

Thèse de Doctorat

JULIAN GILLE

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de Docteur de l'Université de Nantes
Sous le label de l'Université Nantes Angers Le Mans

Discipline : Géographie
Laboratoire : LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Soutenue le 15 novembre 2013

École doctorale : DEGEST (Droit Économie-Gestion, Sociétés, Territoires)
Thèse N°

Suivi et modélisation des flux dans un marais maritime : essais et tentative d'application sur la partie nord du Marais Breton

JURY

Rapporteurs : **M. Rachid NEDJAI**, Professeur des Universités, Université d'Orléans
M. Frédéric BERTRAND, Professeur des Universités, Université Paris Sorbonne (Paris IV)

Examineurs : **M. Cyril FLEURANT**, Professeur des Universités, Université d'Angers
M. Kamal EL KADI ABDERREZZAK, Ingénieur chercheur, EDF
M. Paul FATTAL, Professeur des Universités, Université de Nantes

Co-Encadrant de Thèse : **M. Stéphane GAILLARD**, Maître de Conférences, Université de Nantes
Directeur de Thèse : **M. Marc ROBIN**, Professeur des Universités, Université de Nantes

Avant-propos et remerciements

Tout le monde a au moins une raison (plus ou moins bonne) de faire une thèse. Elle est le fruit d'un imaginaire construit de récits de docteurs/doctorants et de la quête d'un certain idéal de travail/vie. J'étais bien loin d'imaginer ce que j'allais vivre. Cette thèse m'a procuré des sensations fortes, du suspense, des retournements de situation pouvant s'apparenter, sous certains aspects, à un bon thriller, notamment pour mon entourage. Si je devais résumer cette tranche de vie en quelques mots clés, je dirais : humide, découverteS, entêtante, musicale. En tout cas, contre vents et marais, j'ai tenté d'aller au bout en évitant l'envasement. Cette thèse m'a surtout apporté un grand enrichissement personnel et scientifique au contact des diverses personnes que j'ai rencontrées et côtoyées, et par les quelques lignes qui suivent, j'aimerais leur exprimer ma reconnaissance.

Les rus qui m'ont mené du baccalauréat S en Sciences de l'Ingénieur (mécanique et électronique) au doctorat en Géographie ont été méandriformes et anastomosés. Des lectures et des rencontres ont rapidement fait émerger en moi l'envie de travailler dans le domaine de l'eau. Il me semblait pour cela important d'étudier le fonctionnement des systèmes de mesure. Mon cursus universitaire a donc dans un premier temps été orienté dans le domaine de l'électronique, de l'automatisme et de l'informatique en obtenant un Diplôme Universitaire de Technologie puis une Licence¹. C'est seulement au niveau du Master 1 puis 2 que je me suis dirigé vers les sciences de l'eau et de l'environnement. Je tiens donc à exprimer ma gratitude à Jacques Collin, Nadine Schuster, Dominique Neuilly, Séverin Pistre, Eric Servat et enfin pour avoir guidé mes premiers pas dans la recherche Catherine Gonzalez, Benoit Roig, Pierre-Alain Ayrat, Sophie Sauvagnargues-Lesage et Christian Puech.

Cette thèse n'aurait pas pu commencer sans le concours financier initial de la Région des Pays de la Loire à travers le programme de recherche GERRICO pendant trois ans. Elle fut ensuite financée par l'Université d'Angers pendant deux ans, à mes « heures perdues », lorsque je n'avais pas un train à prendre ou un cours à préparer dans le cadre de mon poste d'ATER². Enfin, c'est avec le soutien du Pôle Emploi que cette étude fut achevée. Que ces trois mécènes en soient remerciés.

Par la confiance et la liberté accordées, ils m'ont permis de forger et d'aller au bout de mes idées. Merci donc à Marc Robin et Stéphan Gaillard, les deux alchimistes de cette thèse. En paraphrasant Baudelaire, je dirai que je vous ai donné mon bri et vous m'avez aidé à en faire de l'or.

¹ Equivalente à la Licence 3 du régime acutel Licence Master Doctorat.

² Attaché Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Rachid Nedjai, Frédéric Bertrand, Cyril Fleurant, Kamal El Kadi Abderrezzak et Paul Fattal d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail de thèse.

Cette thèse s'est déroulée au sein du laboratoire LETG Nantes – Géolittomer, dirigé par Loïc Ménenteau puis par Denis Mercier. Leur intérêt et leur attention m'ont permis de goûter à la vie de « château ». La majeure partie de cette thèse s'est réalisée en compagnie de la « Communauté du grenier ». Merci pour tous les petits moments passés ensemble avec principalement Andrée, Nora, Daenis puis Annaëlle suite au déménagement. Merci pour les multiples échanges avec les géographes confirmés ou en herbe de l'UMR/IGARUN qui m'ont fait (re)découvrir une géographie, bien éloignée des bouquins du secondaire ... Je n'oublie pas la « filière gabonaise », avec lesquels discuter a toujours été source d'enrichissement, tant les regards et la relation aux choses/personnes différent. Vous m'avez prolongé le plaisir que j'avais déjà eu avec Bienvenue, grand camarade de la première partie de mon cursus universitaire. Bon courage aux nouvelles graines de chercheur !

Certains aspects de cette thèse ont bénéficié des compétences des membres du laboratoire. Pour leurs avis ponctuels ou leurs aides plus poussées, je désire exprimer ma reconnaissance à :

- Bruno Commentale pour la sortie sur le terrain et son initiation à la géomorphologie locale, ainsi qu'à Dominique Sellier pour ces précieux conseils ;
- Patrick Pottier pour la capacité d'accueil d'un territoire et le tourisme ;
- Aurore Huberdeau qui m'a permis de développer mes premiers scripts en java, puis à Pascal Lecomte qui a repris et terminé le travail pour le formatage des données en entrée du modèle Mascaret ;
- Laurent Pourinet pour ses suggestions « palético-cartographiques » pour éviter les illustrations « pathético-graphiques » ;
- Christine Lambert pour l'accès et la gestion des données du fonds Géolittomer ;
- Céline Chadenas pour ses conseils multiples et diversifiés ainsi que pour le partage du bureau pendant les premiers mois de la thèse ;
- Gile Gorsse pour son efficacité et sa rapidité dans la réalisation des multiples ordres de mission et réservations ;
- Alain Couvrand pour les moyens et dépannages informatiques.

Au cours de cette thèse, j'ai été amené à collaborer avec différentes personnes de l'Ifremer sur le terrain ou en laboratoire. Je tiens à remercier Hélène Oger-Jeanneret, Benoist Hitier, Philippe Souchu, Jean-Pierre Baud, Yoann Le Merrer et Karine Collin pour leur aimable aide.

Au niveau du laboratoire MMS, je tiens à exprimer mes remerciements à :

- Philippe Rosa, pour la préparation du matériel de terrain, les analyses bactériologiques. Sans rancune pour les nutriments, même si les faits ont montré qu'il vaudrait mieux utiliser un matériel de référence que de refaire la gamme pour s'assurer de la validité des résultats avec le Skalar ;
- Pierre Gaudin, pour la gestion des affaires courantes liées à mon contrat ;
- Vona Méléder, Laurent Barillé, Joseph Baudet, Alexandra Patoux pour les différents échanges lors de mes passages dans les couloirs du laboratoire.

La découverte et la compréhension des particularités de la zone d'étude ont été facilitées par la rencontre d'acteurs locaux et producteurs de données. Ces entretiens débouchèrent souvent par la mise en place de conventions pour l'accès aux références bibliographiques et aux données lorsqu'elles n'étaient pas libres de diffusion. Enfin, certains d'entre eux furent également sollicités pour quelques visites de terrain dans le but d'acquérir de nouvelles données ou de répondre à des questions d'étudiants. Je tiens donc à témoigner ma reconnaissance pour leur disponibilité et leur pédagogie à :

- Hervé de Villepin et Olivier Fandard du SAH Sud Loire,
- Vincent Burot du SMGEMB,
- Hervé Ponthieux et Sébastien Chaigneau de l'ADBVB,
- Christophe Soulard d'Hydroconcept,

Je remercie également Stéphanie Poligot-Pitsch de la cellule Hydrométrie-Hydrologie de la DREAL des Pays de la Loire pour :

- ses conseils dans l'exploitation des débits de la Banque Hydro,
- la mise à disposition du matériel et des techniciens pour mesurer des débits dans le Marais Breton.

Les réflexions et questionnements partagés lors de cette sortie m'ont fait avancer dans ma problématique et le processus de modélisation. Je les remercie pour leur pragmatisme.

Mes échanges avec les membres du Forum des Marais Atlantiques furent essentiels et bénéfiques afin d'appréhender l'ensemble des problématiques liées aux zones humides littorales atlantiques. Merci à

- Loïc Anras pour ses conseils et ses nombreuses références bibliographiques,
- Philippe Boudeau, Anthony Guionneau, Jérôme Fernandez pour l'organisation et la convivialité des journées de formation et d'échanges sur la conception des SIG « Milieux Aquatiques ».

J'ai eu l'occasion d'y rencontrer notamment deux personnes qui m'ont aidé dans ma thèse par leur connaissance du terrain :

- Barbara Gérard de la Fédération des Pêches de Loire-Atlantique pour l'état du peuplement piscicole du marais ;
- Stéphane Renou du GIP Loire Estuaire pour les conversations « géomatico-maraichines » et le « coup de la pompe ».

La modélisation du marais a été menée grâce à l'appui technique des membres d'EDF. Je désire remercier à ce titre Nicole Goutal, Kamal El Kadi Abderrezzak, Fabrice Zaoui, Jean-Marc Lacombe, ... pour leur accueil convivial lors des clubs d'utilisateurs de Mascaret à Chatou et Oxford, ainsi que pour leur aide précieuse pour la prise en main du logiciel et la mise en œuvre de la modélisation. Ces clubs utilisateurs m'auront permis à chaque fois de progresser dans la modélisation et de rencontrer des utilisateurs confirmés de Mascaret, notamment Christophe Coulet d'ARTELIA, Christophe Laroche du CETE Méditerranée et Julien Lhomme de HR Wallingford.

Au cours de cette période, j'ai eu l'occasion de prendre part à d'autres activités, plus ou moins connexes à la recherche et à mes problématiques. Je désire donc remercier :

- aux encadrants du Campus Euro-Méditerranéen sur les risques d'inondation de la Durance ;
- Sophie Bellec pour son aide dans la rédaction du Nouveau Chapitre de la Thèse ;
- le PRES l'UNAM pour l'organisation des Doctoriales et au comité qui a primé mon premier poster, confirmant l'intérêt de mon étude auprès d'acteurs locaux et industriels, et récompensant mon souci du détail dans la vulgarisation ;
- Daniel Levacher et Martin Sanchez-Angulo pour l'expérience éditoriale avec la revue Paralia ;
- Claire Guiu et Aurore avec lesquelles j'ai partagées la co-organisation du café Géo à l'IGARUN sur les « Territoires du tango ».

Si le désir d'enseigner peut représenter une source de motivation pour se lancer dans une thèse, il n'en était rien pour moi. Je dois bien avouer que, rapidement et à ma grande surprise, je découvrais de l'enthousiasme et un réel plaisir à cette nouvelle fonction. Je tiens donc à exprimer ma gratitude à Martin Sanchez-Angulo pour m'avoir donné l'occasion de faire mes premières heures et d'intervenir dans sa licence en tant qu'enseignant et encadrant auprès de ses élèves durant cinq ans.

Le plaisir fut confirmé lors de mon immersion à temps complet sur Angers pendant deux ans, durant lesquels j'ai eu l'occasion de professer à un panel d'étudiants aux origines et formations très diversifiées. Merci donc à tous les étudiants pour tous les échanges dans, sur et autour des cours, me permettant ainsi d'affiner mon enseignement. Merci également à Mohamed Maanan pour m'avoir principalement convaincu de postuler à ce poste d'ATER.

Cette expérience n'aurait pas pu être aussi plaisante sans les membres du département de Géographie et du laboratoire LEESA d'Angers (devenu LETG Angers au cours de ses deux ans). Grand merci à

- Aziz Ballouche, aux multiples casquettes, qui a largement contribué à rendre mon expérience d'enseignement diversifiée, enrichissante et épanouissante sur Angers ;

- Grégoire Maillet et ses multiples conseils « au petit scarabée » ;
- Aurélie Davranche et Pierre-Cyril Renaud pour les conversations pédagogique-géomatiques et autres ;
- Alain Jadas-Hécart et Cécile Riolland-Juin pour la bonne cohabitation dans le bureau ;
- Fabrice Redois, super Géo de terrain et puits sans fonds de connaissance et de bonne humeur ;
- Muriel Travers, qui par son dynamisme et son efficacité par téléphone/courriel rendirent la co-construction des projets M2 CDET en économétrie spatiale appliqués à l’habitat angevin fort agréable, même si très énergivore ;
- Stéphane Sourice pour la visite des mares à tritons, grenouilles et autres amphibiens autour du campus ;
- sans oublier Françoise Picard, Gérard Moguedet, David Landry, Jean Secondi, Maxime Pontié, Lionel Guillemot, Nuscia Taïbi, Mustapha El Hannani, Emmanuel Bioteau, Sigrid Giffon, Emmanuel Jaurand, Jérôme Prugneau, Jean Soumagne, Christian Pihet avec lesquels furent partagés fort agréablement les repas, les réunions de département, une surveillance ou quelques mots dans les couloirs entre deux cours ;
- Dominique Ribalet, Christophe Gelineau et Olivier Laurec qui m’ont permis de bénéficier de bonnes conditions pour dispenser mes cours en salles informatiques ;
- Le personnel administratif de la faculté des Sciences, ainsi que celui des Lettres pour leur gentillesse et pragmatisme.

Merci à Catherine, Clémence et à leur famille, ainsi qu’à Denis qui m’ont aidé à combattre l’humidité relative dès mon arrivée sur Nantes, sans oublier Pascal pour les nombreux échanges, Françoise pour son accueil quelques nuits sur Angers et « humour d’amour ».

Les moments de détente passés avec eux ont été divers, forts sympathiques et instructifs. Merci à Adeline, Xavier, « Petit » Manu, Anne-Claire, Benjamin pour mon immersion dans l’architecture et le génie civil, Maria pour ses multiples talents et son initiation à la gastronomie russe, Norbert, Sandra, Camille, et « Grand » Manu. Une mention spéciale à « Indy Junior » pour ta fidélité dans TOUS les moments passés ensemble, la musicalisation des Bréchoir&Co et les nombreuses virées sur la côte Ouest accompagnées des ASOT. Au plaisir de te retrouver pour partager de nouvelles quêtes de BDNI et décrocher le graal avec la T2BD ;-). En attendant, bonne continuation et voici un nouveau CR, d’un tout autre genre !

Les instants d’évasion furent bercés notamment par des sonorités venues du *río de la Plata*. Merci à Pascal, Claire, Denis, Marie, Eric et Christine pour m’avoir permis de renouer avec le tango argentin, commencé quelques années auparavant et laissé de côté (à tort !) dans la première partie de mon cursus universitaire. Mes progrès

majeurs et mon inspiration sont dus à Catherine et Federico, deux Maîtres dans l'Apprentissage et l'Enseignement Supérieur d'un Tango Rigoureux et Original. Votre pédagogie m'a permis de faire des progrès dans mon tango bien sûr, mais aussi m'a inspiré pour mon approche de la relation élève/enseignant, très utile pour l'enseignement et l'encadrement d'étudiants à l'Université. Le rendez-vous est pris pour venir découvrir une autre facette de vos compétences avec « Valses ! ».

Merci également à toutes celles et ceux rencontrés autour du tango, partageant trajets et impressions de milongas, et qui ont pris de mes nouvelles régulières (in)directement.

Enfin, sans elles, cette activité n'aurait pas le même attrait, la même saveur. Merci donc principalement à Anna, Laurence, Marie-Hélène, Caroline et Graziella avec lesquelles j'ai progressées, et les autres tangueras (...) qui ont partagé (et partageront) de si merveilleux et piquants abrazos sur les tandas de « l'Age d'or » et plus actuelles pour *Soñar y nada más !*

Je n'oublie mes amis de longues dates pour leur soutien et le plaisir toujours renouvelé de les retrouver dans le Sud. Merci à Yvonne, aux GR, à Francine, Erik, Brigitte, ... pour leur confiance et m'avoir permis de marcher et surfer sur « la lune ». Merci à Sophie et Isabelle pour m'y avoir accompagné, pour l'accueil de la *Brenton's* et *Eric's families* ainsi que pour mon hébergement chez la *Hans' family*. Quand tu veux, on remet çà Sophie !

Merci également à Bernard, Marie, Frédéric et Nicole pour votre écoute et votre aide lorsque cela s'est avéré nécessaire.

Je terminerai par un grand Merci pour le soutien et réconfort permanent de ma famille.

Plan du mémoire

Le Marais Breton est une zone humide sur la façade atlantique française. Un réseau dense de drainage et de multiples écluses y favorisent le développement d'activités, essentiellement orientées vers le secteur primaire (agriculture, pêche, aquaculture, saliculture) et tertiaire (tourisme et chasse). Cette étude cherche à répondre aux besoins de connaissances pour comprendre la dynamique des flux en zone littorale et ainsi mieux gérer le développement des activités économiques traditionnelles et locales dans le respect des écosystèmes. La difficulté réside dans la modélisation de l'ensemble du réseau de drainage par sa forte densité, ses faibles variations altimétriques et son comblement progressif dû à l'érosion des berges et à l'envasement.

La première partie de cette thèse est consacrée à la définition des zones humides, à l'évolution de leur perception au cours du temps et à leurs places dans la législation française. Les fonctions et les valeurs associées à ces milieux y sont présentées, ainsi que les objectifs de protection. Elle se termine par l'exposition du cadre scientifique et de la problématique de cette étude.

La seconde partie porte sur la description du Marais Breton. Il y est présenté d'abord dans son contexte général afin de décrire sa mise en place, de mettre en évidence ses particularités morphologiques et climatiques qui conditionnent l'occupation du sol et le développement des activités socio-économiques. La gestion hydraulique des flux d'eau est ensuite exposée, suivie du bilan de la qualité de l'eau.

Si le rôle bénéfique de cette zone humide littorale sur la qualité de l'eau est reconnu depuis longtemps, des efforts restent à produire pour la compréhension des processus mis en jeu. Le recours à la modélisation représente un des moyens pour tenter d'en savoir davantage et tester certaines hypothèses. Dans la troisième partie, la démarche de modélisation et les différents types existants y sont décrits. Les objets et objectifs sont par la suite définis afin d'expliquer les choix méthodologiques. L'inventaire et l'acquisition des données existantes et nécessaires au fonctionnement du modèle sont ensuite détaillés. Enfin une première approche de la dynamique temporelle des flux d'eau est réalisée à l'aide du bilan hydrologique.

La quatrième partie commence par la présentation des résultats de la campagne de terrain de 2009. La mise en œuvre de la modélisation des flux dans la partie nord du Marais Breton y est ensuite expliquée et analysée, avant d'être mise en perspective dans un chaînage de modèles sur le continuum terre-mer.

Cette thèse se termine par une discussion des principaux enseignements de l'étude et propose quelques recommandations pour les études ultérieures.

Sommaire

A.	INTRODUCTION	1
A.1	Les zones humides littorales	3
A.2	Objectifs environnementaux	18
A.3	Cadre scientifique.....	29
B.	MARAIS BRETON	37
B.1	Contexte général.....	39
B.2	Usages et pressions.....	61
B.3	Contexte hydrologique et qualité des eaux.....	82
C.	MATERIELS ET METHODES	125
C.1	Modélisation.....	127
C.2	Données	147
D.	ANALYSE ET MODELISATION	173
D.1	Résultats de la campagne sur le terrain de 2009	175
D.2	Modélisation des flux dans le marais.....	189
D.3	Chaînage des modèles	211
E.	DISCUSSIONS	221
E.1	Avantages de Mascaret	221
E.2	Vers une meilleure modélisation des flux dans le marais.....	222
E.3	Intérêts du chaînage des modèles	225
E.4	Recommandations pour des études futures	227
F.	CONCLUSION GENERALE.....	235
	LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES.....	239
	LISTE DES FIGURES	243
	LISTE DES PHOTOGRAPHIES	249
	LISTE DES TABLEAUX.....	251
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	255
	TABLE DES MATIERES	291
	ANNEXES	297

A. Introduction

A.1	Les zones humides littorales.....	3
A.2	Objectifs environnementaux.....	18
A.3	Contexte scientifique.....	29

Les marais maritimes constituent un type de zones humides, localisées sur le littoral atlantique de la France. De nos jours, ils sont protégés, restaurés, mais cela n'a pas toujours été le cas. Cette évolution des consciences nécessita la mise en place de mesures législatives et contractuelles de l'échelle internationale à locale afin de préserver les services qu'ils rendent pour l'Homme et la biosphère. La bonne gestion de ces espaces de transition entre la terre et la mer est essentielle afin d'assurer la pérennité des usages et des activités présentes. Le développement de nouveaux outils de modélisation sur ce continuum terre-mer semble essentiel afin de pouvoir comprendre les processus mis en jeu et contribuer à la meilleure gestion de ces milieux.

A.1 Les zones humides littorales

A.1.1	Vers une amélioration des consciences	4
A.1.2	Au sein de la législation française	7
A.1.3	De la façade atlantique française.....	11

Un écosystème est un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux, de micro-organismes et de leur environnement non vivant qui par leurs interactions, forment une unité fonctionnelle [ONU, 1992a]. Ces éléments dépendent des uns et des autres, et agissent les uns sur les autres. La moindre modification d'un de ces éléments entraîne une répercussion sur les autres éléments. Il convient donc d'ajouter à cette définition l'Homme comme nouvel élément, qui par son action, directe ou indirecte, induit des changements avec une intensité et une rapidité plus ou moins marquées sur les autres éléments (Figure A-1). Ce système est également en interaction avec des éléments extrinsèques constitutifs de son environnement et des autres niveaux hiérarchiques, partant de l'atome (plus petit élément constitutif) jusqu'à la biosphère (élément macroscopique) (Figure A-2).

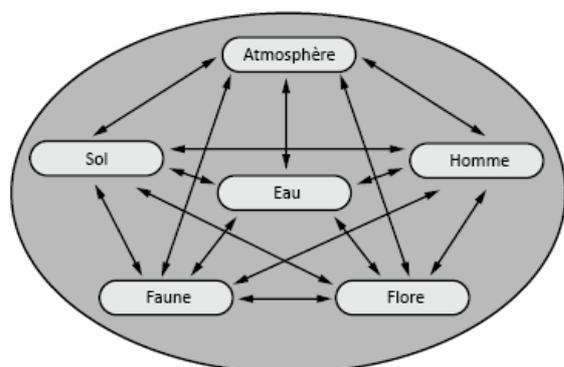


Figure A-1 : Différents éléments constitutifs d'un écosystème et leurs interactions

[Barnaud et Fustec, 2007]

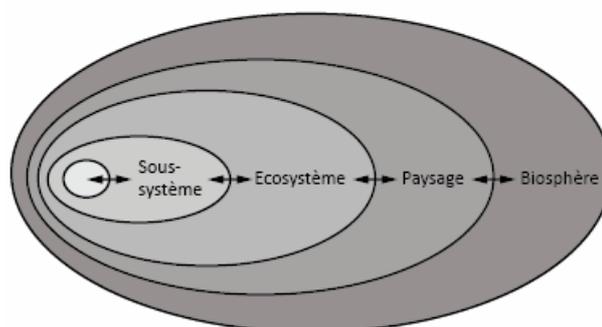


Figure A-2 : Hiérarchisation des systèmes écologiques

[Barnaud et Fustec, 2007]

Milieux à forte humidité ou temporairement aquatiques, les zones humides sont des écosystèmes intermédiaires entre les écosystèmes purement terrestres et les écosystèmes purement aquatiques. En France métropolitaine, les zones humides littorales de la façade atlantique correspondent à l'un des cinq grands ensembles de zones humides d'importance majeure (Figure A-3).

Ce sont des zones de transition très diversifiées, entre les eaux douces continentales et les eaux salées océaniques, qui peuvent se décliner en cinq classes [Cowardin *et al.*, 1979] :

- marines (zones humides côtières comprenant des lagunes côtières, des berges rocheuses) ;
- estuariennes (y compris des deltas, des marais cotidaux) ;
- lacustres (zones humides associées à des lacs) ;
- riveraines (zones humides bordant des rivières et des cours d'eau) ;
- palustres (marais et tourbières).

Une sixième classe peut être ajoutée pour les artificielles, constituées d'étangs à vocations agricole et aquacole, de sites d'exploitation du sel ...

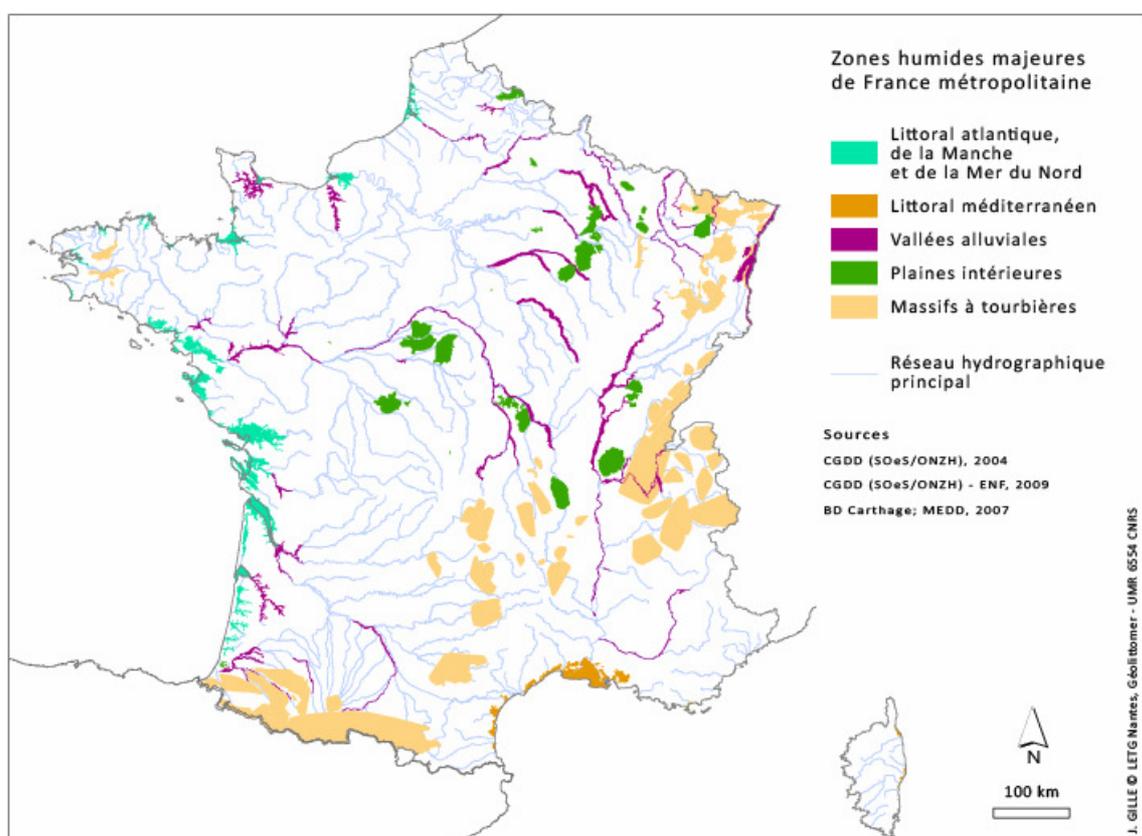


Figure A-3 : Répartition des zones humides d'importances majeures

Ces conditions particulières du milieu favorisent le développement d'une flore et d'une faune spécifiques, voire des espèces rares ou menacées. En fonction de leur nature, elles sont utilisées par diverses activités humaines : pâturage des prairies, coupe des roseaux, pêche et pisciculture en eau douce ou salée, conchyliculture et saliculture sur le littoral, chasse, activités de découverte de la nature [IFEN, 2006].

A.1.1 Vers une amélioration des consciences

Longtemps, les zones humides furent des lieux importants de production et de rencontres privilégiés entre l'Homme et la nature avec les marais, les marais salants, les étangs, les tourbières et les prés humides. Leur perception évolua

considérablement avec la révolution agricole. Du point de vue sanitaire, les marais étaient considérés comme des réservoirs de maladies endémiques et épidémiques. Ils étaient perçus également comme des obstacles au développement de l'agriculture. Face aux essors démographiques et aux besoins d'accroître la production céréalière, ces espaces marécageux, inutiles et nuisibles, furent voués à disparaître. Tout commença avec l'Edit pour le dessèchement des marais du 8 avril 1599. Ces grands travaux continuèrent par la suite, largement abondés avec la réglementation française du XVII^e au XIX^e siècle [Derex, 2001]. Ils s'intensifièrent au XX^e siècle jusqu'à provoquer la disparition de 67 % des zones humides métropolitaines présentes au début de ce siècle et la moitié en seulement 30 ans (1960-1990) [Bernard, 1994].

Après des siècles de destruction, des désordres écologiques et environnementaux majeurs apparurent aux conséquences désastreuses comme la raréfaction et la disparition de nombreuses espèces végétales et animales, la pollution croissante des nappes et des écosystèmes aquatiques, la multiplication de crues catastrophiques à l'aval des cours d'eau fortement aménagés [Barnaud et Fustec, 2007 ; Derex, 2001 ; Mitsch et Gosselink, 2000 ; NRC, 1995]. C'est à partir de ce moment qu'un changement de perceptions s'amorça, et qui amena à prendre conscience de l'importance de la préservation et protection de ces espaces ces quarante dernières années (Figure A-4).

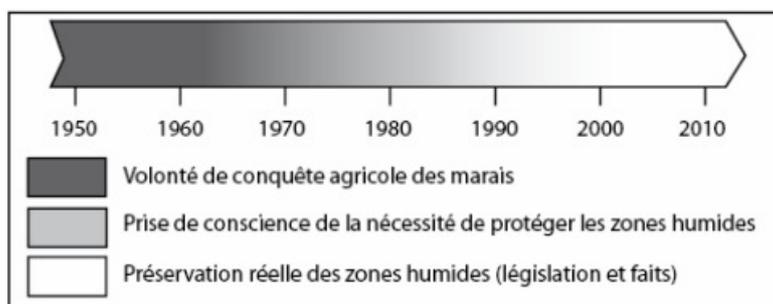


Figure A-4 : Evolution de la perception des marais
(inspiré de [Goeldner-Gianella, 1993])

La première étape de cette réhabilitation dans la conscience collective est marquée par la signature en 1971 de la Convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, communément nommée Convention de Ramsar (Iran) [ONU, 1971]. Cette convention révèle en effet à l'échelle internationale la reconnaissance de l'interdépendance de l'homme et de son environnement, des multiples services et fonctions rendus par ces milieux spécifiques. La mise en place de leur protection est confortée et consolidée par la suite par le développement progressif d'une culture mondiale du respect de l'environnement et du développement durable (Figure A-5). Cette évolution des consciences est impulsée par les sommets de la Terre avec notamment la mise en place du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) en 1972 et de l'Agenda 21 en 1992 [ONU, 2012].

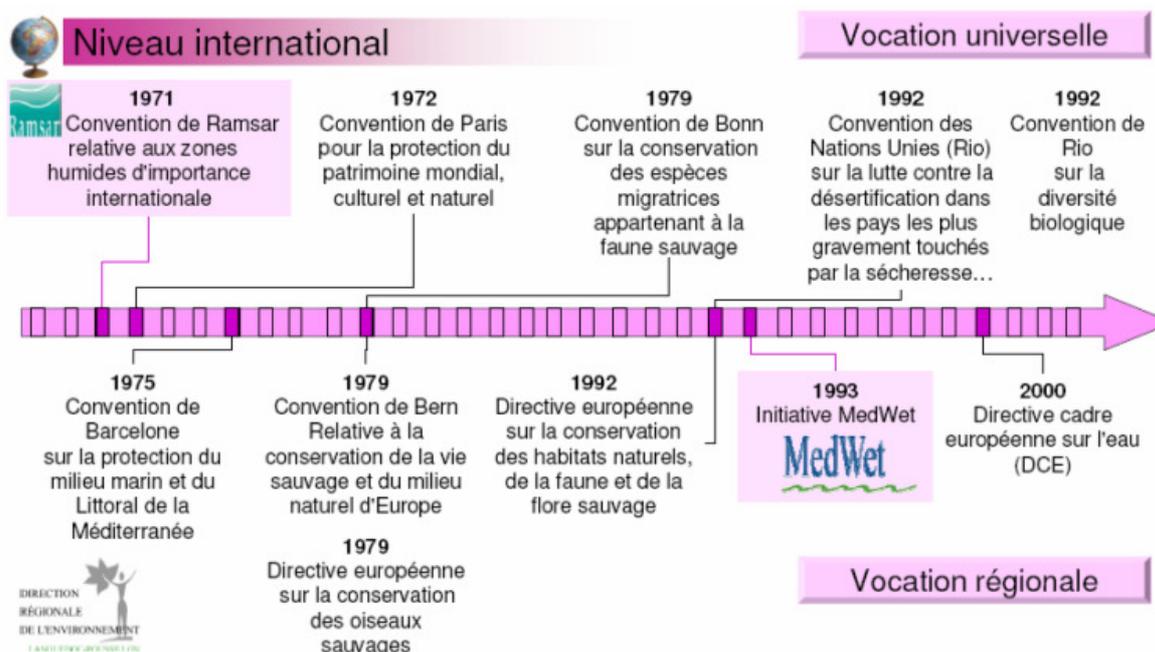


Figure A-5 : Principaux textes internationaux se référant à la protection et à la gestion des zones humides entre 1971 et 2000 [DREAL-LR, 2008]

La réussite de ces actions passe par une implication du niveau international à local. Le développement de ces coopérations est facilité par le lancement du Programme des mers régionales et du Programme d'action mondial pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres [ONU, 2002]. L'objectif est d'aider les Etats à prendre des mesures de nature à prévenir, réduire, maîtriser et/ou éliminer la dégradation du milieu marin ou à remédier aux effets des activités terrestres [ONU, 1995].

A l'échelle européenne, la préservation et la gestion durable des zones humides ont été engagées dans le cadre d'une gestion durable des ressources naturelles et de préservation de la biodiversité, promue par la DCE [CE, 2000] et le réseau Natura 2000, issu des conventions et des directives « Habitats » [CEE, 1992 ; ONU, 1992a] et « Oiseaux » [CEE, 1979a ; ONU, 1979].

La DCE fixe comme objectifs environnementaux aux Etats membres l'atteinte d'un bon potentiel écologique et d'un bon état chimique de toutes les masses d'eaux (superficielles, souterraines, artificielles, de transition, ...) au plus tard le 22 décembre 2015, en proposant des stratégies de lutte contre la pollution de l'eau par bassins hydrologiques [CE, 2000]. Le contrôle de ces objectifs, révisés depuis [CE, 2001a, 2008b], s'effectue à l'aide des programmes de surveillance fixés par les SDAGE et mis en application par les SAGE [RF, 2004].

Ces efforts de défense et de préservation nécessitent de définir quelles portions d'un territoire pouvaient être considérées comme des zones humides afin de mieux les délimiter. De ce besoin apparut une multitude de définitions des zones humides [Barnaud, 2000b ; Barnaud et Fustec, 2007 ; Mitsch et Gosselink, 2000 ; NRC, 1995],

qui diffèrent par leurs objectifs (protection, restauration, gestion, recherche, ...) et leurs domaines d'application (biologie, hydrologie, écologie, économie, ...). Loin de passer en revue toute cette diversité de définitions comme a pu le faire [Dugan, 1990], seules les deux en usage en France vont être présentées ci-après.

La première correspond à celle donnée dans la Convention de Ramsar, traité intergouvernemental qui sert de cadre à l'action nationale et à la coopération internationale en matière de conservation et d'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources. Elle est entrée en vigueur en 1975. C'est le seul traité mondial de l'environnement qui porte sur un écosystème particulier. Les zones humides y sont définies comme « *des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres* » [ONU, 1971].

Dans la réglementation française, selon l'article L211-1 du Code de l'Environnement, les zones humides correspondent à des « *terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année* » [RF, 1992].

Si dans la littérature anglo-saxonne il n'y a qu'un seul terme (*wetland*) pour parler de l'ensemble de ces écosystèmes, il existe en revanche trois termes dans la littérature francophone : *terre humide*, *milieu humide* et *zone humide*. S'il est possible d'en faire des déclinaisons sémantiques, le terme générique qui sera employé dans la suite de ce manuscrit sera celui en usage dans la législation française : *zone humide*.

A.1.2 Au sein de la législation française

La gestion de la ressource en eau, la préservation des milieux aquatiques et la lutte contre les pollutions se réalisent, selon le découpage naturel de la France métropolitaine, en six grands bassins hydrographiques. Chaque grand bassin hydrographique est confié à une Agence de l'Eau. La mission de cet établissement public de l'Etat est d'apporter une aide technique et financière aux élus et aux usagers de l'eau [MEEDDM, 2009a ; RF, 2006c]. Ses actions sont financées par l'application du principe « pollueur - payeur ». Chaque utilisateur paye une « redevance » pour l'eau qu'il prélève et les pollutions qu'il rejette [RF, 1995, 2006c, 2010].

A partir de 1992, les zones humides deviennent un enjeu déterminant pour la protection et le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques [RF, 1992]. La préservation, la gestion durable des zones humides et la nécessaire cohérence des politiques publiques de l'Etat et des collectivités territoriales sont ensuite réaffirmées d'intérêt général dans les lois relatives aux territoires ruraux [RF, 2005], la loi sur

l'eau et les milieux aquatiques [RF, 2006c] et l'engagement national pour l'environnement [RF, 2010]. Aucune politique de gestion de l'eau ne peut désormais se soustraire à un diagnostic préalable de l'état de ces milieux et de leur rôle en matière de protection de la ressource, de régulation des débits des cours d'eau et de conservation de la biodiversité [ADBVBB, 2009 ; AELB, 2005 ; Anras, 2001].

Les textes nationaux portant sur les zones humides apparaissent majoritairement dans le code de l'environnement. Dans une moindre mesure, certains textes se retrouvent également dans d'autres codes (<http://www.legifrance.gouv.fr/>) : le code forestier, le code rural, le code de l'urbanisme, le code des impôts et le code général des collectivités territoriales. Toute cette réglementation s'inscrit dans une succession de mesures politiques nationales engagées depuis 1964 en faveur des espèces et des milieux (Figure A-6).

Des inventaires sont menés afin de se soumettre aux objectifs de préservation. Ils sont fondés sur la définition donnée dans la loi sur l'eau de 1992, précisée par la suite, compte tenu du manque de précision des critères pratiques [RF, 2007, 2008a, 2009]. S'ils varient selon l'objectif [Fustec et Frochot, 1996 ; Mitsch et Gosselink, 2000], les critères les plus communément usités sont [Anras, 2001 ; Barnaud et Fustec, 2007 ; Mitsch et Gosselink, 2000 ; NRC, 1995] :

- les sols hydromorphes comme critère physico-chimique,
- les niveaux d'eau pour l'hydrologie,
- la végétation pour les aspects biologiques.

Leurs combinaisons multiples permettent d'aboutir à des méthodes *ad hoc* (Figure A-7).

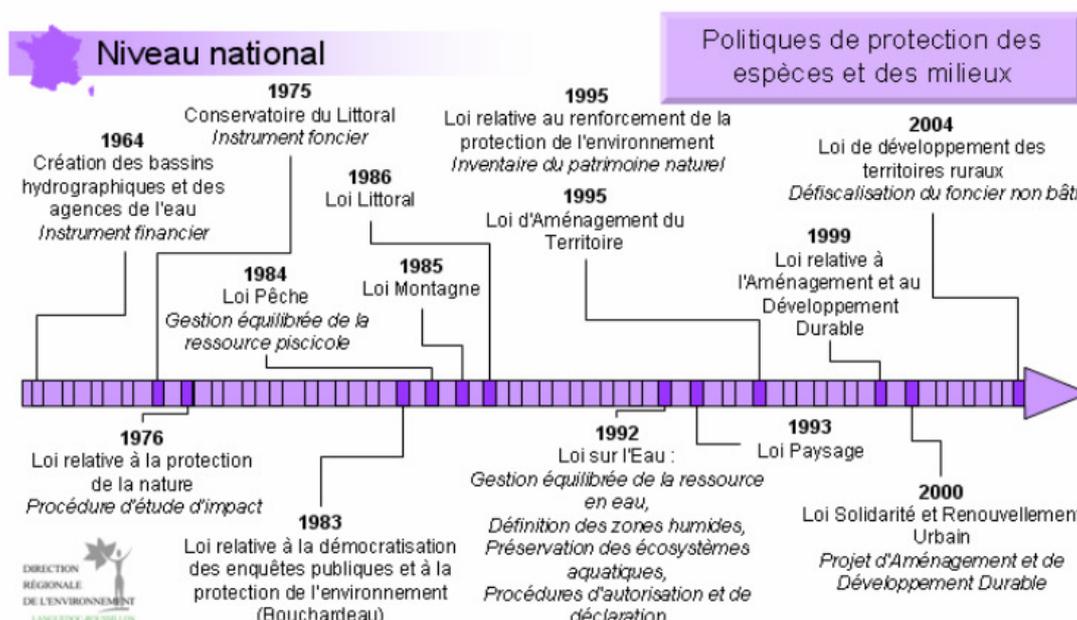


Figure A-6 : Politiques nationales de protection des espèces et des milieux de 1964 à 2004

[DREAL-LR, 2008]

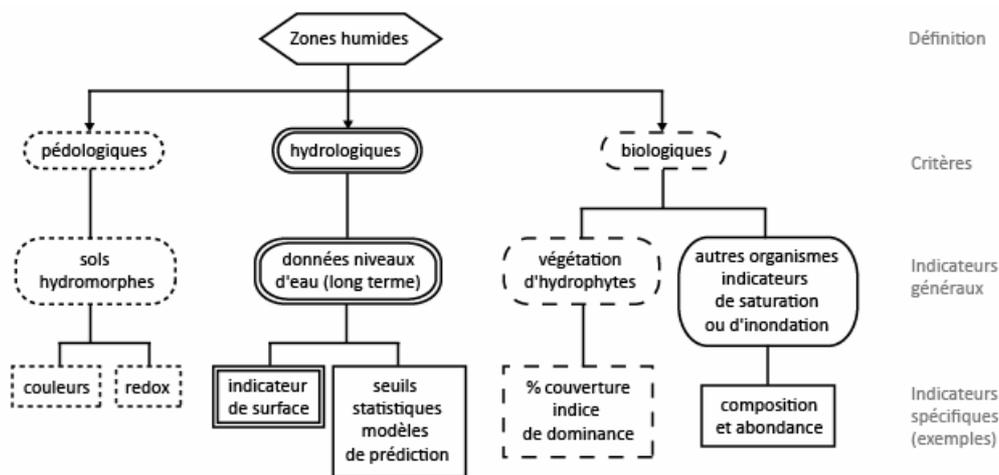


Figure A-7 : Relations entre une définition de référence de zones humides et les critères, les indicateurs généraux ou spécifiques liés
(d'après [NRC, 1995])

Ces inventaires représentent le support de stratégies d'intervention et de la réalisation d'actions contractuelles ou réglementaires, notamment au travers du SDAGE qui reprend l'ensemble des obligations fixées par les lois françaises et les directives européennes [AELB, 2005 ; Anras, 2001 ; RF, 1992]. Le SDAGE conditionne toutes les décisions concernant l'eau et les milieux aquatiques prises par les services de l'Etat, les collectivités territoriales et leurs établissements publics. Localement, il coordonne et oriente les initiatives de gestion collective par les SAGE et les contrats de rivières et de baie [RF, 2006b].

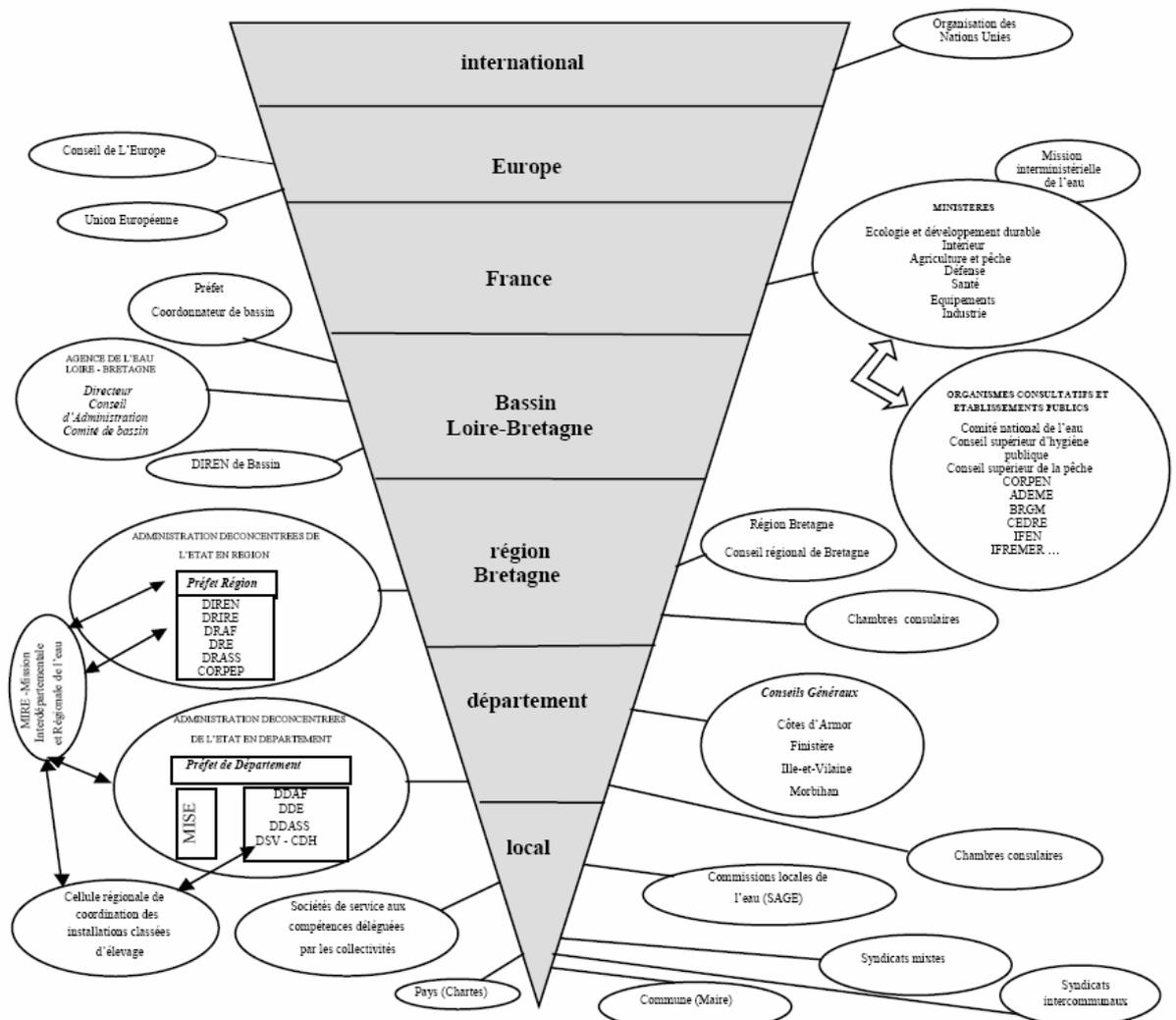
Toutes ces politiques sont renforcées par le plan national d'action en faveur des zones humides dont les grands objectifs sont [MEEDDM, 2010b] :

- d'améliorer les pratiques,
- de développer des outils robustes pour une meilleure gestion,
- de répondre de façon plus forte et plus concrète aux engagements de la France quant à la mise en œuvre de la convention de Ramsar.

L'application du droit peut ainsi se résumer à l'ingestion d'un mille-feuille peu digeste. Les textes législatifs sur l'eau ont tout d'abord des visées différentes, entre ceux consacrés à la ressource en eau dans le milieu naturel, ceux à ses usages et ceux à sa protection contre les pollutions. Leur portée diffère également selon leur niveau d'application (Figure A-8). Du local à l'international, une multitude d'acteurs aux statuts et missions variés s'enchevêtre et contribue au partage voire à la confusion au niveau des responsabilités (Figure A-9).

	Ressource en eau dans le milieu naturel	Eaux de baignade	Eau destinées à la consommation humaine	Protection de la ressource en eau contre les pollutions ponctuelles	Protection de la ressource en eau contre les pollutions accidentelles	La lutte contre les pollutions diffuses								
International	Conventions Internationales OSPAR RAMSAR		Directives de qualité de l'eau de poisson de l'OMS	Protocole de Londres sur l'eau et la santé 1999		Convention OSPAR								
Communautaire	Directive "prescriptions" 18 juillet 1978 (78/659/CE)	Directive "conchyliculture" 30 octobre 1979 (79/923/CE)	Directive "Eaux brutes" (75/440/CE)	Directive "Eaux souterraines" (80/68/CE)	Directive "Eaux de baignade" (76/160/CE) Proposition de révision 24/10/2002	Directive "eau potable" 3 novembre 1999 (98/83/CE) modifiant la Directive du 15 juillet 1980 (80/778/CE)	Directive "regals" 4 mai 1976 (76/54/CE)	Directive "IPPC" du 24 septembre 1996 (96/61/CE)	Directive "Seveso II" du 9 décembre 1996 (96/61/CE)	Directive "Eaux urbaines résiduaires" du 21 mai 1991 (91/271/CE)	Directives "bois" du 12 juin 1996 (96/278/CE)	Directive "mise sur le marché de produits phytopharmaceutiques" du 15 juillet 1991 (91/414/CE)	Directive "mise sur le marché des produits biocides" du 16 février 1998 (98/8/CE)	Directive "nitrate" du 12 décembre 1991 (91/676/CE)
Directive Cadre 2000/60/CE 23 octobre 2000														
National			Décret 3 janvier 1989 Décret 7 mars 1991 abrogés par Décret 20 décembre 2001	Loi ICPE du 19 juillet 1976 Arrêté 10 juillet 1990 Arrêté 22 août 1991	Décret 07 avril 1981 Décret 20 septembre 1991	Décret 3 janvier 1989 & Décret 7 mars 1991 abrogés par Décret 20 décembre 2001	Arrêté 7 février 1998	Décret 28 décembre 1999 Décret 20 mars 2000 Arrêté et Circulaire ministériels du 10 mai 2000	Loi sur l'eau du 3 janvier 1992 Décret 3 juin 1994 Arrêté 23 novembre 1994 Arrêté 8 janvier 2001	Loi sur les "conditions de mise sur le marché et d'utilisation des produits phytosanitaires" modifiée par la loi d'orientation 9 juillet 1999 transposant les directives précitées Arrêté 25 février 1975 modifié par décret du 5 mai 1994 Circulaire du 25 février 1997 Arrêtés février et juillet 1997 Arrêtés ministériels 05 mars 2001 Arrêtés préfectoraux (Alsace) juillet 2001	Décret du 27 août 1993 Arrêté 22 novembre 1993 2nd programme d'actions Décret du 10 janvier 2001 Arrêté interministériel 05 mars 2001 Arrêtés avril 2001			
Loi ICPE du 19 juin 1976														
Loi 541245 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leurs pollutions du 16 décembre 1964														
Loi sur l'eau 92-3 du 3 janvier 1992														
Projet de loi portant transposition de la Directive Cadre 2000/60/CE présentée en Conseil des Ministres le 12 février 2003														
Nouvelle loi sur l'eau en 2004 ?														
Code de l'environnement														
Code de la santé publique														
Code rural														
Code Général des collectivités territoriales														
<i>Traitement CESR, Schéma non exhaustif</i>														

Figure A-8 : Mille-feuille de la réglementation sur l'eau [Fleury et Guyomarc'h, 2003]



NB : Schéma non exhaustif
 Traitement CESR Bretagne

Figure A-9 : Enchevêtrement d'acteurs institutionnels
 [Fleury et Guyomarc'h, 2003]

A.1.3 De la façade atlantique française

Le littoral de la façade océanique de la France compte de nombreuses zones humides littorales à l'interface entre les bassins versants terrestres et la zone maritime (Figure A-10). Parmi elles, les marais maritimes ont été entièrement façonnés par la main de l'Homme pour produire dans les premiers temps du sel et des coquillages [Verger, 2005]. Ce sont des zones basses de très faible pente vers le large qui se développent au fond d'une baie abritée, dans un estuaire ou en arrière d'une flèche et qui peuvent recevoir de petits cours d'eau côtiers [Derruau, 1979 ; Miossec, 2004].

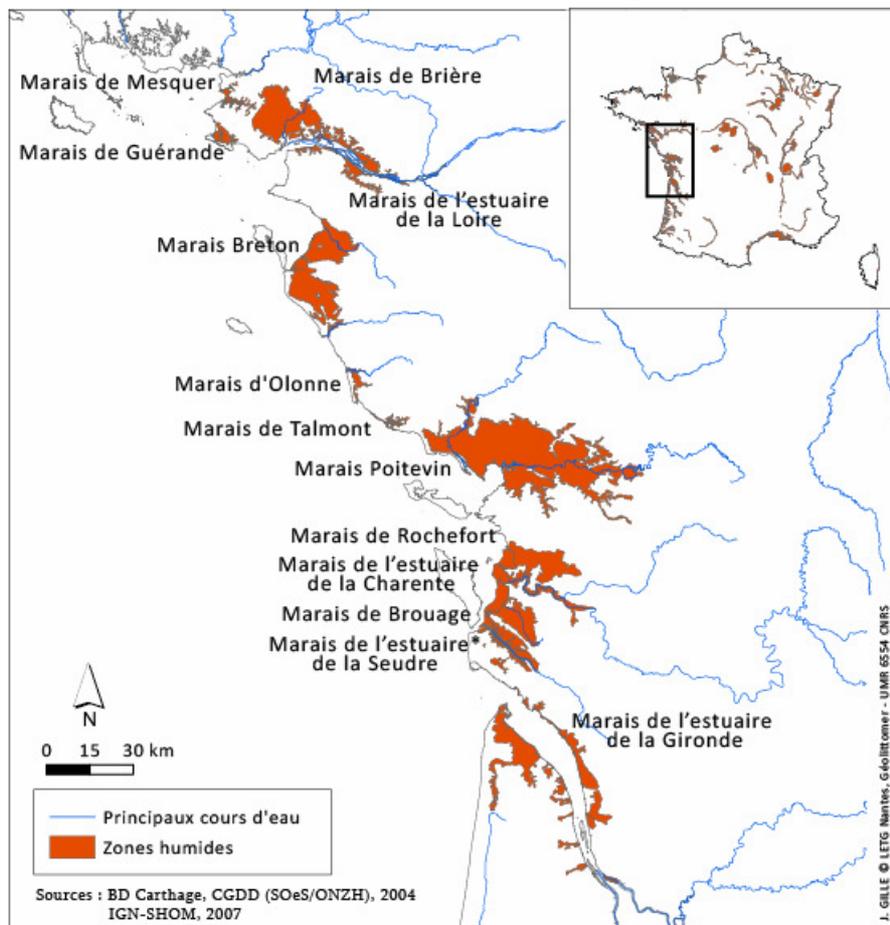


Figure A-10 : Marais littoraux de la façade atlantique

Un marais maritime en zone tempérée est composé de deux parties, distinctes ou non selon la présence d'une petite falaise : la slikke et le schorre (Figure A-11).

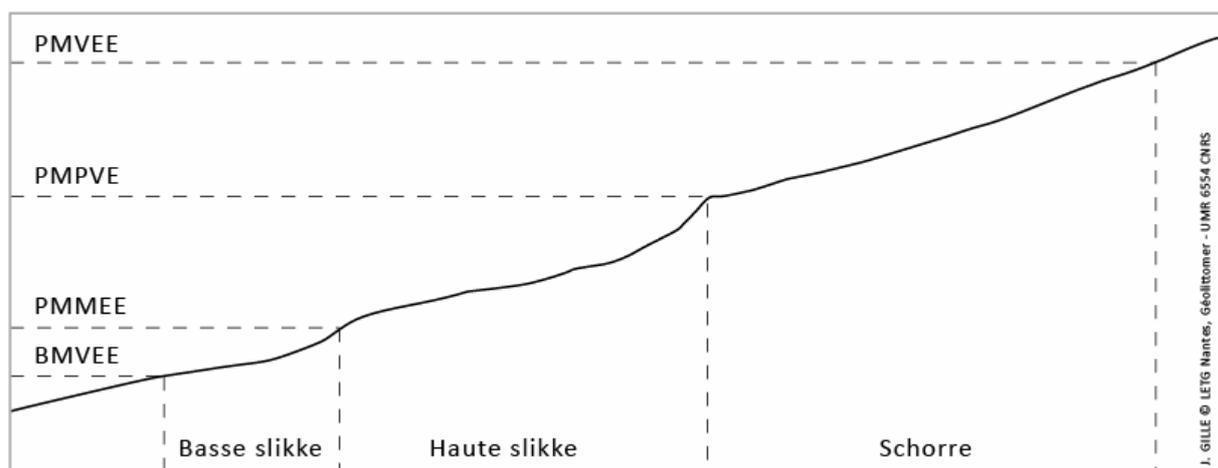


Figure A-11 : Profil topographique type original du littoral atlantique

(PMVEE : Pleine mer de vive eau extraordinaire ; PMPVE : Pleine mer de petite vive eau ; PMMEE : Pleine mer de morte eau extraordinaire ; BMGVE : Basse mer de vive eau extraordinaire)

Le terme slikke vient du néerlandais, qui signifie boue. Il correspond à la partie basse de pente très faible (1 à 3 %), située sur la partie supérieure de l'étage infralittoral toujours en eau et dans la zone intertidale recouverte à chaque marée. Cette vaste

surface nue est parsemée de quelques tâches de végétation (*Zostera noltii*), et est parcourue par de petits chenaux plus ou moins profonds, sillonnés tantôt par le flot tantôt par le jusant. Ce réseau est généralement hiérarchisé, mais les divagations ne sont pas rares. Ces chenaux, nombreux dans la partie basse de la vasière, car liés aux courants de marée, disparaissent sur la haute slikke (Figure A-12).

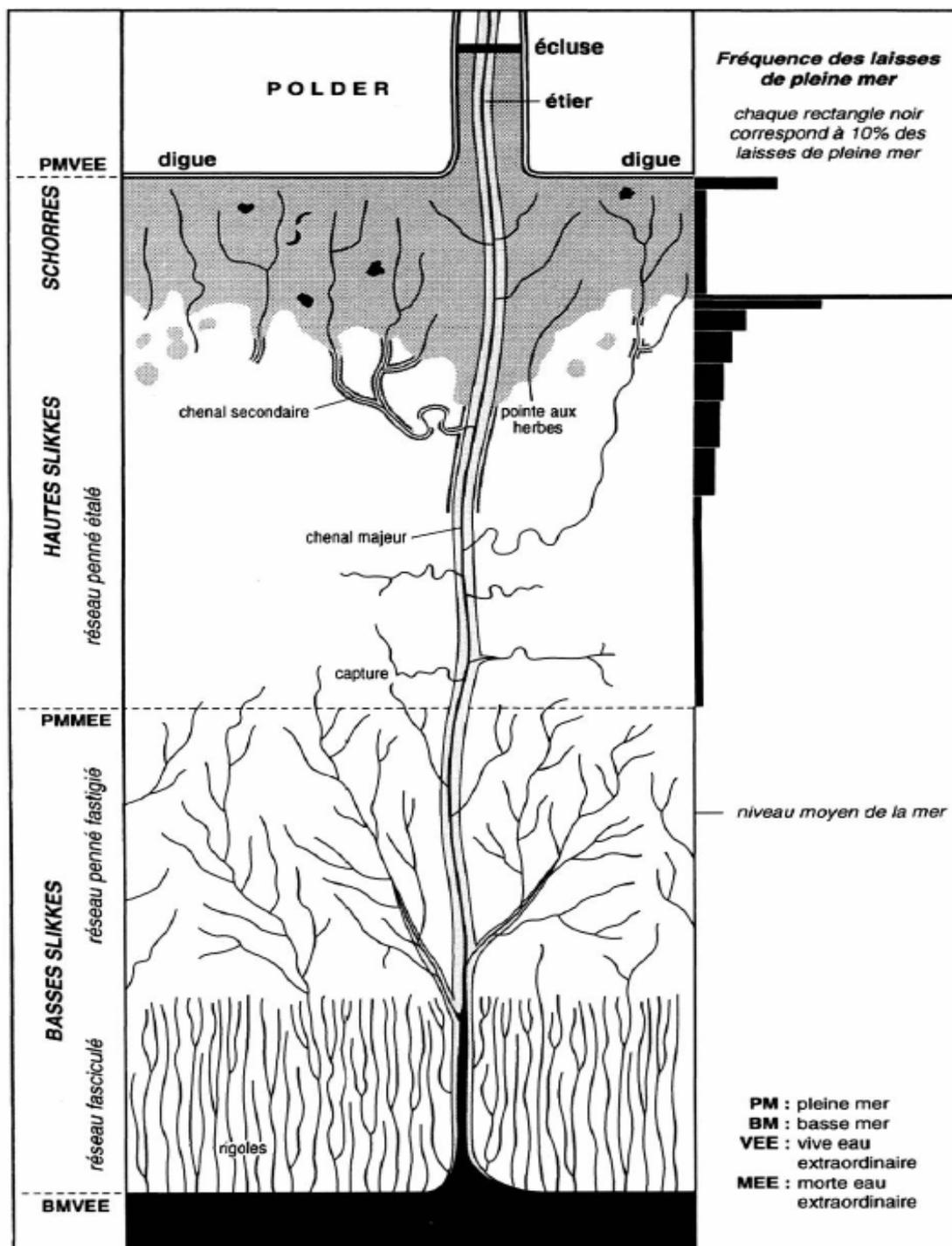


Figure A-12 : Réseaux des chenaux sur les slikkes et les schorres
[Verger, 1995]

La sédimentation est favorisée sur cette dernière par les laisses de pleines mers les plus fréquentes, et par la présence des premières plantes colonisatrices, comme les

spartines et les salicornes. Les vasières atlantiques sont extrêmement riches en de nombreuses espèces d'invertébrés. Elles servent ainsi de nourriceries pour les jeunes poissons à marée haute et à de nombreux oiseaux à marée basse [Barnaud et Fustec, 2007 ; Derruau, 1979 ; Miossec, 2004].

Les deux critères retenus pour sa définition sont donc [Verger, 1968] :

- hydrographique : la slikke s'étend à l'intérieur de la zone intertidale, sans en atteindre la limite supérieure ;
- sédimentologique : les sédiments constitutifs sont fins : vase, tange, sable vaseux, sans évolution pédologique.

Le schorre, aussi appelé herbu, signifie pré salé en néerlandais. Il n'est recouvert que lors des grandes marées. Il est formé d'un tapis végétal dense, caractérisé par un étagement de la végétation selon le gradient de salinité. A proximité de la haute slikke, ce sont les plantes dites « halophiles » qui se développent sur ces terrains salés pour ensuite laisser la place aux plantes plus « halophobes » dans les terres. En premier lieu, il y a donc les spartines (*Spartina townsendii*, *Spartina stricta*), les salicornes (*Salicornia herbacea*), les *Puccinellia maritima*, la soude maritime (*Suaeda maritima*), les *Aster tripolium*, les *Halimione portulacoïdes*. Ensuite, il vient les *Plantago maritima*, les *Armeria maritima* et les *Agropyrum pungens* dans les parties les moins submergées [Barnaud et Fustec, 2007 ; Derruau, 1979 ; Miossec, 2004].

Des chenaux encaissés aux berges abruptes parcourent ces étendues sous forme de méandres (Figure A-12). Ils peuvent être drainés tout aussi bien par des eaux salées ou douces.

Trois critères définissent le schorre [Verger, 1968] :

- hydrographique : le schorre est obligatoirement dans la zone inondable par les eaux marines ou fluvio-marines soit pendant les vives eaux, soit pendant les tempêtes ;
- botanique : il possède une couverture végétale halophile dense, en dehors des chenaux et des petites mares ;
- pédologique : son sol, composé de matériel fin (tange ou vase plus ou moins sableuse) souvent lité ou même stratifié, en général granulé, est plus ferme que celui de la slikke.

La construction des digues de mer scinde les marais maritimes en deux parties : une première « externe » en bordure de mer, et une seconde « interne », plus éloignée du rivage et qui a pu perdre son caractère maritime au fil du temps. Selon l'ancienneté et l'emplacement de ces prises, le profil topographique des marais maritimes peut être accentué ou inversé. Dans le cas où les prises successives sont effectuées sur des schorres de moins en moins mûrs, la disposition conforme est accentuée (Figure A-13, A). En revanche, la pente de la partie interne aura tendance à s'inverser avec des phénomènes plus ou moins conjoints comme une sédimentation plus active dans la

partie externe, un tassement des sédiments dans la partie interne. Une disposition contraire se met donc en place à l'échelle du marais (Figure A-13, B) et elle peut même être en escalier si les endiguements les plus récents sont d'un niveau supérieur aux plus anciens (Figure A-13, C).

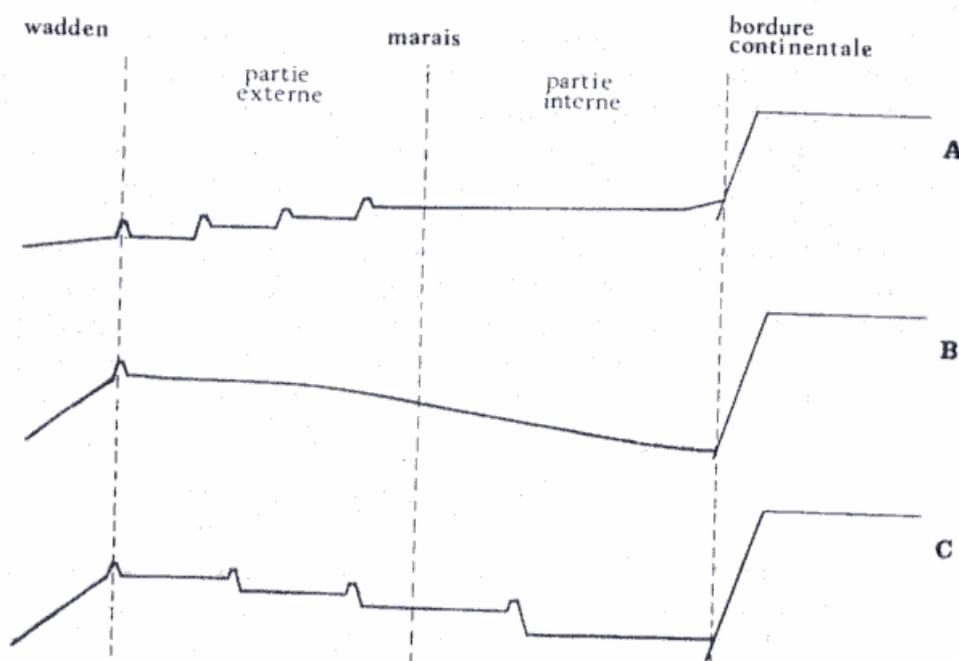


Figure A-13 : Dispositions conforme et contraire des marais maritimes
 (A : disposition conforme ; B : disposition contraire ; C : disposition contraire en escalier)
 [Verger, 1968]

Dans l'optique de mieux comprendre le milieu et son fonctionnement, le gestionnaire cherchera à replacer son site dans les typologies existantes en matière de milieux naturels en général et de zones humides en particulier. Il existe plusieurs classifications des milieux, de portée nationale, européenne ou mondiale (Tableau A-1).

Typologies spécifiques aux zones humides	Typologies non spécifiques aux zones humides
SDAGE Med Wet RAMSAR	Corine Biotope Natura 2000 EUNIS

Tableau A-1 : Typologie des milieux naturels

Seule la première de chaque typologie, utilisée dans le modèle commun pour l'inventaire des zones humides [AELB, 2005 ; AESN et FMA, SD ; IFEN, 2004 ; SANDRE, 2004], va être présentée ci-après.

La typologie SDAGE a été élaborée par le MNHN de Paris et adoptée au niveau national en 1996. Treize types de zones humides y sont distingués (Tableau A-2).

DOMINANTES		TYPES-MAJEURS	SDAGE	SAGE (SOUS-TYPE)
SALINITÉ	RÉGIME HYDRIQUE			
EAU SALÉE SAUMÂTRE	Eau courante influencée par la marée	Côtières Estuariennes	1 Grands estuaires	Herbiers Récifs
	Eau stagnante		2 Baies et estuaires moyens plats	Vasières Prés-salés
	Pas influencée	Zones humides aménagées saumâtres	3 Marais et lagunes côtières	Arrières - dunes Lagunes
EAU DOUCE	Eau courante inondée de manière :			
	✓ Permanente ✓ Saisonnière	Fluviales	5 Zones humides des cours d'eau et bordures boisées	Ripisylve et fourrés alluviaux
	✓ Permanente ✓ Saisonnière		6 Plaines humides mixtes liées aux cours d'eau	Herbacée (prairies inondables), Palustre (roselière, cariçaie) à végétation submergée
EAU DOUCE	✓ Permanente ✓ Saisonnière		7 Zones humides de montagnes, collines et plateaux	Marais d'altitude (source, combe à neige) Tourbières Zones humides de bas- fond en tête de bassin Zones humides boisées
	Eau stagnante :			
	✓ Temporaire ✓ Saisonnière ✓ Permanente	Lacustres (lac, étang)	8 Régions d'étangs	Herbacée (roselières, prairies inondables) Palustres (roselières, cariçaies)
	✓ Temporaire ✓ Saisonnière ✓ Permanente	Marais, marécages	9 Bordures de lacs	Végétation submergée
	✓ Permanente ✓ Saisonnière	Zones humides ponctuelles	10 Marais et landes humides de plaine	Landes humides Prairies tourbeuses
	✓ Temporaire ✓ Saisonnière		11 (Zones humides liées à un plan d'eau ponctuel)	Petits lacs, mares, ...
EAU DOUCE	✓ Permanente ✓ Temporaire	Zones humides aménagées en eau douce	13 Marais agricoles aménagés	Rizières, Prairies amendées, Peupleraies
			14 Zones humides aménagées diverses	Réservoirs - barrages Carrières en eau Lagunages
		7 types majeurs	13 types / SDAGE	28 types / SAGE

Tableau A-2 : Typologie des zones humides applicable aux SDAGE et SAGE
[AELB, 2005]

Elle s'applique à de grandes formations géomorphologiques et paysagères, se trouvant de fait plus particulièrement concernées par une gamme de politique de même "nature" (agricoles, équipement, ...) [IFEN, 2004]. A minima, c'est elle qui est utilisée [Fromont, 2008]. Mais elle ne permet pas une description des habitats (biotope + biocénose), qui doit être faite à l'aide de la typologie Corine Biotope, utilisée pour la

délimitation officielle des zones humides en France [RF, 2008a]. Sa mise en œuvre nécessite une connaissance plus fine du terrain que la typologie SDAGE.

Corine Biotope est une typologie des habitats naturels et semi-naturels présents sur le sol européen, satisfaisant à la directive communautaire « Habitats, Faune, Flore » [CEE, 1992]. Issu de la commission Corine chargée de la coordination de l'information en environnement, le programme a abouti en 1991 à la proposition d'une typologie arborescente à six niveaux maximum, basée sur la description de la végétation à partir des relevés phytosociologiques³ [Rameau *et al.*, 1997]. Seize types d'habitats, regroupés en quatre classes, sont rencontrés en marais côtiers (Tableau A-3).

CODE	DESIGNATION DE L'HABITAT
Habitats des marais sub-saumâtres thermo-atlantiques	
53-17	Végétation à scirpes halophiles
44-813	Fourrés de tamaris
Habitats des marais doux	
37-7	Lisières humides à grandes herbes
Habitats de zones humides	
53-11	Phragmitaies
53-13	Typhaies
53-14	Roselières basses
53-15	Végétation à <i>Glyceria maxima</i> (grande glycérie)
53-415	Communauté à <i>Butomus umbellatus</i> (jonc fleuri)
53-149	Végétation à <i>Hippuris vulgaris</i> (pesse d'eau)
22-33	Groupement à <i>Bidens tripartita</i> (bident tripartite)
Habitats des milieux humides	
11	Eaux eutrophes
22-41	Végétation aquatique flottant librement
22-42	Végétation enracinée immergée
22-432	Communauté flottante des eaux peu profondes
22-44	Eaux oligo-mesotrophes calcaires à characées
22-3.	Communautés amphibies - végétation annuelle des vases exondées

Tableau A-3 : Habitats rencontrés en marais côtiers selon la typologie Corine Biotope (d'après [des Touches et Anras, 2005])

³ La phytosociologie est l'étude synthétique des communautés végétales. Cette discipline s'intéresse aux relations spatiales et temporelles des végétaux entre eux et avec leur milieu.

A.2 Objectifs environnementaux

A.2.1	Fonctions et valeurs	18
A.2.2	Protections des zones humides : mesures et réglementations.....	21

A ce jour, les marais maritimes remplissent divers rôles et font l'objet de multiples usages comme cela va être démontré ci-après.

A.2.1 Fonctions et valeurs

Les différents éléments de l'écosystème interagissent entre eux par un ensemble de processus hydrologiques, biologiques, chimiques et physiques. Par leurs combinaisons, ils donnent naissance à des fonctions, caractérisant le fonctionnement global et le rôle joué par ces écosystèmes.

Les différentes fonctions associées aux zones humides peuvent être regroupées en quatre catégories [Fustec, 2000 ; Fustec et Frochot, 1996] :

- fonctions hydrologiques / vis-à-vis du régime des eaux : contrôle des crues, recharge / décharge des nappes, dissipation des forces érosives ...
- fonctions biogéochimiques / d'épuration / vis-à-vis de la qualité de l'eau : rétention des sédiments, rétention / élimination des nutriments et des contaminants, dynamique du carbone ...
- fonctions d'habitat / régulation des chaînes trophiques / ressources : productivité primaire, poissons, faune sauvage, ressources agricoles ...
- fonctions de récréation, d'éducation, culturelles ...

Ces fonctions sont de nature différente. Aussi certains auteurs préfèrent alors les distinguer en parlant de *fonctions*, *produits*, *attributs* et *valeurs* (Figure A-14). Le terme *fonction* ou *service* est restreint à la résultante de l'ensemble des processus en interaction avec les caractéristiques du milieu (rétention des sédiments, contrôle des crues, ...). Les ressources fournies par ces milieux (poissons, roseaux, ...) donnent les *produits* ou les *biens*. La structure et les fonctions de ces milieux leur confèrent des *attributs* comme par exemple la diversité biologique ou le rôle patrimonial. Les bénéfices retirés par les sociétés indiquent la *valeur* attribuée à ces milieux [Dugan, 1990 ; Maltby *et al.*, 1994].

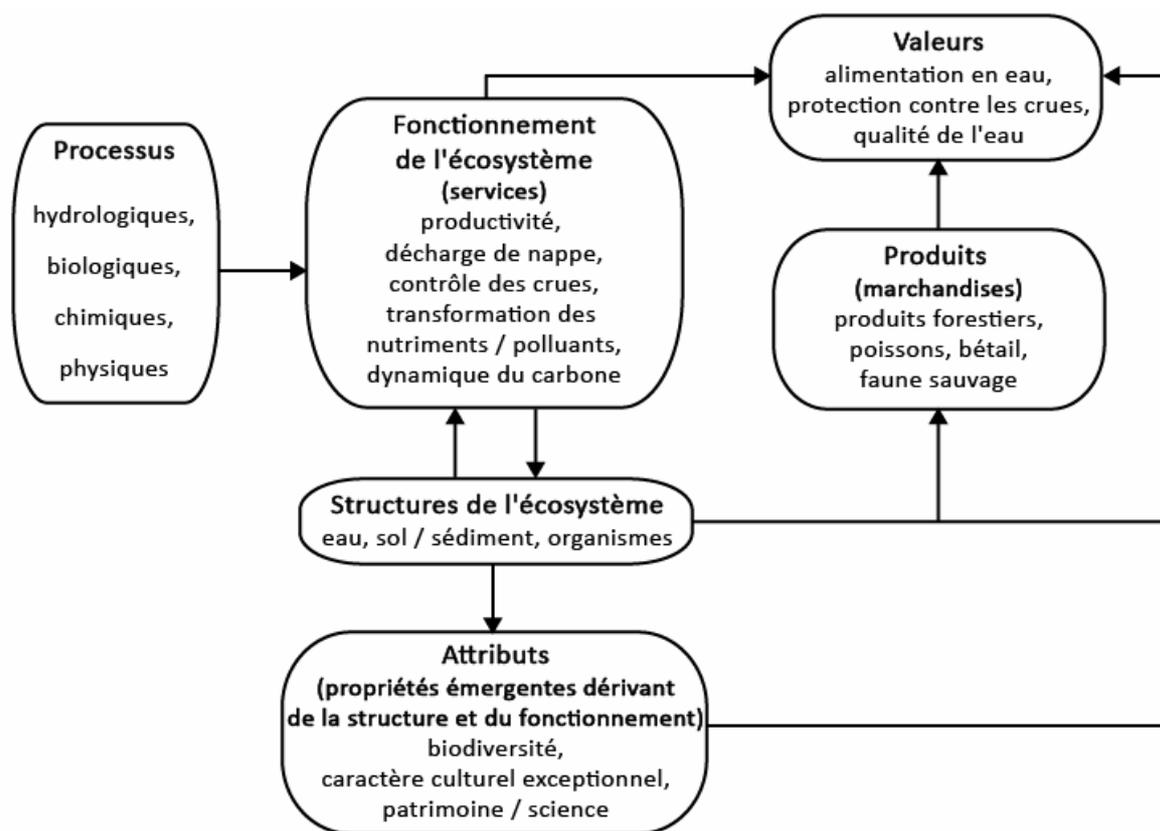


Figure A-14 : Ensemble des relations entre les caractéristiques des zones humides, les divers types de propriétés qui en découlent et leur valeur (d'après [Maltby et al., 1994])

Dans le cadre de l'inventaire des « zones humides prioritaires » ou des études préalables pour l'élaboration des CREZH [Hydroconcept, 2007b, 2009 ; Perrineau et Blanchet, 2011], les objectifs de gestion des zones humides se basent sur l'identification :

- des fonctions (hydrologiques, bio-géochimiques et écologiques) générées par les processus naturels internes au milieu (Figure A-15) ;
- des valeurs (environnementales, économiques et sociétales) correspondant à l'ensemble des services (avantages, directs ou indirects, perçus pour la société) et des produits (biens fournis par les zones humides) (Figure A-16).

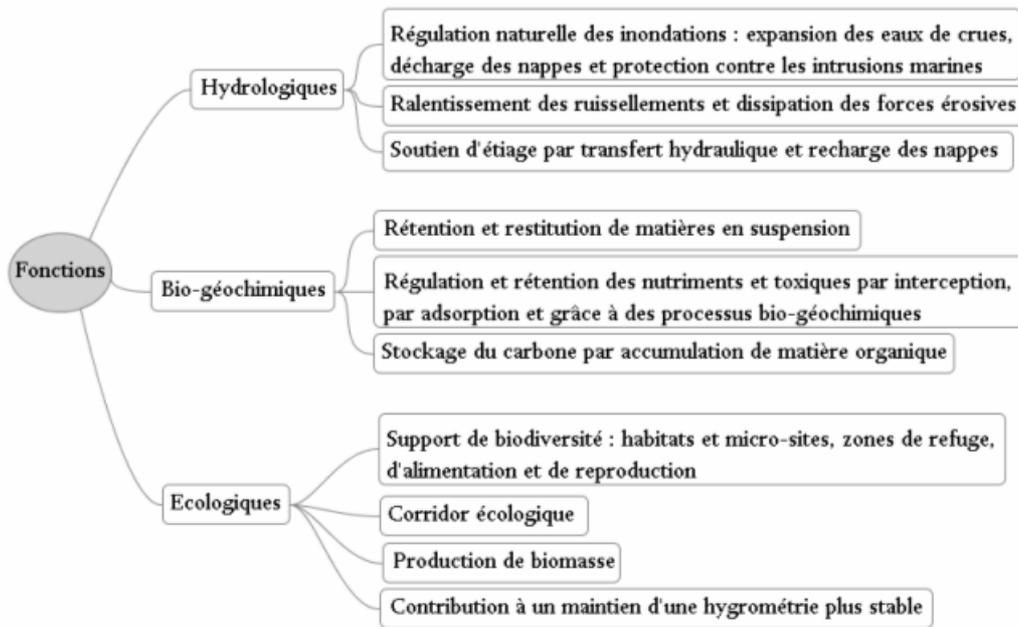


Figure A-15 : Fonctions générées par les processus naturels internes des zones humides (d'après [Perrineau et Blanchet, 2011])

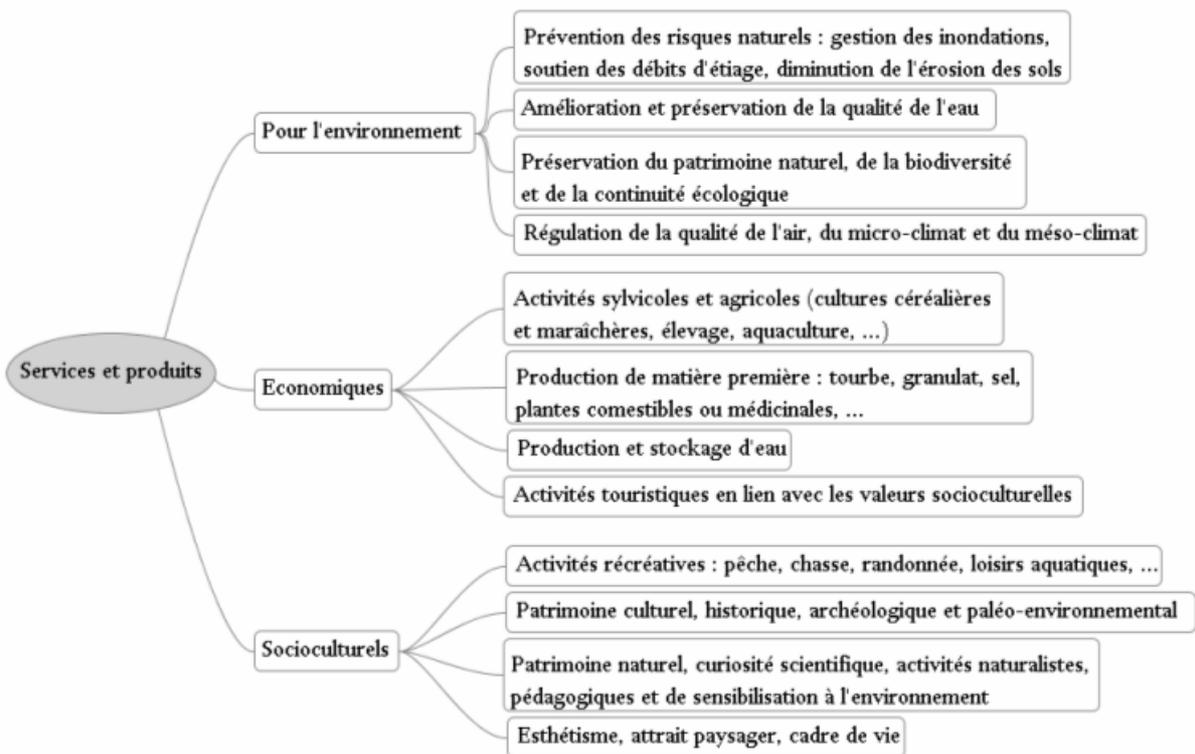


Figure A-16 : Valeurs associées aux zones humides (d'après [Perrineau et Blanchet, 2011])

A.2.2 Protections des zones humides : mesures et réglementations

En France, la perception sociale des zones humides littorales a plus qu'évolué depuis une trentaine d'années, passant de la théorie à la pratique, et des grands espaces aux petits pays [Goeldner-Gianella, 1993 ; Lefeuvre *et al.*, 2000]. Après le fort déclin des milieux humides observé entre 1960 et 1990, leur superficie se stabilisa dans 78 % des cas de 1990 à 2000 [Ximenès *et al.*, 2007]. Ce phénomène tardif peut s'expliquer par [MEEDDM, 2009a] :

- la ratification de la Convention de Ramsar en 1986,
- leur définition et leur prise en compte en 1992 avec la loi sur l'eau,
- la promotion des premières mesures agricoles adaptées (OLAE) à partir de 1992,
- la déduction fiscale sur le foncier non bâti consentie à partir de 1993 ...

Cependant ce décalage temporel révèle aussi la difficulté de mettre en œuvre de grands programmes mondiaux d'environnement à l'échelle locale [Goeldner-Gianella, 1993].

La modification progressive des perceptions et des représentations des marais a permis l'élaboration de dispositifs dans le but de les préserver, les restaurer et les valoriser. Une zone humide peut être sujette à divers outils de protection, selon son étendue et sa position spatiale, son degré d'importance de l'échelle locale à internationale (Figure A-17) : les instruments de planification, les instruments contractuels, les instruments fiscaux ou financiers, les instruments réglementaires de protection et de gestion, les instruments réglementaires de protection sans gestion, les instruments fonciers, les instruments non contraignants.

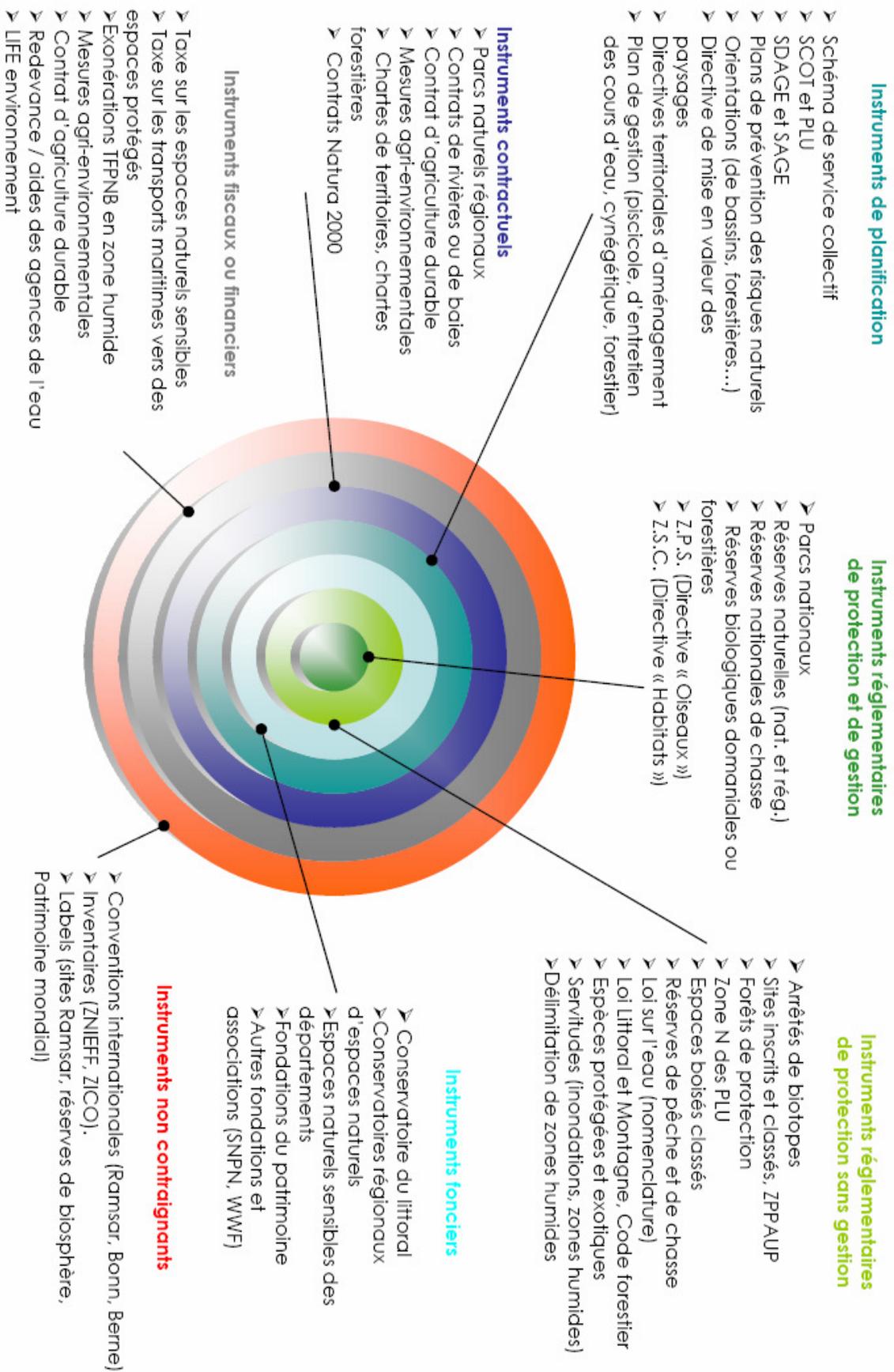
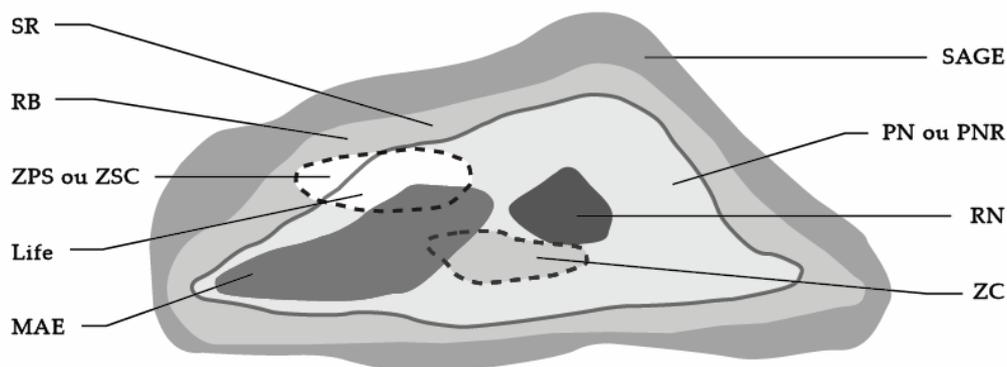


Figure A-17 : Schéma récapitulatif des outils de protection des zones humides [Cizel, 2006]

Chaque dispositif possède ses propres objectifs et ses méthodes de mise en œuvre (protection, gestion de la ressource en eau, planification territoriale ...). Le choix du plus pertinent est souvent affaire de négociation entre les divers partenaires en fonction des usages et tend à la dispersion des responsabilités. Si bien souvent les effets et les périmètres d'action des différents textes se complètent, se superposent, ils peuvent aussi se contrarier en raison de leur localisation et leur délimitation, relevant davantage du contexte socio-économique que d'une stratégie réfléchie (Figure A-18). L'efficacité de toute cette panoplie de mesures reste par conséquent encore à démontrer [Barnaud, 2000a ; Barnaud et Fustec, 2007 ; Lefeuvre *et al.*, 2000]. Les imperfections pointées sont [Cizel, 2010] :

- le cumul d'instruments : aucun texte ne prévoit de dispositions tendant à limiter ou interdire la création d'un instrument en présence d'un autre, à l'exception du territoire d'un parc national qui ne peut plus se superposer à celui d'une réserve naturelle depuis 2006 ou à celui d'un parc naturel régional ;
- l'inadaptation de certains instruments : certains outils s'avèrent en outre inadaptés aux zones humides soit parce qu'ils ne prévoient pas de mesures de gestion des milieux (sites inscrits et classés, arrêté de biotope ...), soit parce que leur régime de protection est insuffisant pour juguler des aménagements destructeurs (parcs naturels régionaux), soit enfin parce qu'ils sont encore peu utilisés s'agissant des zones humides (espaces naturels sensibles, réserves biologiques) ;
- la fixité de l'instrument : les outils de protection ignorent d'une part les évolutions des milieux dans le temps et dans l'espace (sauf ceux prévoyant un plan de gestion), et d'autre part ne peuvent prendre en compte les influences extérieures à la zone humide protégée, en particulier les modifications ayant des répercussions hydrologiques (sauf les sites Natura 2000) ;
- l'absence de mise en place automatique : même en cas de menaces ou d'atteintes graves constatées, aucun texte ne prévoit une création automatique de protection réglementaire d'une zone humide.



Mesures internationales		Mesures nationales de protection-gestion	
SR	Site Ramsar	PN	Parc national
RB	Réserve de la biosphère	RN	Réserve naturelle, régionale
Mesures européennes		SC	Site des Conservatoires
ZPS	Zone de protection spéciale	PNR	Parc naturel régional
SIC	Site d'intérêt communautaire	SAGE	Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
ZSC	Zone spéciale de conservation		
Life	Instruments financiers européens		
MAE	Mesures agri-environnementales		

Figure A-18 : Zones humides prestigieuses bénéficiant d'une multitude de mesures plus ou moins emboîtées de conservation ou de gestion aux objectifs en partie communs (d'après [Barnaud et Fustec, 2007])

A ce jour, l'ensemble des zones humides françaises continue à se dégrader. Les zones humides de la façade atlantique sont les secondes plus dégradées après les vallées alluviales (Figure A-19). Elles sont marquées principalement par une croissance de l'activité de tourisme (activités balnéaires et attrait des paysages) et de loisirs (fréquentation humaine, chasse et pêche) [CGDD-SOeS, 2012b].

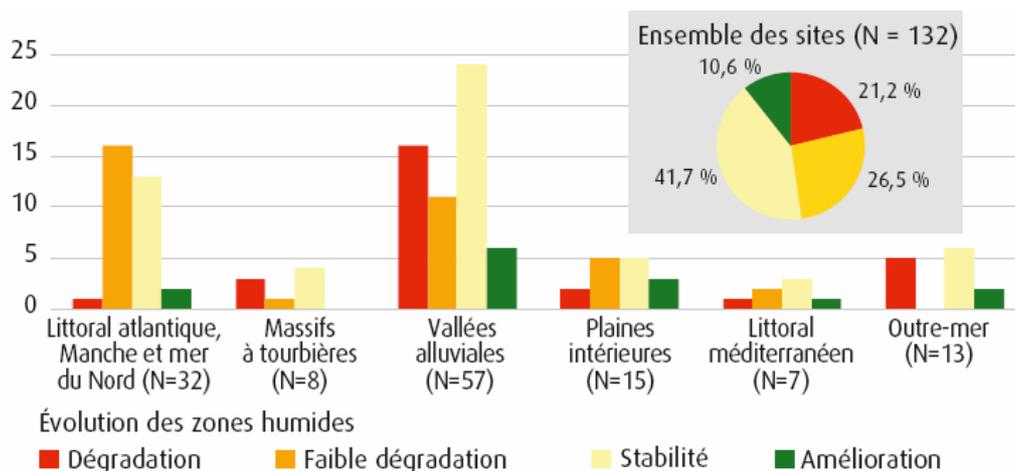
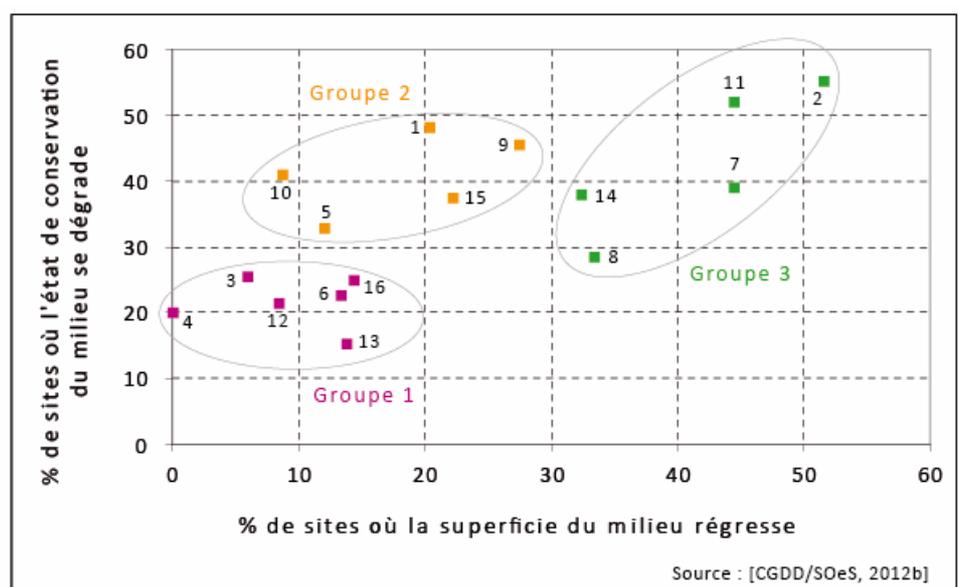


Figure A-19 : Développement persistant des dégradations des zones humides entre 2000 et 2010 [CGDD-SOeS, 2012a]

Ces altérations sont dues à un mauvais état de conservation des zones humides et, dans une moindre mesure, à la régression de leur surface. L'analyse conjointe de ces deux facteurs permet de distinguer trois groupes de milieux humides (Figure A-20) :

- Groupe 1 : milieux dont la superficie est majoritairement stable (plus de 80 % des cas) et présentant une faible dégradation de leur état écologique (inférieur à 25 % des cas) ;
- Groupe 2 : milieux en situation incertaine, avec des pertes de surfaces limitées (9 à 28 % des cas) et une dégradation notable de leur état de conservation (de 33 à 48 % des cas) ;
- Groupe 3 : milieux les plus en danger avec la diminution de leur surface (plus de 30 % des cas) et une détérioration inquiétante de leur état écologique (de 29 à 55 % des cas).



1	Annexes alluviales (N=59)	9	Milieux palustres d'eau douce (N=80)
2	Dunes et pannes dunaires (N=31)	10	Milieux palustres d'eau saumâtre (N=23)
3	Eaux libres courantes douces (N=101)	11	Prairies humides (N=99)
4	Eaux libres courantes salées (N=24)	12	Ripisylves (N=95)
5	Eaux libres stagnantes douces (lacs, étangs, mares) (N=100)	13	Slikkes (N=29)
6	Eaux libres stagnantes salées (N=30)	14	Tourbières (N=34)
7	Landes humides (N=27)	15	Vasières, grèves peu ou pas végétalisées (N=63)
8	Mangroves (N=9)	16	Végétations halophiles inondables (N=35)

Figure A-20 : Evolution des surfaces des milieux humides moins préoccupante que leur état de conservation

(Sans pondération par l'étendue des milieux présents dans les sites, N : nombre de sites)
(d'après [CGDD-SOeS, 2012a])

L'Homme exploite et aménage ces milieux pour utiliser les ressources renouvelables (vivantes) ou non (minérales) et convertir les espaces naturels. Ces activités sont sources de rejets de substances multiples, contaminantes à divers titres (Figure A-21).

Il y a donc souvent opposition entre ceux qui cherchent à maîtriser la nature à des fins économiques avec ceux qui privilégient le développement durable par le respect

de la nature. Pour tenter de sortir de cet affrontement récurrent, les Etats et la communauté internationale cherchent à promouvoir une gestion durable de l'espace côtier et ainsi garantir le futur de cette zone littorale depuis le Sommet de la Terre à Rio en 1992 [ONU, 1992b].

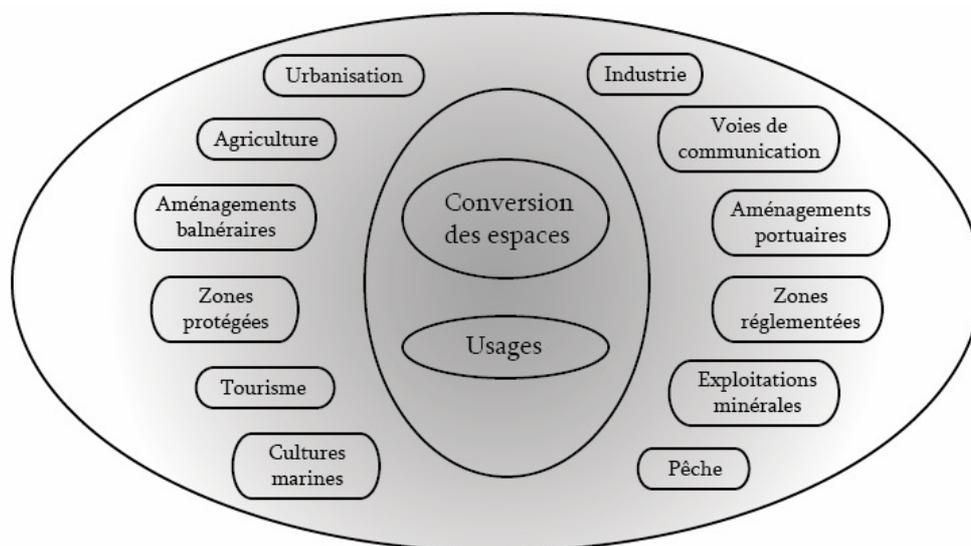


Figure A-21 : Typologie des activités humaines et des usages des milieux côtiers
(d'après [Barusseau et al., 1997])

Considéré comme une « cause » nationale, un patrimoine qui nécessite une politique spécifique, le littoral apparaît donc aussi important à protéger et gérer que les zones humides [RF, 1986, 2005]. C'est en ce sens que la protection de l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-Est est assurée selon la Convention OSPAR depuis 1992, à la suite de la fusion des Conventions d'Oslo (1972) portant sur les immersions et de Paris (1974), étendant le champ aux pollutions d'origine tellurique et à l'industrie pétrolière [OSPAR, 1992]. Quinze gouvernements des côtes et îles occidentales d'Europe en sont membres, ainsi que la Communauté Européenne. La zone OSPAR est subdivisée en cinq régions (Figure A-22).

La façade atlantique française est regroupée avec la côte ibérique au sein de la quatrième région. Cette région s'étend du 48° de latitude Nord au 36° de latitude Nord, et du 11° de longitude Ouest jusqu'aux limites des bassins versants des rivières qui se jettent dans l'océan Atlantique [OSPAR, 2000].

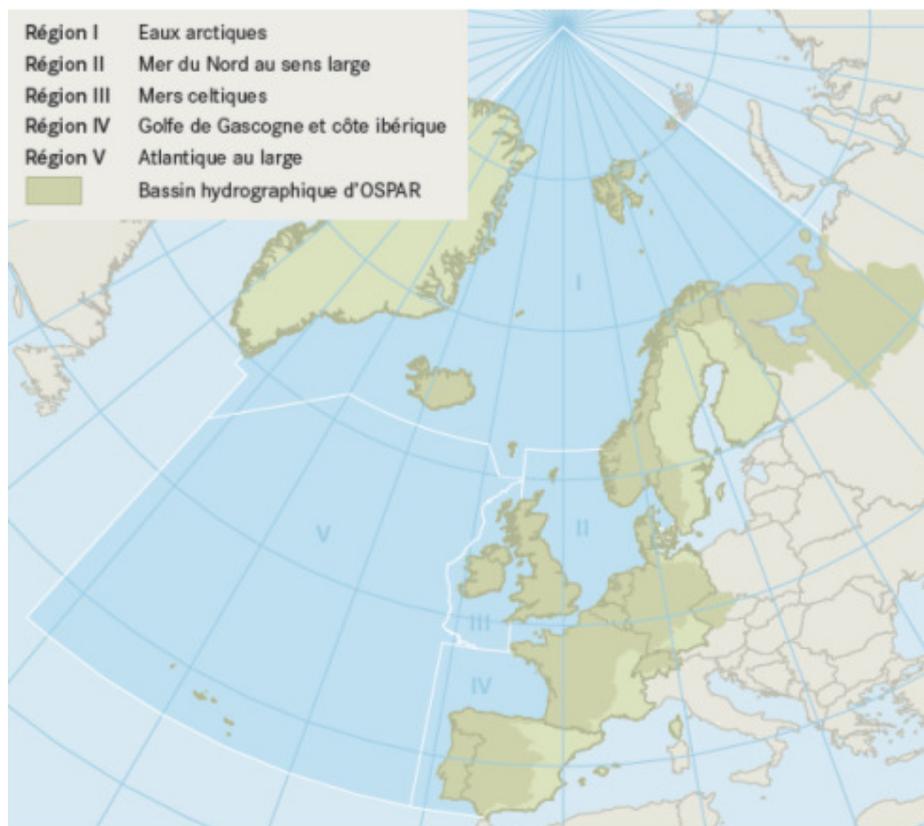


Figure A-22 : Zone OSPAR et son bassin hydrographique
[OSPAR, 2010]

La Convention OSPAR travaille dans le cadre du droit international coutumier, comme codifié par la Convention de 1982 des Nations Unies sur le droit de la mer [ONU, 1982]. Elle respecte également les principes résultant de la conférence des Nations Unies de Stockholm sur l'environnement [ONU, 1972], de Rio de Janeiro sur l'environnement et le développement [ONU, 1992b], ainsi que celle sur la diversité biologique [ONU, 1992a].

Pour atteindre ses objectifs, la Convention OSPAR se base sur l'approche écosystémique, définie comme « la gestion intégrée et complète des activités humaines, basée sur la meilleure connaissance scientifique disponible de l'écosystème et de sa dynamique, afin d'identifier et d'agir sur les pressions qui sont préjudiciables à la santé des écosystèmes marins, réalisant de ce fait l'utilisation durable des ressources et des services des écosystèmes et le maintien de l'intégrité de l'écosystème » [OSPAR, 2010]. Cette méthode constitue un élément principal de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) [CE, 2000] et de la Directive Cadre Stratégie pour le milieu marin [CE, 2008a] au sein de l'UE (Figure A-23).

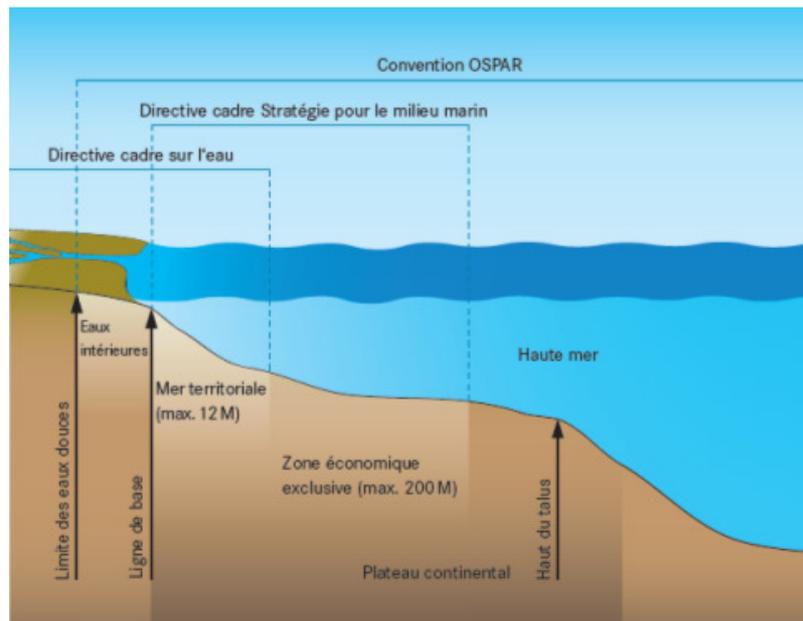


Figure A-23 : Zones juridictionnelles de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, de la Convention OSPAR, de la Directive cadre sur l'eau de l'UE et de la Directive cadre Stratégie pour le milieu marin de l'UE
[OSPAR, 2010]

L'identification de ces pressions revient à évaluer la capacité d'accueil d'un territoire, niveau maximum de pression, exercée par les activités et les populations permanentes et saisonnières, que peut supporter le système de ressources du territoire sans mettre en péril ses spécificités. Cette méthode vise à poser les projets de territoires littoraux (urbanisme, aménagement territorial, ...) en des termes nouveaux, de développement global, soutenable, de vulnérabilité, d'appréciation collective ou de médiation, avec des méthodologies également renouvelées autour d'indicateurs, de modélisations prédictives et de démarches participatives [Pottier *et al.*, 2009].

A.3 Cadre scientifique

A.3.1	Modélisation des flux sur le continuum terre - mer	29
A.3.2	Programme de recherche GERRICO.....	30
A.3.3	Problématique	32

A.3.1 Modélisation des flux sur le continuum terre - mer

Grâce aux progrès technologiques et scientifiques, il existe de nos jours de nombreux modèles permettant :

- de modéliser les flux d'eau en milieux naturels et ruraux [Estupina Borrell, 2004 ; Loumagne, 2001 ; Perrin, 2000], en milieux urbanisés [Chocat, 2009 ; Morena, 2004], en assainissement [Bourrier, 2008 ; Buyer, 2002], en hydrodynamique côtière [Plus *et al.*, 2006b ; Stanisière *et al.*, 2006 ; Tartinville *et al.*, 1998] ;
- de suivre dans ces milieux le transport et l'évolution de la qualité des eaux de surface [Brater *et al.*, 1996 ; De Vries et Hromadka, 1993 ; Horn *et al.*, 2004] ou plus spécifiquement des sédiments [Merritt *et al.*, 2003], de l'oxygène dissous [Cox, 2003], des nutriments [Payraudeau, 2002], des bactéries [Bougeard *et al.*, 2008], des pesticides [Bedos *et al.*, 2002 ; Köhne *et al.*, 2009b].

Mais la modélisation de la circulation des flux d'eau et de leurs qualités dans les marais est encore très marginale à en croire la rareté de la littérature évoquant ces thématiques. Les études menées sont généralement réalisées par des bureaux d'études. Les plus récentes pour le Marais Breton portent sur l'aménagement, l'entretien des étiers et la gestion de la ressource en eau [Hydroconcept, 2007b, 2009 ; ISL Ingénierie, 2004 ; SAFEGE, 2011 ; SCE, 2002, 2003]. Lorsqu'elle est utilisée, la modélisation hydraulique sert à l'évaluation du redimensionnement d'ouvrages hydrauliques, à l'augmentation des capacités d'évacuation des étiers.

Des universitaires et des chercheurs de l'INRA, CEMAGREF, BRGM, MNHN ont également étudié le fonctionnement des marais essentiellement par des approches probabilistes et de télédétection [Alsumard, 1999 ; CEMAGREF, 1994 ; Puech *et al.*, 1999 ; Samaali, 1999 ; Samoudi, 2000]. Ces méthodologies apportent une meilleure compréhension de la dynamique des flux d'eau dans les marais, par la définition d'indicateurs spatiaux et temporels du caractère humide des prairies et de leur degré de connectivité avec le réseau de drainage. Ces indicateurs ont aussi permis la mise en place d'une approche probabiliste pour simuler le remplissage et la vidange des marais.

Cependant, ces approches restent encore insuffisantes pour répondre aux problématiques de gestion de l'eau entre les différents usages. Il faut les coupler à

d'autres sources de données et à des investigations sur le terrain [Geffray et Ménanteau, 2004 ; Robin, 1992]. La réponse à ces problématiques nécessite la quantification et le suivi de la qualité des flux d'eau comme en témoignent les travaux sur le marais de Moëze (Charente-Maritime) [Anras, 1997 ; Giraud, 1992]. La détermination du bilan hydrologique représente un des moyens pour appréhender la circulation des flux d'eau et en harmoniser les usages dans une zone humide fluviale [Bendjoudi *et al.*, 2002 ; Weng *et al.*, 1999] ou un marais littoral [Fashi, 2000 ; Giraud *et al.*, 1991 ; Weng *et al.*, 2003]. La modélisation des flux d'eau et de leur qualité en constitue un autre, surtout pour les activités dépendantes de la qualité de l'eau.

A.3.2 Programme de recherche GERRICO

La baie de Bourgneuf est située au sud de l'embouchure de la Loire. Ses propriétés physiques et biologiques (richesse élevée en eaux salées souterraines, influence de l'estuaire de la Loire et des bassins versants), conjuguées aux activités humaines pluriséculaires (conchyliculture, saliculture) ou plus récemment apparues sur le littoral atlantique (tourisme), en font un lieu de rencontre et d'expérimentation particulièrement bien adapté pour des travaux scientifiques croisés d'intérêt européen, voire mondial [Baud et Guillaudreau, 2007].

Plusieurs outils y ont été déjà mobilisés afin de dégager un projet de territoire :

- Procédure d'élaboration non aboutie d'un SMVM pour arbitrer les usages de la mer et du littoral [Gomez, 1994b] ;
- Mise en place d'un SAGE, approuvé en 2004 [ADBVB, 2004] et révisé en 2011 [ADBVB, 2011] ;
- Elaboration d'un document d'objectif Natura 2000 [ADBVB, 2010].

Mais leur mise en œuvre pose problème, en raison du manque de consensus et de fédérations entre les protagonistes [Bersani *et al.*, 2005 ; Miossec, 2004]. En effet, dans la pratique, les mises en œuvre réussies de cette approche dépendent plus d'une volonté politique nationale et/ou locale et des moyens financiers mis à disposition, garantissant un investissement à long terme, que des connaissances scientifiques [Henocque, 2006 ; Olsen, 2000 ; Rolland, 2005].

Sur ces bases et fort de ces considérations, l'Ifremer et ses partenaires se sont engagés en 2006 à mettre en œuvre un programme visant à analyser les besoins de connaissance de la gestion des zones côtières, développer une approche transdisciplinaire d'identification des problèmes et de leur possible résolution, construire des outils d'aide à l'évaluation, à la prospective et à la prise de décision, et enfin communiquer ces outils de manière à ce qu'ils soient compris et utilisés

effectivement par les acteurs non scientifiques de la GIZC⁴ [Anonyme, 2006]. C'est ainsi que le programme GERRICO (GEstion globale des Ressources marines et des Risques dans les espaces COtiers) fut lancé [Baud et Guillautreau, 2007].

Cette thèse se situe dans un cadre général de recherche où l'accent actuel est mis sur le développement d'outils permettant de modéliser les flux d'eau à l'interface des différents compartiments de l'hydrosystème côtier. Elle est financée par la région Pays de Loire dans le cadre du projet GERRICO. Il est piloté conjointement par l'Ifremer et l'Université de Nantes. L'objectif visé de ces actions de recherche est l'amélioration des connaissances relatives à l'exploitation des ressources marines dans les espaces côtiers selon trois axes [Baud et Guillautreau, 2007] :

- Axe 1 : Bioproduction et ressources marines ;
- Axe 2 : Identification et analyse des risques pour une gestion durable ;
- Axe 3 : Interactions nature/société vers la mise au point d'un outil d'aide à la décision pour la Gestion Intégrée des Zones Côtières.

Cette thèse s'inscrit dans l'action 3.1 du troisième axe portant sur les modèles physiques (Figure A-24).

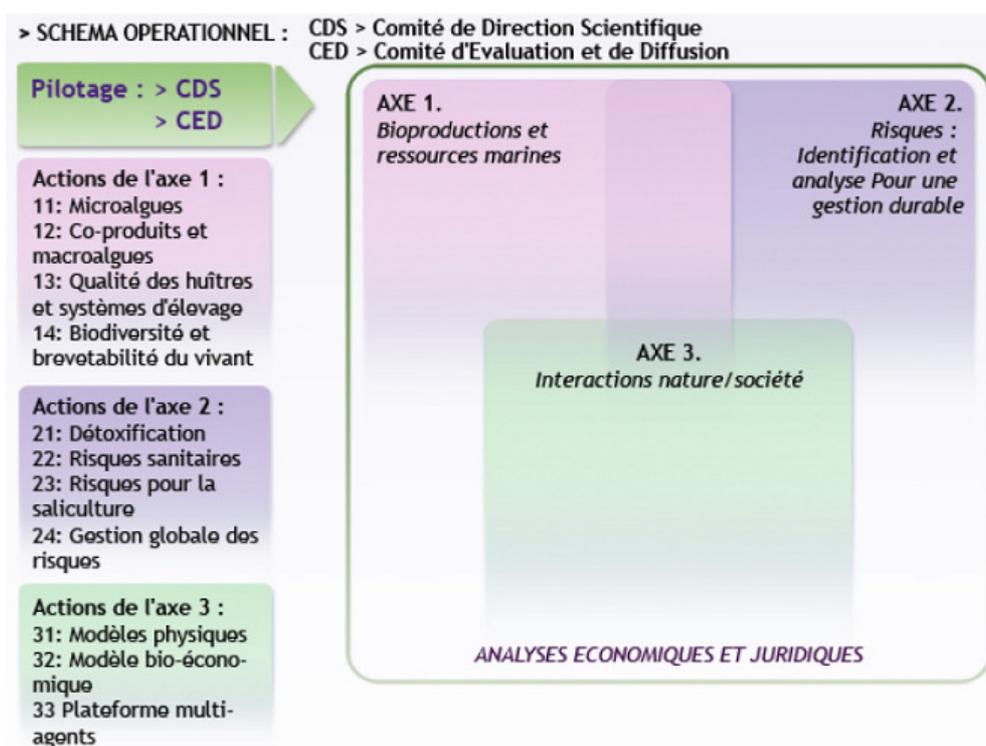


Figure A-24 : Organisation du projet GERRICO

⁴ Les définitions et les acronymes sont nombreux pour parler des processus concertatifs visant une gouvernance respectueuse de l'environnement et des intérêts socio-économiques [Rolland, 2005]. Le concept utilisé pour en parler dans la suite de ce manuscrit sera GIZC, usité dans le plan national d'action en faveur des zones humides [MEEDDM, 2010b], la convention OSPAR [OSPAR, 2010] et le droit international, communautaire et national [Lozachmeur, 2005].

L'objectif de cet axe est de développer une méthodologie dans le but d'accroître la qualité des eaux et d'optimiser la gestion des activités côtières. Cette méthodologie s'appuie sur une chaîne de modèles couplés, depuis les bassins versants jusqu'à la mer côtière, en prenant en compte les différents compartiments du système, les activités et les divers forçages physiques et bio-physiques (Figure A-25).

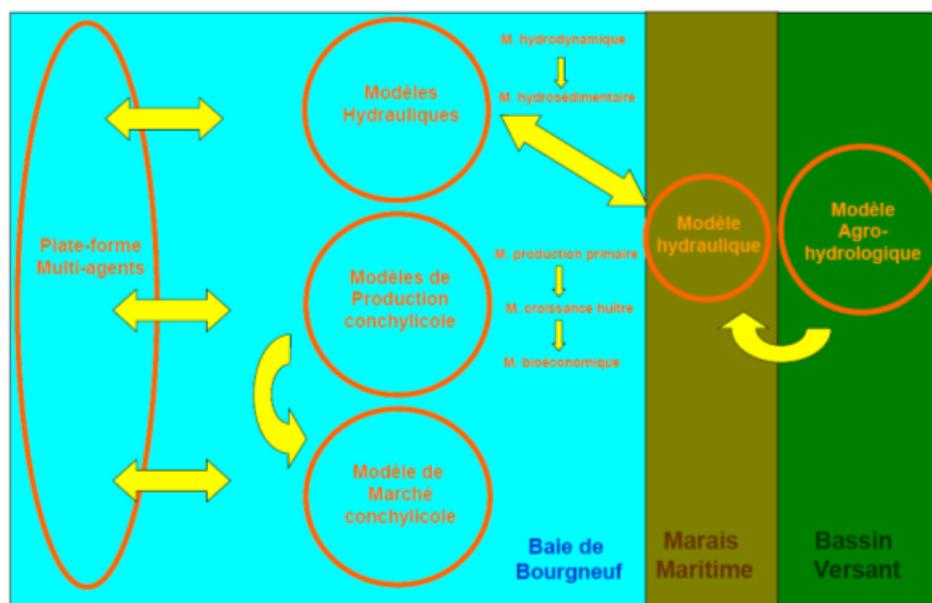


Figure A-25 : Principe du chaînage entre les modèles dans les différents compartiments [Baud et Guillaudeau, 2010a]

Cette approche a pour ambition de fonder un protocole permettant d'asseoir une GIZC en cherchant :

- à développer une articulation entre des modèles physiques, biologiques et économiques ;
- à proposer différents scénarii d'évolution et à simuler leurs impacts pour favoriser la prise de décision des aménageurs.

A.3.3 Problématique

Le marais reçoit, avec les eaux du bassin versant, des pollutions agricoles, industrielles et urbaines, dont les incidences mériteraient d'être évaluées. Cette étude passe par une vue globale de l'ensemble hydrographique : bassin versant, marais et baie [Baudet *et al.*, 1987b]. La mise en place d'une modélisation agro-hydrologique en zone côtière, en couplant différents modèles, constitue l'un de ces outils, à l'instar des études menées sur les marais côtiers de Kervigen [Piriou *et al.*, 1999], du Croisic et de Pen-Bé [Jeanneret *et al.*, 2006 ; Lomakine, 2005], des chenaux du Payré [IFREMER, 2007], de la lagune de Thau [Plus *et al.*, 2006b], de la rivière d'Auray [Rollo, 2012]. Se basant sur des mesures de terrain et des simulations informatiques, ces études mettent en évidence le rôle bénéfique des marais sur la qualité de l'eau. Une

décroissance des concentrations des contaminants est observée entre l'entrée et la sortie des marais (Figure A-26). La plupart du temps, les marais maritimes sont considérés comme des « boîtes noires », milieux pour lesquels les processus hydrologiques et biogéochimiques mis en jeu sont méconnus et / ou négligés. Ces études se limitent alors à un bilan entrée / sortie des flux d'eau. Leur modélisation dans les marais est soit intégrée dans le modèle de bassin versant dans son intégralité ou pour partie, soit négligée.

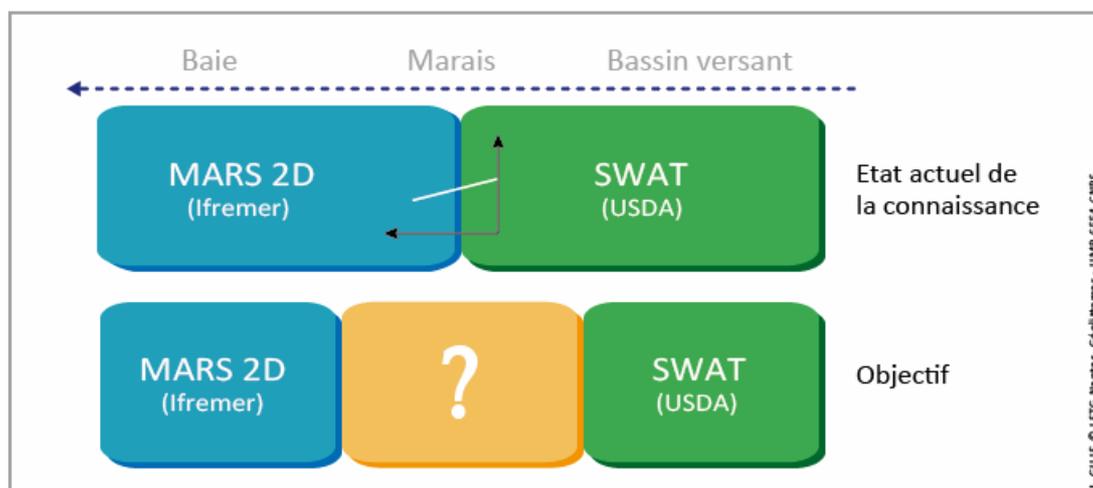


Figure A-26 : Modélisation du continuum terre-mer

L'objectif de cette étude est donc de savoir s'il est possible d'aller plus loin que ces simples approches empiriques avec l'ajout d'un modèle sur ce continuum terre-mer (Figure A-26), tenant compte de la propagation des flux d'eau et de contaminants dans le marais, et permettant ainsi d'apporter quelques éléments de compréhension sur le fonctionnement de ces « boîtes noires ».

La réalisation de cet objectif amène à se poser diverses questions, pouvant être regroupées en cinq thèmes :

- Thème 1) Sur son fonctionnement hydrologique : D'où vient l'eau ? Comment circule-t-elle ? Combien de temps y reste-t-elle ? Quels sont les facteurs conditionnant sa gestion ? Dans quels buts ? Pour quels usages ?
- Thème 2) Sur son fonctionnement bio-géochimique : Quel est son impact sur la qualité de l'eau ? Est-il possible de le quantifier ? Quels sont les processus mis en jeu ?
- Thème 3) Sur la modélisation : Quels sont les phénomènes à simuler et modélisables ? A quelles échelles spatio-temporelles ? Quel type de modèles utilisé ? Quelles informations nouvelles apporte-t-il ? Quelle est la fiabilité des résultats ?
- Thème 4) Sur les données : Quelles sont les données nécessaires ? Sont-elles disponibles ? Suffisantes ? Quelles stratégies doivent être mise en œuvre pour combler les éventuels manques ?

- Thème 5) Sur sa gestion : Dans quelle mesure cette étude peut-elle aider à la gestion des marais ? Est-elle transférable à d'autres secteurs ?

La suite de ce manuscrit s'attachera à apporter des réponses à l'ensemble de ces questions :

- la partie B portera sur les thèmes 1 et 2 en présentant le contexte général du Marais Breton, les activités qui s'y développent, la dynamique des flux d'eau et leur qualité ;
- la partie C sera consacrée aux thèmes 3 et 4, en présentant les différents types de modélisation et de modèles afin d'expliquer les choix méthodologiques pour cette étude et les données nécessaires pour l'étude ;
- la partie D est intégratrice de tous les thèmes avec la présentation des résultats de la campagne de terrain pour la qualité de l'eau, la mise en œuvre de la modélisation et les gains apportés par une telle démarche ;
- la partie E est une discussion des enseignements retirés à l'issue de ce travail de recherche et propose quelques pistes à approfondir dans la perspective de nouvelles études sur de tels milieux.

B. Marais Breton

B.1	Contexte général.....	39
B.2	Usages et pressions.....	61
B.3	Contexte hydrologique et qualité des eaux.....	82

« Marais agricole préservé » pour les acteurs locaux, « milieu naturel fabuleux » pour la LPO [Candau et Le Floch, 2000], « océan de prairies, vaste réserve de foin utilisée pour le pâturage extensif de bovins » [Croix, 1986] ... Chacun possède sa propre image du Marais Breton selon son intérêt et son usage.

Il doit son apparence de zone naturelle grâce à l'omniprésence de l'herbe non cultivée. Pourtant, il s'agit bien d'un espace organisé avec des aménagements anciens, renouvelés, adaptés aux contraintes locales, aux évolutions. Sa mise en place est le fruit de processus géomorphologiques et anthropiques qui se sont échelonnés au cours du temps. Les aménagements de ce territoire par l'Homme ont favorisé son installation et la mise en valeur ces terres nouvellement gagnées sur la mer. L'évolution des consciences et l'intérêt de la société facilita l'implantation de nouveaux modes de valorisation, voire la supplantation des usages historiques de ce marais. La pérennité de ces activités est basée sur une gestion de l'eau, assurant ainsi une eau en quantité ou de qualité, voire les deux selon les nécessités.

B.1 Contexte général

B.1.1	Localisation et caractérisation physique.....	39
B.1.2	Genèse du marais	45
B.1.3	Climat.....	54

B.1.1 Localisation et caractérisation physique

B.1.1.1	Les coteaux	42
B.1.1.2	Le Marais Breton.....	42
B.1.1.3	L'île de Noirmoutier.....	43
B.1.1.4	La Baie de Bourgneuf	43

Le Marais Breton se situe au sud de l'estuaire de la Loire. C'est la 5^{ème} plus grande zone humide littorale française métropolitaine, après la Camargue, le Marais Poitevin, l'estuaire de la Gironde et la baie du Mont Saint-Michel (CGDD (SOeS/ONZH), 2004). Elle appartient à un grand ensemble de zones humides localisées sur la façade atlantique française, également nommé marais de l'Ouest. Dans la région des Pays de la Loire, les zones humides représentent 239 581 ha soit 7,5 % du territoire (Observatoire des zones humides, 2007), ce qui la positionne au troisième rang français en terme de superficie de zones humides. 14 zones humides d'importance majeure y sont décombrées (Figure B-1) : 1 lac (n° 8), 4 localisées le long de cours d'eau (n°s 4, 5, 6, 7) et 9 sur le littoral (n°s 1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 13, 14).

Le Marais Breton (n° 9) est l'une d'elles. Il se situe sur le bassin versant de la Baie de Bourgneuf⁵ (BVBB), d'une superficie d'environ 980 km². Le BVBB correspond à la portion du territoire qui capte l'ensemble des précipitations évacuées dans la Baie de Bourgneuf (n° 10). Il recouvre 73 % du territoire géré par le SAGE du BVBB. Le périmètre administratif du SAGE s'étend sur 39 communes et 2 départements (Figure B-2) : 17 communes en Loire-Atlantique et 22 communes en Vendée. La différence entre les deux zonages vient du fait que 19 communes ne font partie que partiellement du BVBB.

⁵ Le bassin versant de la Baie de Bourgneuf sera nommé par la suite BVBB lorsque le bassin versant est considéré dans son ensemble comme la portion du territoire réceptacle des flux d'eau terrestres arrivant dans la baie. La notion de bassin versant sera quant à elle réservée à la partie continentale du territoire amont hors marais.

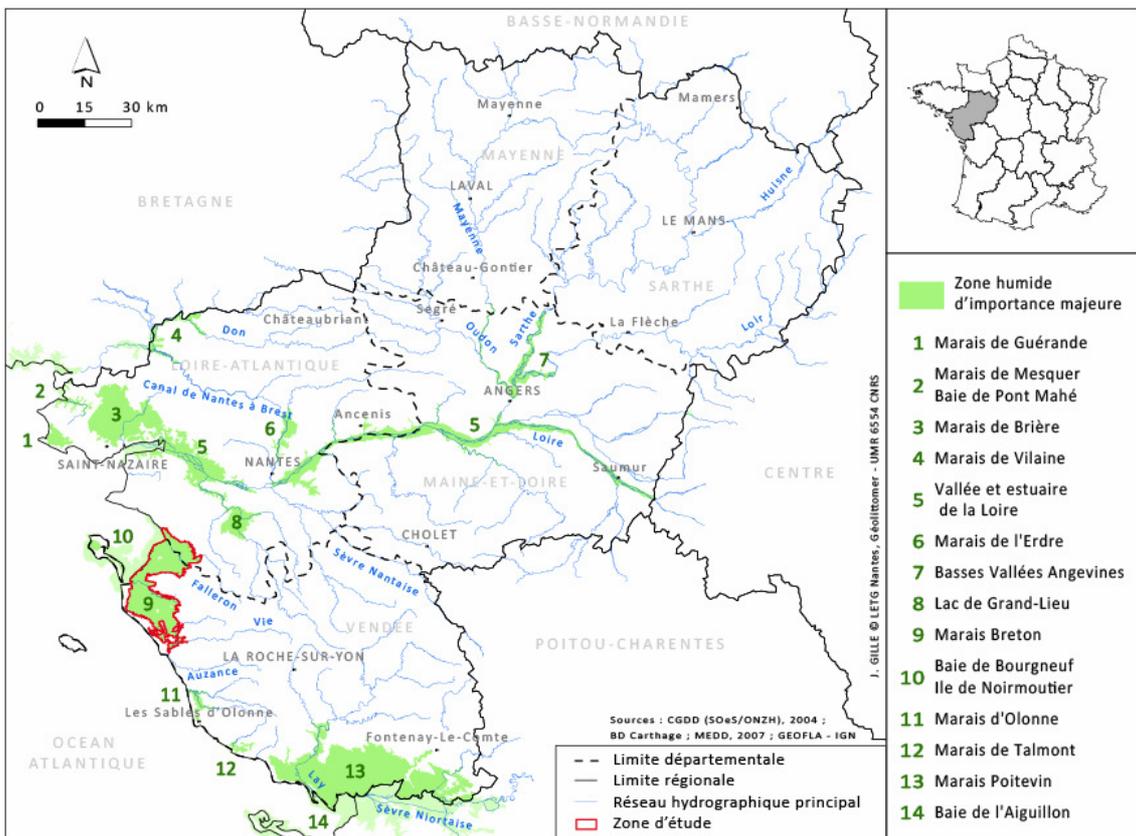


Figure B-1 : Zones humides d'importance majeure de la région des Pays de la Loire

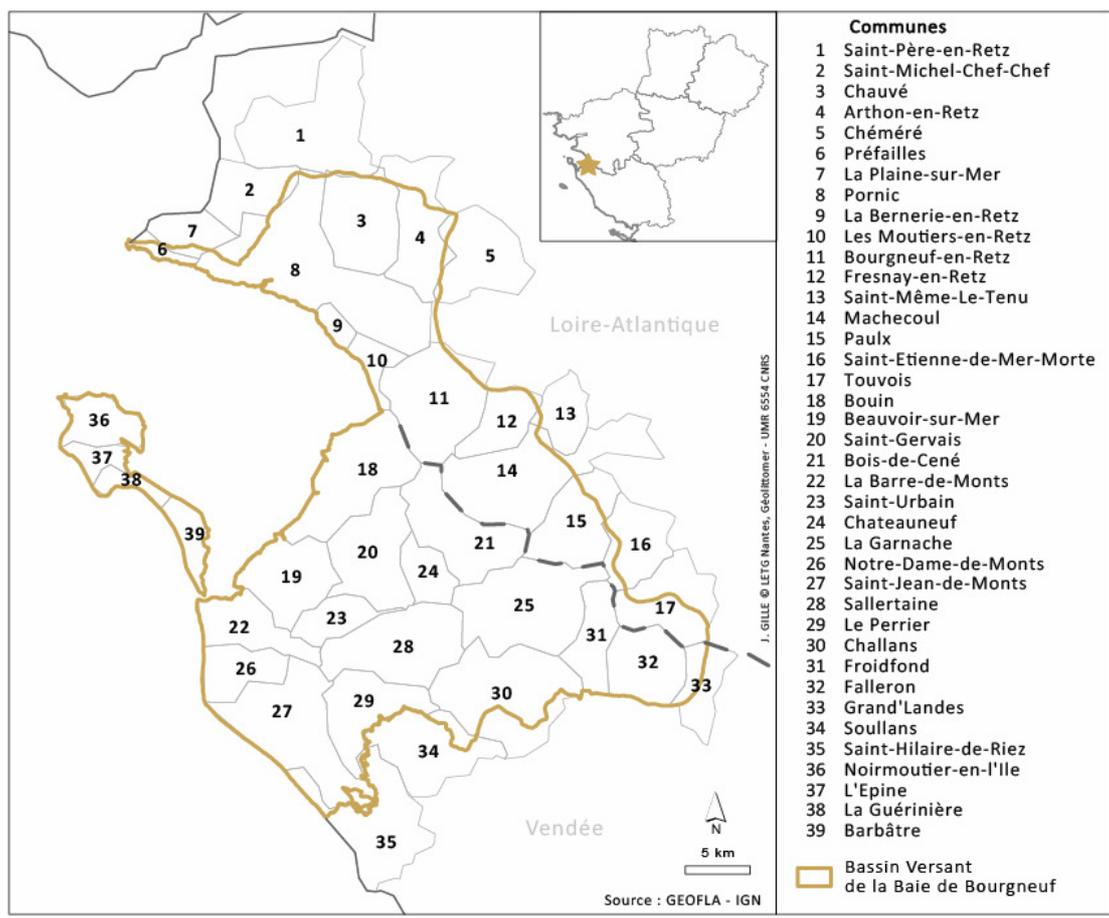


Figure B-2 : Emprise spatiale des communes du BVBB

Le BVBB s'étend également sur 3 arrondissements à savoir Saint-Nazaire, Nantes, Les Sables-d'Olonne et 11 cantons : Pornic, Saint-Père en Retz, Bourgneuf-en-Retz, Beauvoir-sur-Mer, Challans, Machecoul, Palluau, Légé, Saint-Jean-de-Monts, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Noirmoutier-en-l'Île.

Le point le plus haut du BVBB se situe à 71 m NGF, dans le sud-est du BVBB et plus de la moitié du BVBB est inférieure à 10 m NGF (Figure B-3). Il est composé de quatre entités géographiques distinctes présentées ci-après : les coteaux, le Marais Breton, l'île de Noirmoutier et la Baie de Bourgneuf (Figure B-4).

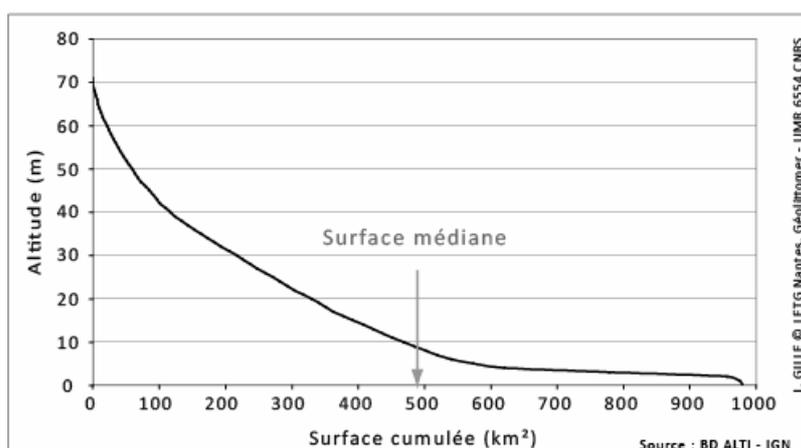


Figure B-3 : Courbe hypsométrique du BVBB

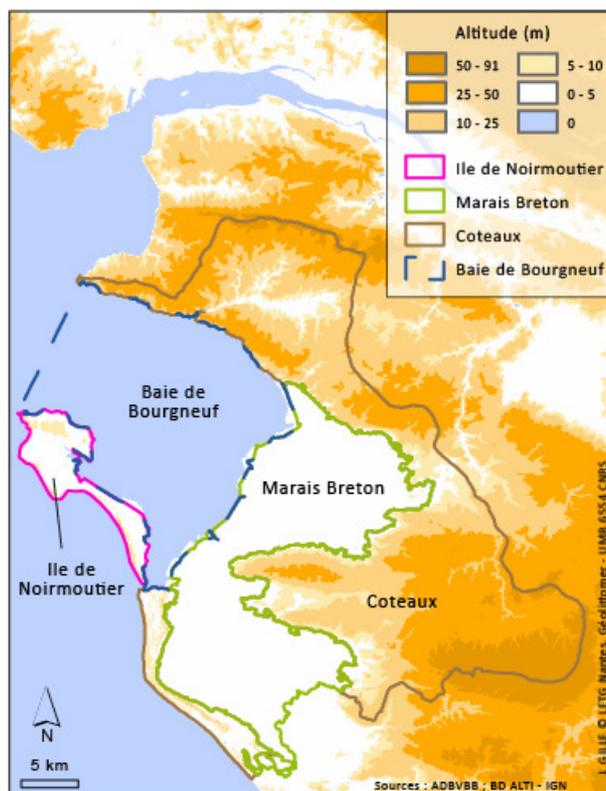


Figure B-4 : Relief et entités géographiques du BVBB

B.1.1.1 Les coteaux

Les coteaux peuvent être subdivisés en 31 bassins versants. Ils se situent sur un plateau bocager où l'écoulement des eaux est libre [ADBVB, 2011]. Ils sont appelés traditionnellement « Champs » en référence à la mise en valeur des sols : vignes, cultures fourragères et présence de moulins à vent sur la ligne de faite [Mounès, 1974].

30 d'entre eux ont leur exutoire en amont du Marais Breton et 1 seul directement dans la baie (bassin versant du canal de Haute Perche, au Nord). Ce dernier sera écarté dans cette partie afin de ne présenter que ceux en amont du Marais Breton.

Les quatre plus vastes bassins versants sont celui du Falleron (137 km²), du ruisseau de Pont Habert (50 km²), du Taizan (42 km²) et du ruisseau des Godinières (17 km²). Les 26 autres restants ont une superficie inférieure à 10 km². Le contact avec le Marais Breton se fait sous forme d'un versant voire d'une falaise morte (cf B.1.2, p.45).

B.1.1.2 Le Marais Breton

Le Marais Breton tire son nom de la Baie de Bourgneuf, lorsqu'elle s'appelait « Baye de Bretagne » [Mounès, 1974], malgré que les neuf dixièmes soient extérieurs à la Loire-Atlantique (appartenant à la Bretagne historique). C'est une vaste étendue plane variant entre 0 et 4 m NGF. Par conséquent, une grande partie de ses terres se situe en dessous du niveau des plus hautes eaux. Elles sont protégées des immersions marines par une digue [Verger, 1968]. Le paysage actuel du Marais Breton doit son maintien aux aménagements et à la gestion réalisés par l'Homme, ce qui en fait un milieu naturel artificiel en perpétuel équilibre. C'est la plus importante zone de marais sur le BVBB, devant celle de Noirmoutier (18 km²) et de Haute Perche (6 km²). Sa superficie ne fait pas consensus dans la littérature, ainsi que dans les données mises à disposition par des organismes, producteurs de données (Tableau B-1).

Source	Superficie (km ²)
[Verger, 1968]	400
[Sauveterre, 1980] [Nourry et al., 1994]	370
[Baudet et al., 1987c] CGDD (SOeS/ONZH), 2004 [Corlay, 1986b] DIREN Pays de Loire, (ONZH, 2002)	360
[Bouscasse et al., 2011a] [Gomez, 1994]	350
[ADBVB, 2011]	324

Tableau B-1 : Synthèse non exhaustive des valeurs trouvées pour la superficie du Marais Breton

Ces différences doivent probablement leur origine à des problèmes d'ordre :

- scalaire, notamment pour les plus anciennes (avant l'ère de l'informatique et des SIG) ;
- géographique en fonction des institutions et des périmètres d'actions publiques [Barnaud, 2000b ; Candau et Le Floch, 2000] ;
- sémantique avec la prise en compte du marais de la Vie et du Jaunay [ADASEA de la Vendée, 2002 ; Baudet *et al.*, 1987c ; Nourry *et al.*, 1994]).

Dans la bibliographie, plusieurs autres appellations ont été données mais elles sont tombées en désuétude de nos jours : marais Breton-Vendéen [Baudet *et al.*, 1987a], marais Nantais⁶ [Dufil, 1986], marais septentrional de la Vendée, marais Nord Vendéen⁷ [Nourry *et al.*, 1994]. Localement, le Marais Breton est souvent découpé en deux parties avec la présence de l'ancienne presque-île de Beauvoir-sur-Mer : le marais de Bourgneuf et de Bouin au nord, et le marais de Monts au sud en lieu et place respectivement de l'ancien Golfe de Machecoul et celui de Soullans [ADASEA de la Vendée, 2002]. C'est à cette partie nord que Mounès [1974] restreint l'appellation « Marais Breton », la détachant ainsi du « Marais de Monts » au sud. Enfin, cette synthèse historique sur les valeurs de la superficie du Marais Breton montre l'argumentation de la précision.

Pour la suite de l'étude, ce sont les limites définies par l'ADBVB qui seront utilisées, car c'est elle qui a en charge l'animation et la mise en œuvre du SAGE.

B.1.1.3 L'île de Noirmoutier

Elle s'étend sur une superficie légèrement inférieure à 50 km². Elle comprend quatre communes (du nord au sud) : Noirmoutier en l'île, l'Épine, la Guérinière et Barbâtre. Son relief est particulièrement bas (inférieur à 20 m). Des digues sur la côte Est et un cordon dunaire à l'Ouest protègent ces terres, qui pour plus de la moitié, sont situées au dessous des plus hautes eaux [ADBVB, 2011]. L'île est également composée de quatre secteurs distincts : un plateau granitique au Nord, un cordon dunaire à l'Ouest et au Sud, un marais salé entre les deux, et des polders [ADBVB, 2004].

B.1.1.4 La Baie de Bourgneuf

La Baie de Bourgneuf est un vaste bassin sédimentaire, d'une superficie de 340 km², créé par l'effondrement d'un bloc antérieur au Crétacé supérieur [Ters, 1978a]. Elle s'étend de la Pointe Saint-Gildas jusqu'à Beauvoir-sur-Mer. Elle est délimitée par l'île de Noirmoutier à l'Ouest, le Marais Breton à l'Est et le Pays de Retz au Nord

⁶ En raison de la proximité de Nantes et du fait que la baie constitue un lieu privilégié de villégiature des Nantais.

⁷ Par opposition au marais Sud Vendéen, le Marais Poitevin.

(Figure B-5). Cinq exutoires principaux d'étiers ou de rivières y sont dénombrés (du nord au sud, et d'est en ouest) :

- le Port de Pornic (canal de Haute Perche) ;
- le Port du Collet (étier de la Charreau Blanche, étier du Gros Baron, rivière du Falleron) ;
- le Port du Bec (canal du Dain) ;
- le Port de la Barre-de-Monts (Grand Etier de Sallertaine, canal de la Taillée) ;
- le Port de Noirmoutier-en-l'île (étier du Moulin, étier de l'Arceau, étier des Coëfs).

La baie est peu profonde, sa bathymétrie varie entre 0 et 10 m. Elle appartient au type des baies frisonnes, morphologiquement caractérisées par la rencontre des flots provenant de deux ouvertures, de part et d'autre d'une île. L'ouverture septentrionale de la baie, entre la pointe de Saint-Gildas et l'Herbaudière (12 km), est plus large que l'ouverture méridionale, délimitée par l'étroit goulet de Fromentine (0,5 km). Cette forte dissymétrie occasionne une prédominance du flot nord-sud. La rencontre des courants, appelée *wantij* en néerlandais, se produisait donc initialement dans le sud de la baie. Elle était marquée par l'édification d'un isthme, nommé faite du Pé localement [Verger, 2005]. Il fut préservé et réhaussé artificiellement par l'Homme afin de servir de gué : c'est l'actuel passage du Gois. De nos jours, le *wantij* s'opère au sud du passage du Gois.

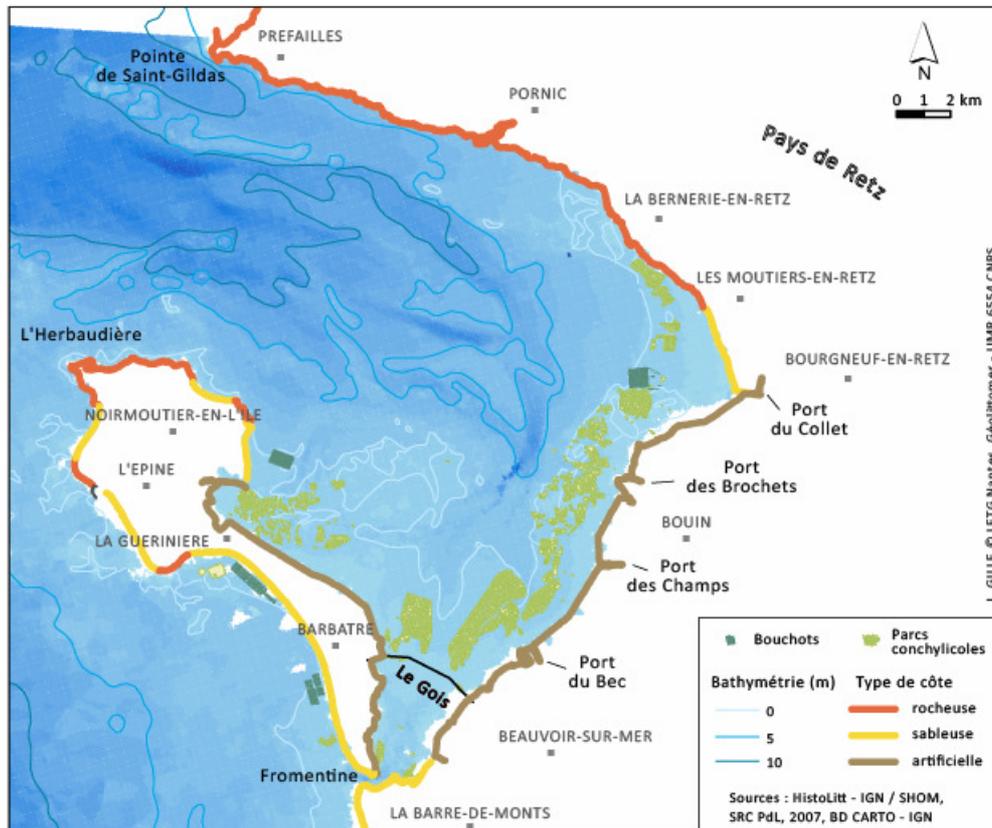


Figure B-5 : Baie de Bourgneuf

Le littoral de la baie est composé de trois secteurs morphologiques distincts [Bioret et Dupont, 1986 ; Bousquet et Miossec, 1986] :

- les falaises rocheuses : elles représentent des abris naturels et peuvent être précédées par des platiers peu accessibles, pouvant disparaître à marée haute ; elles sont principalement localisées sur la Côte de Jade au Nord (de la Pointe Saint-Gildas à la Bernerie-en-Retz) et dans une moindre mesure sur l'île de Noirmoutier ;
- les cordons dunaires : ils sont issus de la dérive sédimentaire, sont exposés aux vents et peuvent être recouverts par des forêts ; ils se situent au niveau du Port du Collet, au sud de la baie de Bourgneuf, sur la côte Ouest de l'île de Noirmoutier et également de la Guérinière à Barbâtre ;
- les digues : elles sont érigées sur une côte vaseuse, protégeant de vastes étendues de marais et de secteurs aquacoles ; elles sont présentes en fond de baie, de Bourgneuf-en-Retz à Fromentine, ainsi que sur la côte Est de l'île de Noirmoutier.

B.1.2 Genèse du marais

B.1.2.1	Processus morphologiques.....	46
B.1.2.2	Actions de l'Homme.....	47
B.1.2.3	Réseau hydrographique.....	51

La notion de paysage recouvre à la fois une composante fonctionnelle (le paysage constituant la structure des écosystèmes) et une composante culturelle, plus subjective, intimement liée à la personnalité, au vécu, à la culture de l'observateur. Le relief est un élément plus ou moins structurant du paysage. Cinq valeurs peuvent lui être attribuées et conditionnent les usages qu'il en est fait (Figure B-6).

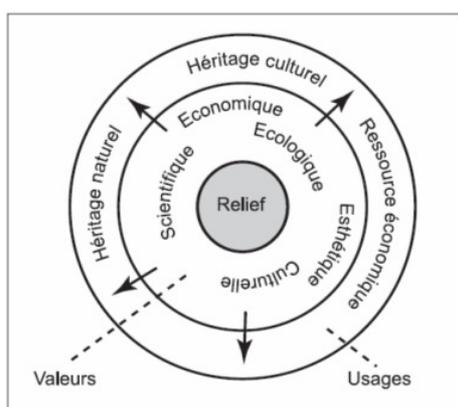


Figure B-6 : Cinq valeurs des reliefs et des formes
[Reynard, 2005]

Le paysage du Marais Breton (Photographie B-1) est le fruit d'une évolution complexe tenant à la fois des raisons morphologiques, géographiques et historiques.



Photographie B-1 : Panorama depuis la table d'orientation de Saint-Cyr-en-Retz (44)

B.1.2.1 Processus morphologiques

Une série de transgressions marines est venue déposer une couche de 5 à 7 mètres d'alluvions marines en fond de baie [Delanoë *et al.*, 1971], à l'origine de la formation du substrat typique du marais : le « bri ». Ce sédiment, contenant le plus souvent des proportions d'argile dépassant les 50 %, est aussi appelé bri flandrien, en référence à la période à laquelle il s'est déposé entre les estuaires de la Gironde et de la Loire, ou encore argile à scrobiculaires [Baudet *et al.*, 1987c].

La mise en place d'un cordon sableux, au Quaternaire, en marge de l'actuelle zone de marais, couplée à une baisse du niveau eustatique, provoquèrent un allongement de l'île de Noirmoutier vers le Sud et une quasi fermeture de la baie de Bourgneuf. Le colmatage naturel fait reculer le rivage vers la mer (cf Annexe 1, p.299), accéléré par les entreprises humaines parties à la conquête des schorres et, finalement, des slikkes. De nos jours, il provient pratiquement des seuls apports de la mer lors du flot, le jusant ne ramenant vers le large qu'une faible partie des dépôts [Mounès, 1974]. La sédimentation sableuse est très faible, il ne se produit que des remaniements temporaires lors des tempêtes. En revanche, les vasières continuent à s'accroître par les apports en suspension d'éléments très fins. Ces derniers sont présents dans des proportions très variables comprises entre 1 % et plus de 50 %, et proviennent essentiellement des anciennes expulsions de l'estuaire de la Loire [Gouleau, 1975]. Le dépôt sédimentaire dans la baie sous l'effet des marées est évalué à 250 000 tonnes par an [Gomez, 1994b]. Les apports dus au Falleron seraient de l'ordre de 1974 tonnes, soit $1/140^{\text{ème}}$ des apports sédimentaires en baie de Bourgneuf par les marées [Besnard, 2012]. A titre de comparaison, la Loire expulse en moyenne 1 million de tonnes par an [LCHF, 1987]. Avec des concentrations en MES pouvant être supérieures à 1 g/L, la baie de Bourgneuf est probablement une des baies

macrotidales⁸ les plus turbides d'Europe avec pour conséquences une limitation de la production primaire de microalgues dans la colonne d'eau et des effets négatifs sur l'alimentation des bivalves [Haure *et al.*, 2008].

Les vasières couvrent la plus grande partie de cette baie, à l'exception de la partie haute des estrans où les sables prédominent. La présence de l'île de Noirmoutier protège la baie des courants du large atlantique, favorisant ainsi cet envasement de la baie, avec un taux d'élévation de 1 cm par an en moyenne [Gouleau, 1975 ; Mounès, 1974]. Des chasses sont effectuées dans les ports afin d'évacuer les matériaux déposés pendant le flot et ainsi éviter leur comblement. Elles sont d'autant plus efficaces que la forme du port est étroite, comme par exemple pour le Port du Collet [Sanchez et Delanoë, 2006]. La hauteur maximale de vase liquide observée au Port du Collet est de 1 m en une marée. Mais la majeure partie ne reste pas, elle est évacuée lors de la marée suivante [Communication orale, CEP 2009].

Outre les aménagements anthropiques détaillés ci-après, le marais est marqué par la présence d'un microrelief nommé gilgai ou mottureau⁹ dans les parcelles. Ce sont des bosses et des creux d'une amplitude de quelques dizaines de centimètres, résultant du gonflement par hydratation et du retrait par dessiccation des sols. Etant liés à la physique des sols, ils réapparaissent systématiquement malgré leur atterrissement [Verger, 1964, 1994].

B.1.2.2 Actions de l'Homme

Le paysage du Marais Breton est en perpétuelle évolution, façonné par la main de l'Homme pour lutter contre son envasement inéluctable et éviter sa fermeture par le développement de friches [Beaulieu *et al.*, 2003]. Actuellement, ce paysage comporte trois zones différentes, vestiges de l'occupation et des activités socio-économiques passées et actuelles (Figure B-7) :

- une zone externe de polders : terres gagnées sur la mer et isolées par endiguement, ne dépassant pas 1 m NGF et pouvant être localement sous le 0 m NGF (communes de Bouin et de Beauvoir-sur-Mer) ;
- une zone médiane de marais gâts (ou marais à bossis) : anciens marais salants à l'abandon, reconnaissables avec ses salines et ses bossis¹⁰ (communes des Moutiers en Retz, de Bourgneuf en Retz, de Bouin et Beauvoir-sur-Mer). Leur altitude varie de 1,20 m NGF dans les salines à 3 ou 4 m NGF sur les bossis ;
- une zone interne de prés bas (marais doux) : terres comprises entre 1 et 2 m NGF à vocation agricole principalement.

⁸ Amplitude moyenne de la marée supérieure à 4 mètres.

⁹ Le terme gilgai provient d'Australie. C'est le plus utilisé dans la littérature anglo-saxonne. Le terme mottureau correspond quant à lui à l'appellation donnée par les Vendéens.

¹⁰ Digue séparant deux salines.

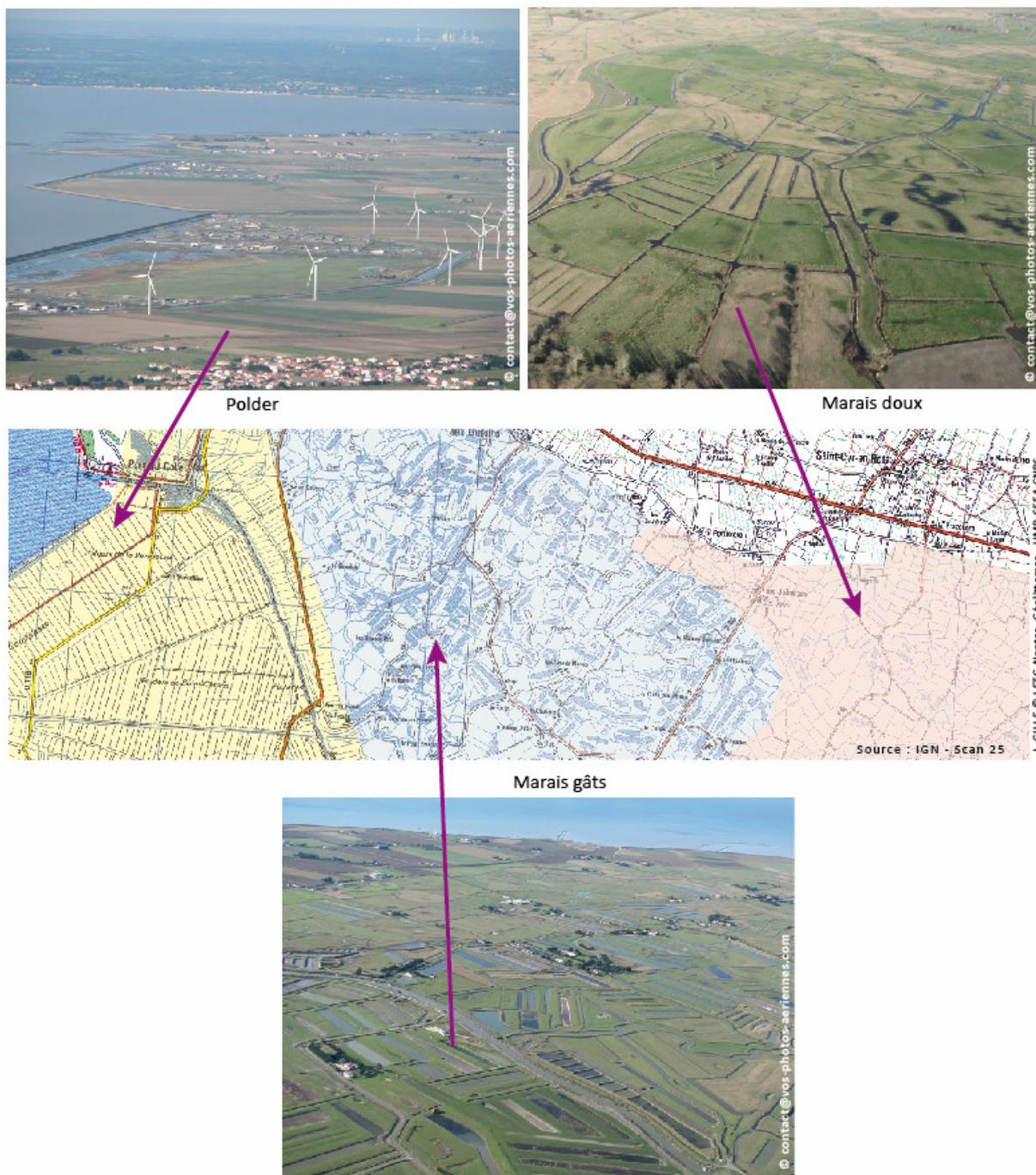


Figure B-7 : Vues aériennes des différents secteurs du Marais Breton

Le colmatage de l'ancien golfe (lieu de l'actuel Marais Breton) était déjà marqué par de vastes schorres aux environs de l'an 1000. Un réseau de drainage fut aménagé pour évacuer les eaux à la mer et la zone des salines fut aménagée du XII^e au XIV^e siècles [Mounès, 1974].

Les premières digues et chaussées furent construites du XI^e au XIV^e siècles (Figure B-8) pour protéger les surfaces conquises sur la mer des vivers (vives mers).

Ces tempêtes d'Ouest, accompagnées de véritables raz de marée, étaient craintes par la population car la mer emportait tout, détruisait les salines, inondait les récoltes, noyait le bétail et pouvait menacer des vies humaines [Luquiau, 1996]. Entre la flèche du Collet au nord et le cordon littoral au sud, le littoral a été endigué sur 26,8 km de longueur (ADBVBB). Parfois rompues, souvent refaites, les prises du marais ont été surtout actives aux XVIII^e et XIX^e siècles.

Ces nouvelles terres gagnées sur la mer ont été scindées et modelées en parcelles afin de construire des bassins. Les sols gorgés d'eau et leur imperméabilité relative nécessitent un drainage de surface. Les premiers dessèchements commencèrent dès le début du XVIII^e siècle [Mounès, 1974], afin d'éviter une submersion durable des eaux d'inondation, nuisible aux activités agricoles. L'irrigation et le drainage sont réalisés d'une part par la mise en place d'un système dense de canaux et de fossés et, d'autre part, par la création d'ouvrages hydrauliques pour chaque parcelle (batardeaux, bondes...), chaque canal ou fossé (vannes, écluses). Ces derniers se jettent alors dans des étiers en zone côtière [Anras *et al.*, 2004]. L'entretien de ce réseau hydrographique se fait par curage. Les dépôts de vase se font de part et d'autre du fossé, créant ainsi un bourrelet, aplani le plus souvent [Anras et des Touches, 2007]. La mise en place de ce système hydrographique complexe s'est réalisée en quatre étapes (Figure B-9).

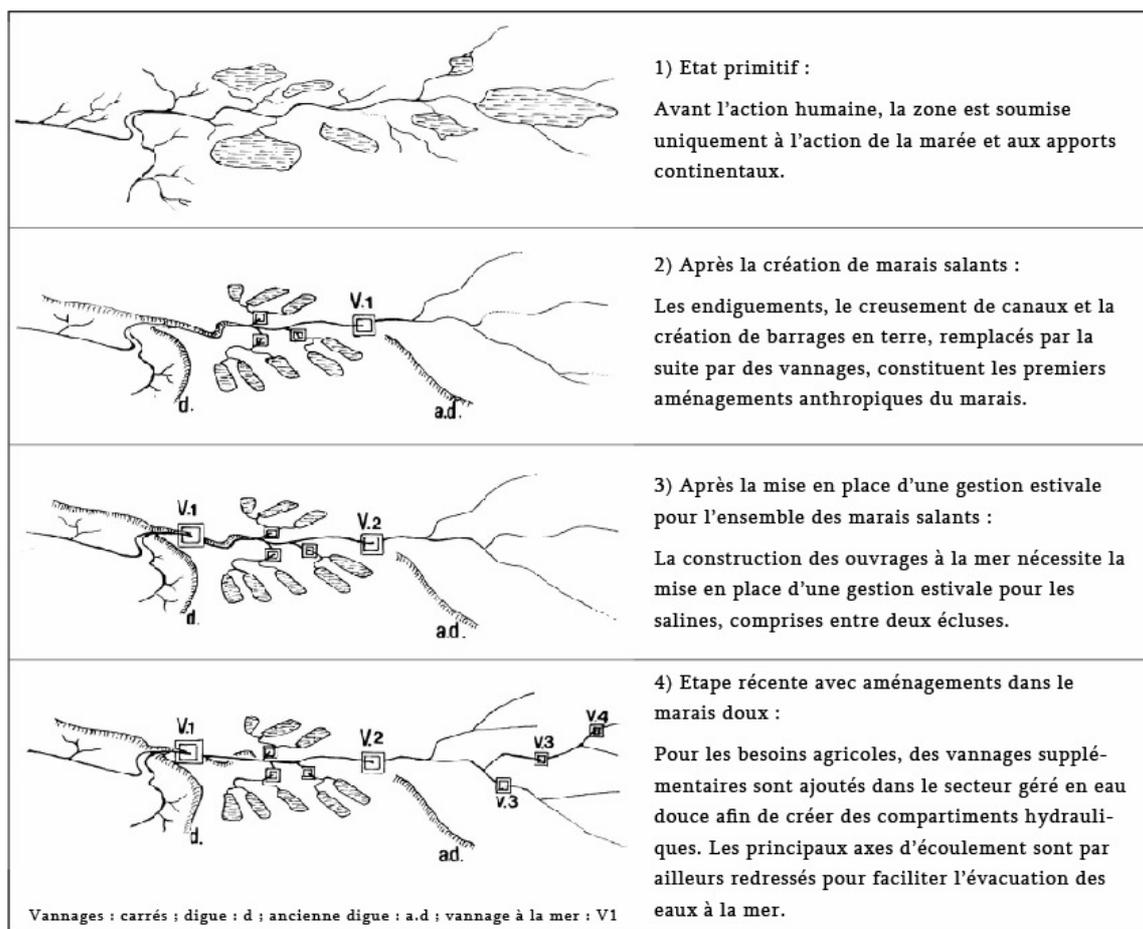


Figure B-9 : Evolution schématique de la gestion hydraulique le long d'un axe hydrographique traversant le marais
(d'après [Baudet et al., 1987c])

Dans les parcelles, des ados¹¹ et des rigoles (Photographie B-2) sont construits afin de favoriser l'évacuation des eaux [Sauveterre, 1980]. Ces aménagements sont majoritairement préférés, car moins onéreux que le drainage souterrain par des tuyaux (Photographie B-3).



Photographie B-2 : Rigole d'une parcelle au niveau du Port du Collet, Les Moutiers-en-Retz (44)



Photographie B-3 : Drains souterrains d'une parcelle, se déversant dans le canal d'amenée, Machecoul (44)

A ce jour, le maintien du paysage actuel du Marais Breton est dû à deux actions incitées par les mesures agroenvironnementales (cf B.2.2.1, p.64): la pratique d'un élevage bovin extensif dans les prairies et la gestion des niveaux d'eau. En leur absence, les prairies évolueraient en friche, avec pour effet une diminution de l'intérêt pour l'accueil de l'avifaune [Le Floch et Candau, 2001 ; Tournade et Bouzillé, 1995].

B.1.2.3 Réseau hydrographique

Le BVBB appartient au district de bassin DCE de l'AELB et plus précisément à la région hydrographique des bassins côtiers du sud de la Loire. Il est couvert par 9 zones hydrographiques (Figure B-10).

Une des caractéristiques communes des marais maritimes est leur densité de drainage élevée, résultant de différents processus et aménagements, comme vu précédemment. Le Marais Breton n'échappe pas à la règle avec ses 6300 km¹², soit une densité assez homogène de 19 km de linéaire / km². A titre de comparaison, la densité est inférieure à 1 km de linéaire / km² pour les bassins versants du BVBB (Figure B-11).

¹¹ Aménagement du sol en vue de son irrigation par ruissellement.

¹² Les fossés le long des routes ne sont pas pris en compte dans ce chiffre car ils ne sont pas cartographiés dans la BD Topo. Leur représentation est faite uniquement sur le cadastre.

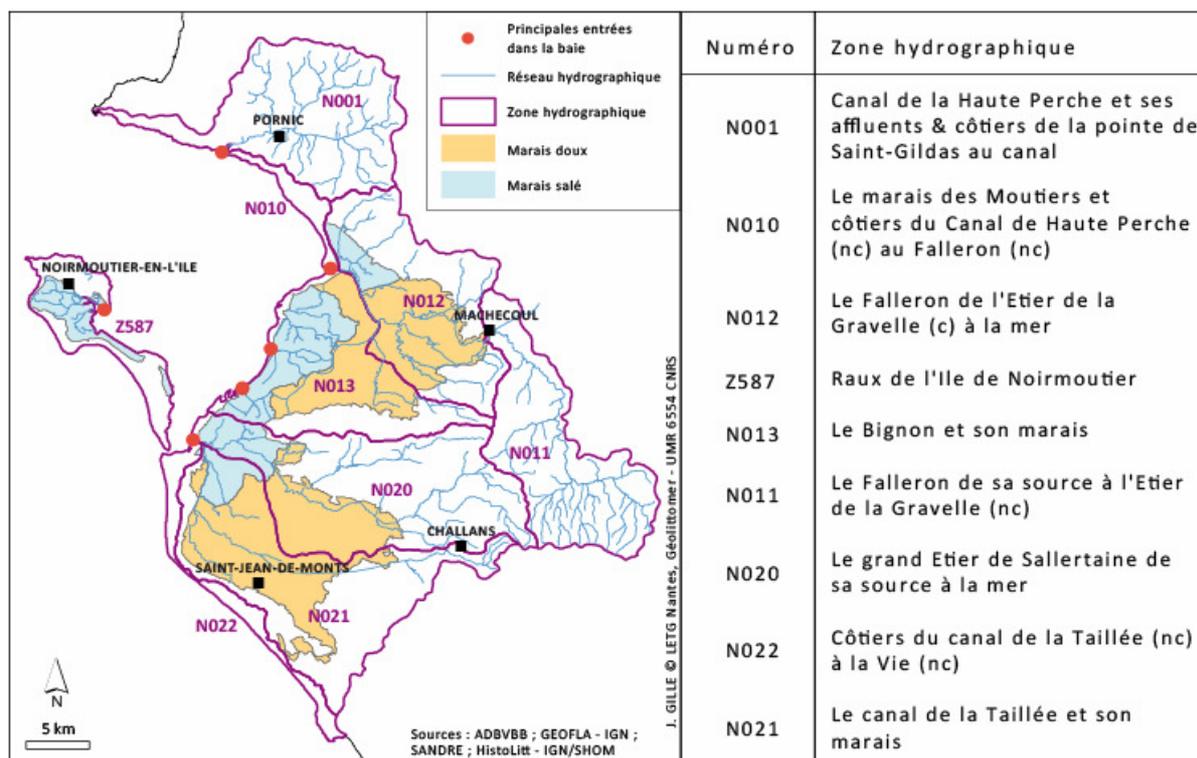


Figure B-10 : Zones hydrographiques du BVBB

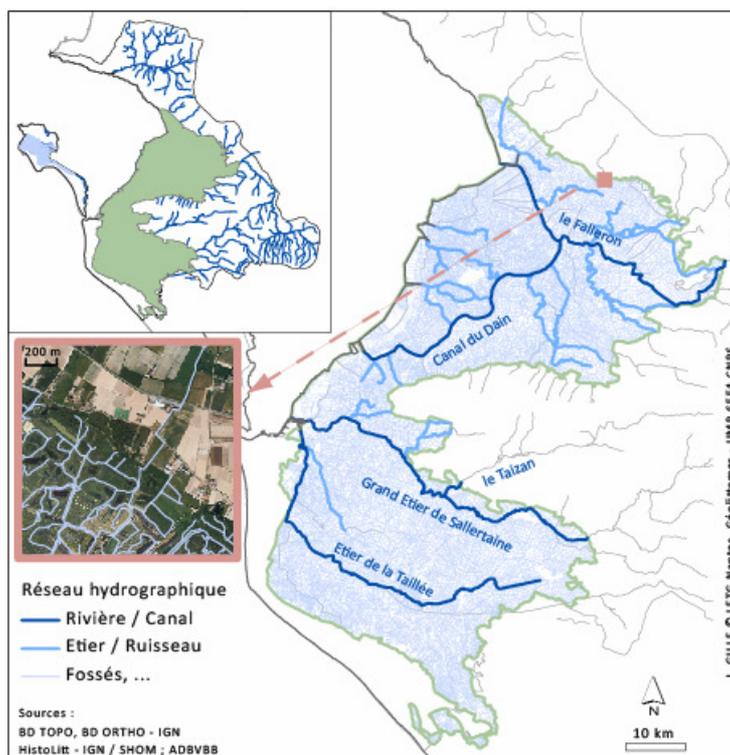


Figure B-11 : Réseau hydrographique du BVBB

De nombreux cours d'eau alimentent le Marais Breton d'Est en Ouest. Le plus important dans la partie nord est le Falleron, qui se jette dans la baie au niveau du Port du Collet. Une partie de ses eaux peut également emprunter le Dain pour déboucher dans la baie au niveau du Port du Bec, selon la gestion hydraulique et la

cote d'eau. Au sud, le Grand Etier de Sallertaine, rejoint par le Taizan, se déverse au niveau de l'ancien polder de la Prise, à cheval sur les communes de Beauvoir-sur-Mer et de La Barre-de-Monts. Cet endroit correspond aussi à l'émissaire des eaux de la Taillée.

Le réseau hydrographique des bassins versants, tracé généré naturellement, est d'ordre 1 à 4 selon la classification de Strahler¹³ et de type dendritique. A son entrée dans le marais, il se désagrège en une toile très ramifiée et maillée, de type polygonal et réticulé, significatif de la forte empreise humaine sur cette zone [PRPC, 1999]. Il est hiérarchisé en trois niveaux (Tableau B-2).

Langage usuel	Langage administratif
primaire	étiers
secondaire	écours
tertiaire	secondaire

Tableau B-2 : Correspondance des trois niveaux de réseau entre le langage usuel et administratif

Le réseau primaire correspond aux rivières et aux axes hydrauliques qui ont un intérêt collectif indiscutable (drainage d'un territoire, soutien d'étiage) et qui assurent l'évacuation des eaux à la mer. Le réseau secondaire, de section moindre, se retrouve lui à l'intérieur du marais, en lien direct avec le réseau primaire. Quant au réseau tertiaire, son rôle hydraulique est localisé autour des parcelles. Il représente la majorité du linéaire total en marais (Tableau B-3).

Réseau	Largeur (m) [Samaali, 1999]	Densité (km/km ²) [CEMAGREF, 1994]
Primaire	10 - 15	1,5
Secondaire	4,5 - 5,5	2,9
Tertiaire	2 - 3,5	18

Tableau B-3 : Dimensions du réseau par type

Ces ordres de grandeur ont été évalués pour le marais de Bourgneuf, soit à l'intérieur du Marais Breton [Samaali, 1999]. Or il est à noter qu'il y a une évolution spatiale de ces caractéristiques. Dans la partie interne du Marais Breton, la surface des parcelles est en moyenne de cinq hectares et la largeur des fossés faible. En se rapprochant de la côte, la superficie des parcelles diminue jusqu'à quelques ares et la largeur des fossés augmente, jusqu'à atteindre son maximum dans le Port du Collet avec 40 m (Hydroconcept, 2008).

¹³ Hiérarchisation de l'ensemble du réseau hydrographique en fonction du nombre de drains qui l'alimentent [Bravard et Petit, 2000].

B.1.3 Climat

B.1.3.1	Précipitations.....	54
B.1.3.2	Température	58
B.1.3.3	Vent	58
B.1.3.4	Ensoleillement.....	59

Le BVBB est soumis à un climat océanique aux hivers doux et pluvieux, avec des étés frais et humides (Figure B-12), similaire à ceux observés dans les marais de la façade atlantique française [Anras, 1997 ; Giraud, 1992 ; Lomakine, 2005 ; Paticat, 2007].

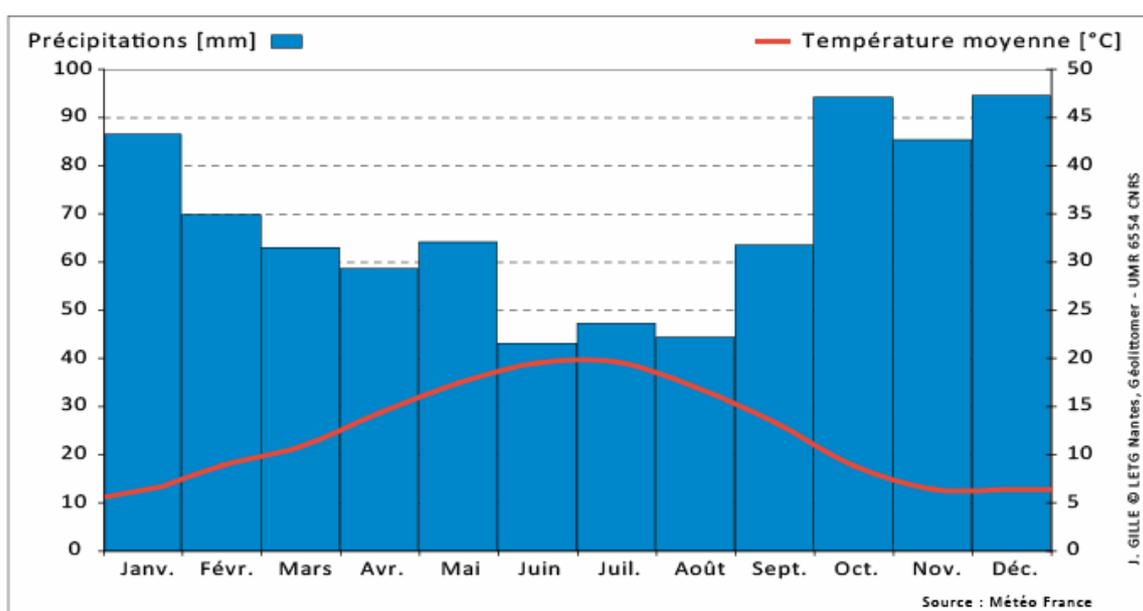


Figure B-12 : Diagramme ombrothermique à la station de Bouguenais (moyenne mensuelle entre 1980 et 2007)

B.1.3.1 Précipitations

Les tendances annuelles sont globalement identiques pour chaque station. Le relief joue un rôle important sur la distribution spatiale des cumuls annuels des précipitations (Figure B-13).

Une double évolution positive est observée :

- d'ouest en est, corrélée à l'éloignement du littoral et à l'apparition des premiers reliefs ;
- du nord au sud pour les stations les plus continentales, liée également à l'élévation de l'altitude.

Les précipitations annuelles les plus élevées sont mesurées au niveau de la station de Palluau et les plus faibles à celles du Perrier. Les stations de Pornic, Noirmoutier-en-l'île et Saint-Jean-de-Monts ont des cumuls annuels proches.

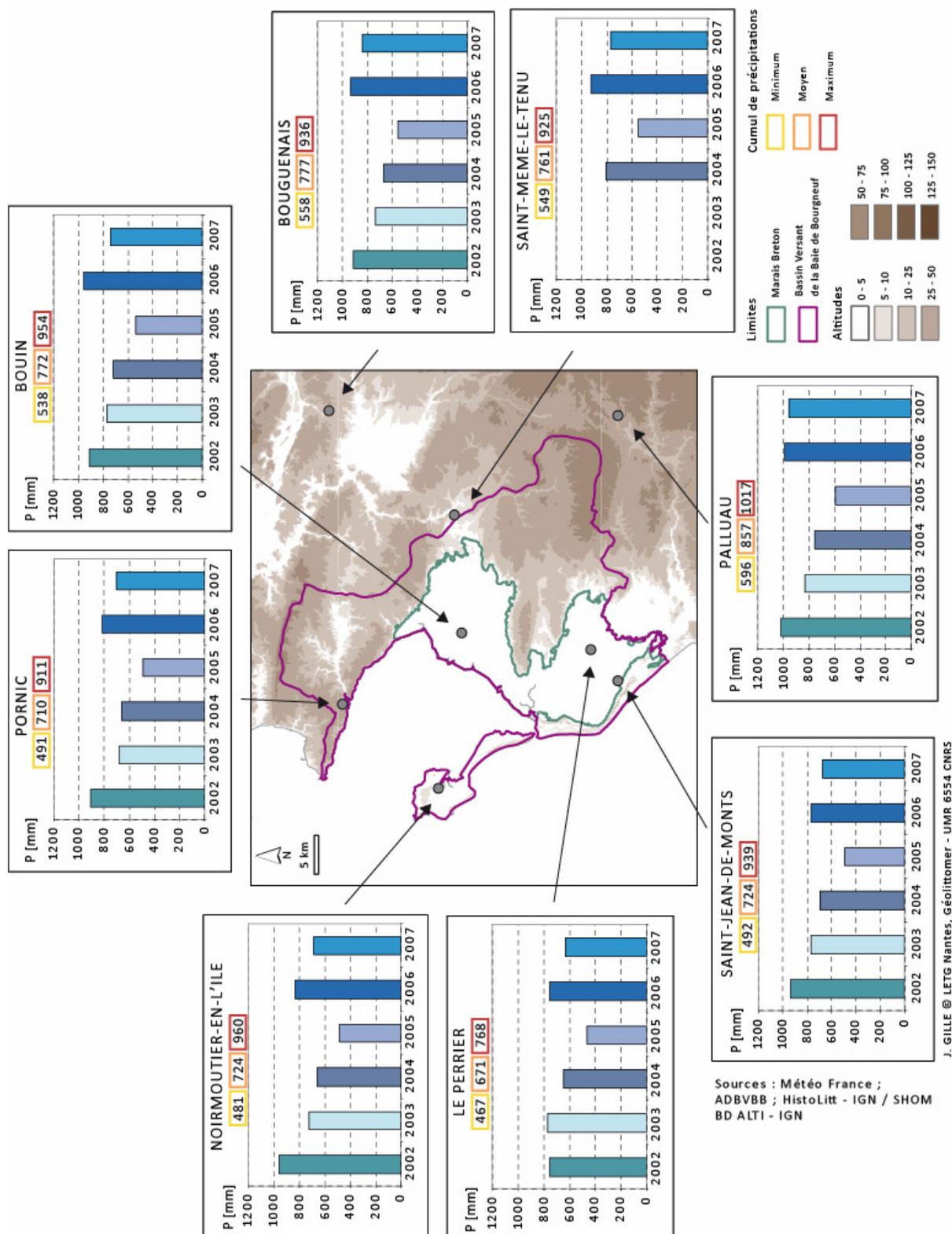


Figure B-13 : Répartition des cumuls annuels des précipitations de 2002 à 2007

Météo France a évalué ainsi que la hauteur de pluie décennale (hauteur de précipitation égale ou dépassée en moyenne une fois par décennie) en un jour varie de 42 à 52 mm sur le BVBB. En deux jours, cette hauteur décennale passe à 56 mm au Nord de l’Ile de Noirmoutier et à 68 mm au Sud-Est du BVBB [Corbin et Baraer, 2003]. En moyenne, il pleut 1,1 fois plus à la station de Bouguenais qu’à celle de Pornic, distante de 38 km de cette dernière et de 31 km de la baie. Les cumuls moyens annuels sont de l’ordre de 815 mm pour la période 1980-2007, avec une valeur minimale de 558 mm (2005) et une maximale de 1087 mm (1999) les années exceptionnelles (Tableau B-4). Les précipitations journalières moyennes fluctuent entre 3,5 et 5,7 mm. L’intensité maximale observée est de 50 mm en 24 heures (6 août 1995). Le nombre de jours pluvieux dans une année varie quant à lui entre 135 (1989) et 242 (2000).

Année	Précipitations totales [mm]	Nombre de jours pluvieux	Intensités journalières [mm]	
			moyennes	maximales
1980	769	175	4,4	35,5
1981	961	180	5,3	46,7
1982	970	188	5,2	45,1
1983	778	170	4,6	36,4
1984	983	173	5,7	28,6
1985	608	167	3,6	26,8
1986	868	200	4,3	41,5
1987	718	159	4,5	36,2
1988	889	167	5,3	32,8
1989	756	135	5,6	31,3
1990	656	145	4,5	28
1991	696	148	4,7	36,6
1992	702	154	4,6	38,6
1993	722	191	3,8	41
1994	1022	182	5,6	31,4
1995	840	160	5,3	50
1996	669	160	4,2	33,2
1997	691	179	3,9	31,8
1998	855	211	4,1	38
1999	1087	224	4,9	35,8
2000	990	242	4,1	30
2001	919	233	3,9	34,2
2002	917	226	4,1	29,8
2003	734	174	4,2	33,6
2004	673	190	3,5	26,2
2005	558	158	3,5	34,2
2006	936	182	5,1	26,6
2007	845	198	4,3	39,6
Moyenne	815	181	4,5	35,0

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Source : Météo France

Tableau B-4 : Caractéristiques annuelles des précipitations à la station de Bouguenais de 1980 à 2007

(en **bleu** : les valeurs maximales, en **violet** : les valeurs minimales)

A l’échelle d’une année, trois périodes se dégagent (Figure B-14) :

- d’octobre à janvier, le nombre moyen de jours de pluie est de 18 jours par mois et les deux tiers ont des précipitations supérieures à 1 mm par jour ;

- de février à mai, il pleut en moyenne 15 jours par mois et les précipitations journalières sont 9 fois supérieures à 1 mm dans le mois ;
- de juin à septembre, le nombre moyen de jours pluvieux est de 12 jours par mois et les précipitations sont en moyenne 7 fois supérieures à 1 mm par jour.

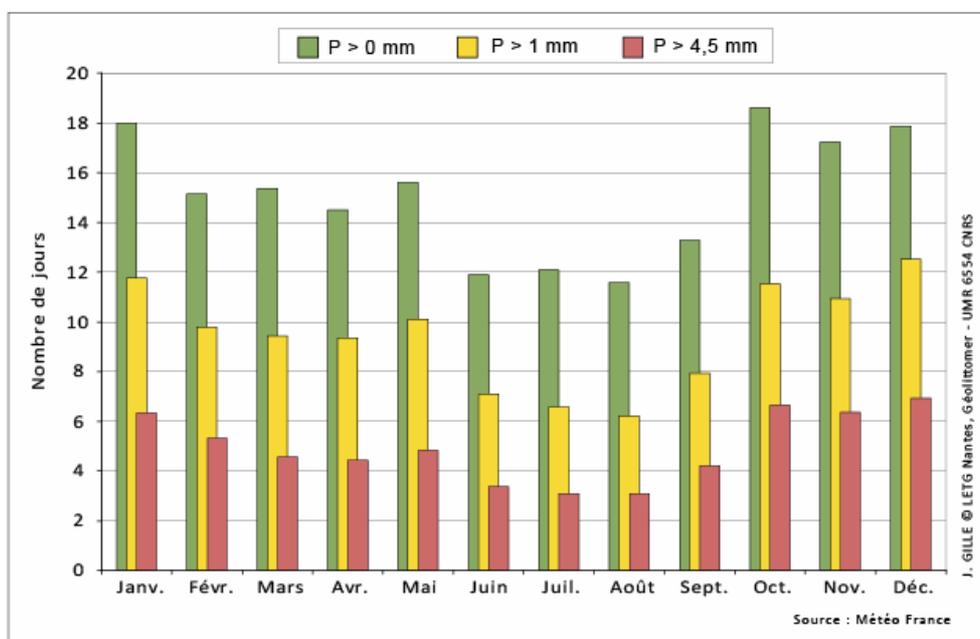


Figure B-14 : Nombre moyen de jours de pluie par mois à la station de Bouguenais de 1980 à 2007

Le nombre moyen de jours de pluie supérieur à 4,5 mm par jour varie entre 3 l'été et 7 en période hivernale. Les intensités journalières y sont élevées et représentent dans l'ensemble 80 % des cumuls mensuels d'eau précitée (Figure B-15) : de 81 à 84 % entre septembre et février, et de 75 à 78 entre mars et août.

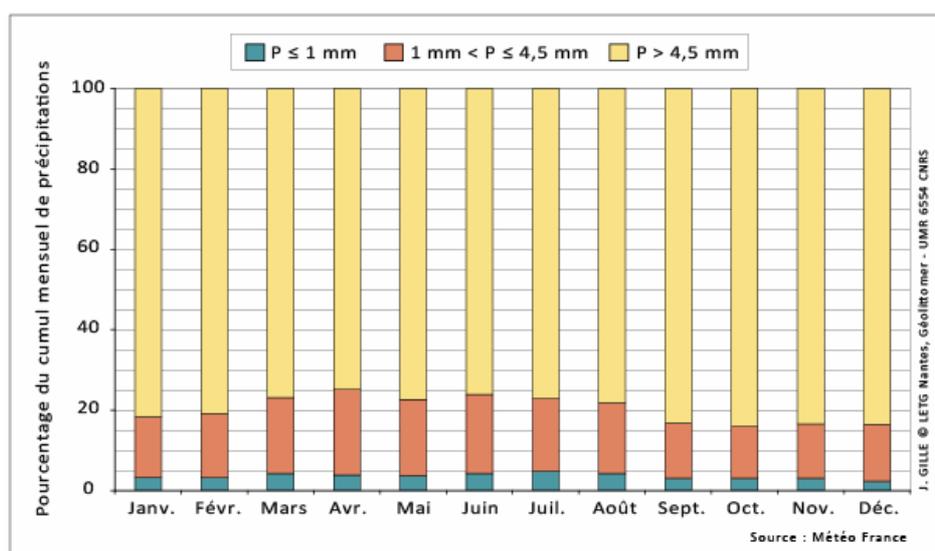


Figure B-15 : Répartition des cumuls mensuels de précipitations en fonction de l'intensité journalière à la station de Bouguenais de 1980 à 2007

B.1.3.2 Température

Tout au long de l'année, les températures sont marquées par l'influence de l'océan. Les hivers sont plutôt doux et les étés tempérés. Les grands froids ou les fortes chaleurs restent exceptionnels.

La température suit très souvent une courbe quotidienne sinusoïdale avec un minimum en fin de nuit et un maximum en début d'après-midi.

Comme pour les précipitations, il y a des différences significatives entre le bord de mer et l'intérieur des terres [Corbin et Baraer, 2003] :

- De septembre à novembre : les températures moyennes du matin atteignent en moyenne 7 à 8 °C dans l'intérieur. Elles sont beaucoup plus élevées sur la côte grâce à la douceur océanique. L'après-midi, la température moyenne est de l'ordre de 16 à 17°C aussi bien pour la côte et que pour l'intérieur.
- De décembre à février : il y a la même répartition qu'en automne, 3 à 4 °C pour les zones les plus froides et 5 à 6 °C pour les plus douces en bord de mer. Dans l'après-midi, ces différences de moyennes s'atténuent avec 8 à 10 °C d'Est en Ouest.
- De mars à mai : les nuits sont plus froides qu'en automne avec en moyenne 6 à 8 °C au petit matin (températures minimales). En revanche, les journées sont plus douces avec 14 à 16 °C du bord de mer aux régions de l'intérieur.
- De juin à août : il y a assez peu de différence la nuit, les côtes restent néanmoins plus douces avec 14 à 15 °C. L'après-midi, la température moyenne atteint parfois 24 °C dans l'intérieur. Le littoral est quant à lui plus tempéré grâce aux brises marines (21 à 22 °C en moyenne sur l'île de Noirmoutier).

B.1.3.3 Vent

Le BVBB est marqué par des coups de vent ou tempêtes de l'automne au printemps. En dehors de ces cas extrêmes, le vent est généralement modéré et régulier tout au long de l'année (Figure B-16).

Il est plus important en bord de mer qu'à l'intérieur des terres. Cette différence est due à deux phénomènes :

- les forces de frottement sont beaucoup moins importantes sur mer que sur terre ;
- les brises de mer¹⁴ estivales soufflent essentiellement près du littoral.

¹⁴ Vents générés par la différence de température entre la mer et la terre. Dès que la température au dessus du sol est suffisante, l'air surchauffé a tendance à s'élever. Il se crée alors un « appel d'air » de la mer vers la terre qu'on appelle brise thermique ou brise de mer. La brise de terre, phénomène inverse de moindre importance, se produit la nuit lorsque la terre est plus froide que la mer.

La vitesse moyenne du vent sur l'année atteint 6,5 m/s sur Noirmoutier contre un peu moins de 4,5 m/s dans l'intérieur des terres. L'ensemble du BVBB possède donc un bon potentiel éolien, proche de celui des pointes du Finistère ou du Cotentin pour Noirmoutier.

Les vents prédominants proviennent :

- d'Ouest à Sud-Ouest, caractéristique du climat océanique de l'Ouest de la France ;
- d'Est ou du Nord-Est, lorsqu'un anticyclone s'installe sur les Iles Britanniques.

Les premiers constituent les vents forts les plus fréquents, tandis que les seconds représentent ceux à vitesses faibles ou modérées [Corbin et Baraer, 2003].

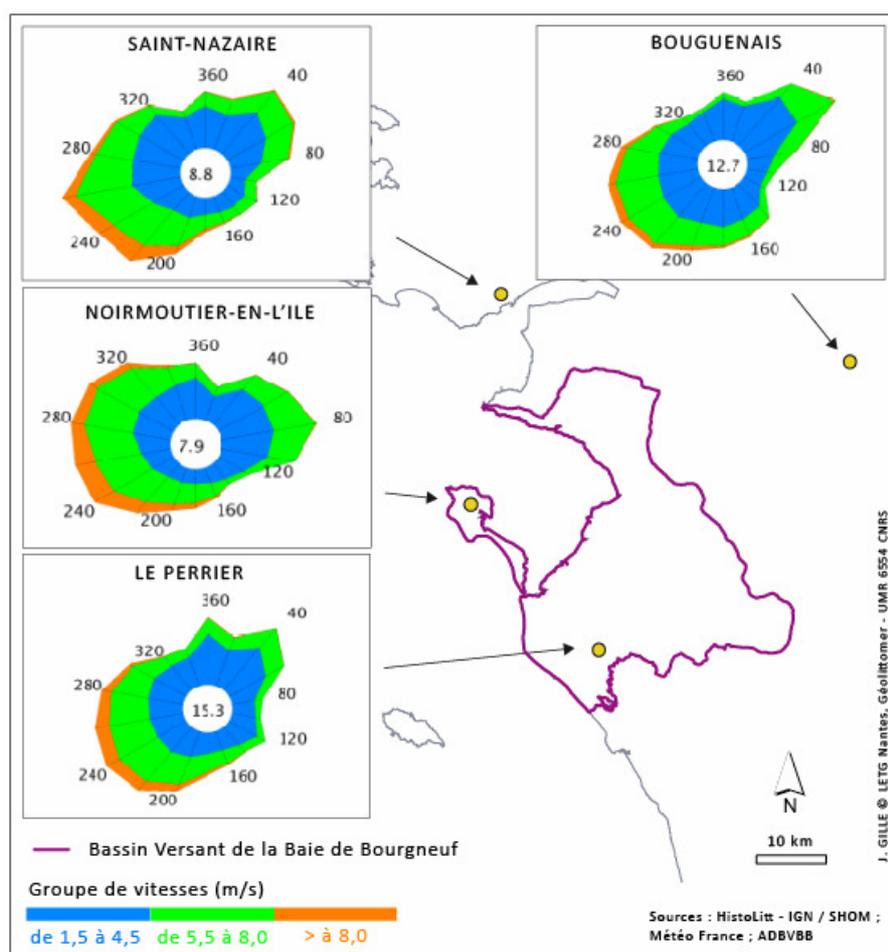


Figure B-16 : Rose des vents annuelles
(d'après [Corbin et Baraer, 2003])

B.1.3.4 Ensoleillement

Météo France ne dispose pas de mesure directe d'insolation sur le BVBB. L'estimation de la durée d'ensoleillement se base donc sur les deux points de mesure significatifs les plus proches (Figure B-17) :

- la Roche-sur-Yon pour les zones les plus à l'Est du BVBB,
- les Sables d'Olonne pour les zones côtières de la baie de Bourgneuf.

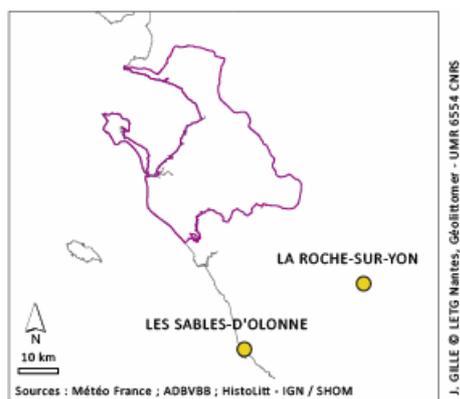


Figure B-17 : Localisation des deux stations de mesure directe d’insolation à proximité du BVBB

La Roche-sur-Yon comptabilise en moyenne 1700 heures de soleil par an, contre 2014 heures aux Sables d’Olonne. En se basant sur ces chiffres et les particularités climatiques de l’île de Noirmoutier, l’insolation annuelle moyenne sur cette dernière devrait avoisiner 2100 heures. Cette moyenne est comparable avec celles de Toulouse et Bordeaux (voisin de 2000 heures) ou même de Carcassonne (2140 heures), mais loin derrière celles de Marseille avec ces 2800 heures [Corbin et Baraer, 2003].

B.2 Usages et pressions

B.2.1	Occupation du sol.....	61
B.2.2	Activités socio-économiques	64
B.2.3	Zones protégées	75
B.2.4	Harmonisation des usages.....	77

Dans les sociétés « anciennes », avant l'industrialisation, la mer et les littoraux étaient considérés comme répulsifs et dangereux, hormis pour les peuples de la mer (Grecs, Scandinaves, Bretons, ...). Seuls les gens de mers (pêcheurs, sauveteurs, gardien de phare) y vivaient au quotidien. Avec l'avènement d'une société dite « de loisirs », caractérisée par l'allongement du temps libre, la généralisation progressive des pratiques touristiques et la recherche du soleil et de la plage, les mentalités évoluèrent. La relation des Hommes à ces zones changea. Désormais, la mer représente un élément important de la qualité de vie [Peron et Rieucan, 1996]. A ce jour, le littoral est le lieu de nombreux usages qui peuvent parfois rentrer en conflit. Afin de mieux comprendre leurs origines et leurs impacts sur le marais, il convient dans un premier temps d'étudier les activités socio-économiques qui s'y développent, de dresser un inventaire des différents zonages de protection avant d'aborder les conflits d'usages qui peuvent exister.

B.2.1 Occupation du sol

La population permanente du BVBB est de 136 933 habitants, dont 46 % sont regroupés sur 6 communes. Ces communes se situent en périphérie du Marais Breton. Ce territoire est faiblement peuplé, sa densité de population oscille entre 24 et 430 habitants par km² (Figure B-18).

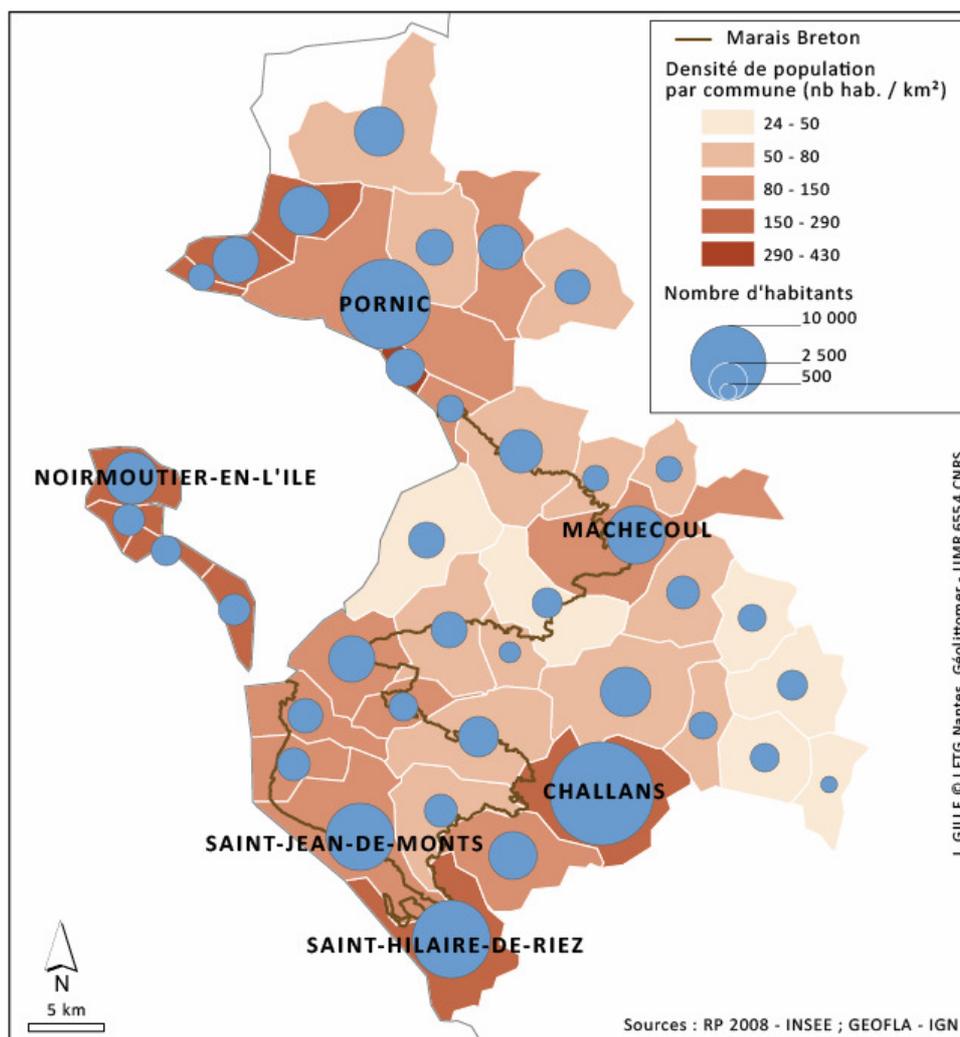


Figure B-18 : Répartition de la population sur le BVBB

L'occupation du sol du BVBB est consacrée à 80 % à l'agriculture (Figure B-19), dont 40 % en prairies, 30 % en terres arables et 30 % en zones agricoles hétérogènes.

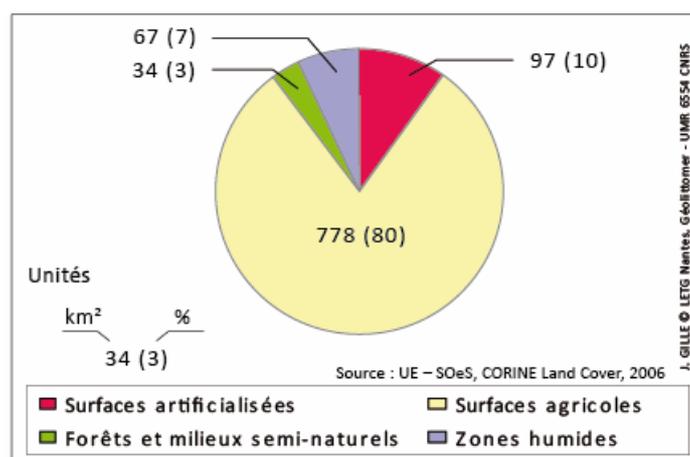


Figure B-19 : Principaux types d'occupation du sol¹⁵ du BVBB

¹⁵ Niveau 1 de l'occupation du sol dans la BD CORINE Land Cover

Les 10 % de territoires artificialisés se situent majoritairement sur le littoral sableux et autour des principales communes (83% de surfaces urbanisées, 10 % d'espaces verts artificialisés, non agricoles, 6 % de zones industrielles et commerciales et 1 % de mines, décharges et chantiers). Les espaces forestiers sont constitués principalement des forêts domaniales, implantées sur les cordons dunaires. Enfin, les zones humides se retrouvent sur les secteurs de marais, à l'interface de la zone terrestre et maritime (Figure B-20).

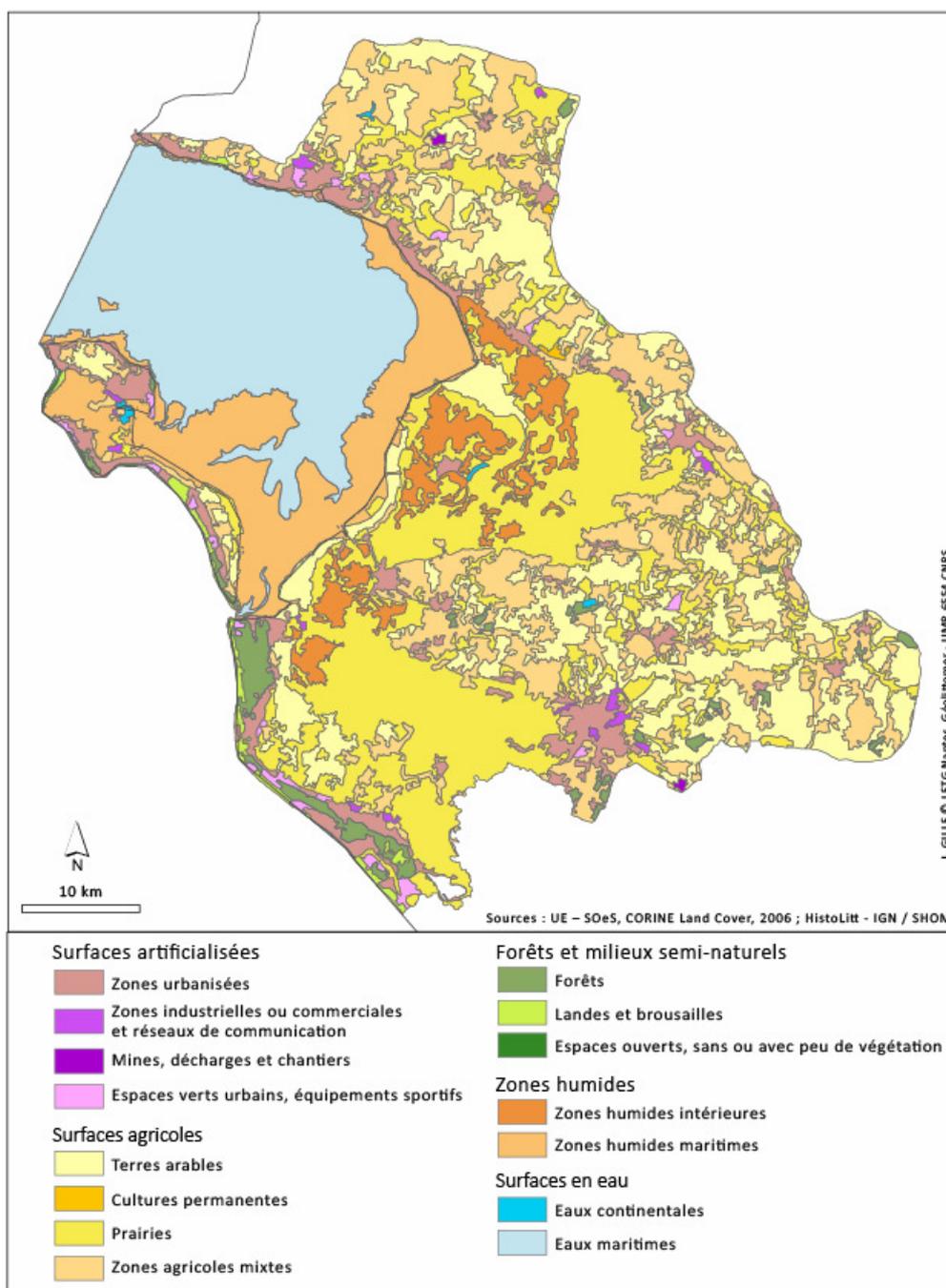


Figure B-20 : Occupation du sol du BVBB

Leur faible part d'occupation tient de la méthodologie utilisée pour leur inventaire. Une meilleure évaluation devrait en être faite dans le cadre de l'inventaire des zones

humides de chaque commune, mis en place par la CLE, conformément aux attentes du SDAGE Loire-Bretagne 2009-2015 [ADBVB, 2011].

B.2.2 Activités socio-économiques

B.2.2.1	Agriculture.....	64
B.2.2.2	Cultures marines.....	67
B.2.2.3	Ports et pêches.....	72
B.2.2.4	Tourisme.....	74

Les principales activités économiques présentes sur le BVBB sont : l'agriculture, les cultures marines, la pêche et le tourisme.

B.2.2.1 Agriculture

L'activité agricole joue un rôle important dans l'économie du BVBB. Elle représentait en 1999 l'une des trois premières sources d'emploi pour 29 communes (RP 1999 – INSEE). 1867 exploitations agricoles sont recensées, employant 3066 unités de travail annuel (équivalents temps plein). La surface agricole utile (SAU) est voisine¹⁶ de 800 km². Les principaux usages en sont la production fourragère, les terres labourables, l'élevage de bovins et les prairies permanentes (Figure B-21).

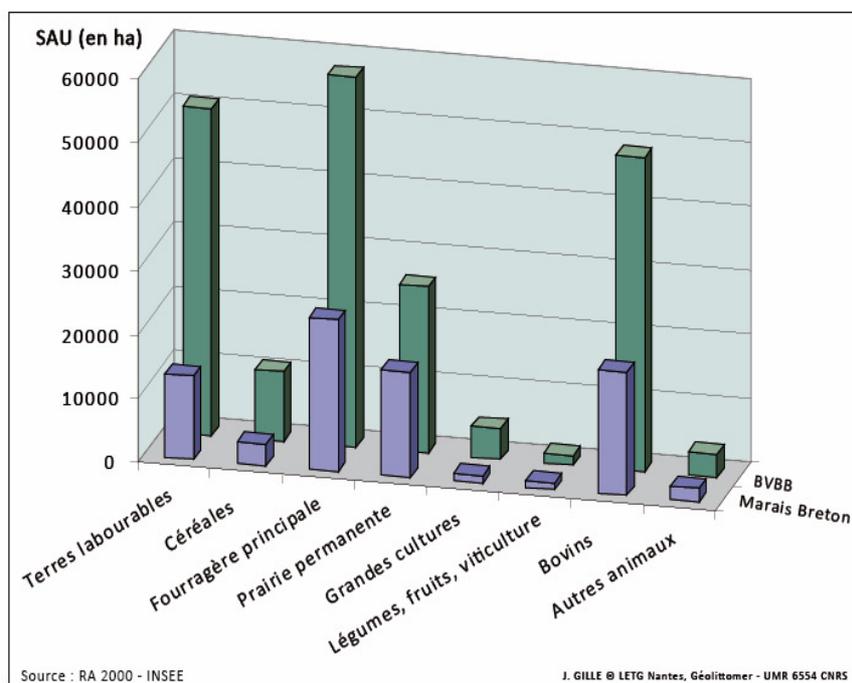


Figure B-21 : Répartition de la surface agricole utile

¹⁶ Les données de SAU pour les communes de l'Epine et de Préfailles ne sont pas communiquées, au titre du secret statistique.

15 communes ont au minimum une superficie de 17 % de leur territoire dans le Marais Breton. Le recensement agricole étant à la commune, la SAU de certains usages dans les communes en périphérie du Marais Breton sont surestimées, comme pour les terres labourables.

L'orientation technico-économique des exploitations agricoles (OTEX) du Marais Breton permet de distinguer [Coïc, 2009] :

- la partie Est où le « polyélevage à orientation granivores » prédomine ;
- la partie Ouest où se répartissent des « polycultures », des « cultures générales » ainsi que des exploitations en « polyélevage à orientation herbivores » et des « bovins Lait, élevage et viande » ;
- l'extrême Nord-Est concerné principalement par les « cultures de fleurs et horticoles diverses ».

La mécanisation et l'intensification agricole comme sur les coteaux ne sont pas envisageables dans le marais. Les difficultés sont dues aux caractéristiques physiques du marais [Sauveterre, 1980] : l'humidité et la nature des sols¹⁷, la densité du réseau hydrographique et le microrelief. Les activités agricoles sont donc orientées principalement vers le fourrage, l'herbage (Photographie B-4), supports de l'élevage de bovins, activités traditionnelles du Marais Breton (Photographie B-5).



Photographie B-4 : Prairie fauchée



Photographie B-5 : Pâturage de bovins

Près de 90 % des exploitations ont au moins un atelier bovin et avant tout du bovin viande. La diminution des pratiques de pâturage observée au profit de la fauche est préjudiciable pour la valeur écologique du Marais Breton. Elle entraîne :

- une banalisation du milieu prairial avec une régression de l'habitat hygrophile¹⁸,

¹⁷ Souvent très argileux.

¹⁸ Humide.

- la réduction des espaces de nidification pour les limicoles nicheurs,
- le non entretien du réseau hydraulique,
- le non entretien voir la disparition des zones d'eau douces temporaires essentielles à la reproduction des amphibiens.

Afin de préserver la biodiversité sur les prairies naturelles, le pâturage des parcelles et une gestion différenciée des niveaux d'eau dans les marais doux et salé sont favorisés à l'aide de Mesures Agro-Environnementales (MAE) [DRAAF PdL, 2010]. La première fut l'Opération Groupée d'Aménagement Foncier (OGAF) environnement. Elle a été mise en place en 1992 et 1993 sur une superficie de 138,80 km². Elle fut poursuivie par les Opérations Locales Agro-Environnementales (OLAE) en 1998 et 1999 sur une superficie de 146,86 km² [Beaulieu, 2003], avec pour contraintes techniques : la limitation de la pression de pâturage, la réduction des doses de fertilisants, le maintien du caractère humide des prairies, le décalage des dates de fauche et le maintien des éléments paysagers [Candau et Le Floch, 2000]. Vinrent ensuite les Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE) entre 1999 et 2002, les Engagements Agro-Environnementaux (EAE) en 2003, le Contrat d'Agriculture Durable (CAD) entre 2004 et 2006, et pour finir les Mesures Agro-Environnementales Territorialisées (MAET) [Coïc, 2009]. A ce jour, le territoire retenu pour la mise en œuvre de ces mesures correspond au périmètre du site Natura 2000 "Marais Breton, Baie de Bourgneuf, Ile de Noirmoutier, et forêt de Monts", avec quelques extensions sur des zones connexes (Tableau B-5).

Type d'habitat visé	Code de la mesure	Objectifs de la mesure	Montant de l'aide
Prairies humides – marais doux	PL_BRET_HE1	Exploitation par fauche ou pâturage, (si fauche, à partir du 1er juin), fertilisation azotée totale limitée à 60 U/ha/an	150 €/ha/an
Prairies humides – marais salés	PL_BRET_HE2	Exploitation par fauche ou pâturage, (si fauche, à partir du 25 mai), fertilisation azotée totale limitée à 60 U/ha/an	150 €/ha/an
Prairies humides à forte valeur biologique – marais doux	PL_BRET_HE3	Exploitation par fauche ou pâturage, (si fauche, à partir du 10 juin), pâturage interdit du 01 janvier au 01 mars, fertilisation interdite	214 €/ha/an
Prairies humides à forte valeur biologique – marais salés	PL_BRET_HE4	Exploitation par fauche ou pâturage, (si fauche, à partir du 05 juin), pâturage interdit du 01 janvier au 01 mars, fertilisation interdite	214 €/ha/an
Marais salants	PL_BRET_SE1	Gestion individuelle des marais salants pour favoriser la biodiversité	450 €/ha/an

Tableau B-5 : Listes des MAE proposées sur le territoire
[DRAAF PdL, 2010]

En sus des objectifs environnements initiaux, les MAE ont acquis au cours du temps d'autres fonctions [Coïc, 2009] :

- augmentation de l'attractivité du milieu,
- traduction des enjeux et des problèmes locaux,
- entretien du marais,
- aide à la désintensification de certaines exploitations,
- création d'une dynamique de territoire.

L'objectif est de stabiliser les surfaces en herbe, en particulier dans les zones menacées de déprise agricole, et d'y maintenir des pratiques respectueuses de l'environnement. Le dispositif s'appuie sur un chargement limité à 1,4 UGB/ha, sur la présence d'éléments de biodiversité et sur une gestion économe en intrants. La conversion en UGB pour les bovins correspond au taux suivant : un bovin de 6 mois à 2 ans = 0,6 UGB ; un bovin de plus de 2 ans ou vache ayant vêlé = 1 UGB [MAP, 2007].

Sur les coteaux, l'agriculture est plus riche, plus tournée vers les marchés, aux productions précoces et diversifiées [ADBVB, 2004] : l'élevage de volailles hors-sol, les céréales, l'horticulture et le maraîchage. Les températures douces en hiver permettent la production de légumes primeur au printemps [Miossec, 2004]. Les productions dominantes sont la mâche et le poireau sur le continent, et la pomme de terre sur l'île de Noirmoutier. Le chiffre d'affaires pour l'économie maraîchère est estimé à 60 millions d'euros [ADBVB, 2006a]. D'après le recensement parcellaire graphique de 2004 à 2009, la tendance est à une baisse de l'élevage et à une augmentation des cultures, notamment des céréales.

B.2.2.2 Cultures marines

La multiplicité des formes littorales présentes sur les côtes atlantiques de la France ont permis le développement des cultures marines : la saliculture, l'ostréiculture (huîtres), la mytiliculture (moules), la vénériculture (palourdes), la pisciculture ou encore l'algoculture. Ces ressources marines côtières constituent une richesse pour la Région des Pays de la Loire. Les autorités locales tendent à favoriser une activité qui permet une réutilisation des marais salants en voie d'abandon et le maintien des populations dans des communes en difficulté. L'estran est quant à lui occupé par l'implantation de parcs à huîtres et de bouchots pour les moules (Photographie B-6).



Photographie B-6 : Parcs conchylicoles de la Coupelasse, à marée basse

a) Saliculture

Si la saliculture est une activité mineure du Marais Breton à ce jour, cette activité ancestrale du marais salé fit de l'île de Noirmoutier et de la Baie de Bourgneuf des pôles très actifs de production et de commercialisation du sel par le passé. Les premières traces de production de sel remontent à la fin de l'Âge du Bronze ou du début du premier Âge du Fer [Forré et Ménanteau, 2007]. Mais ce n'est qu'au cours du Haut Moyen-Âge que le marais salé fut aménagé et que les premières salines apparurent. Cette activité connut un véritable essor dans la baie jusqu'à son apogée, aux XIV^{ème} et XV^{ème} siècles [Alonso Villalobos et Ménanteau, 2006]. Au cours des siècles suivants, le déclin progressif le long de la façade atlantique de la saliculture est attribué à celui de la pêche à la morue, à la concurrence des sels industriels de l'Est et du Midi, ainsi qu'aux nouvelles techniques de conservation des aliments [Beaulieu *et al.*, 2003]. A ces raisons vinrent s'ajouter, plus localement, l'envasement du réseau hydrographique et la construction d'endigements le long du Falleron et du Dain [Forré et Ménanteau, 2007]. Depuis le début des années 90, un regain de l'activité est constaté, particulièrement sur l'île de Noirmoutier avec, à ce jour, 3800 œillets exploités par 100 producteurs. La marge de progression y reste importante encore puisque sa capacité de production maximale est estimée à plus de 6000 œillets. Sur le continent, l'activité tend à se développer depuis l'an 2000 avec l'installation de jeunes paludiers (13) sur les communes de Beauvoir-sur-Mer et Bouin. Ils utilisent 230 œillets pour leur production [ADBVBB, 2004].

Le sel se ramasse de juin à septembre. En moyenne, une tonne est produite par œillet et par an. En dehors de cette période, le marais est noyé de septembre à fin février pour le protéger de la pluie et du gel, puis de mars à mai, la saline est asséchée pour être entretenue et rénovée en vue du prochain cycle de production [Beaulieu *et al.*, 2003].

b) Conchyliculture

La conchyliculture constitue une activité importante pour la baie de Bourgneuf. Sa masse d'eau bénéficie d'une courantologie calme, ce qui en fait une zone abritée, privilégiée pour l'exploitation conchylicole [Le Pimpec, 2004]. L'implantation de la conchyliculture dans cette zone, à partir de 1946, est due à des conchyliculteurs charentais issus du bassin de Marennes-Oléron, en quête de bassins vierges d'exploitation [Gomez, 1994b ; Robert, 1973].

C'est l'ostréiculture qui y est prépondérante (troisième bassin producteur d'huîtres) avec la culture de l'huître creuse portugaise, *Crassostrea angulata*, dans premier temps jusqu'en 1971¹⁹, puis ensuite de l'huître creuse japonaise, *Crassostrea gigas* [Gomez, 1994b].

¹⁹ Date de sa disparition totale à cause d'une maladie.

Suite au déclin de la saliculture, les salines les mieux alimentées en eau salée sont remodelées en claires ostréicoles, offrant ainsi de multiples services à l'ostréiculture [Beaulieu *et al.*, 2003] :

- affinage des huîtres pendant des périodes variant de quelques semaines à plusieurs mois (fines de claires et spéciales de claires) ;
- stockage de la production ;
- verdissement en claires grâce à la navicule bleue, algue unicellulaire dont l'apparition est chaque année aléatoire ;
- prégrossissement en claire : les huîtres effectuent la première partie de leur croissance en marais.

Actuellement, la baie de Bourgneuf est la principale zone d'exploitation conchylicole dans la région Pays de la Loire, avec près de 260 entreprises, essentiellement familiales. Une centaine d'entre elles sont regroupées au niveau de la zone aquacole du Dain, sur la commune de Bouin. L'ostréiculture y est présente sous deux facettes : une activité traditionnelle et une autre plus novatrice avec les écloséries / nurseries [ADBVB, 2011]. Ces dernières connaissent un essor rapide, plaçant ainsi la Région des Pays de la Loire en position de leader national (70 %) et notamment le secteur de Bouin et de Beauvoir sur Mer (80 % de la production régionale, 20 entreprises sur un total de 29). En 2007, 1,1 milliard de naissains prégrossis de bivalves sont produits. Le potentiel de production est d'un peu plus de 8300 tubes tamis. Son développement maximal est estimé à 12 000 tubes tamis [SMIDAP, 2008]. L'activité traditionnelle a permis quant à elle de vendre 13 500 tonnes pour un chiffre d'affaires autour de 43 millions d'euros en 2007²⁰.

Malgré cela, ce domaine d'activité est en crise depuis de nombreuses années localement avec une moins bonne croissance des huîtres, un ensablement de la baie et une forte délocalisation de la production vers la Bretagne [Chancel-Lesueur et Samyn, 2009]. La diminution du nombre d'exploitants pose également problème localement. Le remplacement partiel des professionnels partant à la retraite semble être dû, plus qu'ailleurs, aux difficultés de moderniser les pratiques [ADBVB, 2006a]. La situation ne s'arrangea pas avec les derniers épisodes estivaux, d'ampleur nationale, de mortalité des naissains (Figure B-22).

²⁰ D'après les enquêtes menées par L. Le Grel dans le cadre du projet GERRICO.

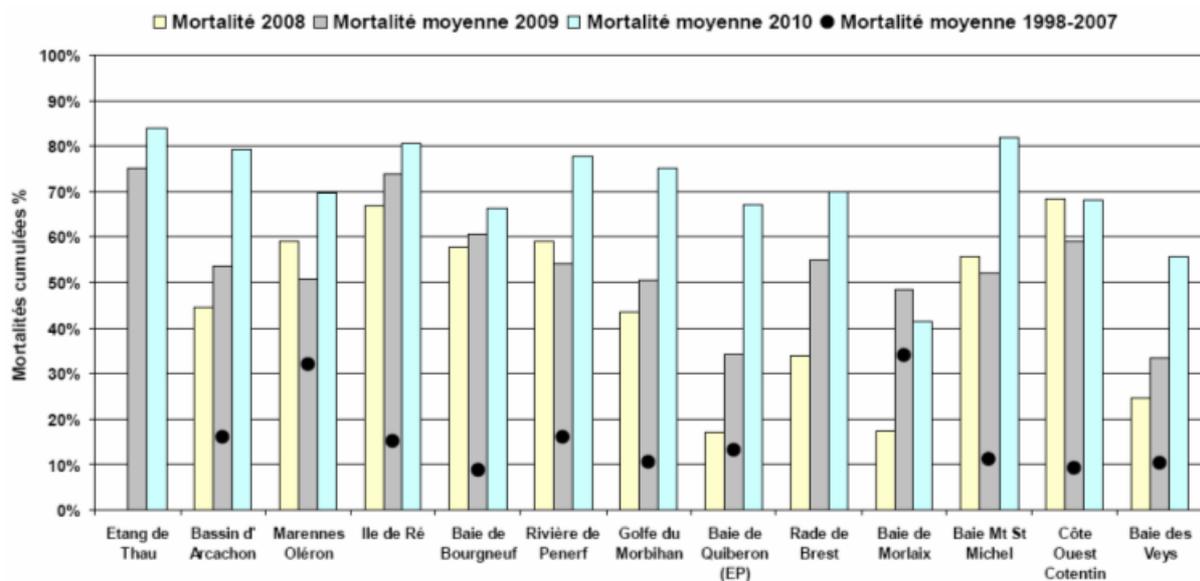


Figure B-22 : Mortalité moyenne des naissains pour l'ensemble des bassins ostréicoles français
[Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011]

Ces mortalités ont pu aller jusqu'à plus de 80% en Baie de Bourgneuf en période estivale (Figure B-23).

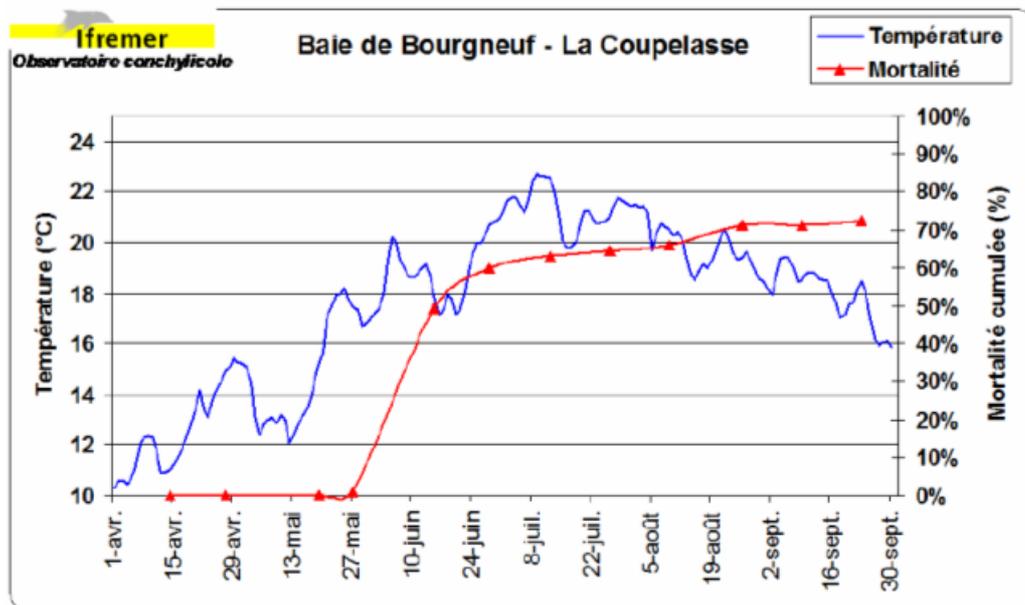


Figure B-23 : Évolution de la mortalité du naissain de captage et de la température de l'eau en baie de Bourgneuf en 2010
[Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011]

Des tensions apparaissent entre les différents professionnels de l'ostréiculture. En effet, certains avancent l'hypothèse que le dépassement de la capacité trophique est responsable de ces mortalités [Barillé-Boyer *et al.*, 1997]. D'autres pensent que les écloséries favorisent la surproduction sur parcs et une désorganisation du marché avec l'utilisation des huîtres triploïdes. De plus, ils mettent en cause la responsabilité

sanitaire des écloséries au sujet des deux phénomènes d'épizootie [ADBVB, 2011]. Les dernières recherches de l'Ifremer, basées sur des analyses épidémiologiques, semblent invalider ces thèses en partie. Elles montrent clairement que le virus OsHV1 μ var, associé aux bactéries du genre *Vibrio splendidus*, joue un rôle prépondérant dans l'explication des mortalités 2010 [Cochennec-Laureau *et al.*, 2011].

La mytiliculture, bien que secondaire, demeure une activité bien installée, principalement au Nord de la baie et à Noirmoutier. La production annuelle de moules est d'environ 1500 à 2000 tonnes, soit environ 2,5 % de la production nationale. La baie constitue un centre de captage naturel réputé pour la moule commune, *Mytilus edulis*. C'est ainsi le deuxième bassin français pour la fourniture de moules pour le reparcage et de naissains sauvages à mettre en boudins. Deux autres espèces font également l'objet d'un élevage sur le territoire : l'huître plate, *Ostrea edulis* (prégrossissement) et l'ormeau, *Haliotis tuberculata* (écloserie-nurserie) [ADBVB, 2011].

Historiquement, la profession conchylicole possède une conscience du risque ancrée dans ses pratiques. L'élevage de coquillages est une activité de production en milieu ouvert, qui est fortement exposé aux phénomènes altérant la qualité de l'eau (toxines, espèces invasives, pollution). Son histoire est rythmée par des crises plus ou moins profondes (Tableau B-6).

Période	Événements
1920	Mortalité massive de l'huître plate (Bretagne)
1971	Disparition des huîtres portugaises (National)
Années 1970	Forte baisse de productivité des bassins ostréicoles (National)
1987	Épizootie d'origine bactérienne de la palourde (National)
1978, 1999 et 2003	Pollutions par hydrocarbure Amoco Cadiz, Erika et Prestige (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes, Aquitaine)
2008 et 2009	Fortes mortalités inexplicables des huîtres juvéniles (National)
1999 et 2010	Tempêtes Lothar et Xynthia (Régions côte atlantique)

Tableau B-6 : Principales crises enregistrées par le secteur conchylicole
[Le Bihan et Pardo, 2012]

Ces multiples crises tendent à la mutation du secteur conchylicole. De nouvelles pratiques sont à l'étude comme la délocalisation d'une partie de leur production vers le large ou dans d'autres bassins conchylicoles nationaux voire étrangers plus favorables [Mille et Le Bihan, 2011].

c) *Activités aquacoles*

D'autres activités aquacoles se développent et se diversifient sur le littoral terrestre. Deux piscicultures intensives de turbots sont installées sur l'île de Noirmoutier. Elles emploient une centaine de personnes. La production de micro-algues destinées notamment à la consommation humaine (*Ondettella aurita*) est localisée sur le polder de Bouin. Enfin, la pénéculture est pratiquée comme un complément de revenus [ADBVB, 2011]. L'aquaculture extensive de poissons en marais est en net déclin et

reste marginale de nos jours, même si par le passé, elle a occupé une place importante avec la reconversion des marais salants en marais à poissons [Gomez, 1994b]. Le principe est de faire pénétrer les alevins dans le marais, de les laisser grossir en se nourrissant des proies trouvées dans le milieu, avant de les pêcher [Beaulieu *et al.*, 2003]. Dans les réseaux aquatiques en marais doux, 25 à 30 espèces sont répertoriées en général [Callens et Miossec, 2003]. Les espèces pêchées sont l'anguille, le bar, le mullet, la daurade et les poissons plats (sole, turbot, carrelet) [Beaulieu *et al.*, 2003].

B.2.2.3 Ports et pêches

La baie de Bourgneuf représente une zone particulièrement riche au plan halieutique. Elle constitue un espace privilégié de frayères et de nourriceries pour des espèces benthiques et démersales compte-tenu de la faible profondeur de ce secteur côtier, de la diversité sédimentaire de ses fonds, de son abriement aux courants marins du large et de l'enrichissement trophique issu de la proximité du continent [Desaunay *et al.*, 1981 ; Thimel, 1994].

La pêche côtière et la petite pêche²¹ sont pratiquées en baie de Bourgneuf par de petites unités polyvalentes (tamis à civelles, chalut à poissons, chalut à crevette grise, casiers, palangres, filets...) [Gomez, 1994b]. Les principaux ports de pêche sont : l'Herbaudière (à Noirmoutier-en-l'île), Pornic, Beauvoir-sur-Mer et Bouin.

En 2010, la flottille du port de l'Herbaudière est de 100 navires : 70 basés sur l'île de Noirmoutier et 30 à l'Epoids (Port du Bec), vendant régulièrement à la criée de l'Herbaudière. L'Organisation de Producteurs de la Pêche de Noirmoutier a vendu 1671 tonnes de poissons pour un chiffre d'affaires total voisin de 11 millions d'euros. Le port se place ainsi au 18^{ème} rang des ports de pêche de France en termes de chiffre d'affaires et au 26^{ème} rang pour le tonnage débarqué. En 2008, la crise économique a touché ce secteur, ce qui entraîna une récession de 16,7 % en tonnage et de 13,6 % en chiffre d'affaires pour la période 2004-2010 (Tableaux B-7).

Déparquement de la pêche pour le port de l'Herbaudière		
Année	Apports	Valeurs
2004	2145	12844
2005	1989	13063
2006	2096	15965
2007	2005	13093
2008	2005	13042
2009	1787	11091
2010	1671	10688

Sources :
[Chancel-Lesueur et Samyn, 2009], CCI de la Vendée

ESPECES	PRODUITS DEBARQUES			
	Apports		Valeurs	
	2008	2009	2008	2009
Sole	523	468	5237	5237
Congre	393	338	608	488
Bar	170	135	1810	1810
Rouget	70	66	612	619
Divers Poissons	458	649	1756	2160
TOTAL POISSONS	1614	1656	11727	10314
Crustacés	159	116	784	713
Mollusques	213	0	491	0
Coquillages	9	14	49	63
TOTAUX	2005	1787	13042	11091

Source : [Chancel-Lesueur et Samyn, 2009]

Tableaux B-7 : Production du port de l'Herbaudière - Noirmoutier
(Apports : en tonnage, valeurs : chiffre d'affaires en milliers d'euros)

²¹ Sortie à la mer d'une durée inférieure à 24 heures.

La sole, la plie, la crevette grise sont pêchées sur les fonds meubles tandis que le bar, le congre, le rouget-barbet, le bouquet le sont sur les fonds plus grossiers et rocheux [Thimel, 1994]. La pêche à la civelle se réalise quant à elle au niveau des principaux étiers de la baie lors des grands coefficients de marée [communication orale CEP, 2008].

La pêche à pied est également pratiquée dans la baie. En 2009, 250 permis ont été attribués à des pêcheurs à pied professionnels de coquillages. La palourde, la coque, et dans une moindre mesure le bigorneau, constituent les espèces récoltées en baie de Bourgneuf, pour un chiffre d'affaires de 63 milliers d'euros [Chancel-Lesueur et Samyn, 2009]. Mais cette activité professionnelle est concurrencée, voire menacée par la pêche à pied des touristes qui dégradent et gaspillent la ressource. Enfin, il convient de noter la présence de carrelets fixes (environ 150) sur le littoral Nord de la baie (Photographie B-7) et sur les étiers (Photographie B-8) comme une autre activité de loisir [Gomez, 1994b].



Photographie B-7 : Carrelets sur l'estran, à proximité du Port du Collet, Les Moutiers-en-Retz (44)



Photographie B-8 : Carrelets dans un étier, à proximité du Port des Brochets, Bouin (85)

Dans le Marais Breton, les espèces recherchées pour la pêche de loisir sont l'anguille (et la civelle), le sandre et le brochet. La pêche à la grenouille (verte et rousse) est par ailleurs pratiquée en juillet et août [Bouscasse *et al.*, 2011b]. Les recensements piscicoles révèlent que le peuplement piscicole se dégrade depuis deux décennies. La diversité piscicole est réduite et la biomasse est faible. Au total, 16 espèces piscicoles sont recensées en 2011 [Gérard, 2012] contre 22 entre 1987 et 1991 [Feunteun *et al.*, 1999]. Les tendances marquantes sont d'un côté la surreprésentation des espèces non natives du marais (*pseudorasbora parva* et gambusie) et de l'autre l'absence du brochet et les faibles abondances d'anguille. La rareté de ces deux espèces, repère pour le brochet et patrimoniale pour l'anguille, traduit la mauvaise connectivité du réseau hydrographique et l'insuffisance d'habitats piscicoles favorables à ces espèces. L'envasement des chenaux et les multiples ouvrages hydrauliques en sont pour partie responsables [Besse et Baisez, 2012 ; Le Pape, 2010]. Les travaux menés dans le cadre

du CREZH devraient inverser la tendance et favoriser la biodiversité dans le réseau [Hydroconcept, 2009].

B.2.2.4 Tourisme

L'essor du tourisme balnéaire provient des vertus qu'une société de plus en plus urbaine lui accorde [Miossec, 2004] : paysages, qualité de l'air, eau et soleil. L'attrait du littoral est presque sans limites. Il représente une activité économique majeure du BVBB, à en juger les importantes variations de population entre les résidents à l'année et les autres.

Toutefois, il est difficile voire quasiment impossible de quantifier exactement le nombre de touristes présents sur un territoire. Il peut en revanche être estimé à partir de la capacité d'hébergement ou par l'étude de différents indicateurs [Cheize, 1986a] : le trafic routier, la consommation de farine de blé, les objets oblitérés, le volume d'ordures ménagères, la consommation d'eau. Tous ces indicateurs nécessitent des recherches approfondies. N'étant pas l'objet de l'étude et cherchant uniquement à avoir quelques ordres de grandeur, c'est à partir de la capacité d'hébergement que les flux touristiques vont être calculés.

La fréquentation touristique correspond ainsi au nombre de lits touristiques par communes, multiplié par un taux de fréquentation. Le taux moyen de fréquentation des hébergements²² pour la Loire-Atlantique et la Vendée est de 74 % en 2009 (Tableau B-8).

Département	Hôtels (annuel)	Campings (de mai à septembre)
Loire-Atlantique	78%	67%
Vendée	67%	83%

Source : Direction du Tourisme - INSEE

Tableau B-8 : Taux de fréquentation des hébergements en 2009 sur le BVBB

En tenant compte de ces moyennes départementales, l'afflux de touristes sur le BVBB est évalué à 262 435 personnes, sachant que le nombre total de lits touristiques²³ est de 354 642 (Tableau B-9).

²² Nombre de nuitées divisé par le nombre de chambres (ou d'emplacements) et par le nombre de jours de la période considérée, soit 365 (ou 153 jours).

²³ Nb lits occupés dans résidences secondaires = 74 % du nb résidences secondaires * 5

Nb lits occupés dans campings = 74 % du (nb emplacements - nb emplacements loués à l'année) * 3

Nb lits occupés dans hôtels = 74 % du nb chambres d'hôtels * 2

	Résidences secondaires	Campings	Hôtels	Total
Nombre de lits	289922	61554	3166	354642
Nombre de lits occupés	214542	45550	2343	262435

Source : Direction du Tourisme - INSEE

Tableau B-9 : Nombre de touristes en 2009 sur le BVBB

Cet afflux de touristes représente 2 fois la population permanente du BVBB. C'est en bordure de baie que la pression se fait la plus forte avec une concentration moyenne de touristes 4,3 fois la population permanente pour les communes hors marais et 4,6 uniquement pour celles de l'île de Noirmoutier. Saint-Jean-de-Monts et Saint-Hilaire-de-Riez captent à elles seules 44 % des touristes du BVBB.

Il convient de rappeler que, outre toutes les approximations faites, cette approche omet la clientèle locale (48 % Vendée, 40 % Loire-Atlantique) venant sur le BVBB uniquement à la journée, notamment pour la pêche à pied lors des grandes marées [Cheize, 1986a]. Elle ne tient pas compte également de la durée et de la période d'affluence des touristes, paramètres importants de la fréquentation accrue en période estivale. Ces chiffres constituent donc une estimation basse des flux touristiques. En 1982, la fréquentation touristique sur l'île de Noirmoutier était déjà estimée supérieure de 22 % à la capacité d'accueil. Sa population était multipliée en moyenne par 7,9, avec des pics à 11,7 pour les communes de la Guérinière et de Barbâtre [Cheize, 1986b].

B.2.3 Zones protégées

Le BVBB est reconnu comme ayant un grand intérêt en termes de biodiversité. Il est l'objet de plusieurs périmètres de protection et d'inventaires (Figure B-24).

Les directives européennes « Oiseaux » [CEE, 1979a] et « Habitats faune flore » [CEE, 1992] établissent la base réglementaire du grand réseau écologique européen Natura 2000 dans le but de préserver la diversité biologique et valoriser le patrimoine naturel des territoires. Le BVBB dispose de 4 sites Natura 2000 qui s'intersectent :

- le site FR 5200653 « Marais breton, Baie de Bourgneuf, Ile de Noirmoutier et Forêt de Monts » classé comme Site d'Intérêt Communautaire (SIC) en 2012 ;
- le site FR 5202012 « Estuaire de la Loire Sud – Baie de Bourgneuf » classé comme Site d'Intérêt Communautaire (SIC) en 2012 ;
- le site FR 5212009 « Marais Breton, baie de Bourgneuf, Ile de Noirmoutier et forêt de Monts » classé en zone de protection spéciale (ZPS) en 2006 [RF, 2006a] ;
- le site FR 5212014 « Estuaire de la Loire et baie de Bourgneuf » classé en zone de protection spéciale (ZPS) en 2008 [RF, 2008b].

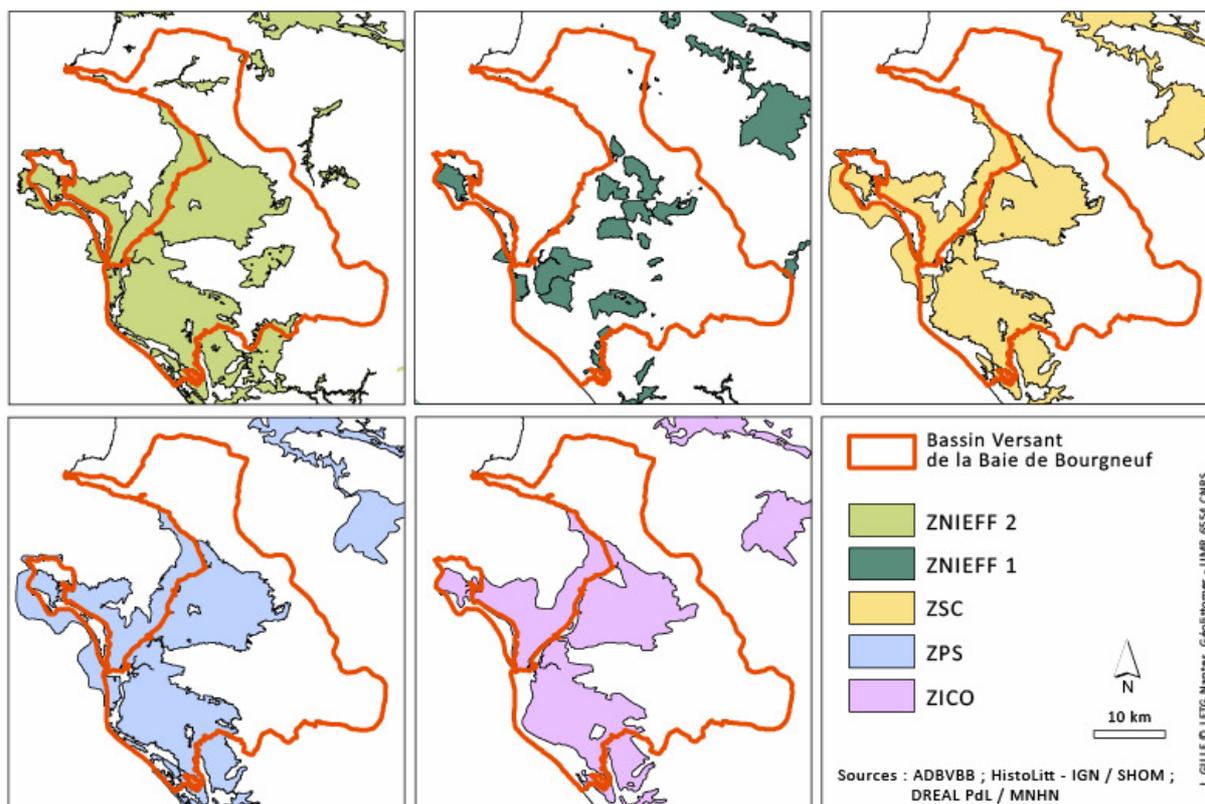


Figure B-24 : Périphéries de protection et d'inventaires

Leur gestion est définie par les documents d'objectifs (DOCOB), documents d'orientations et de référence pour les acteurs ayant compétence sur le site pour le maintien ou le rétablissement des habitats naturels ou d'espèces dans un état de conservation favorable [ADASEA de la Vendée, 2002 ; ADBVBB, 2010].

La désignation et le périmètre des SIC s'appuient sur des inventaires de richesses écologiques réalisés précédemment [FDC Vendée et LPO Vendée, 2010]. Ils sont proposés à l'Europe en vertu de la Directive "Habitats faune flore ". Après validation, ils constitueront les Zones Spéciales de Conservation (ZSC). Ces inventaires sont traduits par une très large couverture du périmètre en Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de type I pour les secteurs de grand intérêt biologique ou écologique et de type II pour les grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes. La présence d'un très riche contingent d'espèces rares, menacées ou protégées à plus d'un titre (Tableau B-10) doit également au BVBB d'être classé comme Zone d'Importance pour la Conservation des Oiseaux (ZICO²⁴) « Baie de Bourgneuf et Marais Breton ».

²⁴ Ou aussi Zone d'Importance Communautaire pour les Oiseaux (en Europe).

	Secteur maritime	Secteur marais salé	Secteur marais doux	Roselières	Secteur dunaire
Habitats	Replats boueux ou sableux exondés à marée basse ; Estuaire ; Récifs ; Bancs de sable à faible couverture d'eau marine ; Prés à Spartina ; Végétations annuelles pionnières à Salicornia et autres ; espèces halophiles des zones boueuses et sableuses ; Prés salés atlantiques ; Fourrés halophiles thermo-atlantiques.	Lagunes côtières (habitat d'intérêt communautaire prioritaires) ; Marais et prés salés thermo-atlantiques. Zone préférentielle pour la nidification des larvo-limnicoles.	Secteur à enjeu très fort, il représente une zone de halte importante pour les espèces migratrices en tant que zone d'hivernage ou de reproduction.	Les roselières sont des milieux très particuliers qui forment un biotope à part entière pour certaines espèces totalement inféodés à cet habitat. Leur fragmentation entraîne une perte en biodiversité importante. Ces milieux se doivent d'être protégés, maintenus et gérés efficacement.	Végétation annuelle des laissés de mer ; Dunes mobiles embryonnaires ; Dunes mobiles du cordon littoral (dunes blanches) ; Dunes côtières fixées à végétation herbacée (dunes grises- habitats d'intérêt communautaire prioritaires) ; Dépressions humides intradunales ; Dunes à salix arenaria ; Dunes boisées du littoral atlantique
Espèces associées	La Bernache cravant, le Canard siffleur, le Canard colvert, le Criquet des salines (<i>Epacromius tergestinus</i>) espèce que l'on croyait disparu en France, et petits passereaux, dont la Gorgebleue à miroir, sous espèce nantaise (annexe I de la Directive Oiseaux).	La Loutre, Le Triton crêté, la Bouvière	le Hibou des marais, le Héron garde boeufs, la Barge à queue noire, la Bécassine des marais, le Pipit farlouse, la Chevêche d'athéna, le Canard souchet, la Sarcelle d'été, le Tadome de Belon, le Chevalier gambette, l'Echasse blanche, le Vanneau huppé.		Cynoglosse des dunes (<i>Omphalodès littoralis</i>) (espèces d'intérêt communautaire prioritaires).

Tableau B-10 : Espèces Annexe 1 de la directive oiseaux
[Bouscasse *et al.*, 2011b]

Le SAGE fixe quant à lui les objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur et de protection quantitative et qualitative des ressources en eau superficielle et souterraine, des écosystèmes aquatiques, ainsi que les objectifs de préservation des zones humides. C'est l'ADBVB qui est chargée de sa mise en œuvre [ADBVB, 2004].

B.2.4 Harmonisation des usages

Toutes ces activités socio-économiques nécessitent d'avoir une eau de qualité et en quantité. Sa gestion est basée sur les niveaux d'eau dans le marais (Tableau B-11).

A ces usages vient s'ajouter le tourisme balnéaire qui induit également une pression sur les masses d'eau superficielles et souterraines. Cet afflux touristique est une source de problèmes par son caractère cyclique, de courte durée et massif [Cheize, 1986b]. Cette forte augmentation de la population entraîne souvent un dysfonctionnement des stations d'épuration, incapables de traiter tous les effluents. La qualité des eaux de baignade s'en ressent inévitablement [Miossec, 2004].

USAGER / ACTEUR		PREOCCUPATION
Pêche	AAPPMA*	Hausse des niveaux d'eau en hiver et de la durée d'enneigement pour le fonctionnement des frayères à brochets Hausse des niveaux en été pour la pratique de la pêche
	Fédération / Conseil Supérieur de la Pêche	Circulation piscicole anguille et brochet sur cours d'eau et marais Renaturation du lit sur les secteurs dégradés des cours d'eau du bocage Favoriser la reproduction du brochet sur marais et bocage Gérer les niveaux en fonction des besoins biologiques des espèces (brochet) Gestion du réseau tertiaire pour ses potentialités biologiques
Monde agricole		Constat du mauvais état des berges / élevage / ragondin / curage Volonté de limiter dans le temps les débordements avec une durée maximale inférieure à quelques semaines
Saliculture		Problème lié à la gestion des niveaux pour les lâchers et les prises d'eau Inondation acceptable
Ostréiculture		Synchronisation des 2 marais Importance du réseau tertiaire pour le stockage partiel de l'eau douce pour une évacuation plus lente Gestion de l'évacuation de l'eau douce
Ligue pour la Protection des Oiseaux		Hausse des niveaux d'eau en hiver et de la durée d'enneigement pour le fonctionnement biologique du marais Faire une Gestion isolée par casier pour augmenter les surfaces ennoyées Proscrire l'élargissement des canaux lors des curages / érosion Incidence à définir de l'arrachage des espèces envahissantes sur le milieu en place Gestion des passages routiers / faune
Chasse		Hausse des niveaux d'eau en hiver et de la durée d'enneigement pour le fonctionnement biologique du marais Conserver les parties basses inondables
Communes		Gestion des inondations / surfaces imperméabilisées/portes à la mer (évacuation) Réalisation de curage Possibilité de Favoriser des débordements ponctuels locaux sur des surfaces plus ou moins grandes Prise en considération de l'état des berges Gestion du pluvial / extension urbaine Gestion des crues en tête de bassin

* Association Agréée de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques

Tableau B-11 : Synthèse des préoccupations des usagers et des acteurs locaux (d'après [Hydroconcept, 2007a])

Les intérêts peuvent diverger selon les groupes sociaux et la période dans l'année (Figure B-25). De plus, certaines activités exercent une pression sur la qualité de l'eau, pénalisante pour d'autres activités plus en aval. Ces divergences sont par conséquent susceptibles d'être génératrices de conflits entre les différents acteurs pour l'exploitation de la ressource en eau et des territoires [Corlay, 1986a] :

- conflit entre les agriculteurs - éleveurs qui veulent évacuer le plus rapidement possible des eaux des premières grosses pluies d'automne et les ostréiculteurs qui redoutent l'abaissement brutal du taux de salinité des eaux côtières à quelques semaines de la période d'expédition ;
- conflits entre agriculteurs « modernistes » favorables à une refonte importante du système hydraulique en vue d'intensifier l'agriculture du marais et les « traditionalistes » hostiles aux grands bouleversements et qui réclament une amélioration douce de la circulation des eaux ;
- conflits entre agriculture et tourisme lors des orages d'été qui nécessitent des évacuations massives d'eaux à forte charge organique venant « souiller » les lieux de baignade parfois très « éloignés des étiers ;
- conflits entre pêcheurs professionnels et plaisanciers qui s'expriment en termes de concurrence économique et de concurrence spatiale entre pêcheurs en baie et adeptes des sports nautiques ;
- conflits entre aquaculteurs et touristes qui peuvent prendre des formes aiguës lorsque des demandes d'ouverture de nouvelles concessions concernent des secteurs fréquentés par les pêcheurs à pied ;
- conflits potentiels entre aquaculture intensive utilisant les eaux souterraines et aquaculture traditionnelle sur l'estran si les rejets ne sont pas strictement contrôlés.

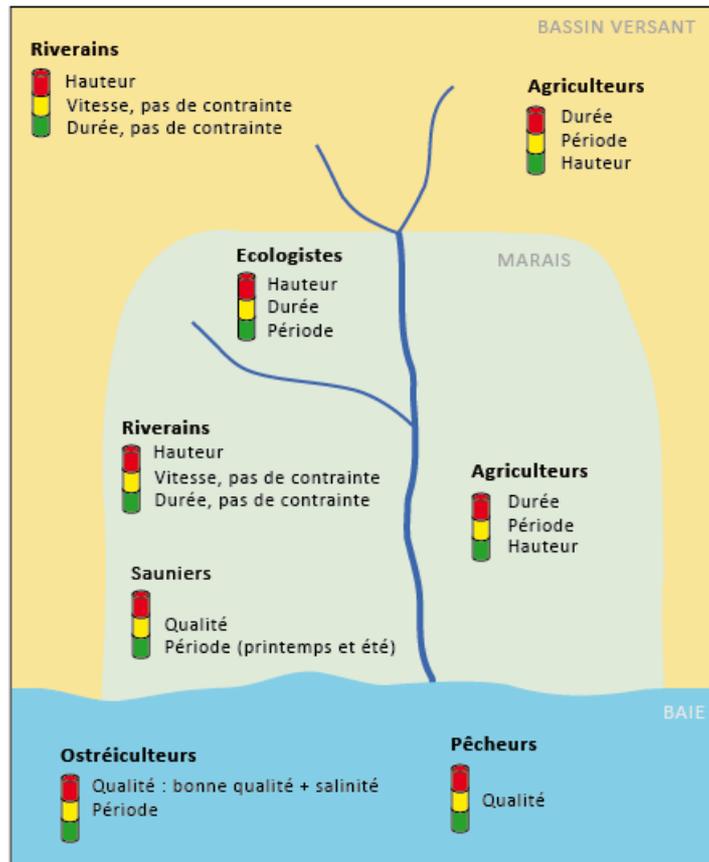


Figure B-25 : Principales contraintes liées à la ressource en eau par ordre de priorité (rouge : importante, jaune : moyenne, vert : faible) (d'après [ISL Ingénierie, 2004])

En réalité, pour le Marais Breton, à la différence d'autres secteurs sur la façade atlantique, il n'y a pas réellement de conflits pour l'exploitation de cette ressource [Candau et Le Floch, 2000]. Les différents acteurs arrivent à se concerter pour aboutir à un processus d'harmonisation des usages en fonction des principales contraintes et ainsi bénéficier des services rendus par le Marais Breton. L'analyse de ces derniers révèle une importance et un potentiel de développement différenciés selon les acteurs. Les services majeurs rendus par le Marais Breton sont la production de biomasse / matériaux et la constitution d'habitats favorables à la biodiversité (Tableau B-12).

L'agriculture, la conchyliculture, la chasse et la pêche sont donc les activités qui en bénéficient. L'amélioration de la qualité de l'eau est également favorable à la conchyliculture et à la pêche. Ce service est celui qui possède le plus fort potentiel de développement, par rapport aux autres qui sont déjà bien exploités.

Services écosystémiques	Description sommaire du service	Usages ou activités bénéficiant potentiellement du service	Zone où le service s'exprime	Zone d'influence	Population bénéficiaire	Potentiel non exploité
Écrêtement (rétention) des crues	Rôle tampon pour les zones urbaines en amont des marais qui pourraient subir de fortes inondations lors d'épisodes de submersion marine importants	Urbanisation/population	Ensemble du Marais	Zones urbaines sur le marais	Population urbaine / la population sur les marais est plus soumise à un risque	0
Purification de l'eau et traitement des eaux usées	Action dénitrifiante du marais, environ 150 kg/ha/an Peu ou pas d'action sur les phosphores Effet probable sur la bactériologie mais données insuffisantes, idem pour les métaux lourds	Conchyliculture pêche à pied de loisir et professionnelle	Cours d'eau/étiers Cours d'eau/étiers	Côte littoral où se déversent les cours d'eau (Baie de Bourgneuf)	Conchyliculteurs pêcheurs	++
Régulation du climat (maintien de la qualité de l'air)	Régulation des microclimats locaux, par une influence sur le taux de précipitation et la température locale	∅	Ensemble du Marais	Ensemble du Marais	Population locale	0
Alimentation et matériaux (système productif)	Production de biomasse pour l'agriculture et les espèces chassées, nutriments pour les coquillages	Agriculture	Marais à vocation agricole	Marais à vocation agricole	Agriculteurs	0
		Conchyliculture	Marais et lagunes côtières	Marais et lagunes côtières	Conchyliculteurs	0
		Chasse, pêche à pied de loisir et professionnelle	Ensemble du Marais, zones de chasse, plans d'eau	Marais et zones de migration des animaux	Chasseurs, pêcheurs	0
		Chasse, pêche à pied de loisir	Ensemble du Marais	Communes avoisinantes	Chasseurs, pêcheurs	0
		∅	Ensemble du Marais	Communes avoisinantes	Population locale	0
Valeurs esthétiques Sentiment d'appartenance / identité culturelle	Site ne présentant pas de paysage exceptionnel mais suffisamment spécifique pour générer un sentiment d'appartenance au site	Chasse, pêche	Ensemble du Marais	France, Europe	Population française et européenne	+
Biodiversité (réservoir de)	Territoire très riche, concerné par des sites Natura 2000, ZICO, ZNIEFF	Chasse, pêche	Ensemble du Marais	France, Europe	Population française et européenne	+

	Très important	0	Pas de potentiel
	Important	+	Potentiel faible
	Peu important	++	Potentiel important

Les usages en gras sont les usages les plus importants pour un service particulier.

Tableau B-12 : Récapitulatif des services rendus par le Marais Breton [Bouscasse *et al.*, 2011b]

L'évaluation économique de ces services démontre que l'agriculture et la conchyliculture sont les deux activités qui en tirent principalement profit [Bouscasse *et al.*, 2011b]. Elles représentent à elles seules plus de 75 % de la valeur économique du marais estimée, comprise entre 27 et 51,3 millions d'euros par an, ou encore entre 800 et 1500 euros par hectare (Tableau B-13).

		Marais breton		
Superficie des zones humides (ha)		35 000		
Services (fonction et usage)		Min.	Max.	Inc.
Ecrêtement des crues		?	?	
Recharge des aquifères (et soutien d'étiage)		∅	∅	
Purification de l'eau		2,7	3,3	**
Alimentation en eau potable		∅	∅	
Conchyliculture		14,0	22,0	**
Pêche à pied professionnelle		0,4	0,5	**
Pêche à pied de loisir		0,1	0,4	**
Régulation du climat		∅	∅	
Pisciculture		?	?	
Agriculture (prairies humides)		7,5	16,3	**
Abreuvement des animaux		∅	∅	
Chasse		1,9	3,1	*
Pêche amateur		∅	∅	
Valeur éducative & scientifique		0,4	0,4	*
Promenade & observation de la nature		∅	∅	
Appartenance au site		?	?	
Biodiversité (non-usage)		?	5,3	*
TOTAL (M€/an)		27,0	51,3	
TOTAL (€/ha)		800	1 500	

Tableau B-13 : Valeur économique des services rendus par le Marais Breton

(∅ : fonction ou usage non pertinent sur le site ;

? : fonction ou usage non évalué ; Incertitude moyenne (**) ou forte (*) de la quantification)

[Bouscasse *et al.*, 2011a]

Pour l'agriculture, le calcul est basé sur la vente de l'herbe pour le fourrage, l'ensilage et le pâturage. En ce qui concerne la conchyliculture, c'est à travers le service épuratoire rendu par le marais que la valeur économique est déterminée. En l'absence du marais, l'hypothèse retenue est que les zones de production de coquillages actuellement classées en A d'un point de vue sanitaire seraient déclassées en B et les zones actuellement classées en B seraient déclassées en C. Le coût correspond donc aux investissements à réaliser par les entreprises suite à un déclassé, dans le cas où elles ne seraient pas déjà équipées des systèmes de purification.

Certains services n'ont pas pu être identifiés faute d'un manque de connaissance, à l'image du stockage de l'eau par le marais. Si ce rôle est bien mentionné, son impact réel sur la diminution des risques reste flou. Il est tributaire de l'action de l'Homme (gestion des niveaux d'eau par les vannes).

B.3 Contexte hydrologique et qualité des eaux

B.3.1	Entretiens et gestion hydraulique du Marais Breton	82
B.3.2	Dynamique des flux d'eau	92
B.3.3	Qualité des milieux.....	103

B.3.1 Entretiens et gestion hydraulique du Marais Breton

B.3.1.1	Associations de propriétaires	83
B.3.1.2	Principe de gestion	85
B.3.1.3	Manceuvres hydrauliques.....	89

Le Marais Breton est alimenté à la fois par des eaux salées provenant de la baie et en eaux douces par les petits cours d'eau côtiers. La circulation de ces flux d'eau est régie et limitée par de nombreux ouvrages d'étagement du plan d'eau autour des étiers (batardeaux, écluses, vannages) (Figure B-26).

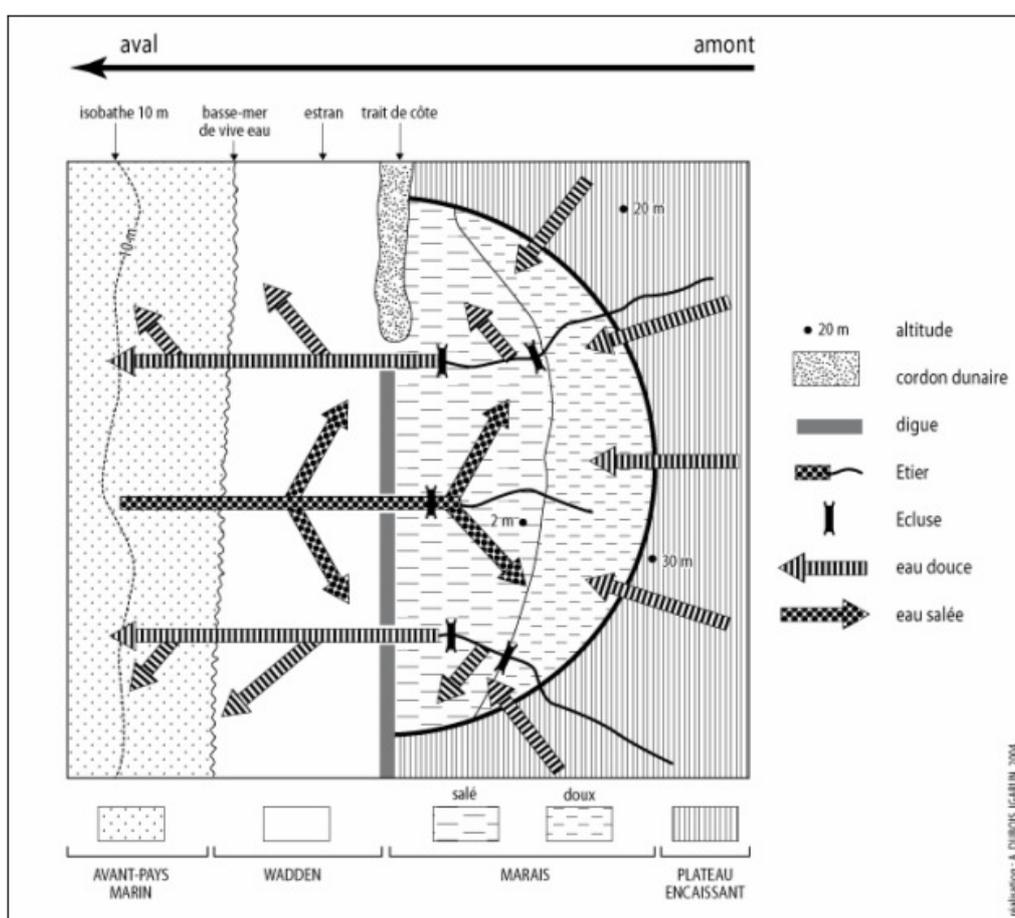


Figure B-26 : Schéma théorique du géosystème maraîchin atlantique
[Corlay, 1986b]

Ces ouvrages permettent ainsi de distinguer des unités hydrauliques cohérentes (UHC), zones dont le niveau d'eau et la gestion sont considérés équivalents et

homogènes [Anras *et al.*, 2006]. Les UHC sont délimitées naturellement (coteau, cordons dunaires) et artificiellement (digues, chaussées). Elles sont gérées par des associations de propriétaires. L'historique et les objectifs de ces dernières vont être abordés avant de présenter le principe de la régulation des flux d'eau dans le marais.

B.3.1.1 Associations de propriétaires

L'ensemble du Marais Breton est géré par neuf associations de propriétaires fonciers (Figure B-27).

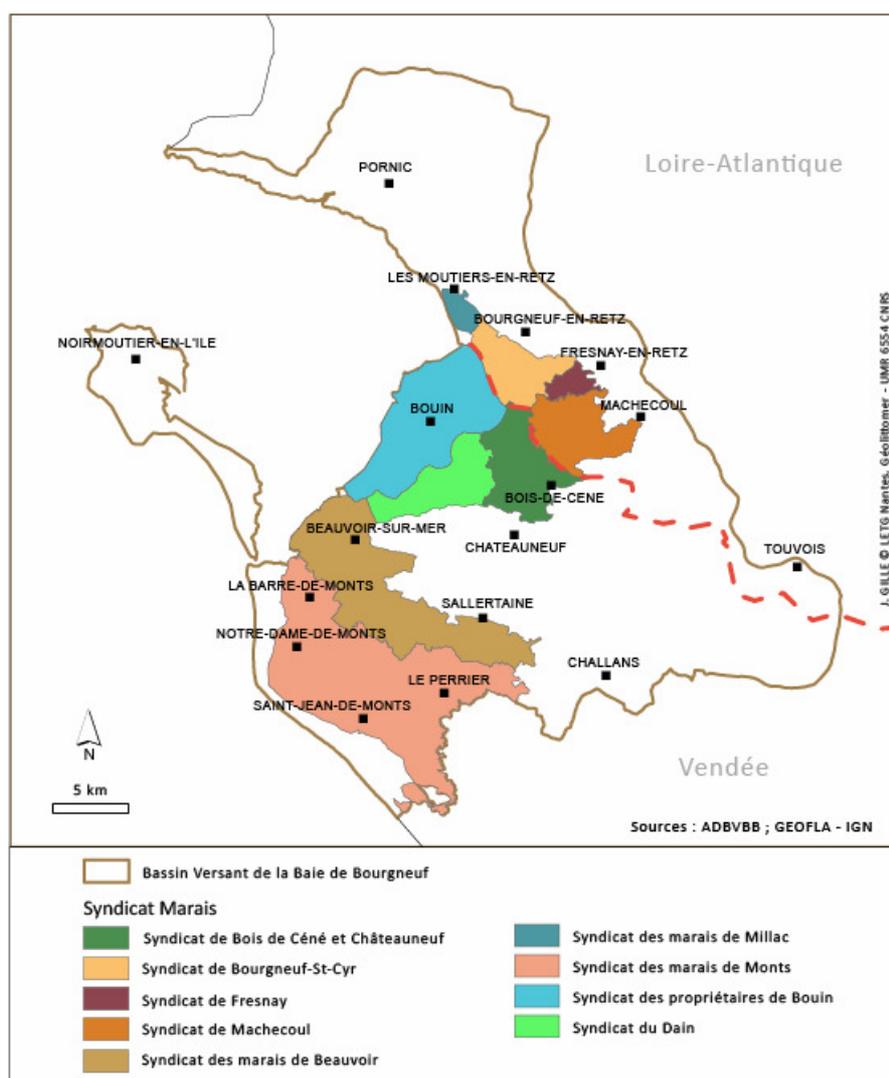


Figure B-27 : Syndicats de marais gérant le Marais Breton

La mise en place de ces associations dans leur statut actuel remonte pour la plupart au début du XIX^e siècle. Leurs rôles sont [Gilardeau, 2008] :

- d'assurer l'entretien et la restauration du réseau principal et des ouvrages ;
- de préserver l'environnement en respectant les espèces et milieux sensibles, et en luttant contre les espèces envahissantes.

Ces associations sont regroupées en deux syndicats mixtes pour faire face au financement de gros travaux (Figure B-28) :

- le Syndicat Mixte des Marais de Beauvoir sur Mer et de Saint Jean de Monts (SMMBMSJM), comprenant l'ensemble des marais liés à l'étier de Sallertaine et à l'étier de la Taillée ;
- le Syndicat d'Aménagement Hydraulique (SAH) Sud Loire, pour l'ensemble de la partie nord du Marais Breton ainsi que les marais situés au nord du BVBB jusqu'à la Loire.

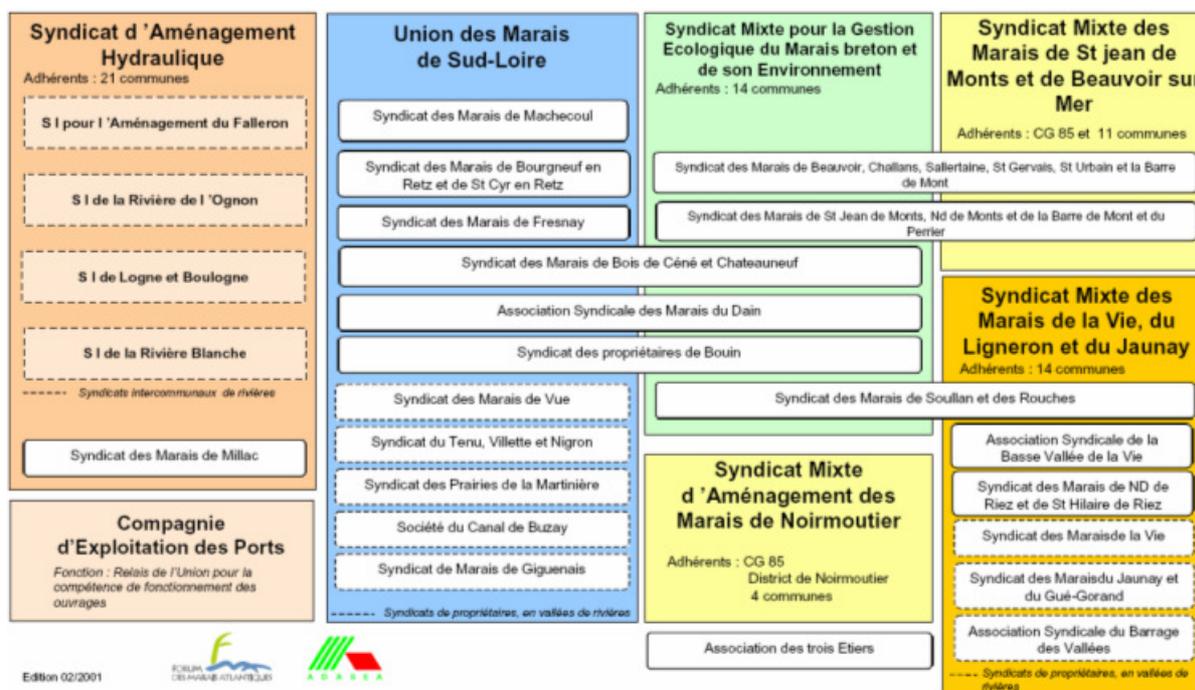


Figure B-28 : Organisation de la gestion du Marais Breton

L'Union des Marais Sud-Loire regroupe les Syndicats de propriétaires de Marais ; elle fédère leurs initiatives. Elle a financé les investissements jusqu'en 1985 et le fonctionnement jusqu'en 1995.

Le SAH Sud Loire a pris le relais de l'Union pour l'investissement en 1985. Il s'est doté de la compétence de fonctionnement et a pris le relais de l'Union pour le fonctionnement en 1996. Depuis 1996, le Conseil Général de Loire-Atlantique participe au budget de fonctionnement du SAH et l'Union ayant transféré sa gestion hydraulique au SAH, apporte à celui-ci sous forme de fonds de concours, le montant de la taxe de marais perçue auprès des Syndicats de Marais.

La Compagnie d'Exploitation des Ports (CEP) (groupe Générale des Eaux) a été le prestataire de service du SAH pour la gestion hydraulique et l'entretien des ouvrages à partir du 1^{er} juin 1995. Elle avait repris le personnel de l'Union des Marais et gère les ouvrages qui étaient la propriété de l'Union, du SAH, de l'État (Collet, etc.), ou de Syndicats. Elle était le conseiller technique de l'Union et du SAH, rendait des comptes de sa gestion et proposait des améliorations de gestion [Friedrich, 2004]. Depuis 2010, la CEP n'existe plus. C'est à nouveau le SAH Sud Loire qui s'occupe de la gestion hydraulique.

Le fonctionnement hydraulique et les niveaux d'eau dans les marais sont conditionnés par les ouvrages se situant sur le primaire. Les axes hydrauliques importants correspondent quant à eux au primaire et au secondaire. Ils sont donc régulièrement entretenus et curés par leurs organismes de tutelle. Les courants peuvent y être élevés en fonction des périodes, de la proximité des ouvrages et/ou à la suite de remembrements conduisant à la diminution de la densité du réseau de drainage. Ils sont donc plus sensibles à l'érosion.

Le stockage de l'eau est lui assuré, de façon prépondérante, par le réseau tertiaire, avec des temps de résidence de l'eau pouvant être importants. Leur éloignement et leur nombre de connexions les séparant du réseau primaire et secondaire les mènent à un confinement et donc à un envasement progressif. Pour contrer cette évolution et préserver les diverses fonctions des fossés, les syndicats doivent avoir recours au curage des fossés périodiquement [Botto *et al.*, 1999]. Ces actions doivent s'inscrire dans le cadre du contrat restauration entretien des zones humides (CREZH), passé avec l'AELB, pour une mise en œuvre des actions durant 5 ans [des Touches et Anras, 2005]. Seulement, les Syndicats de Marais ne gardent aucune (ou peu) de traces écrites des curages. Ce n'est que par « mémoires d'hommes ». Il est donc difficile d'avoir des données précises sur l'entretien des fossés [communication orale Hydroconcept, 2009].

Enfin, un minimum de gestion concertée entre chaque syndicat est nécessaire. Il y a un étagement des différents secteurs de marais de l'ordre de quelques centimètres. Le marais le plus bas est celui de la Barre de Monts (au Sud), et le plus haut, celui de Mâhecoul (au Nord). Cette différence altimétrique nécessite donc, par exemple, de s'assurer que le marais de Mâhecoul soit vide avant de laisser s'écouler celui du Bois de Cené afin d'éviter tout reflux dans celui-ci [communication orale SMGEMB, 2008].

B.3.1.2 Principe de gestion

La gestion hydraulique est codifiée par les décisions du syndicat de marais. A ce jour, trois règlements d'eau sont en vigueur sur l'ensemble du Marais Breton : un pour le Falleron, un autre pour l'étier de Sallertaine et un dernier pour celui du Perrier [communication orale SMGEMB, 2008].

En fonction du régime des eaux, les gestionnaires appliquent des règles de manœuvre des ouvrages pour évacuer les excédents vers la mer ou au contraire apporter les compléments prélevés à l'extérieur du marais (Loire). Ces règles sont soumises à des contraintes physiques (marée, débit du bassin versant amont) et à des usages internes (hauteur d'eau requise par les usagers du réseau) et externes (usagers aval : ostréiculture) [Dutartre *et al.*, 1998]. Cette gestion des flux d'eau amènent à une subdivision du Marais Breton en deux entités géographiques, avec chacune leur propre régime hydraulique au cours de l'année : le marais salé et le marais doux.

a) Marais salé

Cette première entité a besoin d'apport d'eau de mer régulier. Elle est soumise au rythme des marées et à l'ampleur des coefficients qui déterminent la possibilité de renouvellement de l'eau pour les endroits les plus reculés [Beaulieu *et al.*, 2005]. Elle se comporte en système stagnant entre deux périodes d'ouverture des ouvrages pour bénéficier des flux de marée. L'eau de mer peut être circulante pendant plusieurs heures par jour, dans un sens, puis dans l'autre. Cette fréquence d'oscillation, selon les secteurs et la gestion appliquée, peut être importante (2 fois par 24 heures) ou faible (quelques fois par mois) [Anras *et al.*, 2004].

Les prises d'eau se font tous les mois, lors de chaque pleine lune²⁵ (Tableau B-14).

Jours par rapport à la lune (pleine ou nouvelle)	Ecluse du Collet (Falleron)
2 jours avant la lune	Vidange
La veille de la lune	Prise d'eau
Le jour de la lune	Complément du niveau
1 jour après la lune	Chasse puis nouvelle prise
2 jours après la lune	Complément du niveau
3 jours après la lune	Chasse et nouvelle prise
4 jours après la lune	Complément du niveau
Jusqu'à la lune suivante	Conservation du niveau dans le bief

Tableau B-14 : Règles de manœuvres de l'écluse du Collet
(d'après [SCE, 2000a])

Deux jours auparavant, les ouvrages hydrauliques sont ouverts à marée basse pour vidanger les marais salés. Les cycles de vidange et de remplissage se font respectivement en trois fois pour une durée totale de 12 à 15 heures et de 10 à 12 heures. L'ouverture du vannage de Millac se fait 2 heures après la marée haute, pour laisser le temps aux pêcheurs de prélever les civelles [communication orale CEP, 2008].

L'inondation du marais est limitée. Les fossés du marais sont plutôt en eau douce en période hivernale, en raison de l'évacuation des eaux pluviales des coteaux. Afin d'éviter une trop forte dilution, une réalimentation en eau salée des bassins reconvertis pour les usages aquacoles s'avère nécessaire [ADBVB, 2011].

b) Marais doux

Le marais doux est, quant à lui, marqué par un régime alternant selon la saison.

- **En période hivernale**

De la fin de l'automne au début du printemps, les excédents hydriques (pluie, nappes) sont évacués pour protéger les activités en place sur le marais. Ils génèrent

²⁵ Pour des coefficients de marée supérieurs à 70.

donc des flux importants vers l'aval (Figure B-29). Au-delà d'un certain seuil d'eau précipitée sur les coteaux, des secteurs de marais accueillent les crues nourricières pour les systèmes prairiaux en place. Ces inondations sont dues à l'incapacité d'évacuer le trop-plein d'eau en raison du calibre des exutoires et de certains goulets d'étranglement sur les étiers. Elles peuvent durer aussi longtemps que les précipitations génératrices demeurent [Robin, 1992]. Cette fonction ralentit le transit de l'eau et contribue à son épuration. Le maintien d'une biodiversité intéressante est également tributaire de ces submersions temporaires [Fustec, 2000].



Figure B-29 : Circulation des flux d'eau au cours de la période hivernale

Ces inondations sont plus généralisées en secteurs doux du fait que les parcelles sont plus basses que dans les secteurs salés. Pour réduire leur fréquence, des niveaux assez bas sont maintenus dans le réseau de façon à augmenter la capacité de stockage avant le débordement des étiers [ADBVBB, 2011]. Les ouvrages sont ouverts / fermés dans le but d'écarter les crues [communication orale CEP, 2008].

- **En période estivale**

Les marais connaissent un fort taux d'évapotranspiration en période estivale, qui s'étend des premières grandes marées de printemps aux premières pluies importantes d'automne soit en général de mi-avril à novembre. Les marais sont alors clos et ne laissent plus s'échapper d'eau vers l'aval. Des apports extérieurs au BVBB s'opèrent alors, uniquement sur la partie nord du Marais Breton, afin de maintenir des niveaux suffisants pour la vie écologique dans le réseau, puisque le débit des cours d'eau drainant les coteaux est quasi nul [Baudet *et al.*, 1987b].

En 1958, l'Union des Marais achète le canal maritime de la Basse Loire pour en faire un outil de régulation hydraulique. L'objectif est d'irriguer en eau douce 100 km² dans la partie nord du Marais Breton (Figure B-30). La marée montante refoule l'eau douce qui est stockée dans l'ancien canal maritime par l'intermédiaire des vannages de Buzay et de la Martinière. Au moment de l'étape de plus haute mer, les eaux de la Loire sont envoyées à contre courant de l'Acheneau et du Tenu, jusqu'à la station de pompage de la Pommeraie sur 80 km de distance. La pente hydraulique de ces rivières étant presque nulle (40 cm pour 40 km), le sens du courant est inversé temporairement avec une amplitude inframétrique grâce à un jeu d'écluses.



Figure B-30 : Circulation des flux d'eau au cours de la période estivale

La station de pompage de la Pommeraie permet de relever de 4 m les eaux prélevées dans la Loire. Environ 8 millions de m³/an sont pompés de juin à octobre, à raison de 1 m³/s. Le pompage est arrêté lorsque le débit de la Loire baisse et que la salinité augmente au point de prélèvement dans la Loire (concentration supérieure à 1 g/L). L'eau est enfin acheminée jusqu'au Marais Breton, sur une distance de 4 km, par un canal d'irrigation, le long duquel les maraîchers prélèvent de petits volumes pour alimenter leurs parcelles.

En dehors de cette période, le Tenu fonctionne en régime normal sud-nord, contribuant ainsi à l'alimentation du lac de Grand-Lieu.

Des prises d'eau sont effectuées au vannage du Nouveau Collet au mois d'avril, en deux fois, jusqu'à l'écluse du Fresne. Cette eau stockée sert à faire des chasses pour dévaser le port et alimenter quelques zones de marais [communication orale CEP, 2008].

B.3.1.3 Manœuvres hydrauliques

La CEP est chargée de gérer l'écoulement des eaux du bassin versant, d'assurer l'alimentation du réseau hydraulique en eau de Loire l'été, d'effectuer le contrôle, la régulation des niveaux d'eau et l'entretien courant des ouvrages, des berges des canaux et rivières. A cet effet, elle s'est dotée d'un outil informatique de télégestion hydraulique qui lui permet de disposer à tout instant des informations des différents ouvrages [Friedrich, 2004]. L'ouverture des portes est programmée dès qu'il y a 10 cm de différence entre l'amont et l'aval

L'objectif est de maintenir des niveaux constants en eau douce de 1,95 m pour le marais de Mâchecoul, et 1,85 m pour ceux de Bourgneuf-en-Retz, Bois-de-Cené et Bouin. Le vannage du Frêne est donc fermé. Cependant, lorsqu'il pleut, la priorité est donnée à l'écoulement, donc au drainage du marais. La gestion locale des ouvrages est effectuée par un éclusier d'astreinte 24 h / 24, 7 jours / 7 afin d'éviter l'inondation des habitations.

Lors de son arrivée dans le Marais Breton, le Falleron se scinde en de nombreux étiers. Il y a deux diffluences majeures le long du Falleron. La principale rive droite correspond à celle avec l'étier de la Gravelle, et sur la rive gauche avec l'étier du Chiron Boileau, qui se jette ensuite dans l'étier de la Taillée Gouine, en aval de sa confluence avec le ruisseau de la Filée. L'étier de la Taillée Gouine et celui de la Gravelle rejoignent le Falleron au Port la Roche. La confluence de ces trois axes principaux d'écoulement constitue un point sensible pour la gestion hydraulique. L'éclusier gère par anticipation les trois vannes afin de maintenir une cote hydrologique inférieure à 2,50 m dans le réseau. Au-delà, les habitations peuvent être inondées (Figure B-31).

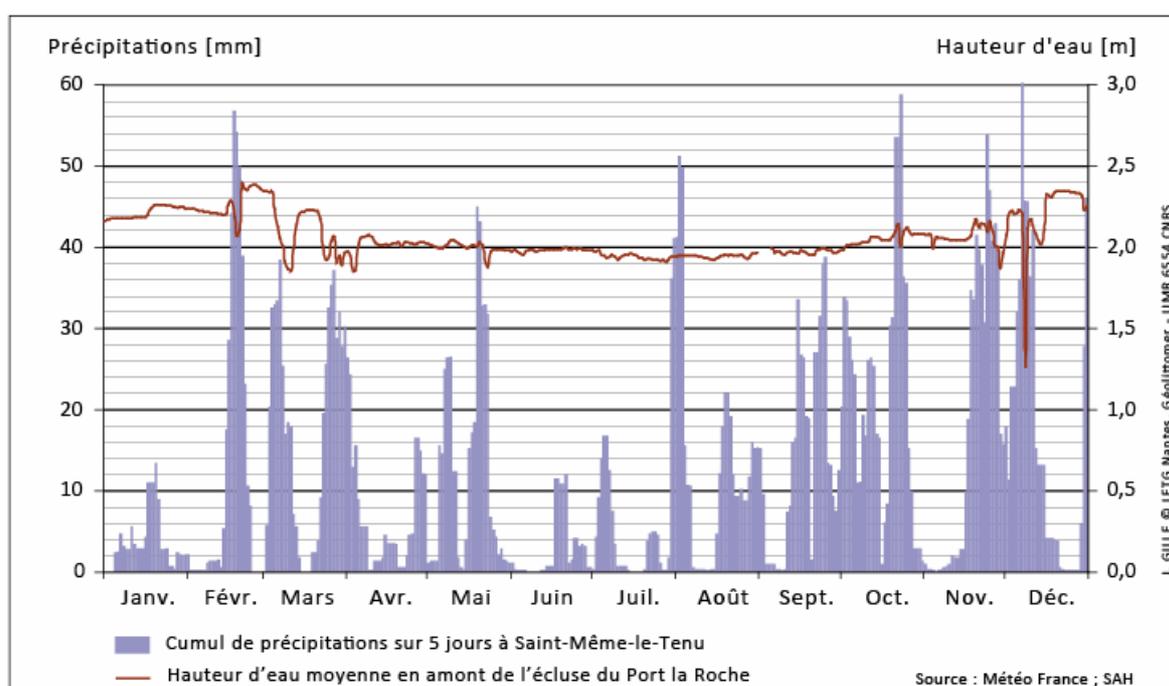


Figure B-31 : Niveaux d'eau au Port la Roche en 2006

En période hivernale, les variations du niveau d'eau peuvent être de plusieurs décimètres en amont de l'écluse du Port la Roche, dès lors qu'il pleut plus de 30 mm pendant 5 jours. Elles sont en revanche infradécimétriques pendant la période estivale.

Le niveau d'eau moyen est plus fluctuant au Port du Collet (Figure B-32). Il y a une différence de 1,7 m entre la cote la plus basse (16 mars) et la plus haute (25 décembre) en 2006. Les manœuvres hydrauliques sont plus importantes.

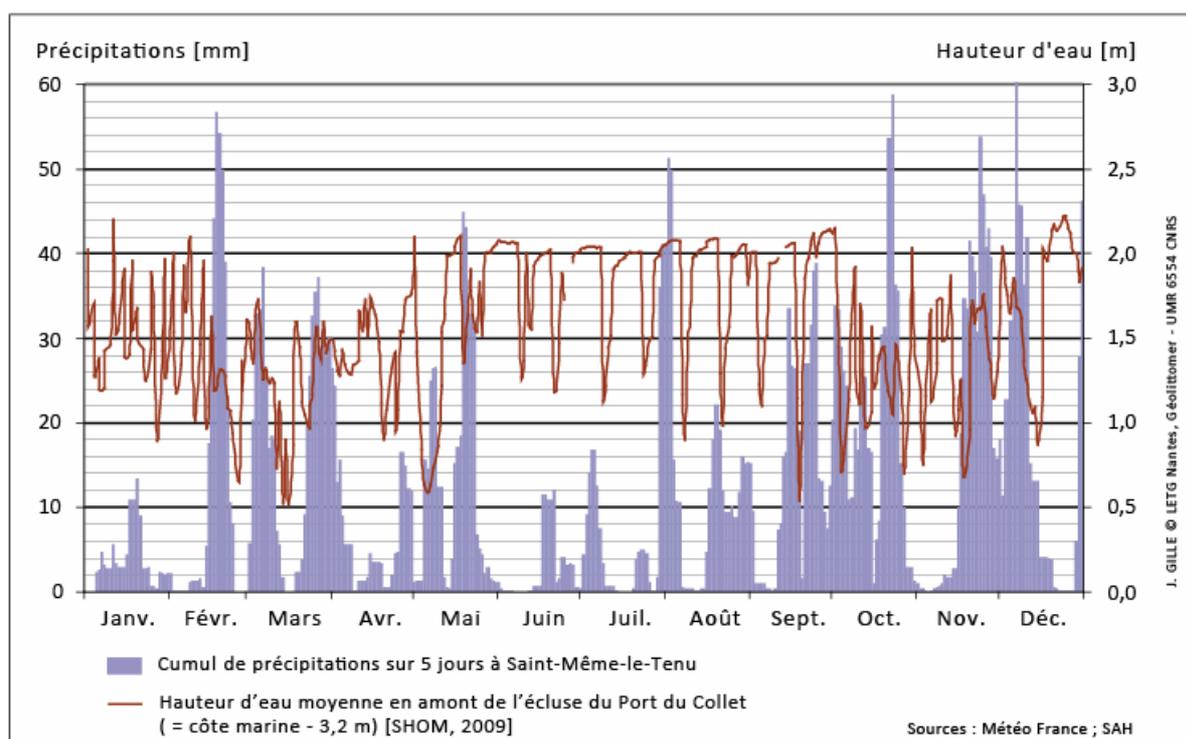


Figure B-32 : Niveaux d'eau au Port du Collet en 2006

En période hivernale (octobre à avril), les fortes fluctuations des niveaux d'eau sont dues à l'évacuation des eaux douces, afin d'éviter l'inondation du marais suite aux précipitations. Pendant la période estivale (mai à septembre), une certaine cyclicité est observée. Les 7 lâchers d'eau correspondent à des chasses d'eau, effectuées pour dévaser le Port du Collet et renouveler l'eau dans le marais pour quelques propriétaires, localisés entre l'écluse du Fresne et le Port du Collet [communication orale CEP, 2009].

Les lâchers d'eau douce sont réalisés en concordance avec les activités ostréicoles. Au Port du Collet, l'écluse gérée par la CEP ne s'ouvre que lorsque la marée est à la fois descendante et en soirée (accord tacite entre les acteurs concernés), afin d'éviter un trop fort courant dans le chenal (dangereux pour les petites embarcations) et pour limiter le renvoi d'eau douce sur les zones d'élevages des huîtres [Hervouet-Baranger, 1998].

Lors de périodes de fortes sécheresses, les niveaux d'eau ne peuvent être stabilisés, compte-tenu de l'évapotranspiration, même avec l'ajout de l'eau issue de la Loire.

Même s'il existe des Syndicats de Marais afin d'optimiser la gestion hydraulique entre les usages de l'eau, les manœuvres d'ouverture et de fermeture de ces derniers restent encore anarchiques. Seuls les ouvrages hydrauliques intermédiaires sont gérés en fonction des manœuvres réalisées par la CEP.

La cinétique des flux d'eau est induite par un dénivelé de la cote d'eau. Par conséquent, l'arrêt de la circulation des flux d'eau ne peut être instantané. Il est progressif et nécessite de bonnes prévisions en amont. Actuellement, il est estimé, de façon empirique, que les niveaux d'eau sont stabilisés en 24 heures sur le Falleron, la Gravelle et la Taillée Gouine. Sur le reste du marais, le temps admis est de l'ordre de 4-5 jours [communication orale CEP, 2008].

Dans la partie sud du Marais Breton, il n'y a pas d'ouvrages télégérés. Tous les ouvrages sont gérés par un éclusier. Des échelles limnimétriques ont été mises en place dans le marais par le SMMBMSJM pour suivre les niveaux d'eau. Il est toutefois difficile d'appréhender la dynamique des flux d'eau dans cette partie du Marais Breton car :

- le journal au fil de l'eau, servant à indiquer les manœuvres hydrauliques n'est pas toujours tenu à jour ;
- la visite des échelles limnimétriques n'est pas régulière ;
- les appareils de mesure (sondes Doppler) sont vandalisés.

Outre les ouvrages hydrauliques, la circulation des flux d'eau est également impactée par le vent, les coefficients de marée, et la végétation [communication orale CEP, 2008].

Les prélèvements d'eau (remplissage du marais) sont effectués lors des grands coefficients de marée. Le vent peut alors augmenter le volume d'eau prélevé ou au contraire empêcher la mer de se retirer en fond de baie, comme au niveau du Port du Collet.

La production en matières organiques des zones humides est importante. L'effondrement de berges et la présence d'embâcles peuvent conduire à un envasement des biefs par le piégeage de ces matières organiques, d'autant plus si la cinétique de l'eau n'est pas élevée.

La CEP a pour obligation de contribuer à la libre circulation des poissons dans le Marais Breton. Elle a par conséquent installé des passes à poissons (Millac, Collet, Frêne), ainsi que des trappes au niveau de certains ouvrages hydrauliques (Frêne). Dans la même finalité, elle laisse régulièrement ouverte une porte de 5 cm au niveau du Collet pendant la marée haute.

B.3.2 Dynamique des flux d'eau

B.3.2.1	Régime hydrologique	92
B.3.2.2	Hydrogéologie du Marais Breton	95
B.3.2.3	Inondations dans le marais	97

Les perturbations atlantiques viennent balayer le littoral tout au long de l'année. La pluviométrie est relativement abondante et les températures douces (cf B.1.3, p.54). Le régime des cours d'eau est qualifié de pluvio-évaporal océanique [Giret, 2007]. Il est marqué par des étiages prononcés, conséquence de la faible surface des bassins et de la prédominance des zones de socles aux faibles réserves souterraines.

B.3.2.1 Régime hydrologique

La pente des bassins versants est faible (Figure B-33). Leur pente moyenne est de 1,79 %. Ils sont plutôt de formes allongées (indice de compacité²⁶ variant de 1,46 à 2,56).

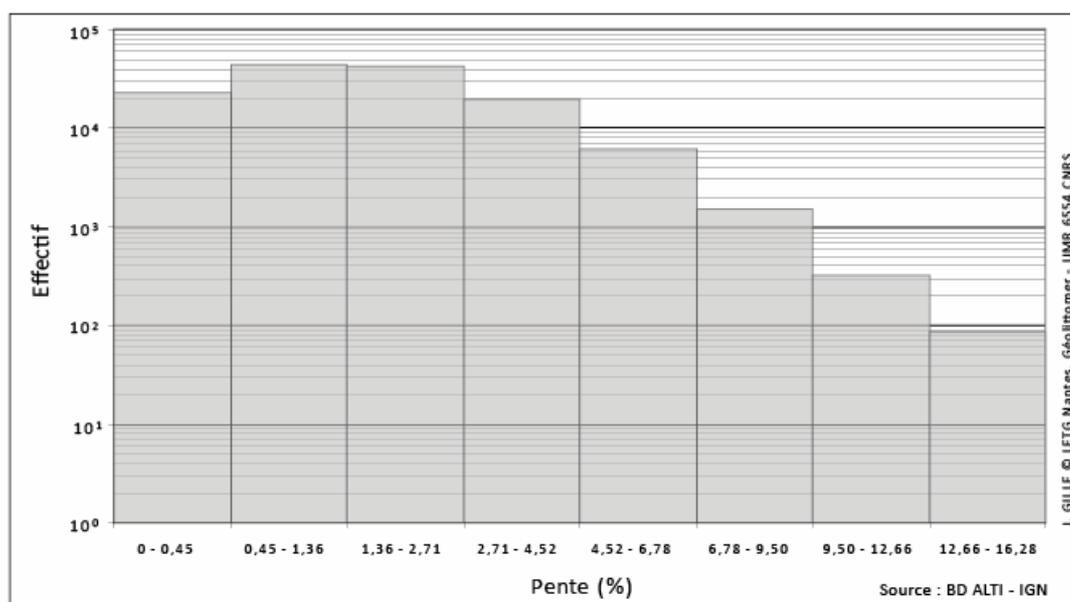


Figure B-33 : Histogramme des pentes des bassins versants en amont du Marais Breton

Hors période de crue, le temps de concentration²⁷ pour les bassins versants est inférieur à la journée, mis à part pour celui du Falleron à Machecoul qui est de

²⁶ L'indice de Gravelius K_G permet de caractériser la forme d'un bassin versant. Il se calcule comme suit $K_G = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$ avec P, le périmètre du bassin versant (en km) et A, son aire (km²) [Roche, 1963].

²⁷ Temps de cheminement entre le point le plus éloigné et le point caractéristique de l'exutoire considéré.

l'ordre d'un jour et demi. Le temps de parcours dans le Marais Breton est tributaire des manœuvres hydrauliques. L'eau met en moyenne entre 2 et 4 jours pour atteindre la baie en période hivernale (Figure B-34).

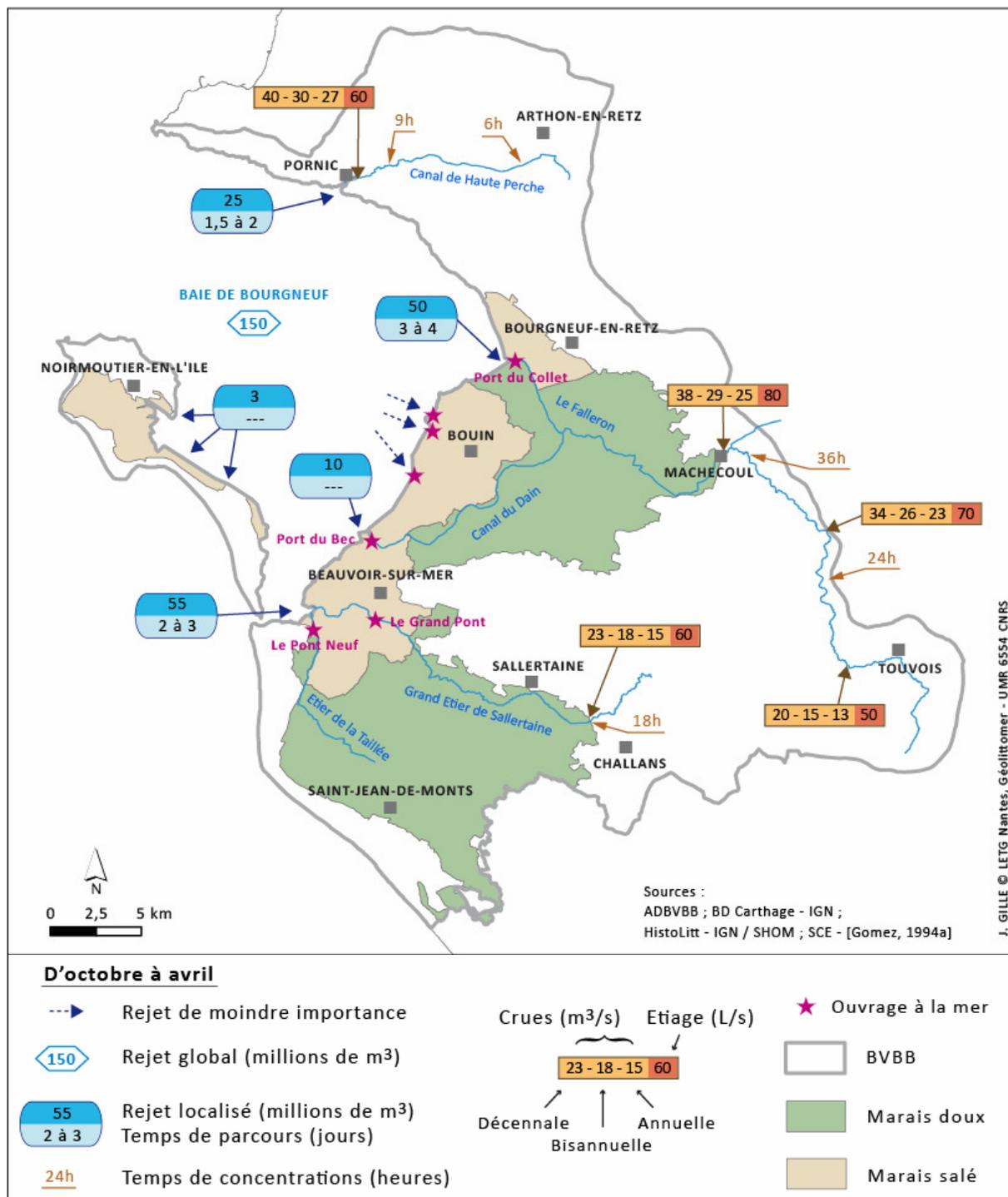


Figure B-34 : Quantification de l'écoulement dans le BVBB
 (temps de parcours évalué pour une vitesse instantanée de 10 à 20 cm/s ;
 débit de crue calculé à l'aide de la formule CRUPEDIX du CEMAGREF ;
 débit d'étiage égal au dixième du module ;
 volume d'eau rejeté estimé à partir du bilan hydrologique
 et considérant que 80 % de l'écoulement s'effectue d'octobre à avril)

La détermination des débits est uniquement faite pour les bassins versants dont l'écoulement est gravitaire. Dans le marais, la notion de volume d'eau lui est préférée pour la quantification de l'écoulement.

Les débits de pointe de crue du Falleron à l'entrée du Marais Breton sont de 25 m³/s pour l'annuelle, 29 m³/s pour la bisannuelle et 38 m³/s pour la décennale. Les valeurs pour les autres bassins versants, en amont du Marais Breton, sont bien inférieures, du fait de leur superficie réduite (Figure B-34).

En période estivale, les cours d'eau en amont du Marais Breton subissent des étiages sévères, qui peuvent conduire à leur tarissement total les années sèches. Pour une année moyenne, les débits sont de 80 L/s à Machecoul pour le Falleron et de 60 L/s à Challans pour le Grand Etier de Sallertaine (Figure B-34).

Le débit des ouvrages à la mer dépend :

- de la cote du plan d'eau aval (liée au coefficient de marée),
- de la cote du plan d'eau amont,
- de la section d'ouverture de l'ouvrage.

Pour le vannage du Nouveau Collet, il y a trois portes. Lors des crues, les trois portes sont ouvertes d'une hauteur équivalente de 1,5 m en moyenne, 2 m au maximum, en une seule fois en moins de deux minutes. L'ouverture des portes est distincte lorsqu'il s'agit de dévasser le port. Une première porte est ouverte d'une hauteur de 0,5 m, puis une à deux minutes plus tard, cette même porte est ouverte jusqu'à la cote de 1,2 m, et après le même laps de temps, jusqu'à la cote de 1,8 m. Les deux autres portes sont ensuite directement ouvertes d'1 m, l'une après l'autre. Cette différenciation est réalisée dans le but d'orienter les flux d'eau sur les zones préférentielles à dévaser.

La durée d'ouverture par marée est en moyenne de 6-7 h pour des marées avec des gros coefficients (98-100) : une à deux heures après la marée haute jusqu'à 2 h après la basse mer. Elle peut aller jusqu'à 9 h au maximum pour des crues importantes et des marées avec de faibles coefficients (50-70), soit au maximum 18 h d'ouverture en 24 h.

Pour une section d'ouverture constante, le débit augmente avec la différence de hauteur des plans d'eau entre l'amont et l'aval. Il atteint son maximum à marée basse, lorsque le plan d'eau aval est inexistant. La fourchette de rapport de débit est de l'ordre de 1 à 8 pour une hauteur évoluant sur 3,5 m [Gomez, 1994a].

D'octobre à avril, les rejets globaux du BVBB dans la Baie de Bourgneuf s'élèvent à 150 millions de m³ (Figure B-34). Le volume d'eau évacué au niveau des principaux ouvrages à la mer est de l'ordre de quelques centaines de milliers de m³ par jour. Il peut atteindre le million de m³ au niveau du Port du Collet en période de crue lorsque le marais est inondé (Tableau B-15). Le débit de pointe y est évalué par la CEP compris entre 20 et 30 m³/s.

Ouvrages	Moyenne (m ³)	Maximum (m ³)
Port du Collet	500 000	1 000 000
Port du Bec	100 000	200 000
Le Grand Pont	200 000	400 000
Le Pont Neuf	150 000	300 000

Tableau B-15 : Volumes écoulés en 24 heures au niveau des principaux émissaires du Marais Breton

(valeur calculée pour un coefficient de marée permettant la bonne évacuation d'une crue avec (maximum) ou sans (moyenne) inondation des marais)

[Gomez, 1994a]

B.3.2.2 Hydrogéologie du Marais Breton

Une nappe s'étend sous l'ensemble du Marais Breton jusqu'à la Baie de Bourgneuf. Elle est contenue dans les formations aquifères du Pliocène, du Lutétien du Cuisien (Eocène) et est captive sous le bri flandrien (Figure B-35).

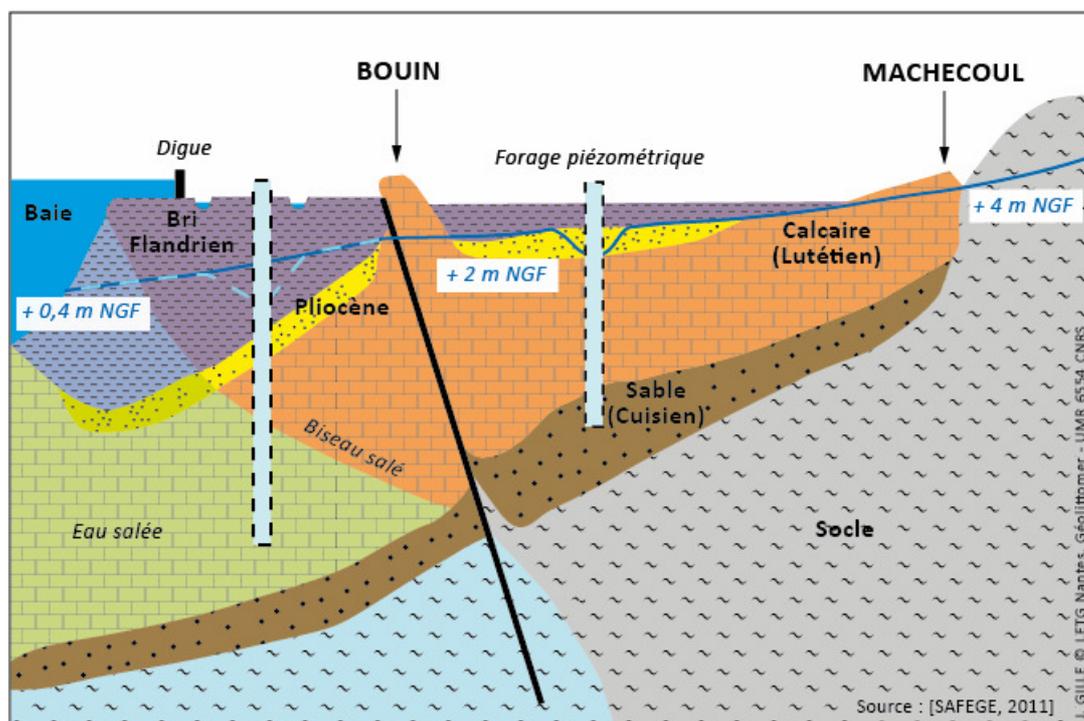


Figure B-35 : Schéma du contexte hydrogéologique de la partie Nord du Marais Breton

Son mur est constitué soit par les argiles, soit par le socle [SAFEGE, 2011]. Le bassin de Machecoul est limité au Nord par un escarpement de ligne de faille. Les calcaires sableux du Lutétien supérieur y atteignent une vingtaine de mètres d'épaisseur au maximum [Ters, 1978a]. Le long de la frange littorale, les intrusions d'eaux marines génèrent un biseau salé plus ou moins important, en fonction des coefficients de marée. La teneur en chlorure de sodium de ces eaux souterraines s'avère trop

importante pour l'alimentation humaine et même pour l'irrigation. Elle est utilisée, en revanche, pour le développement de l'aquaculture [Ters et Viaud, 1983].

Les prélèvements effectués en 2009 sont évalués à 1,9 millions de m³, et en 2010 à environ 1,6 millions de m³ [ADBVB, 2011]. Le bureau d'études BURGEAP estime que des prélèvements à hauteur de 2 millions de m³/an dans la nappe souterraine d'eau salée n'auraient pas d'impact sur la quantité et la qualité de l'eau [SMIDAP, 2008].

Cette nappe est rechargée lors de fortes précipitations (cumul supérieures à 60 mm sur 10 jours). Le bureau d'études BURGEAP considère que sa recharge efficace est égale à 25 % de la pluie totale au niveau de l'affleurement des grès du Lutétien de Machecoul, et de 8 % pour les secteurs recouverts par le bri [SAFEGE, 2011]. Le temps de réponse varie entre 10 et 30 jours, selon l'état hydrique du sol et l'intensité des événements pluvieux (Figure B-36).

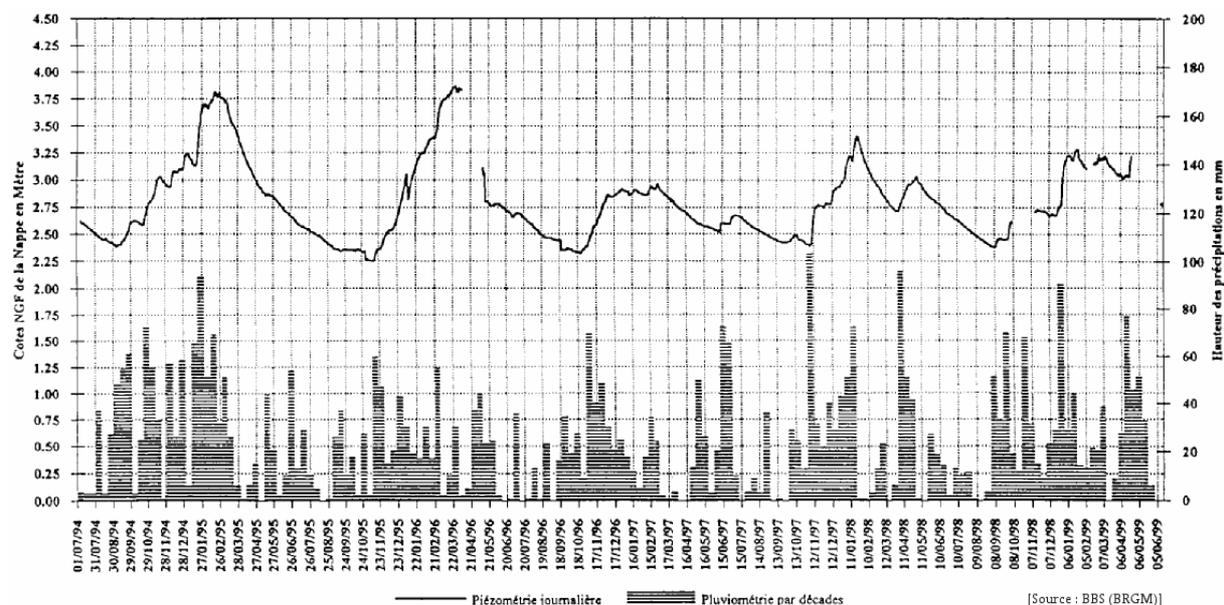


Figure B-36 : Evolution piézométrique de la nappe du bassin Eocène de Machecoul (la Pajotière – n°5)

A aucun moment, le niveau de la nappe remonte jusqu'à celui du fond des chenaux. La nappe ne contribue donc jamais à l'écoulement superficiel dans les chenaux (Figure B-37).

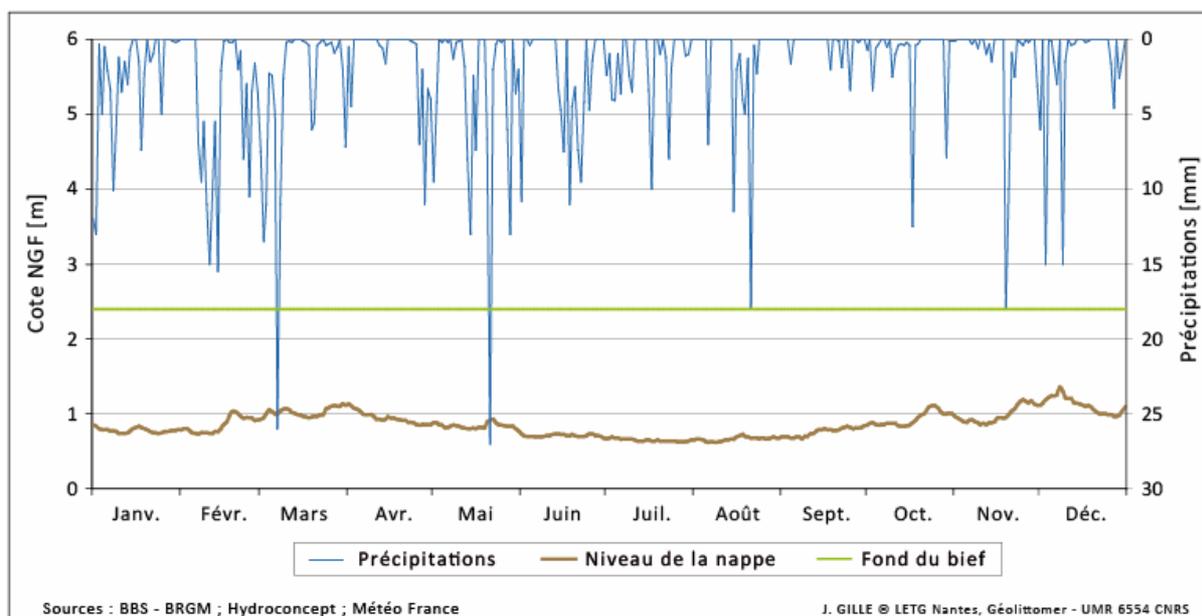


Figure B-37 : Evolution du niveau de la nappe phréatique en fonction des précipitations à Bouin en 2006 (piézomètre du Pont Guérineau)

Cette analyse se confirme au regard de la qualité de l'eau dans les piézomètres et les cours d'eau. Dans le marais, les concentrations dans les eaux souterraines sont bien supérieures à celles présentes en surface dans le Falleron. Elles sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les cours d'eau, à l'exutoire des bassins versants. Les eaux de pluie s'infiltrent sur la bordure continentale du marais et passent latéralement sous le bri [Mounès, 1974].

Dans une conjoncture d'élévation du niveau de la mer, la salinisation des nappes, le relèvement de leur toit, la diminution du gradient vers le niveau de base expliquent la nécessité impérieuse qu'il y a dans les polders, à la fois de surélever des digues, de dessaler les sols par des lâchages d'eau douce et de maintenir un drainage forcé par pompage [Paskoff, 1993].

B.3.2.3 Inondations dans le marais

L'histoire du marais est intimement liée à la lutte contre les inondations. Si pour le bon fonctionnement de certaines fonctions du marais, elles sont nécessaires, elles demeurent aussi néfastes pour les zones urbaines et certaines activités comme la conchyliculture. Les récents événements climatiques montrent que les risques d'inondation de ces zones sont bien réels et que cette lutte est toujours d'actualité. Elles sont de deux types :

- les crues par débordement des cours d'eau, liées au système hydrographique amont ;
- les submersions marines, dues aux tempêtes qui balaient la façade atlantique française.

a) Crues par débordement

De nombreuses crues ont été référencées depuis le début du XX^e siècle. Les principaux événements remarquables sur le Falleron sont les crues de janvier 1936, considérées comme l'événement le plus important, celui de janvier 1988 et ceux de l'hiver 2000-2001 [Mathieu *et al.*, 2009]. Les dernières inondations ont eu lieu en décembre 2009. Durant plusieurs jours, une vingtaine de centimètres a recouvert des quartiers de la commune de Machecoul.

Au-delà d'un certain seuil d'eau précipitée sur les bassins versants, la gestion se montre incapable d'évacuer le trop plein d'eau en raison du calibre des exutoires et de certains goulets d'étranglement sur les étiers. Les inondations de ce type sont dues généralement à des cumuls de précipitations supérieurs à 150 mm, causés par une succession d'épisodes pluvieux durant une semaine [Robin, 1992].

Les volumes d'eau pour de tels épisodes pluvieux sont évalués à 10 millions de m³ pour l'étier de Sallertaine. Ce volume correspond également à la capacité de stockage du marais traversé par cet étier. Le volume total éclusé est donc insuffisant pour assurer la vidange totale du marais et certaines zones restent inondées même en l'absence de pluies supplémentaires. L'évacuation globale de ce marais est assurée en deux semaines environ. Ce délai peut cependant être plus long pour les zones très basses ou celles pour lesquelles le réseau tertiaire fonctionne mal. La hauteur d'eau et la durée de submersion dans le marais peuvent être enfin amplifiées par les vents et les surcotes qui ralentissent l'évacuation des eaux à la mer [ISL Ingénierie, 2004].

b) Submersions marines

Les premières submersions marines mentionnées dans la Baie de Bourgneuf remontent au VI^e siècle, suite au raz de marée de 567 et au vimer de 577 sur l'île de Bouin. La compilation historique des vimers, tempêtes et inondations réalisée par la Société des Historiens du Pays de Retz permet d'y dénombrer 37 événements depuis le début du XX^e siècle jusqu'à la tempête Xynthia en 2010 [Rivron, 2010]. Si toutes n'ont pas donné lieu à des inondations, cette liste exhaustive témoigne de l'omniprésence de ce risque d'inondation dans la Baie de Bourgneuf.

La dernière submersion marine en date est la tempête Xynthia qui est survenue le 28 février 2010 [Chauveau *et al.*, 2011 ; Sarrazin, 2012]. Cette tempête, non exceptionnelle du point de vue de l'événement météo-marin [Feuillet *et al.*, 2012], provoqua des surcotes, se traduisant localement par des submersions sur la quasi-totalité de la façade littorale entre le Port du Collet et la Barre-de-Monts (Figure B-38).

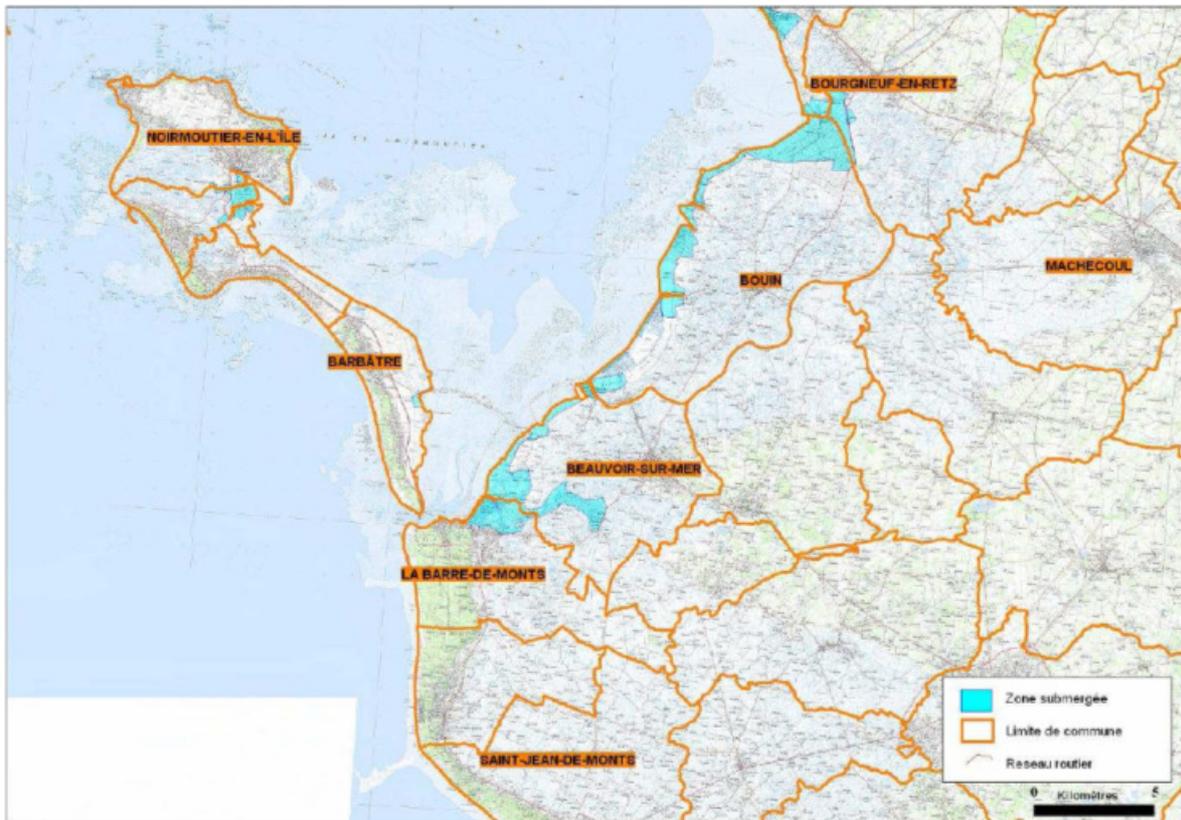


Figure B-38 : Submersions marines dans la baie de Bourgneuf lors de la tempête Xynthia

[Devaux et al., 2012]

Les niveaux marins extrêmes observés durant la tempête Xynthia ont dépassé les niveaux marins extrêmes d'occurrence centennale²⁸ définis par le SHOM Tableau B-16. La cote de référence de 4,20 m IGN 69 a été homogénéisée sur l'ensemble du territoire de Loire-Atlantique. Cette cote est utilisée pour la détermination des zones de vigilance des plans de prévention de risques littoraux [DDTM 44, 2012].

Marégraphe	Niveau extrême enregistré lors de Xynthia (m IGN 69)	Niveau d'occurrence centennale estimé par le SHOM (m IGN 69)	Ecart entre le niveau Xynthia et le niveau marin centennal (cm IGN 69)
Saint-Nazaire	4,20	[4,00 - 4,10]	> 10
Pointe Saint-Gildas	3,96	[3,80 - 3,90]	> 6
Port du Collet	4,20	[3,90 - 4,00]	> 20

Tableau B-16 : Niveaux marins extrêmes observés durant la tempête Xynthia en Loire-Atlantique

(d'après [DDTM 44, 2010])

Les entrées d'eau ont été consécutives au débordement des ouvrages en de nombreux secteurs et à la formation de brèches [Devaux *et al.*, 2012]. La commune la plus

²⁸ Niveaux égaux ou dépassés en moyenne une fois par siècle.

touchée par les inondations est Moutiers-en-Retz, au niveau du bourg et au niveau du Port du Collet (Tableau B-17).

Communes	Surface communale (ha)	Surface submergée (ha)	% de la surface submergée	Nombre total bâtiments	Nombre de bâtiments dans la zone submergée	% de bâtiments dans la zone submergée
Pornic	9464	4	0,04	9259	32	0,3
Les Moutiers-en-Retz	978	129	13,2	1243	286	23,0
Bourgneuf-en-Retz	5345	113	2,1	1621	7	0,4
Bouin	5209	747	14,3	2944	224	7,6
Beauvoir-sur-Mer	3511	427	12,2	3965	225	5,7
La Barre-de-Monts	2813	186	6,6	3681	105	2,9
Barbatre	1301	14	1,1	4502	0	0
L'Epine	857	96	11,2	3558	90	2,5
Noirmoutier-en-l'Île	1990	26	1,3	9949	182	1,8
TOTAL		1742			1151	

Tableau B-17 : Données chiffrées sur les surfaces submergées suite à la tempête Xynthia
(d'après [Devaux et al., 2012])

A proximité du Port du Collet, la digue a été reconstruite sur une soixantaine de mètres pendant trois semaines suite à cette tempête [Lazarevic et Pipaud, 2010]. Les entrées d'eau se sont produites en raison d'un niveau d'eau supérieur à la cote du cordon dunaire au niveau du bourg et à celui des rives du port. De nombreuses dégradations ont été relevées. La submersion au Port du Collet s'est accompagnée de vitesses d'écoulement importantes [Devaux *et al.*, 2012], qui ont causées de fortes dégradations sur la voirie et sur les bâtiments (Photographie B-9). Dans une moindre mesure, des dégradations ont également été relevées sur les bâtiments au niveau du bourg (Photographie B-10).



Photographie B-9 : Dégâts sur la voirie dans le secteur du Port du Collet, Les Moutiers-en-Retz (44)



Photographie B-10 : Inondation de l'avenue de la mer, Les Moutiers-en-Retz (44)

c) Plans de prévention des risques

La tempête Xynthia provoqua une prise de conscience plus importante de la dangerosité des submersions marines. Elle entraîna une accélération des démarches pour la mise en œuvre des plans de prévention. Une circulaire interministérielle fut émise à cet effet en 2010 afin [MEEDDM, 2010a] :

- de délimiter les zones de vigilance (zones d'aléas forts), c'est-à-dire submergées par au moins un mètre d'eau, et au vu de la cote de référence à 4,20 m IGN 69 ;
- d'intensifier et d'accélérer la mise en œuvre des Plans de Prévention des Risques Littoraux.

Ces derniers ont été prescrits sur les communes les plus exposées au risque de submersion marine. Ils sont au nombre de quatre sur le BVBB (Figure B-39). Ils doivent être approuvés d'ici 2014.

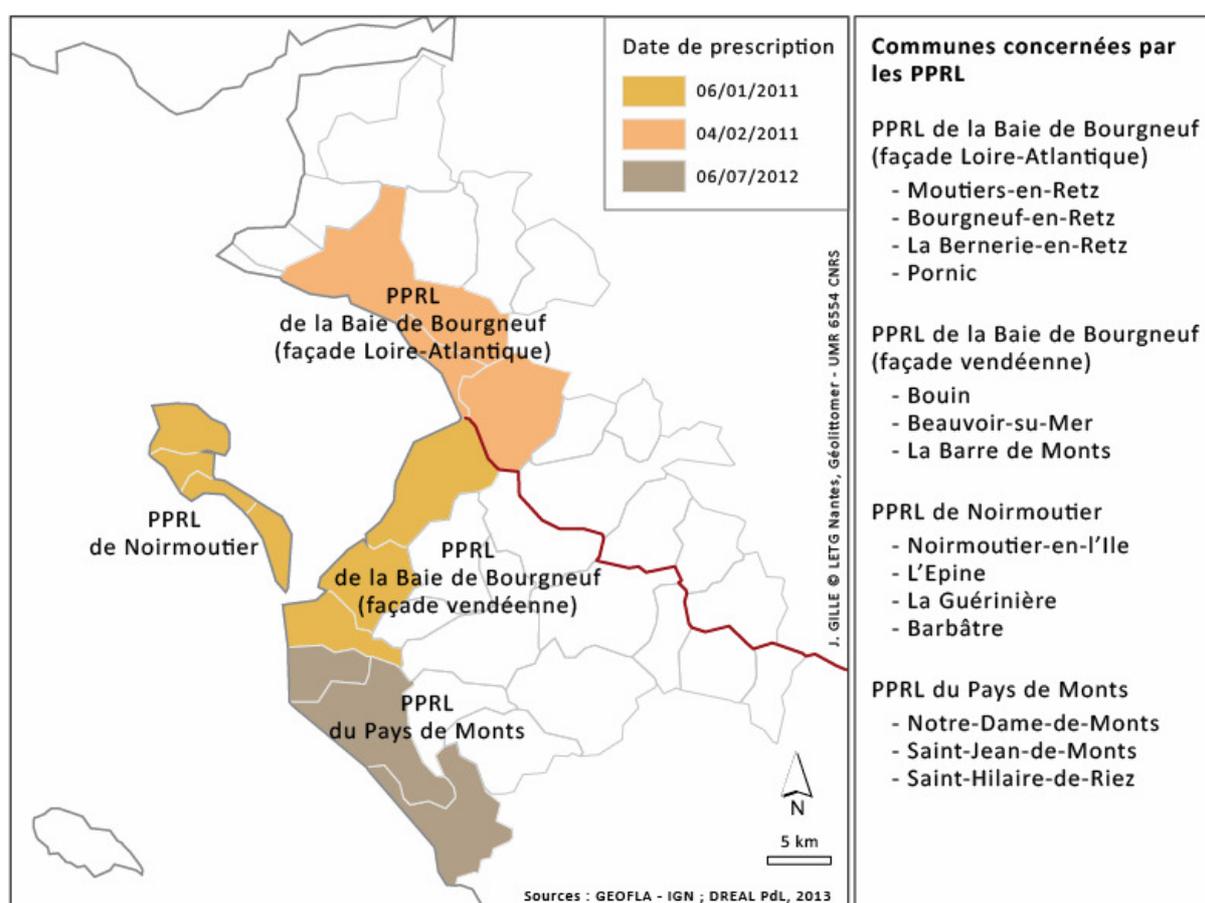


Figure B-39 : Plans de Prévention des Risques Littoraux du BVBB

Au niveau des cours d'eau, le processus commença en 2004 dans la Région des Pays de la Loire. L'accent a été mis dans un premier temps sur les principaux cours d'eau (Loire, Vilaine, Erdre et bassin de Grand Lieu). Les études se poursuivent pour les cours d'eau secondaires. A ce jour, il n'existe pas de Plans de Prévention des Risques d'Inondations pour les cours d'eau côtiers. Un atlas des zones inondables des fleuves côtiers a été réalisé en 2009 à partir d'une analyse hydrogéomorphologique pour la

Loire-Atlantique. Le Falleron est le seul cours d'eau cartographié du BVBB dans cette étude [Mathieu *et al.*, 2009]. Les différents lits du cours d'eau y sont délimités, ainsi que les structures géomorphologiques et aménagements anthropiques qui ont un rôle hydrodynamique (Figure B-40).

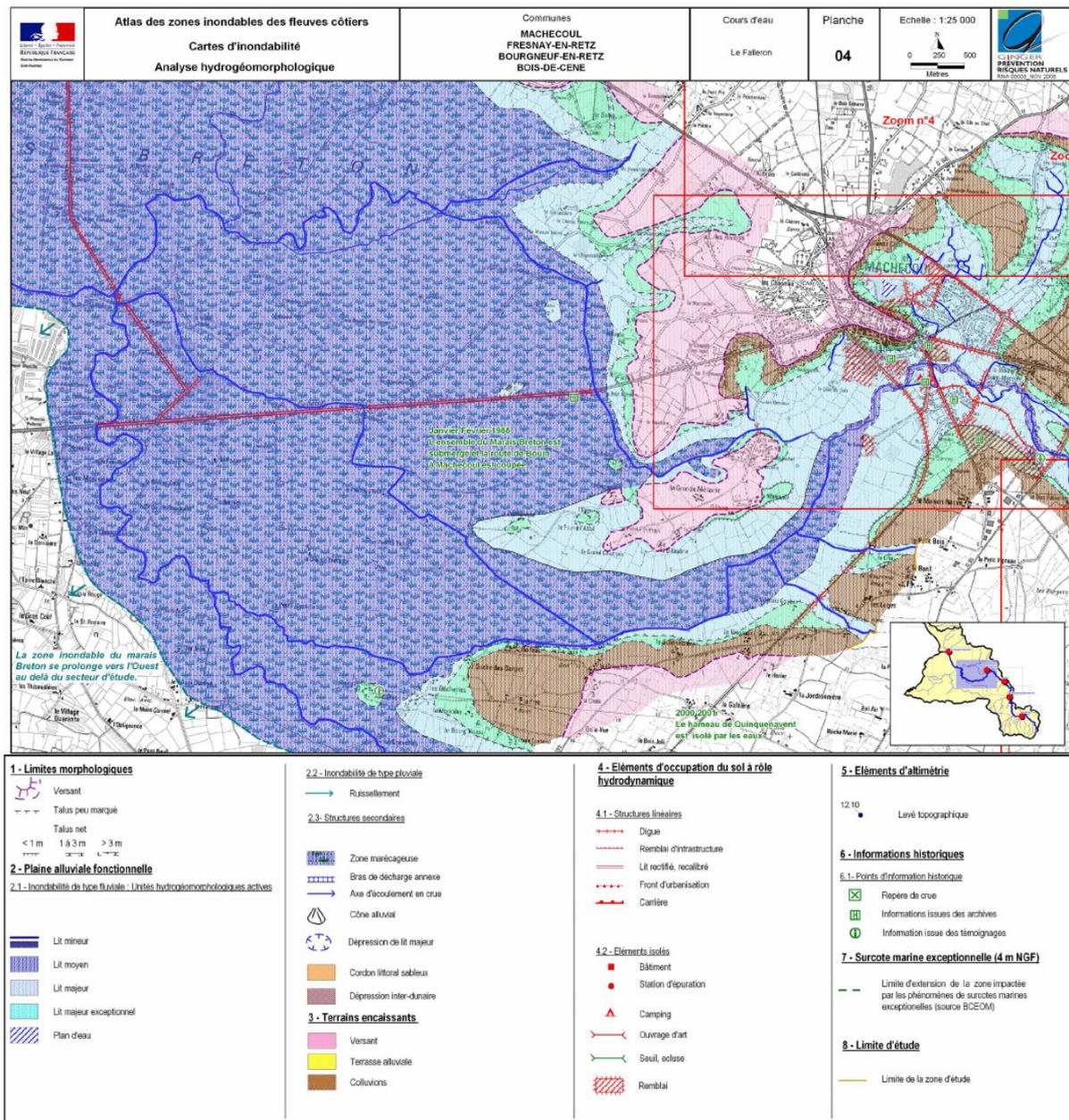


Figure B-40 : Zones inondables à l'entrée du Marais Breton, au niveau de Machecoul [Mathieu *et al.*, 2009]

B.3.3 Qualité des milieux

B.3.3.1	Sources des pollutions.....	103
B.3.3.2	Etat hydromorphologique.....	105
B.3.3.3	Etat de la qualité des eaux.....	108

Les eaux continentales arrivant dans la baie drainent une superficie d'environ 500 km², génératrice d'effluents urbains et agricoles qui entraînent une dégradation de la qualité de l'eau. Solvant universel, l'eau se charge d'une grande quantité d'éléments dissous tout au long de son parcours.

B.3.3.1 **Sources des pollutions**

L'occupation et l'exploitation du milieu par l'Homme sont génératrices d'effluents, qui lorsqu'ils atteignent le réseau hydrographique, contaminent l'eau (Figure B-41). La pollution dans les cours d'eau est souvent due aux manques de traitements ou insuffisances des systèmes d'épuration collectif et non collectif. De fortes concentrations peuvent être observées dans les cours d'eau du fait des faibles étiages qui ne permettent pas une dilution suffisante de ces flux [ADBVBB, 2006a].

Le drainage des terres agricoles sur les bassins versants a des incidences sur le marais et pose des problèmes au niveau quantitatif et qualitatif sur la ressource en eau. Le drainage tend à accélérer la restitution de l'eau dans les cours d'eau. L'onde de crue est par conséquent modifiée et les crues se retrouvent plus violentes au niveau des marais. Les différents produits (nutriments, fertilisants, phytosanitaires) épandus sur les terres agricoles drainées se retrouvent plus vite dans les cours d'eau. Ils n'ont pas eu le temps d'être consommés ou bloqués. Les sédiments sont aussi rapidement évacués par le drainage, contribuant ainsi à l'envasement des chenaux dans le marais [Hydroconcept, 2007a].

Les nutriments peuvent aller jusqu'à provoquer des catastrophes lorsque les circonstances le permettent : arrivée d'eaux douces chargées en nutriments, périodes d'ensoleillement qui réchauffent brutalement les eaux, période de mortes-eaux qui se marquent par un trop faible brassage par les courants de marée. Ces conditions sont idéales pour qu'éclatent des « blooms » phytoplanctoniques qui peuvent s'accompagner de la prolifération d'un dinoflagellé nuisible à la consommation des coquillages (*Dinophysis*) [Miossec, 2004].

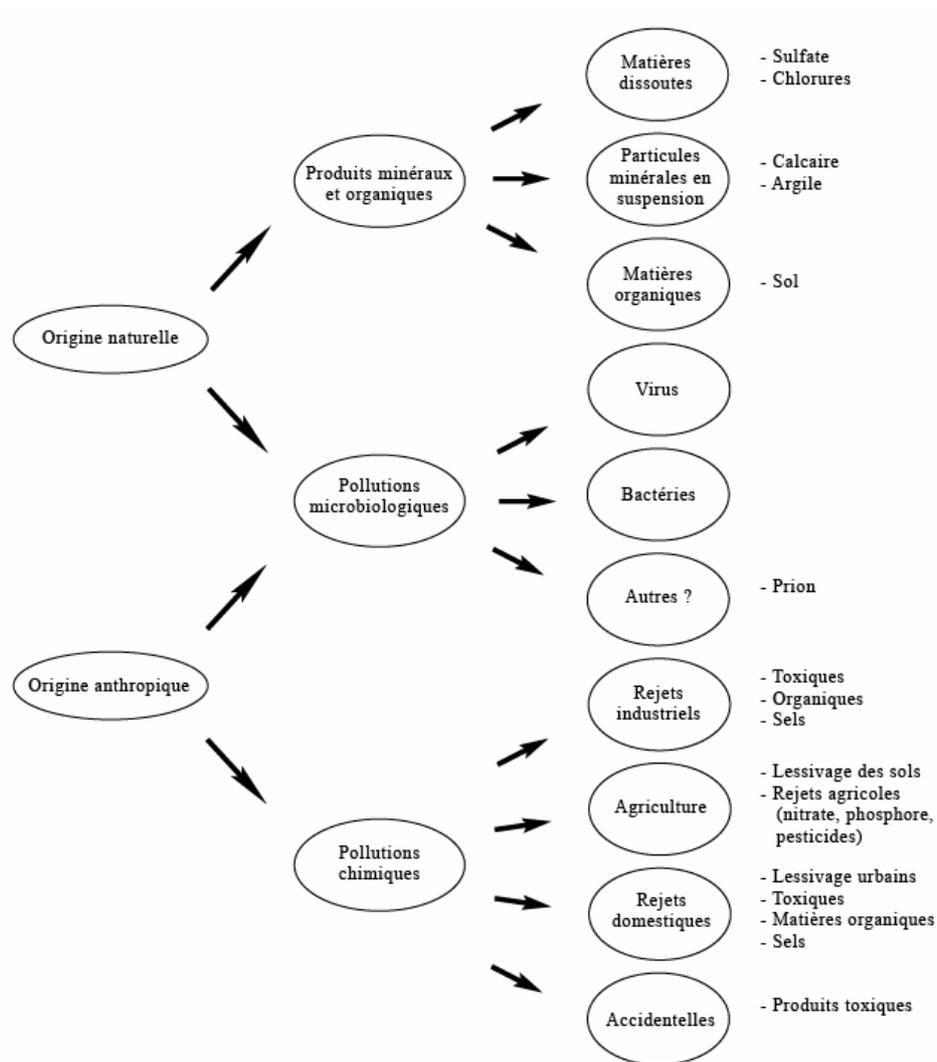


Figure B-41 : Origine des produits rencontrés dans l'eau
(d'après [Bourrier, 2008])

Les évènements naturels jouent un rôle dans les processus écologiques. Ils peuvent favoriser la présence / absence des substances dans l'environnement (Figure B-42). L'objectif est donc de (re)trouver un équilibre écologique, compatible avec l'urbanisation et les activités humaines.

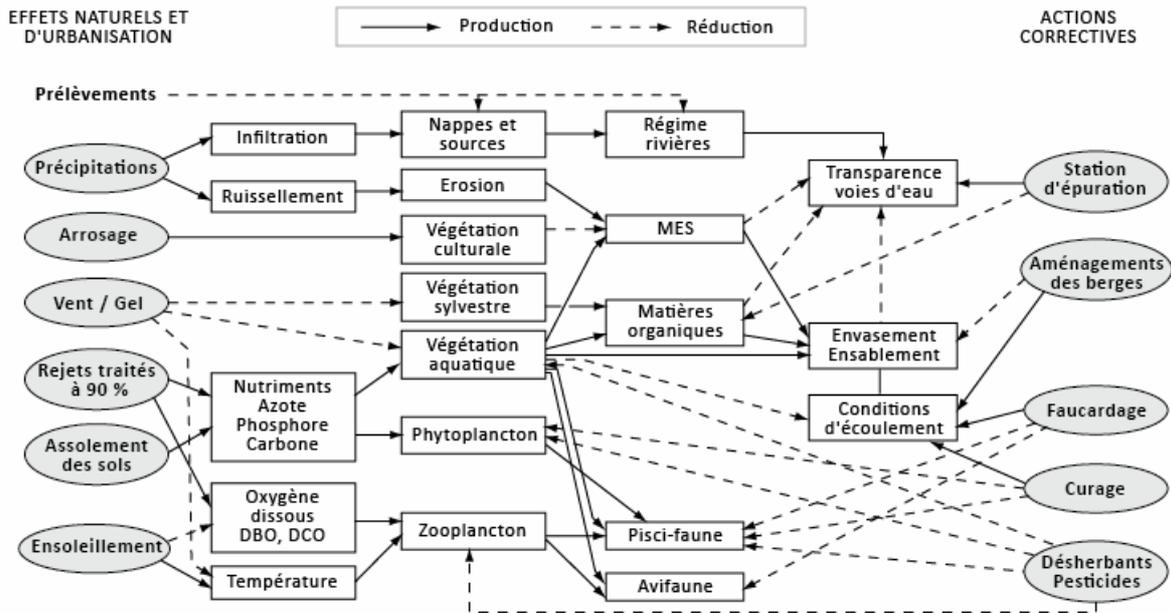


Figure B-42 : Effets et actions sur le cycle écologique
(d'après [Bourrier, 2008])

B.3.3.2 Etat hydromorphologique

L'état hydromorphologique des cours d'eau est défini à l'aide de la méthode du Réseau d'Evaluation des Habitats. Son principe repose sur l'évaluation de la qualité des cours d'eau par rapport aux exigences globales des poissons. Cette analyse se base sur des critères physiques (lit mineur, berges et ripisylve, lit majeur et annexes) et dynamiques (débit, continuité, ligne d'eau).

L'état physique du Falleron est considéré comme étant en bon état pour plusieurs des paramètres (Figure B-43). Les compartiments berge, débit et lit mineur sont ainsi en bon état sur la majeure partie du cours d'eau. Seule la continuité écologique du Falleron présente des altérations élevées sur 40 % du linéaire.

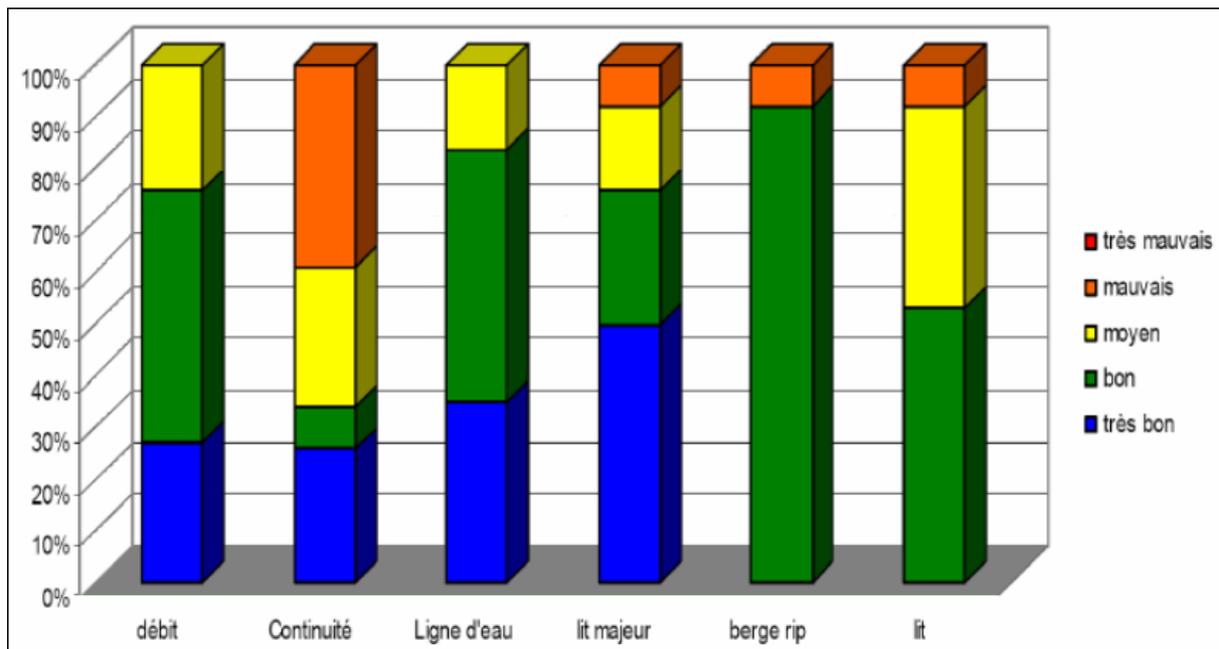


Figure B-43 : Altérations physiques du Falleron
[Hydroconcept, 2010]

A l'inverse, les cours d'eau dans la partie sud du Marais Breton présentent des altérations beaucoup plus significatives (Figure B-44). Excepté la ligne d'eau, l'ensemble des autres paramètres est altéré sur la majeure partie de leur linéaire.

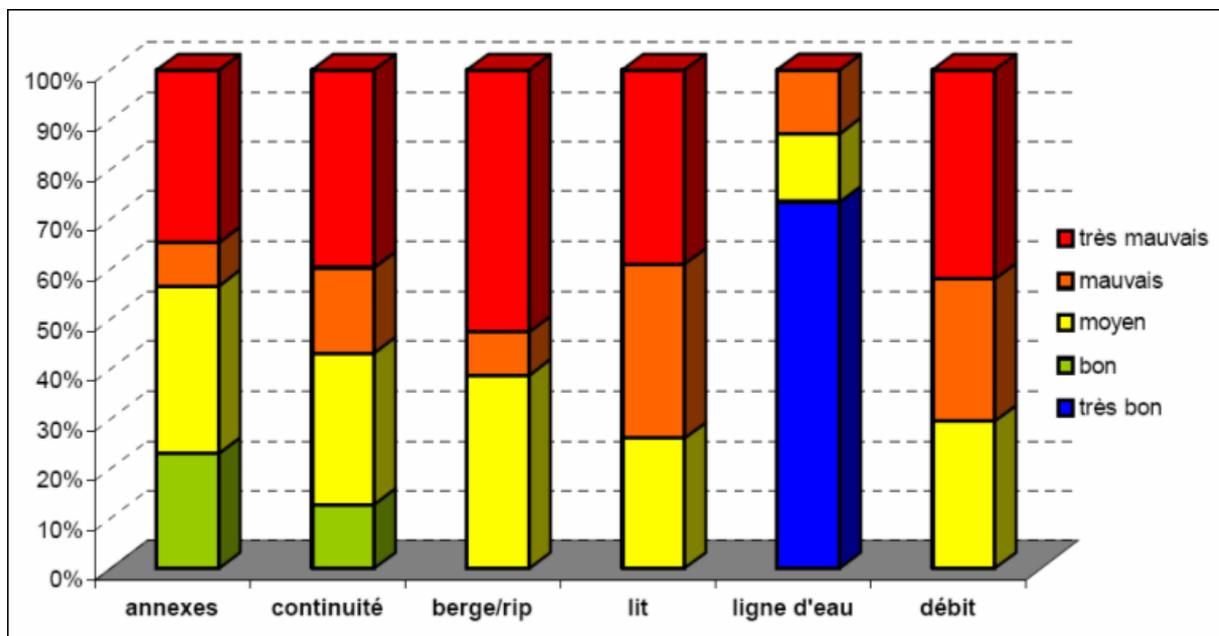


Figure B-44 : Altérations physiques du ruisseau du Grand Taizan
[Hydroconcept, 2007b]

La fonction hydraulique se dégrade dans la partie interne du marais, et à l'inverse, cette fonction s'avère peu dégradée à proximité de l'entrée et de la sortie (Figure B-45). Le facteur de cette dégradation est lié à l'envasement des chenaux (Figure B-46). Le réseau primaire est peu colmaté grâce à un entretien régulier. Les réseaux

secondaires et tertiaires montrent en moyenne un colmatage²⁹ de 38 % après 10 ans et de 51 % après 15 ans. La vitesse de colmatage varie entre 3 et 6 cm/an suivant la localisation et l'ancienneté du curage [Massé *et al.*, 2001].

La partie amont du bassin versant, drainée par le Falleron, est assez pentue. L'envasement y est limité, tout comme sur le secteur du marais de Bourgneuf au nord et en aval du Falleron, où des chasses d'eau sont effectuées pour vidanger le marais salé et dévaser le Port du Collet.

A l'intérieur du marais, la forte sinuosité des chenaux, conjuguée à une section d'écoulement plus petite entraînent une diminution du débit, favorisant ainsi l'envasement des chenaux. Dans le secteur du marais de Bois de Céné, cet envasement est lié aux difficultés pour l'évacuation des eaux à la mer. Enfin, cette dégradation est également due à l'encombrement végétal très important sur les secteurs abandonnés, et à l'érosion des berges liée au piétinement bovin, aux ragondins, aux écrevisses et à la gestion des niveaux d'eau [Hydroconcept, 2010].

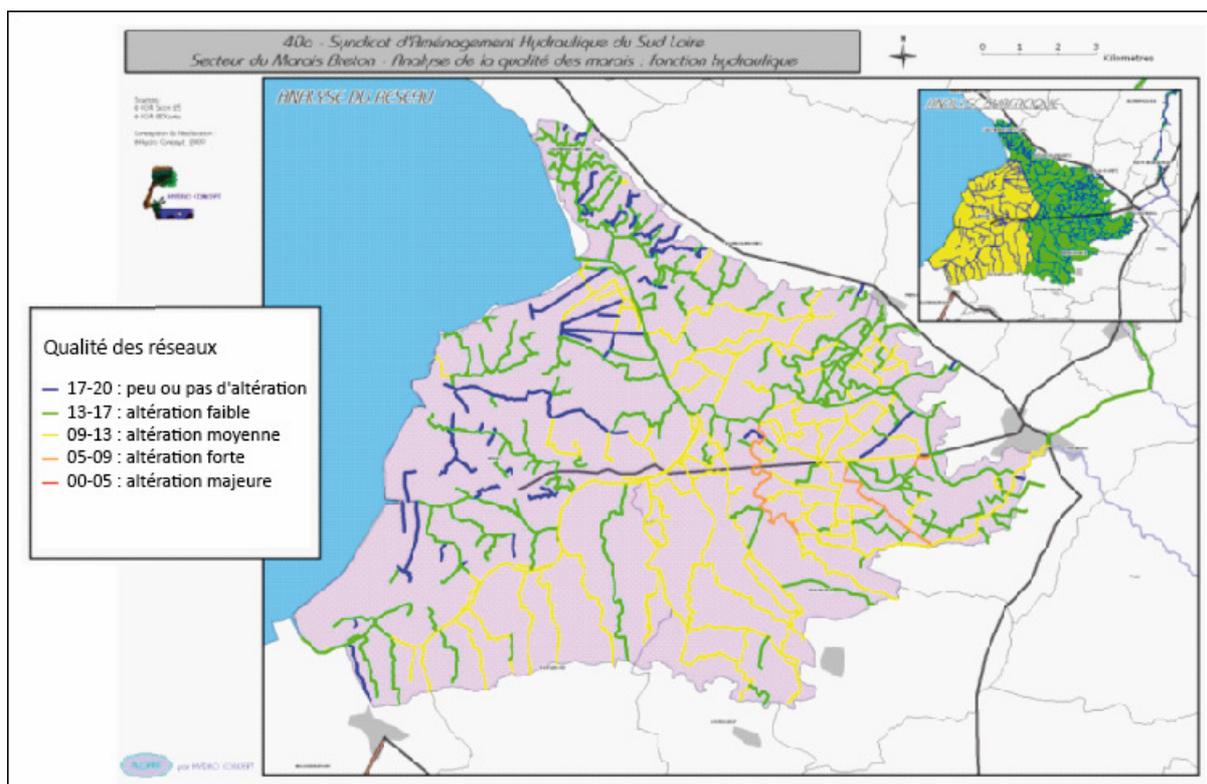


Figure B-45 : Evaluation de l'altération de la fonction hydraulique de la partie nord du Marais Breton
[Hydroconcept, 2010]

²⁹ Hauteur de sédiments rapportée à la hauteur de l'eau et des sédiments.

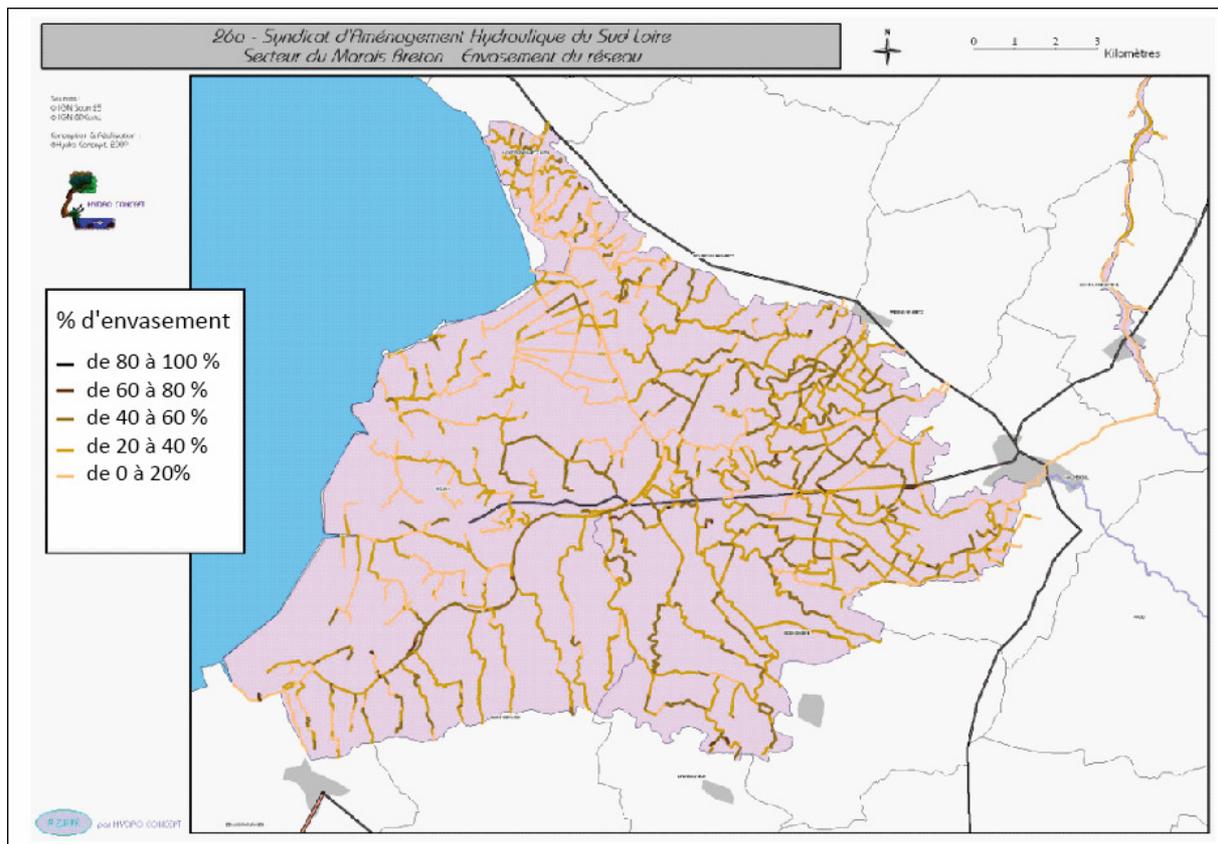


Figure B-46 : Degré d'envasement de la partie nord du Marais Breton
[Hydroconcept, 2010]

B.3.3.3 Etat de la qualité des eaux

Les objectifs de qualité de l'eau retenus dans le cadre du SAGE se basent sur le "Système d'Evaluation de la Qualité physico-chimique de l'eau" (SEQ-Eau), élaboré par les Agences de l'Eau [Agences de l'Eau, 1999]. Pour le BVBB, seuls la fonction "potentialités biologiques" et l'usage "loisirs et sports aquatiques" sont retenus. La fonction "potentialités biologiques" traduit l'aptitude de l'eau à garantir la diversité hydrobiologique et piscicole et les équilibres biologiques. L'usage "loisirs et sports aquatiques" correspond à des parcours en barque, canoë sur les canaux des marais. Excepté le projet d'activités nautiques sur le canal de Haute Perche, cet usage est encore marginal. Il présente toutefois un potentiel de développement [ADBVB, 2004].

Ces objectifs sont définis de manière différente selon les suivis. En effet, certains prennent en compte les résultats bruts des analyses, d'autres les classements de qualité. Il convient donc de noter que suivant la période et le nombre de résultats pris en compte, les objectifs peuvent ou non être respectés [ADBVB, 2006b].

L'échantillonnage spatio-temporel pour le suivi de la qualité de l'eau est très disparate au niveau des paramètres et des années (cf Annexe 2, p.301). Il est par conséquent difficile d'établir un bilan complet pour tous les paramètres sur la même période et pour l'ensemble des points. Les données de l'Observatoire de l'Eau ont déjà été valorisées sur ces différents aspects dans des rapports de l'ADBVB

[ADBVB, 2006b, 2006c, 2006d] et des mémoires universitaires [Jousseume, 2010 ; Le Borgne et Balmain, 2010 ; Malgogne, 2009]. L'analyse suivante s'en tiendra à présenter quelques valeurs caractéristiques afin de fixer les ordres de grandeur pour les nutriments / bactéries / pesticides. Lorsque c'est possible, le bilan est réalisé pour chaque cours d'eau à partir de deux stations (Figure B-47) : la première à l'entrée et la seconde à la sortie du marais doux. Elles sont distantes l'une de l'autre d'une dizaine de kilomètres.

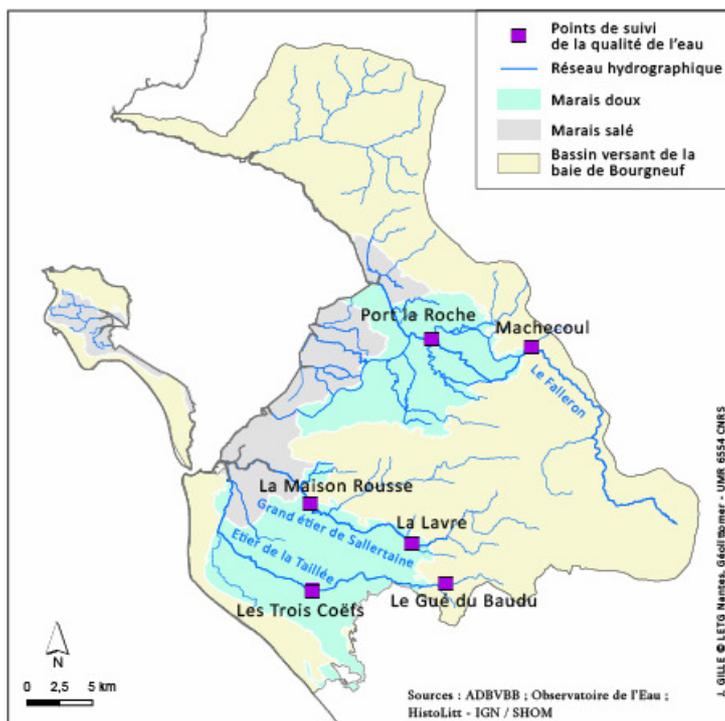


Figure B-47 : Localisation des stations étudiées pour la qualité de l'eau

a) *Nutriments*

Sur la période 2004-2008, l'ammonium est systématiquement réduit en aval du marais doux, le long du grand étier de Sallertaine et celui de la Taillée (Tableau B-18). En revanche, dans le Falleron, il peut être à des concentrations plus élevées en aval qu'en amont. L'année 2006 est marquée par un pic de concentrations égal à 2,99 mg/L le 12 juin (Figure B-48), ce qui contribue à majorer la moyenne (0,85 mg/L) alors que la médiane est de 0,46 mg/L. Les concentrations minimales en aval du Falleron sont supérieures à celles en amont en 2005, 2006 et 2008. En moyenne, le marais doux permet un abattement variant de 38 à 67 % dans le Falleron, de 87 à 96 % dans le grand étier de Sallertaine et de 57 à 89 % dans l'étier de la Taillée. Enfin, les concentrations moyennes les plus élevées sont retrouvées dans le grand étier de Sallertaine. Elles y varient de 1,38 à 5,08 mg/L alors qu'elles ne dépassent pas les 0,84 mg/L dans le Falleron et 0,55 mg/L dans l'étier de la Taillée. Le pic maximal mesuré est égal à 18,80 mg/L (24 juin 2004) pour le grand étier de Sallertaine, 8,92 mg/L (13 mars 2008) pour l'étier de la Taillée et 3,47 mg/L (23 août 2005) pour le Falleron.

		AVAL					AMONT					
Cours d'eau	Statistiques	2004	2005	2006	2007	2008	2004	2005	2006	2007	2008	
NH4	Falleron	Nombre	4	6	5	12	11	12	12	12	12	12
		Moyenne	0,16	0,28	0,85	0,18	0,10	0,42	0,84	0,28	0,29	0,19
		Maximum	0,31	0,65	2,99	0,68	0,24	1,58	3,47	1,35	0,53	0,41
		Minimum	0,06	0,08	0,08	0,05	0,05	0,07	0,01	0,01	0,05	0,03
	Sallertaine	Nombre	12	12	12	12	11	6	7	8	12	11
		Moyenne	0,41	0,17	0,16	0,28	0,18	5,08	4,14	2,03	2,18	1,38
		Maximum	1,21	0,60	0,39	0,99	0,54	18,80	8,82	5,28	3,93	3,68
		Minimum	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,30	0,91	0,05
	Taillée	Nombre		7	6	6	5		2	6	10	11
Moyenne			0,08	0,21	0,19	0,12		0,25	0,55	0,43	1,11	
Maximum			0,18	0,40	0,76	0,40		0,44	1,35	0,99	8,92	
Minimum			0,05	0,05	0,05	0,05		0,05	0,07	0,07	0,05	
NO2	Falleron	Nombre	4	6	4	7	11	12	12	12	12	12
		Moyenne	0,08	0,10	0,37	0,16	0,21	0,19	0,29	0,27	0,22	0,20
		Maximum	0,12	0,22	0,80	0,58	0,83	0,43	1,24	0,60	0,41	0,35
		Minimum	0,06	0,01	0,03	0,02	0,08	0,04	0,01	0,04	0,07	0,06
	Sallertaine	Nombre				7	11		1		3	5
		Moyenne				0,07	0,09		0,26		0,34	0,20
		Maximum				0,24	0,30				0,78	0,24
		Minimum				0,02	0,02				0,02	0,13
	Taillée	Nombre		1		3	5		2		2	
Moyenne			0,27		0,09	0,04		0,19		0,46		
Maximum					0,24	0,10		0,19		0,60		
Minimum					0,02	0,02		0,19		0,32		
NO3	Falleron	Nombre	4	6	5	12	11	12	12	12	12	12
		Moyenne	6,60	8,35	9,80	8,42	13,23	10,78	15,86	17,96	17,02	21,35
		Maximum	16,70	18,70	17,10	20,30	41,60	23,90	66,90	37,90	44,00	46,70
		Minimum	0,50	0,50	0,90	2,00	2,97	0,40	0,60	0,70	1,50	1,70
	Sallertaine	Nombre	12	12	12	12	11	6	7	7	7	5
		Moyenne	4,55	5,26	6,27	3,65	3,89	7,28	10,60	10,63	10,14	9,66
		Maximum	8,63	20,80	16,30	9,34	8,87	21,70	29,20	29,90	25,20	21,90
		Minimum	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,85
	Taillée	Nombre		7	6	6	5		2	6	8	11
Moyenne			3,16	4,98	2,49	2,28		17,90	45,05	33,33	21,89	
Maximum			6,15	12,80	4,19	4,72		19,00	68,60	65,90	30,80	
Minimum			2,00	2,00	2,00	0,65		16,80	25,10	18,40	2,00	
PO4	Falleron	Nombre	4	6	5	12	11	12	12	12	12	12
		Moyenne	0,52	0,39	0,74	0,29	0,25	1,04	2,36	1,15	0,70	0,55
		Maximum	0,89	0,58	1,25	0,57	0,43	2,44	6,38	2,57	1,19	0,92
		Minimum	0,22	0,23	0,26	0,04	0,10	0,50	0,46	0,38	0,27	0,35
	Sallertaine	Nombre	12	12	12	12	11	6	7	8	12	11
		Moyenne	0,54	0,89	0,58	0,51	0,43	2,14	1,91	1,19	1,60	1,21
		Maximum	1,19	2,11	1,16	0,88	0,65	4,74	5,37	2,38	4,86	2,46
		Minimum	0,18	0,23	0,25	0,17	0,20	0,35	0,48	0,34	0,42	0,20
	Taillée	Nombre		6	6	6	5		2	6	10	11
Moyenne			0,11	0,40	0,46	0,38		0,34	0,43	0,38	0,49	
Maximum			0,25	1,28	1,23	0,75		0,36	0,70	0,85	1,99	
Minimum			0,04	0,05	0,11	0,10		0,32	0,31	0,18	0,22	

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS
Source : Observatoire de l'Eau - Analyses LEAV

Tableau B-18 : Valeurs caractéristiques des nutriments en amont et aval du marais doux (en rouge : valeur plus élevée en aval qu'en amont)

Le suivi du nitrite est irrégulier et pas très représentatif pour le grand étier de Sallertaine et celui de la Taillée (Figure B-48). Il permet toutefois de voir qu'occasionnellement les concentrations en aval du marais doux peuvent être supérieures à celles en amont. Les concentrations maximales fluctuent en amont entre 0,35 et 1,24 mg/L dans le Falleron, entre 0,24 et 0,78 mg/L dans le grand étier de Sallertaine et entre 0,19 et 0,60 mg/L dans celui de la Taillée (Tableau B-18). En

aval, elles varient de 0,12 à 0,83 mg/L dans le Falleron, de 0,24 à 0,30 mg/L dans le grand étier de Sallertaine et de 0,01 à 0,24 mg/L dans celui de la Taillée.

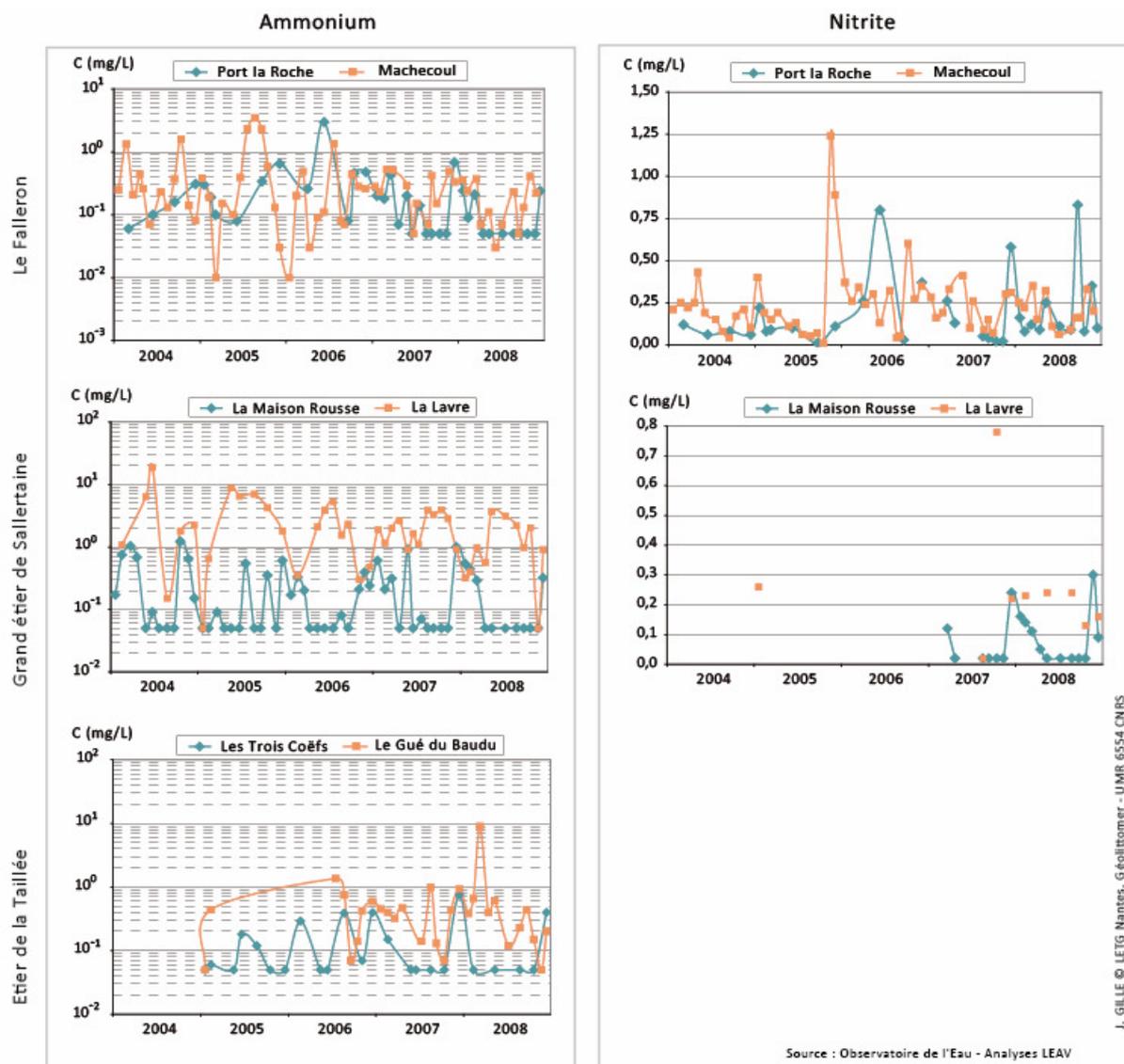


Figure B-48 : Evolution de l'ammonium et du nitrite dans le marais doux

Le nitrate se dégrade au cours de son transit dans le marais doux (Figure B-49). Les concentrations moyennes passent dans le Falleron de 10,78 – 21,35 mg/L en amont à 6,60 – 13,23 mg/L en aval (Tableau B-18). La tendance est la même dans le grand étier de Sallertaine avec une évolution de 7,28 – 10,63 mg/L en amont à 3,65 – 6,27 mg/L en aval. La plus forte variation se situe au niveau de l'étier de la Taillée avec des concentrations moyennes en amont de 17,90 – 45,05 mg/L et en aval de 2,28 – 4,98 mg/L. L'abattement moyen oscille donc entre 38 et 50 % dans le Falleron, entre 37 et 64 % dans le grand étier de Sallertaine et entre 82 et 93 % dans l'étier de la Taillée. Les concentrations maximales mesurées sont de 66,90 mg/L dans le Falleron, de 29,90 mg/L dans le grand étier de Sallertaine et de 68,60 mg/L dans celui de la Taillée. Les concentrations minimales suivent la même progression dans les deux

étiers. Seul le Falleron présente des concentrations légèrement supérieures en aval qu'en amont 4 années sur 5.

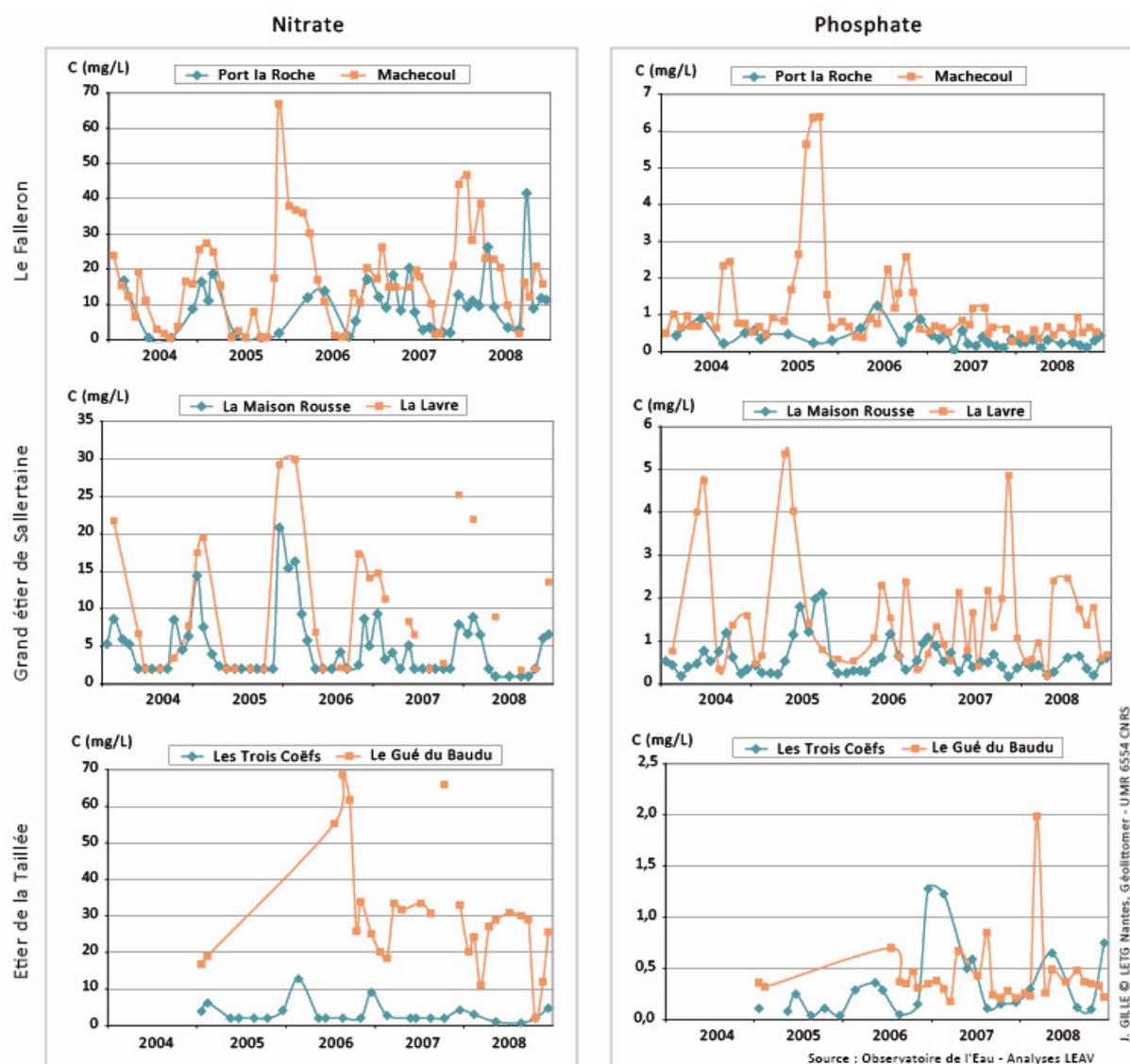


Figure B-49 : Evolution du nitrate et du phosphate dans le marais doux

Le passage des flux d'eau dans le marais s'avère également bénéfique pour le phosphate dans le Falleron et le grand étier de Sallertaine (Figure B-49). Les concentrations moyennes dans le Falleron fluctuent entre 0,55 et 2,36 mg/L en amont et 0,25 et 0,74 mg/L en aval (Tableau B-18). Dans le grand étier de Sallertaine, elles vont à l'amont de 1,19 à 2,14 mg/L et en aval de 0,43 à 0,89 mg/L. La réduction de phosphate en sortie est évaluée entre 36 et 83 % dans le Falleron et entre 51 et 75 % dans le grand étier de Sallertaine.

Le nombre de mesures n'est pas suffisant pour l'étier de la Taillée pour en déterminer une tendance significative. Les concentrations en aval sont dans les mêmes ordres, voire supérieures qu'en amont. La seule chose remarquable est que les concentrations minimales en aval (0,04 – 0,11 mg/L) sont inférieures à celles en amont (0,18 – 0,32 mg/L).

b) Bactéries

Le suivi régulier des bactéries s'est arrêté fin 2003. De 2004 à 2006, les analyses continuèrent sur le Falleron avec une fréquence de 4 en 2004, 6 en 2005 et 4 en 2006. Les autres points suivis l'ont été uniquement en 2005 à 2 reprises (cf Annexe 2, p.301).

La qualité bactériologique de l'eau dans le Falleron est dans l'ensemble de bonne qualité, même s'il peut y avoir de temps à autre quelques dépassements de seuil. Les concentrations médianes sont inférieures au seuil fixé par le SAGE pour les *E. Coli* : 184 u./100 g de CLI au Port la Roche et 526,5 u./100 g de CLI à Machecoul (Figure B-50). Ce seuil est dépassé à deux reprises à Machecoul et une fois au Port la Roche. La concentration maximale mesurée à Machecoul est égale à 154180 *E. Coli*/100 g de CLI et au Port la Roche à 4030 *E. Coli*/100 g de CLI. Les concentrations mesurées au Port la Roche sont supérieures à 3 reprises à celles de Machecoul en 2005. Les concentrations minimales sont égales pour les deux sites à 38 *E. Coli*/100 g de CLI.

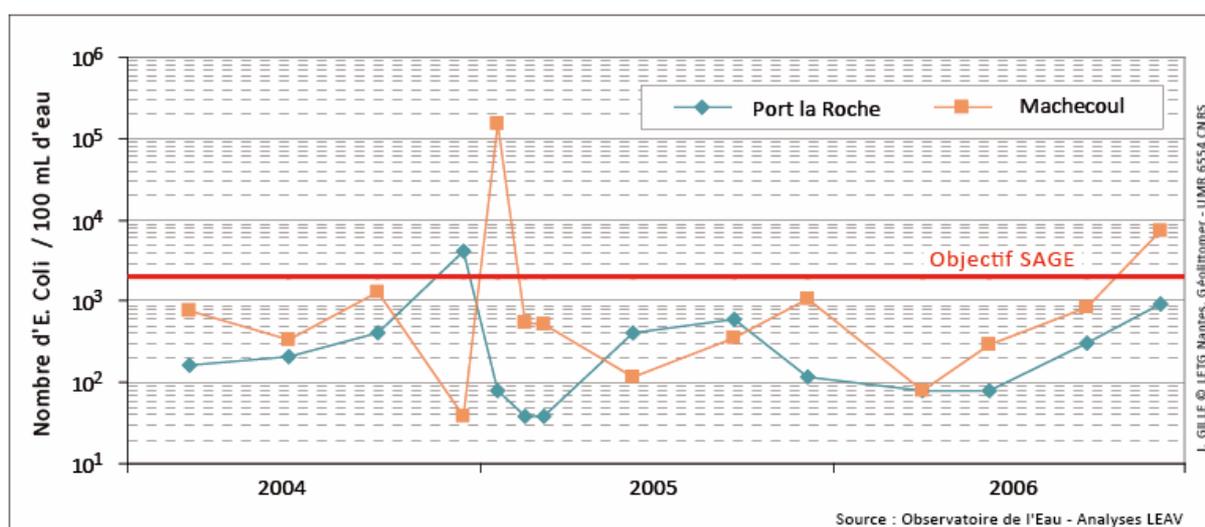


Figure B-50 : Concentration en *E. Coli* au niveau du Port la Roche et de Machecoul de 2004 à 2006

La concentration en streptocoques au Port la Roche est la moitié du temps supérieure à celle de Machecoul (Figure B-51). Les concentrations les plus élevées sont toutefois mesurées à Machecoul, avec un maximum de 8630 u./100 g de CLI, contre 1860 u./100 g de CLI au Port la Roche. Les concentrations médianes sont de 97,5 u./100 g de CLI à Machecoul et de 58 u./100 g de CLI au Port la Roche.

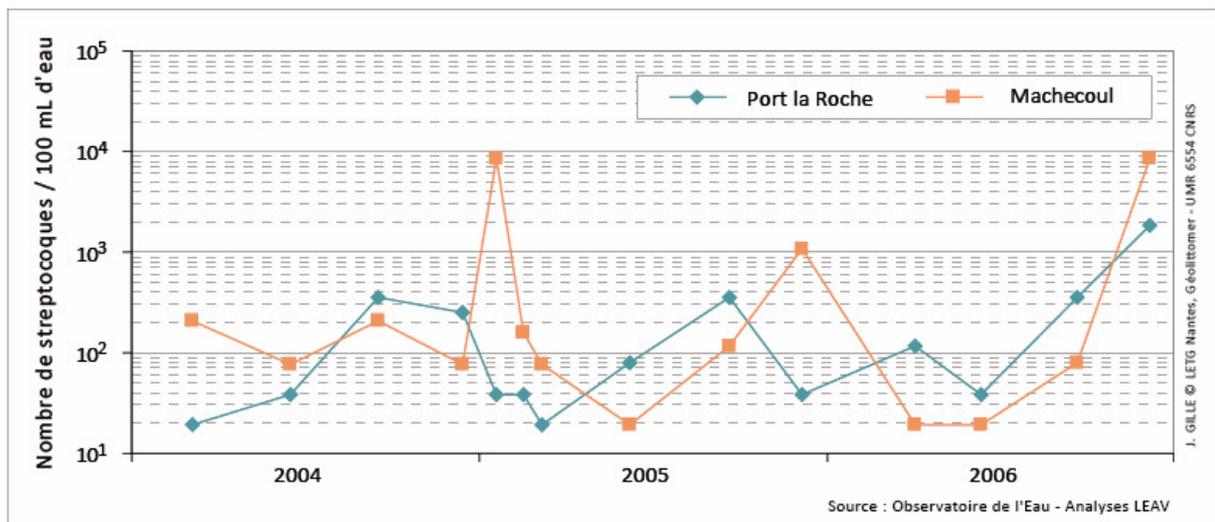


Figure B-51 : Concentration en streptocoques au niveau du Port la Roche et de Machecoul de 2004 à 2006

Les risques sanitaires liés à la consommation de coquillages contaminés par des micro-organismes fécaux sont évalués à l'aide des *E. Coli*. La surveillance est renforcée dès que le seuil microbiologique est dépassé pour chaque classe de qualité [Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011] : 1000 *E. Coli*/100 g de CLI pour la classe A³⁰ ; 4 600 *E. Coli*/100 g de CLI pour la classe B ; 46 000 *E. Coli*/100 g de CLI pour la classe C.

La qualité microbiologique pour l'huître creuse est moyenne à la Coupelasse. Les teneurs en *E. Coli* sont (Figure B-52) :

- pour au moins 90 % des résultats inférieures à 4 600 u./100 g de CLI ;
- pour l'ensemble des résultats inférieures à 46 000 u./100 g de CLI.

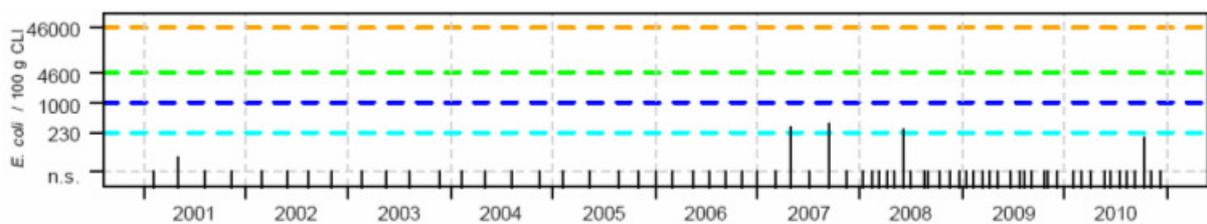


Figure B-52 : Teneurs en *E. Coli* dans l'huître creuse à la Coupelasse
(n.s. : non significatif)
[Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011]

Le suivi bactériologique des autres secteurs du marais est insuffisant pour permettre d'en faire un bilan depuis 2004 (cf **Annexe 2**, p.301).

Les streptocoques fécaux sont plus présents chez l'animal alors que les coliformes fécaux se retrouvent principalement chez l'Homme. Par gramme de fèces, les valeurs

³⁰ Seuil d'alerte abaissé à 203 *E. Coli* / 100 g de CLI depuis 2012.

suivantes multipliées par 10^6 sont en moyenne et respectivement égales pour les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux à 13 et 3 chez l'Homme, 0,2 et 1,4 chez les bovidés, 3,3 et 84 chez le porc, 23 et 980 chez le chien [Rodier *et al.*, 1996]. Leurs survies dépendent des conditions environnementales (salinité, prédation, ensoleillement, turbidité, ...). Toutefois, une caractérisation temporelle peut être faite de ces contaminations. Les coliformes fécaux sont un témoin significatif d'une contamination récente. Les streptocoques fécaux sont quant à eux des témoins assez résistants [Bourrier, 2008].

c) Produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires sont suivis dans le Marais Breton :

- au Port la Roche dans le Falleron de 2007 à 2009,
- à la Lavre et à la Maison Rousse dans le grand étier de Sallertaine de 2008 à 2009.

Les analyses sont confiées au LEAV. Entre 2007 et 2009, ce laboratoire était en phase de développement des méthodes d'analyses sur un appareil neuf. En 2009, une validation plus approfondie a été réalisée, amenant à l'accréditation COFRAC pour un grand nombre de ces éléments. De nombreuses LQ ont été modifiées, et certaines sont passées de 0,02 $\mu\text{g/L}$ en 2007-2008 à 0,04 $\mu\text{g/L}$ en 2009. La comparaison entre les années s'avère difficile. Seuls les résultats de 2009 seront présentés par la suite.

Deux paramètres sont à étudier afin d'évaluer les risques causés par les pesticides pour l'environnement : leur concentration dans l'eau et la fréquence de leur présence.

Les objectifs communautaires sont :

- 1 $\mu\text{g/L}$ pour la totalité des pesticides pour la production d'eau alimentaire [CEE, 1975] ;
- 0,1 $\mu\text{g/L}$ pour chaque pesticide et de 0,5 $\mu\text{g/L}$ pour la totalité pour la consommation humaine [CE, 1998].

Dans le SAGE, les objectifs visés sont le non-dépassement du seuil de 1 $\mu\text{g/L}$ pour la totalité des substances présentes [ADBVB, 2004, 2011]. Au regard des analyses effectuées en 2009, il s'avère que les objectifs ne sont pas tenus dans les eaux de surface du marais (Figure B-53). La concentration totale maximale de pesticides mesurée dans le Falleron au Port la Roche est égale à 5,5 $\mu\text{g/L}$. Les plus fortes concentrations sont retrouvées pour le mois de juillet. Le grand étier de Sallertaine présente des concentrations bien plus élevées que dans le Falleron. La concentration totale maximale de pesticides mesurée est 13,5 $\mu\text{g/L}$ en amont et 2,7 $\mu\text{g/L}$ en aval.

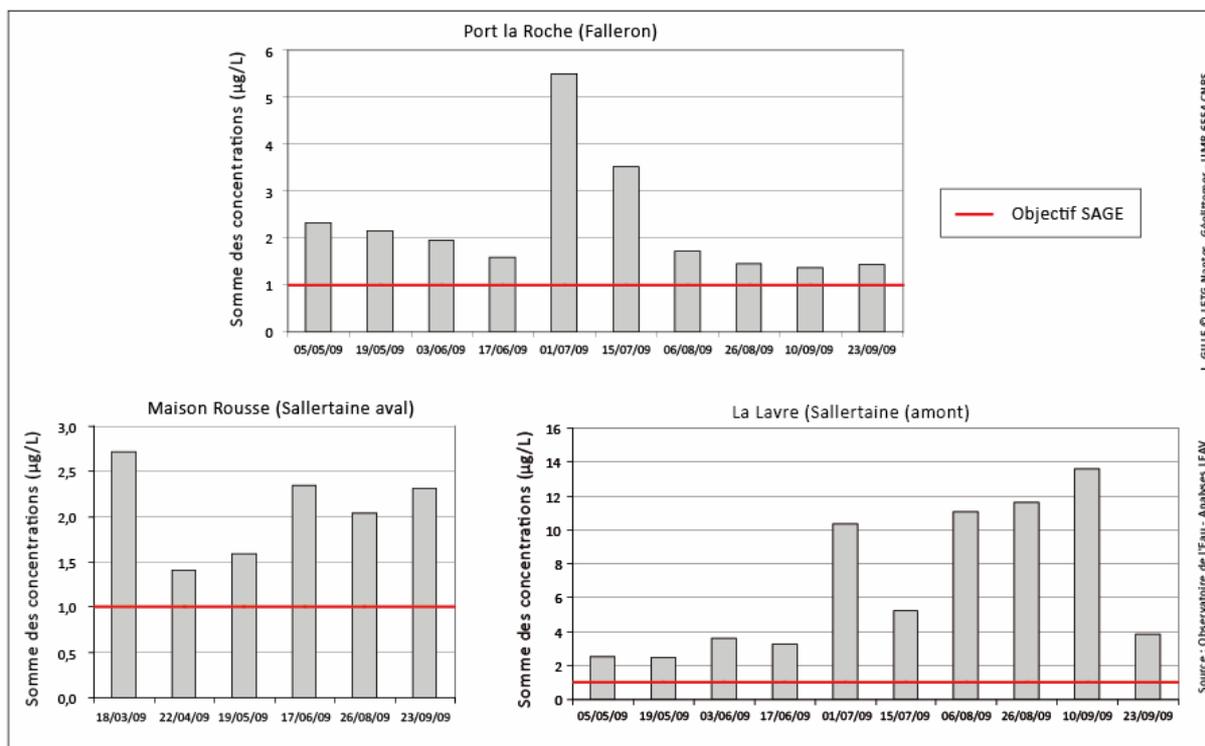


Figure B-53 : Concentrations totales de pesticides mesurées pour chaque point

La présence d'un pesticide est évaluée à l'aide du taux de quantification. Il correspond au rapport entre le nombre de fois où il est quantifié et celui où il est recherché. La LQ varie entre 0,01 et 0,10 µg/L selon les pesticides.

10 prélèvements ont été effectués dans le Falleron de mai à septembre en 2009, à raison de 2 par mois au Port la Roche. 45 pesticides ont été détectés et seulement 35 d'entre eux ont pu être quantifiés (Tableau B-19).

13 pesticides sont quantifiés, au moins une fois, à des seuils supérieurs à 0,1 µg/L. L'AMPA et le glyphosate sont présents dans tous les échantillons et dépassent systématiquement le seuil des 0,1 µg/L. Leurs concentrations maximales sont respectivement égales à 1,7 et 0,8 µg/L. Le diuron, lui aussi présent à chaque fois, est par contre retrouvé en plus faible quantité. Dans seulement 20 % des cas, sa concentration est supérieure à 0,1 µg/L et sa concentration maximale est égale à 0,124 µg/L. 2 autres pesticides se caractérisent par leur concentration élevée : l'aminotriazole avec 1,390 µg/L et le pyriméthanil avec 1,058 µg/L. Les 9 autres pesticides, dont la concentration dépasse au moins une fois le seuil fixé dans le SAGE, ont des concentrations maximales allant de 0,108 à 0,381 µg/L. Enfin parmi les 22 autres pesticides, qui respectent les objectifs fixés dans le SAGE, 10 sont présents dans au minimum la moitié des échantillons.

Pesticides	LQ (µg/L)	TQ (%)	TQ pour C > 0,1µg/L (%)	C max (µg/L)
2,4 D	0,04	30	10	0,205
2,4 MCPA	0,04	30	20	0,116
Acétochlore	0,02	70	0	0,073
Aclonifen	0,02	70	0	0,025
Alachlore	0,01	10	0	0,034
Aminotriazole	0,05	80	30	1,390
AMPA	0,10	100	100	1,700
Atrazine	0,02	50	10	0,125
Atrazine Déséthyl	0,02	50	0	0,025
Carbendazime	0,02	40	10	0,108
Chlorfenvinphos	0,20	50	0	0,039
Cyanazine	0,20	10	0	0,021
Cyprodinil	0,02	10	0	0,027
Diméthénamid	0,02	50	20	0,381
Diuron	0,02	100	20	0,124
Epoxyconazole	0,02	20	0	0,092
Ethoprophos	0,02	30	10	0,325
Glyphosate	0,10	100	100	0,800
Hexazinone	0,02	40	0	0,041
Iprodione	0,02	20	0	0,040
Isoproturon	0,02	20	0	0,040
Mécoprop	0,02	20	0	0,091
Métabenzthiazuron	0,02	30	0	0,031
Métalaxyl	0,02	40	10	0,227
Métobromuron	0,02	20	0	0,030
Métolachlore	0,01	70	10	0,218
Métoxuron	0,02	60	0	0,088
Nicosulfuron	0,02	60	0	0,032
Oxadixyl	0,02	50	0	0,024
Pyriméthanyl	0,02	60	40	1,058
Simazine	0,02	10	0	0,022
Tébuconazole	0,02	50	0	0,046
Tébutam	0,02	50	0	0,025
Terbutryne	0,02	30	0	0,038
Triclopyr	0,04	60	0	0,084

J. GILLET © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Source : Observatoire de l'Eau - Analyses LEAV

Tableau B-19 : Récapitulatif des pesticides quantifiés dans le Falleron au Port la Roche en 2009

Pour le grand étier de Sallertaine, les prélèvements ont lieu sur deux sites mais la période, la fréquence et le nombre d'échantillons diffèrent. A la Lavre, 10 prélèvements ont été effectués de mai à septembre en 2009 à raison de 2 par mois. A la Maison Rousse, 6 prélèvements sont réalisés de mars à septembre, une fois par mois, excepté en juillet.

44 pesticides sont détectés au moins une fois dans le grand étier de Sallertaine, 38 détectés et 25 quantifiés à la Lavre contre 29 détectés et 17 quantifiés à la Maison Rousse. Seuls 12 d'entre eux sont quantifiés sur les deux sites (Tableau B-20).

	LQ (µg/L)	La Maison Rousse (n=6, aval)			La Lavre (n=10, amont)		
		TQ (%)	TQ pour C > 0,1µg/L (%)	C max (µg/L)	TQ (%)	TQ pour C > 0,1µg/L (%)	C max (µg/L)
2,4 D	0,04	33	0	< LQ	50	0	0,055
2,4 MCPA	0,04	50	0	0,041	70	0	0,075
Acétochlore	0,02	17	0	< LQ	10	0	0,022
Aldrine	0,02	17	0	0,013			
Améthryne	0,02				10	0	< LQ
Aminotriazole	0,05	83	33	0,110	40	0	0,090
AMPA	0,10	100	100	1,500	100	100	10,000
Atrazine	0,02	67	0	0,023	40	10	0,953
Atrazine Déséthyl	0,02	17	0	< LQ	60	0	0,043
Carbendazime	0,02	17	0	< LQ	60	0	0,091
Chlortoluron	0,02	33	0	0,028	50	10	0,104
Cyproconazole	0,02	33	0	< LQ	20	0	< LQ
Dichlorprop	0,02				30	0	< LQ
Diflufenicanil	0,02	67	0	0,038	90	10	0,107
Diméthénamid	0,02	33	0	0,048	10	0	< LQ
Diuron	0,02	100	33	0,117	100	40	0,223
Epoxyconazole	0,02	50	0	< LQ	60	0	0,036
Fipronil	0,02				60	0	0,026
Fipronil Sulfide	0,02				30	0	< LQ
Fipronil Sulfone	0,02				40	0	< LQ
Glyphosate	0,10	100	100	1,140	100	100	9,000
HCH Gamma	0,02	17	0	< LQ	10	0	< LQ
Hexazinone	0,02				10	0	< LQ
Imidaclopride	0,02				10	0	< LQ
Iprodione	0,02				30	0	< LQ
Isoproturon	0,02	17	0	0,025			
Mécoprop	0,02	67	0	0,052	50	0	0,036
Métalaxyl	0,02	17	0	0,068			
Métazachlore	0,01				10	0	< LQ
Métobromuron	0,02	33	0	< LQ			
Métolachlore	0,01	67	17	0,260	40	0	0,028
Métoxuron	0,02				10	0	< LQ
Nicosulfuron	0,02				10	10	0,780
Oxadiazon	0,01	50	0	< LQ	100	0	0,049
Oxadixyl	0,02				20	0	0,022
Oxychlorane	0,01				10	0	0,025
Propazine	0,02				10	0	0,024
Propiconazole	0,02	33	0	< LQ	90	0	0,055
Propyzamide	0,02	33	0	0,037			
Simazine	0,02	33	0	< LQ	20	0	< LQ
Sulcotrione	0,04	33	0	0,048			
Tébuconazole	0,02	17	0	< LQ	80	0	0,039
Terbutryne	0,02	100	0	0,043	90	50	0,194
Triclopyr	0,04				40	0	0,062

J. GILLE © LETG Nantes, géolittomer - UMR 6554 CNRS
Source : Observatoire de l'Eau - Analyses LEAV

Tableau B-20 : Récapitulatif des pesticides quantifiés dans le grand étier de Sallertaine à la Lavre et à la Maison Rousse en 2009

16 molécules sont détectées à la Lavre la moitié du temps au minimum contre 12 à la Maison Rousse. Le diuron, le glyphosate et l'AMPA sont systématiquement présents sur les deux sites. A ceux-là s'ajoutent l'oxadiazon à la Lavre et le terbutryne à la Maison Rousse. 8 pesticides sont quantifiés au moins une fois à une concentration supérieure à 0,1 µg/L à la Lavre et 5 à la Maison Rousse. Le terbutryne (50 %), le diuron (40 %), le glyphosate (100 %) et l'AMPA (100 %) sont ceux qui sont le plus souvent quantifiés supérieurs à 0,1 µg/L à la Lavre. Les concentrations maximales

mesurées à la Lavre sont 9 µg/L pour le glyphosate et 10 µg/L pour l'AMPA. Dans une moindre mesure, il convient également de noter les concentrations pour l'atrazine et le nicosulfuron, mesurées à une reprise (10 %), respectivement égales à 0,953 et 0,780 µg/L. A la Maison Rousse, les concentrations maximales les plus élevées sont 1,140 µg/L pour le glyphosate et 1,500 µg/L pour l'AMPA. Enfin, 4 pesticides sont quantifiés à la Maison Rousse à des concentrations maximales supérieures à celles à la Lavre : le diméthénamid, le métolachlore, le mécoprop et l'aminotriazole.

Il convient de noter que certains sont interdits depuis plusieurs années mais restent omniprésents comme par exemple le diuron en 2008, le métolachlore et l'atrazine en 2003.

Les produits phytosanitaires sont appliqués principalement au printemps (généralement en avril) puis en fin d'été / début d'automne (Figure B-54). En moyenne, le nombre d'applications réalisées au printemps représente plus du triple de ce qui est appliqué en fin d'été / début d'automne [CREPEPP, 2000 ; Pierre et Colmar, 2009].

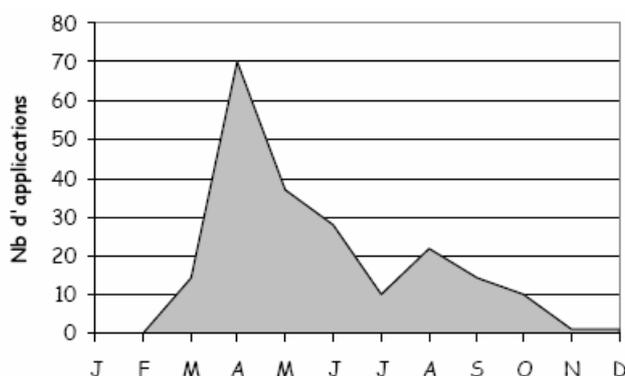


Figure B-54 : Périodes d'application des produits phytosanitaires
[CREPEPP, 2000]

Les doses annuelles utilisées par les collectivités sont fonction de leur taille et sont les plus importantes pour Pornic, Noirmoutier et Challans. Les produits utilisés sont majoritairement des désherbants. Si les quantités appliquées par les particuliers sont difficilement quantifiables, elles restent bien minoritaires comparativement à l'agriculture. Les risques potentiels vis-à-vis de la qualité de l'eau résident principalement dans le non respect des distances par rapport aux points sensibles et sur les précautions d'usage [SCE, 2000b]. Les secteurs à risque élevé de pollution sont les zones près d'un point d'eau (cours d'eau, mares, puits, fosses, bouches d'égout, caniveaux ...) et les zones imperméables (bitume, goudron, dallage, pavés) [CREPEPP, SD].

d) Métaux

La surveillance chimique sanitaire des zones de production conchylicole classées porte uniquement sur trois métaux lourds (cadmium, mercure et plomb) depuis sa

restructuration en 2008 dans le cadre du Réseau d'Observation de la Contamination Chimique (ROCCH). Entre 1979 et 2007 inclus, d'autres métaux furent mesurés en plus de ces trois métaux (Argent, Chrome, Cuivre, Nickel, Vanadium, Zinc) dans le cadre du Réseau National d'Observation (RNO).

Les modifications des stratégies d'échantillonnage au cours du temps entraînèrent des changements de fréquence (1979-2003 : 4 échantillons par an ; 2003-2008 : 2 échantillons par an ; à partir de 2008, 1 échantillon par an). Les données correspondant à la fréquence d'échantillonnage actuel (premier trimestre) sont colorées en noir, les autres en gris (Figure B-55).

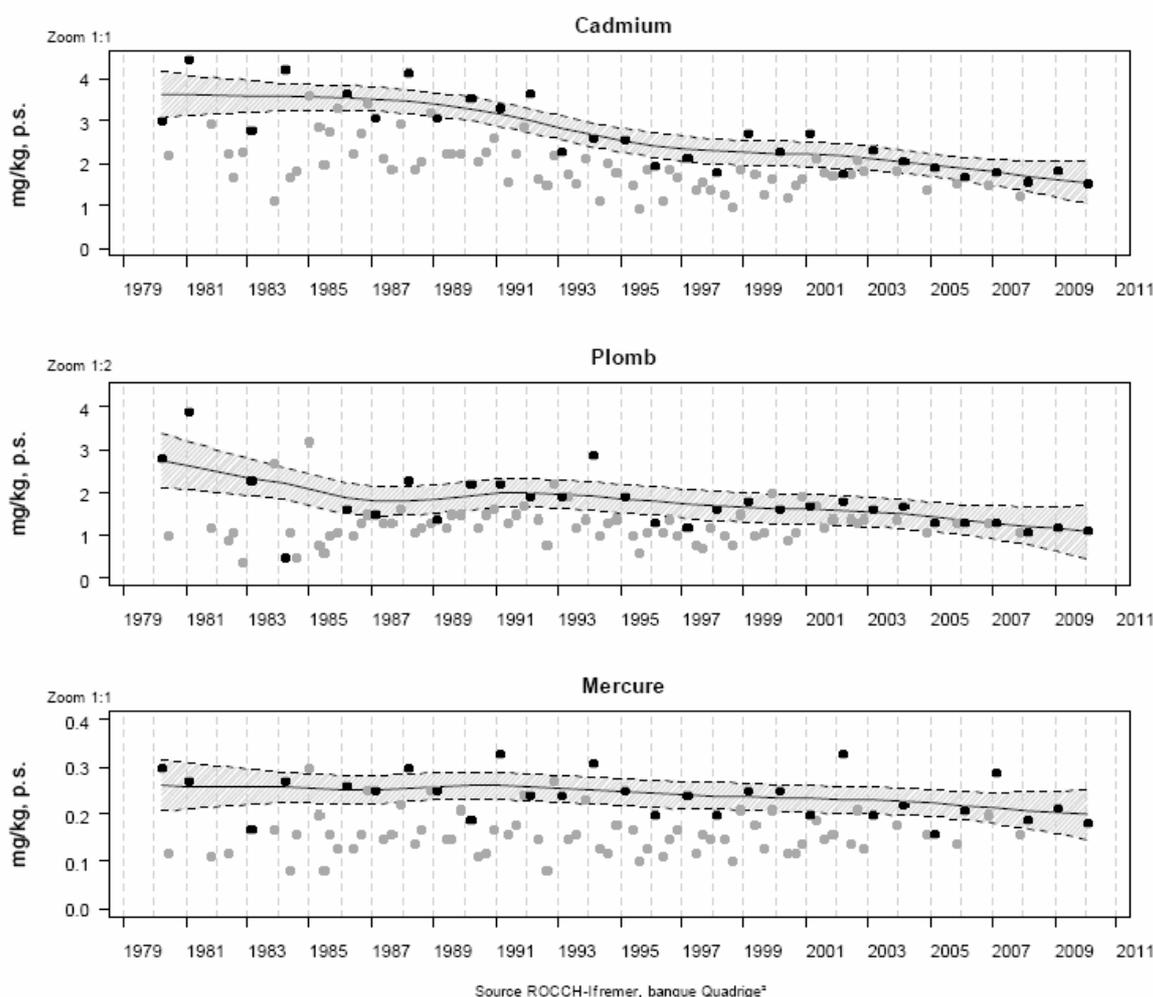


Figure B-55 : Teneur en métaux dans l'huître creuse au niveau de la Coupelasse
[Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011]

Seules les données des premiers trimestres sont utilisées pour le calcul des tendances temporelles. Ces dernières sont mises en évidence grâce à l'ajustement d'une régression locale pondérée (ligne continue). Les deux courbes (en pointillés) encadrant la courbe de régression représentent les limites de l'enveloppe de confiance à 95 % du lissage effectué.

Aucune présence anormale et dangereuse n'est constatée pour les métaux présents à l'exutoire du Falleron dans la Baie de Bourgneuf. Les teneurs en cadmium sont égales à la médiane nationale et inférieures au seuil sanitaire (Tableau B-21). Une tendance à la baisse des teneurs en cadmium est observée dans les années 1990, suivie d'une stabilisation depuis 2005. Le plomb est présent dans des teneurs inférieures à la médiane nationale et inférieures au seuil sanitaire. La présence du plomb tend à décroître sur le long terme. Enfin, les teneurs en mercure sont stables. Elles sont inférieures à la médiane nationale et bien plus au seuil sanitaire.

Métaux lourds	Médiane nationale	Teneurs maximales autorisées dans les denrées alimentaires
Cadmium	1,63 mg/kg, p.s.	5,0 mg/kg, p.s.
Plomb	1,31 mg/kg, p.s.	7,5 mg/kg, p.s.
Mercure	0,22 mg/kg, p.s.	2,5 mg/kg, p.s.

Tableau B-21 : Valeurs seuils pour les métaux lourds

(p.s. : poids sec)

[Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011]

A partir des données existantes, cette analyse montre que le marais joue bien un rôle bénéfique sur la qualité de l'eau pour les nutriments, les bactéries, les pesticides et les métaux. Dans la majorité des cas, une baisse significative des concentrations et du nombre de substances présents en sortie est constatée. Quelques pics de concentrations sont observés en aval du marais doux, à des concentrations pouvant être supérieures à celles en amont.

L'échantillonnage spatio-temporel des données existantes ne permet pas toutefois de calculer des temps de résidence et d'évaluer l'abattement pour l'ensemble des substances. Il ne permet pas non plus de privilégier un processus pour expliquer ce gain au niveau de la qualité de l'eau. Est-il dû à des processus de biodégradation ou de sédimentation ? Les dépassements sont-ils causés par une remise en suspension ? Un relargage des sédiments, de nouveaux apports ? La gestion hydraulique impacte-t-elle la qualité de l'eau ?

En l'état actuel, il est difficile de répondre à l'ensemble de ces questions. Le recours à la modélisation semble donc un moyen pour tester certaines hypothèses et tenter d'en savoir plus sur la dynamique des flux et les processus mis en jeu.

C. Matériels et méthodes

C.1	Modélisation	127
C.1.1	Définitions et objectifs.....	127
C.1.2	Apports de la géographie et des outils informatiques	130
C.1.3	Cas des modèles hydrologiques.....	135
C.2	Données	147
C.2.1	Inventaire et structuration des données	147
C.2.2	Choix et acquisition des données pour la modélisation.....	151
C.2.3	Bilan hydrologique	165

Choisir un modèle revient à faire un compromis, entre les avantages et les inconvénients relatifs au modèle, acceptable pour les fins opérationnelles envisagées [De Vries et Hromadka, 1993]. Parmi les critères et les facteurs à prendre en considération, il convient de connaître [OMM, 1994] :

- les objectifs et avantages attendus des sorties du modèle ;
- les caractéristiques climatiques et physiographiques du bassin ;
- la longueur des relevés des divers types de données ;
- la qualité des données, à la fois dans le temps et dans l'espace ;
- la disponibilité et la puissance des ordinateurs utilisés pour la mise au point et l'exploitation du modèle ;
- la nécessité éventuelle de transposition de paramètres du modèle de petits bassins à des bassins plus grands ;
- la possibilité de mise à jour du modèle pour tenir compte de l'évolution des conditions hydrométéorologiques.

Cette partie du manuscrit sera donc guidée par la recherche et la détermination de ces critères / facteurs essentiels pour la sélection du modèle.

Dans la bibliographie relative à la modélisation, des termes proches peuvent être utilisés pour exprimer la même chose. Selon les auteurs et les domaines, la signification de ces derniers peut également diverger. En conséquence, ces différents termes vont être passés en revue avant d'en baliser leur usage dans ce manuscrit. De cette première étape, il en ressortira la nécessité de définir ensuite la démarche de modélisation et l'objet d'étude afin de choisir le modèle.

Des données sont nécessaires pour alimenter les entrées du modèle. Leur inventaire a permis de faire le bilan sur leur adéquation avec les objectifs de l'étude et d'expliquer les choix méthodologiques qui en découlent. Enfin, cette partie se terminera par le calcul du bilan hydrologique.

C.1 Modélisation

C.1.1	Définitions et objectifs.....	127
C.1.2	Apports de la géographie et des outils informatiques	130
C.1.3	Cas des modèles hydrologiques.....	135

C.1.1 Définitions et objectifs

C.1.1.1	Définitions du modèle et des termes connexes.....	127
C.1.1.2	Démarche et activité de modélisation.....	128

C.1.1.1 Définitions du modèle et des termes connexes

Tirant de ces origines italiennes, le terme *modèle* désigne ce qui sert ou doit servir d'objet d'imitation pour faire ou reproduire quelque chose [Durand, 2006]. Un modèle représente une portion de l'univers du réel, mais ne peut être équivalent à celle-ci. L'univers est trop vaste, dans son étendue, dans sa granularité infinitésimale, dans la diversité de ses objets et de ses phénomènes pour espérer pouvoir le traduire tout entier dans une représentation exhaustive [Langlois et Reguer, 2005].

D'un point de vue plus didactique, le modèle peut être défini selon deux axes :

- comme une structure formalisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes, qui possèdent entre eux certaines relations [Maubourguet, 1993] ;
- comme une représentation schématique d'un processus, d'une démarche raisonnée [Maubourguet, 1993], ou encore comme une représentation idéalisée de la réalité élaborée en vue d'une démonstration, formulable en termes mathématiques [Chorley et Hagget, 1967].

Il peut être un objet concret ou abstrait, volontairement dépouillé de l'activité qui l'a créé. C'est une sorte d'exemple de référence, de concrétisation de la théorie, permettant de justifier la théorie par une signification externe [Langlois et Reguer, 2005].

Des notions proches voire confondues sont utilisées pour parler de modèle. Elles vont être définies brièvement afin de mieux les différencier de la notion de modèle.

Le concept constitue une abstraction à partir de la réalité, comme le modèle, tout en sachant dans les deux cas, que la représentation n'est pas le représenté. Le concept est purement mental, ne s'exprime que par des mots et ne comporte pas l'aspect dynamique, présent souvent dans le modèle [Durand-Dastes, 1974].

La théorie est une construction intellectuelle qui essaie de relier le plus grand nombre de phénomènes observés et des lois particulières en un ensemble cohérent commandé

par un principe général explicatif du tout envisagé. La théorie est donc bien plus complète et complexe que le modèle. Le modèle explique une partie restreinte de la réalité sans faire appel aux principes généraux. Hiérarchiquement, il y a la loi qui permet de passer au modèle, qui lui-même permet l'accès à la théorie. En conséquence, la théorie peut englober un ou plusieurs modèles [Durand-Dastes, 1974].

Le système symbolise un ensemble, lui-même subdivisé en plusieurs autres ensembles [Durand-Dastes, 1974] :

- ensemble d'objets munis de leurs attributs,
- ensemble de relations entre les objets du système,
- ensemble de relations entre le système et le monde qui lui est extérieur, en amont et aval, avec les entrées et les sorties.

Langlois précise que la portion de réalité sensée être décrite par le système est définie entre deux niveaux d'échelle et de connaissance. D'un côté, c'est l'environnement qui englobe le système, qui le limite extérieurement. De l'autre, ce sont les objets terminaux qui le limitent intérieurement [Langlois, 2005a].

Tous les systèmes sont modélisables, mais tous les modèles de systèmes ne sont pas des systèmes car le modèle diffère de la réalité [Durand-Dastes, 1974].

C.1.1.2 Démarche et activité de modélisation

La modélisation désigne aussi bien l'activité pour produire un modèle que le résultat de cette activité. L'activité de modélisation comprend trois phases : la conception, l'utilisation et l'exploitation des résultats du modèle. Une dernière phase peut également être ajoutée selon les objectifs de l'étude : l'amélioration des résultats produits [Langlois et Reguer, 2005]. La modélisation permet de faire deux choses essentielles : comprendre le fonctionnement d'un système et faire des prédictions. Utilisée comme outil, elle permet également la critique et la validation des chroniques, la reconstitution des séries de données et l'analyse de l'impact des forçages [Moatar, 2006].

Hors de son contexte, la simulation est une représentation d'une réalité observée ou potentiellement observable [Lévy et Lussault, 2003]. Les simulations diffèrent les unes des autres selon les conditions initiales et le paramétrage interne du modèle. Il faut en général plusieurs simulations pour affiner le paramétrage et ajuster aux mieux les résultats à la réalité. Grâce aux progrès de l'informatique, cette pratique scientifique tend à se généraliser lorsqu'il y a des difficultés à la fois éthique, technique et scientifique. La simulation numérique offre au chercheur la possibilité de multiplier les expériences virtuelles, tout en sachant que provoquer un « phénomène calculé » sur des « objets numériques » est une représentation qui peut être très éloignée de la réalité. Il convient donc de ne confondre simulation et expérience. Des interprétations multiples peuvent être faites d'une même réalité. Le choix des composantes de la

réalité qui sont intégrés au modèle dépend de la problématique. Si ces composantes sortent de l'objet d'étude, elles en sont exclues [Langlois et Reguer, 2005].

Il existe plusieurs voies de modélisation. Le choix de l'une d'elle doit être fonction du stade d'avancement de l'étude (préliminaire, proposition d'amélioration, gestion fonctionnelle, expertises, ...) et du phénomène à appréhender. C'est dans ce sens que Bourrier propose de requérir à des applications hiérarchisées : analyser pour comprendre, calculer pour proposer, simuler pour agir [Bourrier, 2008].

Pour appréhender initialement les phénomènes de génération des débits, de transfert et de propagation de la pollution, il convient de mener une démarche pragmatique : des investigations, des modes de calculs différenciés, des analyses et des comparaisons avant d'aboutir à une modélisation globale [Bourrier, 2008].

Le géographe appréhende l'espace en créant des objets géographiques³¹ qui supportent son travail de spécialiste et deviennent ses terrains [Lévy et Lussault, 2003]. Toutefois, il convient de préciser que ce même objet géographique peut représenter un système à une autre échelle. L'espace est structuré hiérarchiquement en niveaux d'organisation successifs [Guermond, 2005 ; Puech, 2000]. Chaque niveau de complexité produit sa propre cohérence, ne se comprend correctement et ne se formalise correctement qu'à son niveau. Ces différences d'échelles se retrouvent dans les différences de fonctionnement et de capacité d'intervention dans le processus de modélisation [Guermond, 2005].

L'existence des processus diffère selon les niveaux d'échelle considérés. Chaque processus hydrologique possède son échelle spatiale et temporelle. Un niveau supérieur joue le rôle de contraintes alors qu'un niveau plus fin impose des conditions aux limites (Figure C-1).

Modéliser un territoire n'est pas le représenter : c'est se donner le maximum de régularité et le minimum de contingence locale pour tester des hypothèses et mettre en évidence des lois, des tendances, des mécanismes généraux [Brunet, 1987]. C'est de la théorie que les configurations sont déduites et confrontées au réel, non l'inverse.

³¹ Construit cognitif permettant d'appréhender un phénomène spatial

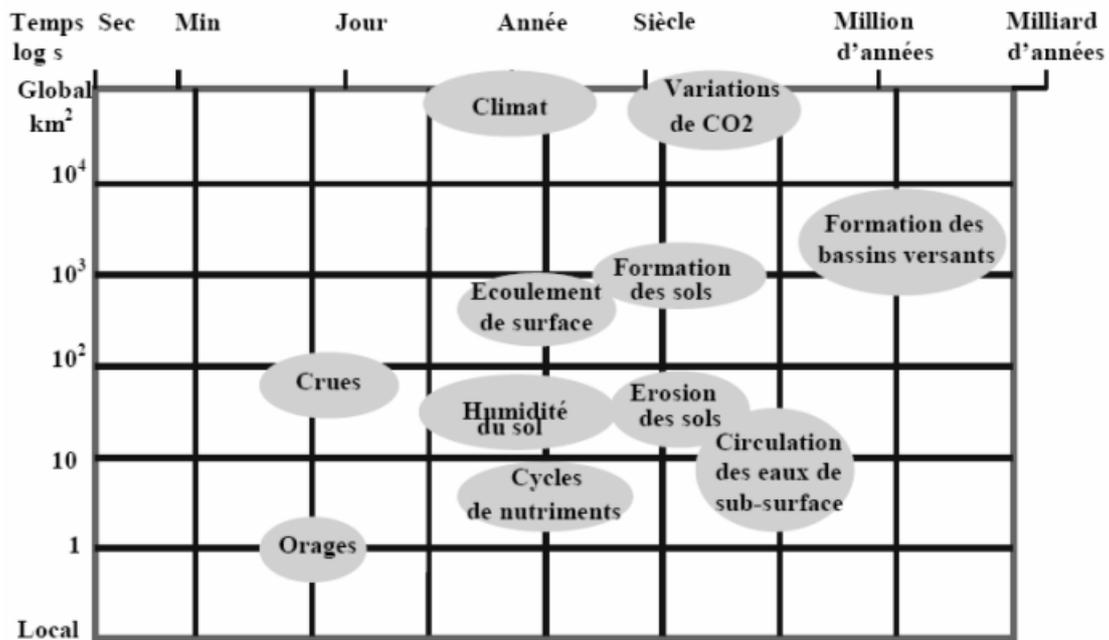


Figure C-1 : Echelles de temps et d'espace des processus hydrologiques
[Loumagne, 2001]

C.1.2 Apports de la géographie et des outils informatiques

C.1.2.1	Approche graphique.....	130
C.1.2.2	Apports des SIG	132
C.1.2.3	Modélisation <i>in silico</i>	134

C.1.2.1 Approche graphique

La représentation graphique est la transcription, dans le système graphique de signes, d'une pensée, d'une « information » connue par l'intermédiaire d'un système de signes quelconque [Bertin, 1967]. Cette représentation graphique peut prendre la forme d'une carte ou d'un chorème.

Une carte est une image, une représentation du Monde ou d'un morceau du Monde, ou plus exactement, de quelque chose quelque part [Brunet, 1987]. C'est une représentation réduite d'un ensemble spatial. Cette représentation est fondée sur un langage, caractérisé par la construction d'une image analogique d'un espace. Elle vise à (re)présenter les objets selon les mêmes dispositions, rapports et dimensions par lesquels ils sont perçus dans la réalité [Lévy et Lussault, 2003]. Elle se définit soit par la relation entre les distances et leur représentation via une échelle, soit par la relation entre les positions et leur représentation via un système de projection [George et Verger, 2006].

Tout le réel ne peut être représenté sur une carte. La perception visuelle n'admet qu'un nombre réduit de variables. Il est donc important de les sélectionner, en amont de la production cartographique, afin d'en limiter le nombre à représenter [Bertin,

1967 ; Lévy et Lussault, 2003]. Toute représentation cartographique suppose également un compromis entre la précision et la lisibilité [Brunet, 1987]. Toutes ces considérations sont reprises dans le processus de généralisation, qui a pour but de reconstituer sur une carte la réalité de la surface représentée dans ses traits essentiels en fonction du but de la carte, de son thème, de son échelle et des particularités de la région cartographiée. Trois opérations sont combinées simultanément à ce titre [Béguin et Pumain, 2000] :

- la sélection, où les éléments topographiques, administratifs et les données géographiques nécessaires à la constitution du fond de carte sont choisis ;
- la schématisation qui peut être structurale lorsqu'elle consiste à simplifier les tracés, et/ou conceptuelle quand la simplification porte sur le mode de représentation et l'implantation pour répondre à un nouveau concept, à un changement du niveau d'organisation lié le plus souvent à une réduction d'échelle ;
- l'harmonisation, qui est la mise en cohérence des deux opérations précédentes, avec la recherche d'un équilibre entre les besoins de simplification, le souci de maintenir une localisation précise des phénomènes représentés et les choix graphiques opérés.

La carte constitue un outil particulièrement adapté à la communication, car elle permet d'intégrer des informations spatialisées pouvant être comprises à la fois par les gestionnaires, les décideurs, les scientifiques et les populations locales [Le Berre, 2008]. Différentes sources de données sont nécessaires à la réalisation d'une carte. Elles constituent en soi des formes d'abstraction de la réalité, qualifiables de modèles. La carte résultante peut également être considérée elle-même comme un modèle résultant des précédents [Langlois et Reguer, 2005]. Ces modes de représentation graphique nécessitent une structuration des données, qui en est facilitée avec les SIG. Les cartes produites sur la base de traitements numériques constituent de puissants moyens de communication et d'interrogation [Pottier, 1994].

Le chorème désigne des structures élémentaires d'organisation de l'espace [Brunet, 1987], qui permettent une combinatoire résultante d'innombrables types de réalités géographiques [Lévy et Lussault, 2003]. Ces structures élémentaires peuvent traduire des interactions nature / société. Elles sont le plus souvent représentées par des schémas ou modèles graphiques très simples [George et Verger, 2006]. Le chorème est souvent exprimé sous une forme graphique, mais peut également être sous une forme textuelle ou mathématique. Il est considéré comme un modèle ou comme une forme de modèle selon la conception de la science [Lévy et Lussault, 2003].

Appliquée aux marais, cette approche permet de travailler sur la circulation de l'eau et sa gestion dans le marais, de mettre en évidence les relations des marais avec les bassins versants *stricto sensu* en amont (Figure C-2), de faire un diagnostic des fonctions réelles des marais, et ainsi déterminer en priorité celles à réhabiliter [Anras, 2007].

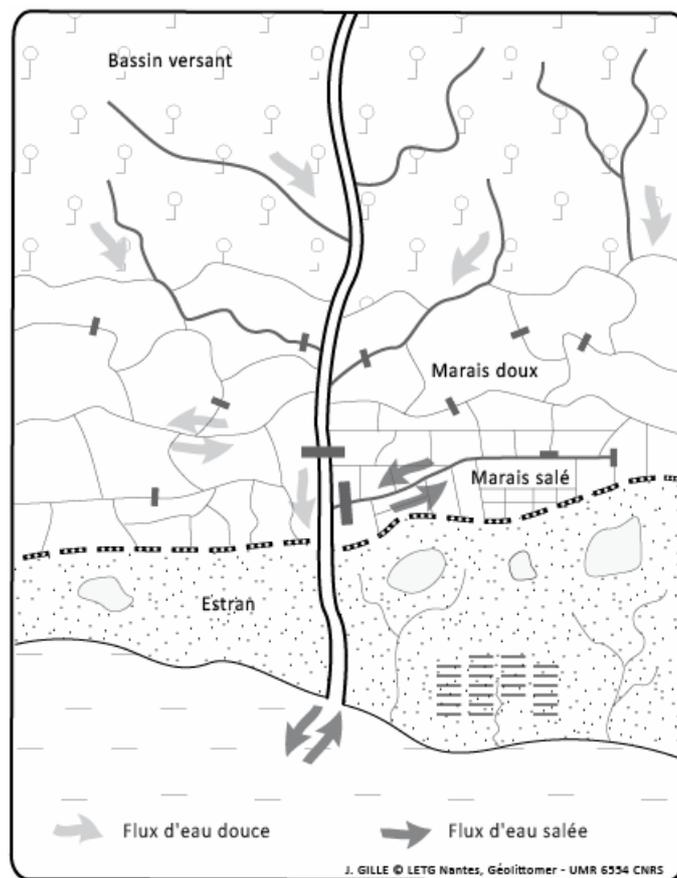


Figure C-2 : Circulation des flux d'eau dans le continuum terre-mer

Si les premières esquisses peuvent se faire encore à la main, les progrès technologiques et informatiques font qu'elle se réalise de nos jours à l'aide des outils de PAO-CAO³².

C.1.2.2 Apports des SIG

Les SIG³³ ont pour vocation le stockage, le traitement, la gestion et la communication d'informations localisées dans l'espace. Les informations sont stockées, notamment dans des BD (Figure C-3). On parle alors de données géographiques ou spatiales, voire spatio-temporelles quand ces données sont également référencées dans le temps [Laaribi, 2000 ; Servigne, 2006].

³² Publication / Conception Assistée par Ordinateur. Dans la présente étude, c'est la version CS2 d'Adobe Illustrator qui est utilisée.

³³ Il existe d'autres termes dans la littérature qui permettent de différencier les objectifs ou les approches : SI, SIE, SIT, SIRS, SIGT ... N'étant pas l'objet principal de cet étude, mais simplement un outil, l'appellation générique SIG sera utilisée.

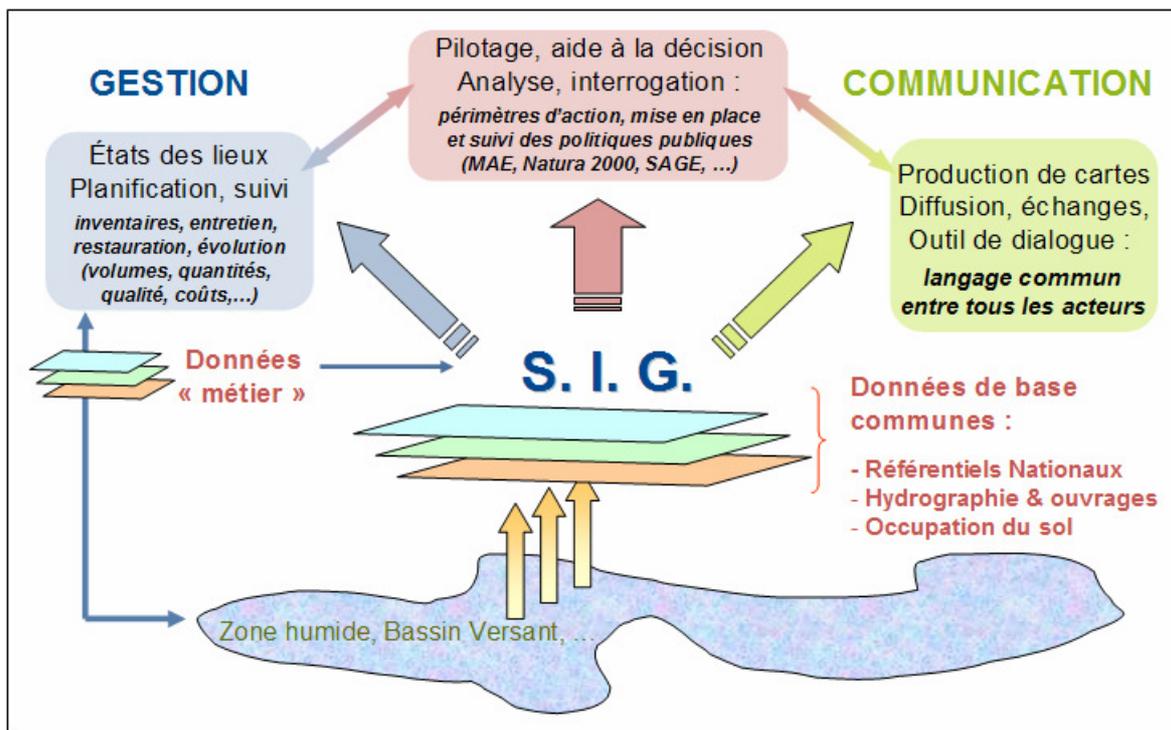


Figure C-3 : Construction et utilisation d'un SIG « Zones Humides »
[Boudeau et Guionneau, 2004]

L'information géographique et la modélisation sont définies par Saint-Gérard comme des structures conceptuelles que la géographie met en œuvre pour renseigner et synthétiser les dimensions propres à son mode de pensée [Saint-Gérard, 2005].

La constitution d'un Modèle Conceptuel de Données est cruciale dans le cadre d'une analyse spatiale, utilisant les fonctionnalités des SIG. La bonne structuration des données au départ empêche le chargement excessif en formules de calcul et la création de boîtes noires aux résultats opaques [Saint-Gérard, 2005].

Une carte structurée numériquement sous forme d'un SIG peut constituer une des entrées d'un modèle mathématique. Les résultats produits peuvent à leur tour donner lieu à des interprétations diverses, ce qui en fait au final une autre forme de modélisation [Langlois et Reguer, 2005].

La modélisation des données / informations est essentielle au développement des BD et systèmes d'information de tous types. Elle a pour rôle ici [Servigne, 2006] :

- de définir de manière pertinente les éléments de la réalité à prendre en compte ;
- de traduire ces éléments dans une représentation spatiale et de choisir un mode de représentation approprié ;
- d'implémenter ces représentations dans un système informatique.

Elle contribue ainsi à la compréhension, explication, structuration, prédiction et manipulation des données à utiliser. Elle s'effectue selon trois niveaux [Peuquet, 1984] :

- le modèle conceptuel (une abstraction des propriétés pertinentes de la réalité) ;
- le modèle logique (une représentation du modèle de données en vue d'une implémentation) ;
- le modèle physique (une représentation du modèle logique dans le système d'information).

Le SIG est utilisé dans cette étude pour la caractérisation de la zone d'étude, l'alimentation du modèle en entrée et la spatialisation des résultats.

C.1.2.3 Modélisation *in silico*

Pour répondre à une problématique scientifique donnée, le chercheur est souvent amené à faire des expériences sur le système étudié afin de comprendre son fonctionnement. Ces expériences sont dites *in situ*, *in vivo* ou encore *in vitro*. Mais ces approches expérimentales classiques ne peuvent pas toujours être menées pour des raisons d'échelles spatiale ou temporelle dans la plupart des cas. Pour y remédier, il a donc recours aux expériences *in silico*, expériences virtuelles construites dans la mémoire des ordinateurs [Fleurant, 2009].

Un des avantages de ces expériences réside dans la possibilité de pouvoir tester un grand nombre de paramétrages, de faire varier les conditions initiales afin d'en évaluer les conséquences. Cette méthodologie incrémentale permet l'évolution du modèle par confrontations et validations successives avec l'observation [Guermond *et al.*, 2004].

La réalité est perçue par le chercheur selon sa culture et son degré de connaissance. La formalisation théorique qu'il en fait a pour objectif premier de comprendre le système réel. Pour pouvoir modéliser informatiquement ce système théorique, il faut d'abord mettre en équations les hypothèses (modèle mathématique). La résolution numérique des équations se fait ensuite via un code de calcul. Cette modélisation informatique dépend des moyens technologiques à disposition (Figure C-4). Elle peut avoir comme objectif [Langlois, 2005a] :

- de mimer au mieux le système réel dans une approche utilitaire, sans vouloir le comprendre ;
- d'appuyer, prolonger la construction du système théorique, en respectant ses simplifications, pour aider la démarche théorique de compréhension.

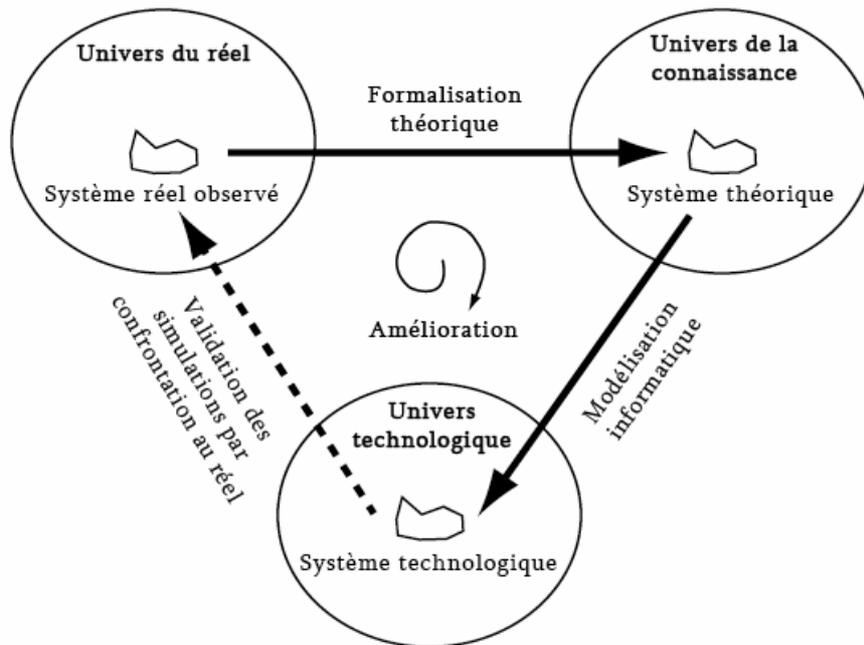


Figure C-4 : Les trois systèmes
[Langlois, 2005a]

Le modèle mathématique est une formulation ou une formalisation mathématique d'une certaine portion de la réalité [Langlois et Reguer, 2005]. Le cadre de validité est fixé par les équations assorties des hypothèses faites pour l'étude. Il y a toutes sortes d'équations possibles : équations aux dérivées partielles (Saint-Venant), équations différentielles, ou équations algébriques (polynôme) [MEDAD, 2007d].

Le code de calcul est celui qui réalise le traitement numérique du modèle mathématique, à savoir la résolution approchée des équations, en fonction des choix techniques et des simplifications faites par le concepteur du logiciel. Il est considéré comme générique dans la mesure où il n'est pas dédié à un jeu de données particulier. Enfin, plusieurs modèles mathématiques différents peuvent être implémentés dans un même logiciel [MEDAD, 2007d].

Le modèle numérique est composé d'un modèle mathématique, d'un code de calcul résolvant les équations et d'un ensemble de données statiques, comme la bathymétrie invariable au cours de l'exploitation du modèle [MEDAD, 2007d].

C.1.3 Cas des modèles hydrologiques

C.1.3.1	Principe et classification des modèles	136
C.1.3.2	Critères de choix pour la modélisation dans les marais.....	138
C.1.3.3	Modèle Fudaa-Mascaret.....	144

L'hydrologie continentale offre maintes possibilités d'établissement de "modèles" : les bases physiques des phénomènes hydrologiques, la complexité et la variabilité des paramètres en font même une nécessité pour leur étude. Les variations hydrologiques, continues ou saisonnières, sont liées au temps-climat et au temps-durée. Le but d'un

"modèle" en hydrologie est de tirer, des valeurs rassemblées et utilisées, l'information susceptible de fournir la solution à un problème donné (Observations écrites de M. Chartier, [Racine, 1974]).

Face à cette grande diversité de processus et d'interprétations du cycle de l'eau, Ambroise pense qu'il y a presque autant de modèles que d'hydrologues [Ambroise, 1998]. Il semble par conséquent utile de les classer selon plusieurs critères afin d'explicitier le choix du modèle pour cette étude, après en avoir expliqué le principe de fonctionnement.

C.1.3.1 Principe et classification des modèles

Deux phases caractérisent le fonctionnement d'un modèle : une première d'élaboration, plus ou moins empirique, et une seconde de test par comparaison au réel (Figure C-5).

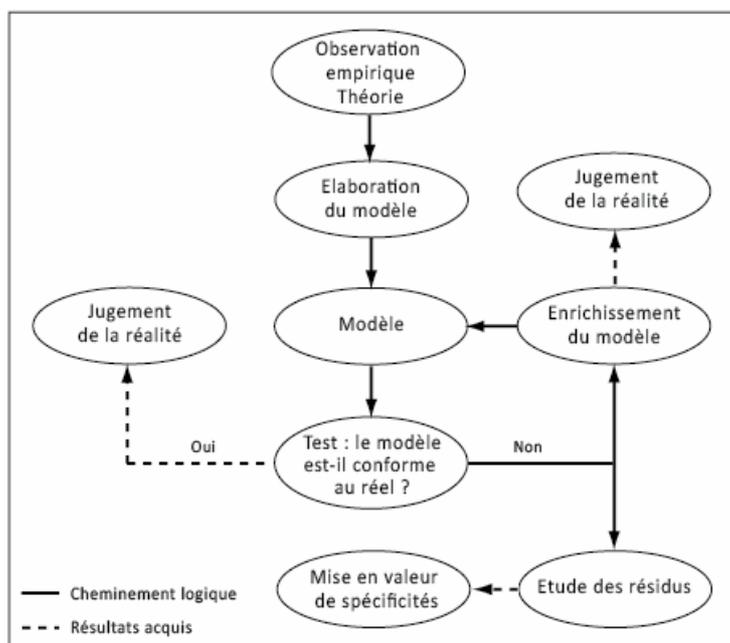


Figure C-5 : Fonctionnement d'un modèle
(d'après [Durand-Dastes, 1974])

Au départ, un modèle peut être créé avec des contraintes simplificatrices très élevées. Ainsi, des relations causales peuvent être dégagées lorsque le modèle reproduit la réalité. Dans le cas où il est non conforme à la réalité, le modèle peut être enrichi par de nouvelles contraintes ou, au contraire, à nouveau simplifié afin de tendre vers la réalité. Il est également possible d'ajuster le modèle à la réalité en réglant la valeur des paramètres des équations lorsque le modèle comporte des éléments et des relations, et que ces dernières sont traduites par des fonctions reliant des variables. Quelque soit la finesse de l'ajustement, il existera toujours des différences entre les résultats fournis par le modèle et la réalité : les résidus. Leur étude révèle souvent la spécificité de l'espace considéré et nécessite des explications complémentaires.

Si chacun des types de modèle diffèrent selon leurs ambitions, leurs domaines d'actions privilégiés et leurs degrés de complexité, ils possèdent tous un point commun : ils sont par définition tous faux [Fleurant, 2009 ; Langlois et Reguer, 2005 ; Vidal, 2005]. Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la moins inexacte possible [Perrin, 2000]. Ainsi, un même système peut être modélisé de plusieurs manières, en mettant en avant un processus plutôt qu'un autre. Cela dépend des objectifs de l'expérience *in silico* que l'on veut mener [Fleurant, 2009 ; Monte *et al.*, 2006]. Des scénarii seront donc établis pour définir les « bonnes » conditions d'utilisation du modèle.

Il y a plusieurs façons de classer les modèles en hydrologie selon les critères retenus (Tableau C-1).

Relations internes	Unité spatiale modélisée	Nature des variables et des paramètres	Pas de discrétisation temporel	Type de fonctionnement du modèle au cours du temps
Empirique Conceptuel Physique	Global Semi-distribué Spatialisé	Déterministe Stochastique	Heure Jour Mois	Continu Evènementiel

Tableau C-1 : Classification des modèles
(d'après [Ambroise, 1998 ; Grayson et Blöschl, 2000])

Une première distinction peut se faire selon le degré d'abstraction du modèle, à savoir la manière dont il transforme la pluie (entrée) en débit (sortie).

Connaissant les entrées et les sorties du modèle, le modèle empirique cherche à reproduire un comportement global via des liens mathématiques, sans faire d'hypothèse sur les processus qui rentrent en jeu. Si l'objectif est plus de prendre en compte son comportement physique, l'objet peut être conceptualisé à l'aide de réservoirs interconnectés qui se vident et se remplissent au cours du temps, offrant ainsi une description simplifiée de la variabilité spatio-temporelle et de la complexité des phénomènes rencontrés. Le modèle physique, quant à lui, décrit les phénomènes à l'aide des lois qui régissent l'écoulement de l'eau.

Les modèles peuvent également être différenciés en s'intéressant à l'unité spatiale modélisée, à savoir : a) si l'objet est considéré dans sa globalité dans l'espace comme une entité homogène, b) s'il est divisé en sous-unités supposées homogènes, c) ou s'il est finement discrétisé en mailles élémentaires, tirant ainsi partie de la variabilité spatiale des facteurs géographiques et météorologiques qui conditionnent son comportement.

Une autre séparation est faite en fonction de la nature des variables et des paramètres : les modèles déterministes et stochastiques. Pour la première catégorie, le résultat est unique car aucune des variables du modèle n'est considérée comme une

grandeur aléatoire. A l'inverse, pour la seconde catégorie, le caractère aléatoire de certaines variables du modèle est pris en compte sous la forme d'une fonction de distribution de probabilités.

Enfin, deux dernières classifications peuvent être réalisées en prenant en compte le caractère temporel. La première dépend du pas temporel de discrétisation des processus modélisés (seconde, heure, jour, mois, ...). La seconde relève du type de fonctionnement du modèle : en continu sur une période donnée, ou sur un évènement précis.

C.1.3.2 Critères de choix pour la modélisation dans les marais

Sachant qu'un modèle ne représentera jamais parfaitement les processus réels, il apparaît important de définir ses caractéristiques, ses qualités de correspondance avec le réel. Elles doivent être cherchées non seulement à travers l'observation, mais aussi par rapport aux objectifs et à la problématique posés pour cette modélisation : classe de modèle, de précision, de domaine de validité [De Vries et Hromadka, 1993 ; Langlois et Reguer, 2005 ; OMM, 1994].

Avant de modéliser un objet, il convient dans un premier temps de le conceptualiser afin de répondre à un objectif. Les systèmes fluviaux sont des objets de recherche qui poussent à l'interdisciplinarité. La diversité de leurs origines et des processus qui s'y manifestent trouve leur explication à travers la géoscience, l'écologie et l'ingénierie (Figure C-6).

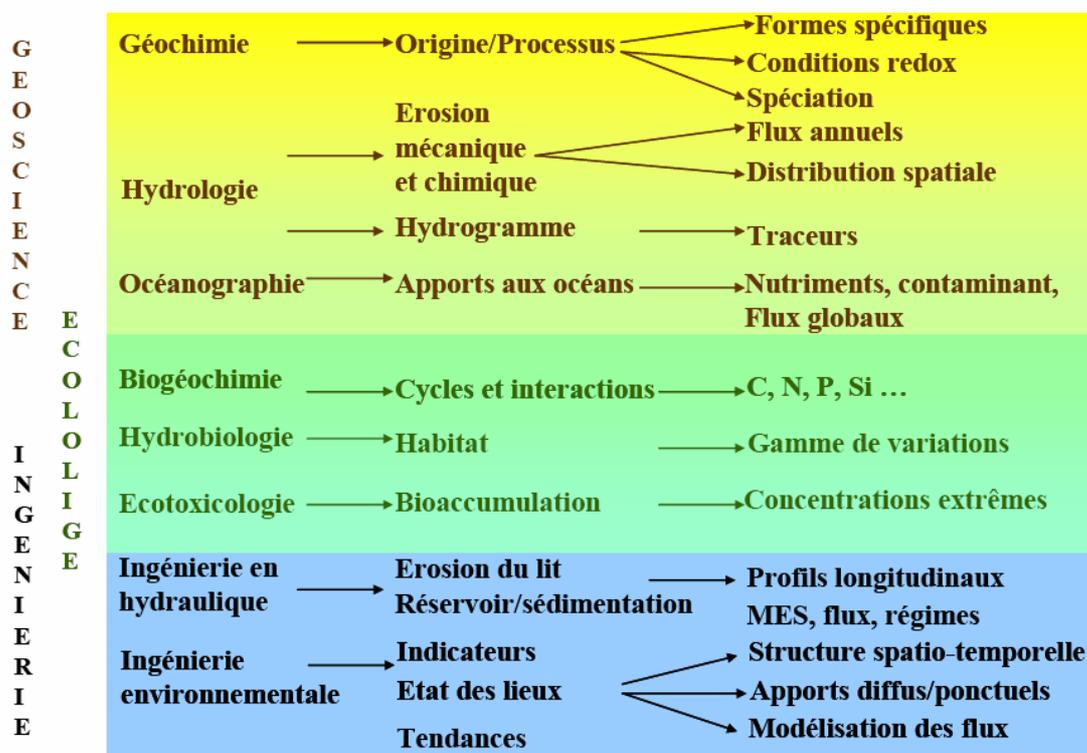


Figure C-6 : Différentes disciplines scientifiques impliquées dans l'étude des systèmes fluviaux et leurs objets d'analyse

[Moatar, 2006]

Dans la présente étude, l'objet est le marais, et l'objectif est le transfert des flux d'eau et de polluants de l'amont à l'aval du marais (Figure C-7). Comme vu précédemment, la densité du réseau hydrographique du Marais Breton est très élevée. C'est un milieu naturel totalement anthropisé, et quasiment plat avec peu de repères altimétriques. Il est maintenu dans son état actuel par l'action de l'Homme, tant au niveau de son exploitation que de sa gestion hydraulique. Il est donc difficile de savoir dans quel sens circule l'eau (cas 1), si l'écoulement est contraint par une digue, une route (cas 2) ou par un léger dénivelé altimétrique (cas 3).

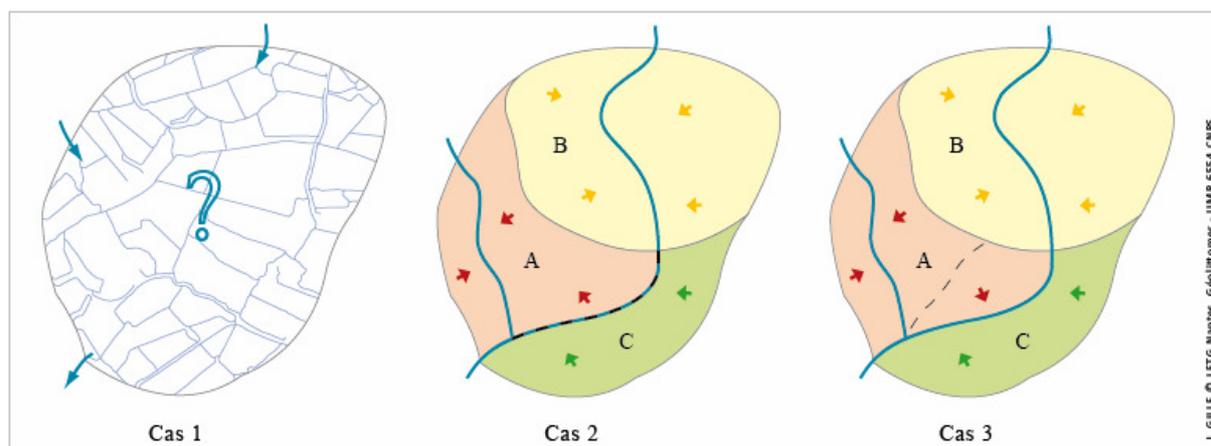


Figure C-7 : Problématiques de la détermination du sens d'écoulement de l'eau

Ces marais maritimes comme d'autres marais ne sont pas couverts par une couverture topométrique fine ce qui de facto n'autorise pas leur modélisation hydraulique : la pente des étiers n'est pas connue et la topométrie de l'ensemble du marais ne permet pas de les situer dans une classification topométrique de type marais conforme, marais contraire par exemple [Verger, 1968]. Les données altimétriques de référence (BD TOPO - IGN) sont insuffisantes pour ces secteurs.

La description globale du régime de l'eau en est donc très élémentaire car les relations hauteur-débit ou hauteur-volume ne sont pas connues. Comme il a été indiqué par la plupart des participants au programme national Zones Humides [Hubert-Moy *et al.*, 2005b], la précision altimétrique nécessaire à la description du fonctionnement hydraulique de telles zones humides est inférieure au décimètre [Dutartre *et al.*, 1998 ; Robin, 1992]. Ce manque de données altimétriques / bathymétriques empêche par conséquent la détermination des directions d'écoulement des flux d'eau, même si des approches spatiales par télédétection peuvent partiellement y remédier [Alsumard, 1999 ; Bailly *et al.*, 2003 ; Lukac, 2001 ; Puech *et al.*, 1999 ; Robin, 1992 ; Samaali, 1999 ; Samoudi, 2000]. L'usage de données de télédétection permet de porter un diagnostic sur le réseau hydraulique, le caractère humide des parcelles et les eaux de surface, et ainsi évaluer dans quelle mesure elles sont dépendantes des précipitations et/ou de la gestion hydraulique du marais [Hubert-Moy *et al.*, 2005a ; Hubert-Moy *et al.*, 2005b].

De nos jours, les données LIDAR apportent cette précision décimétrique voire infradécimétrique, ce qui s'avère très utile en zone côtière [Benyoucef, 2009 ; David, 2011 ; Hitier *et al.*, 2010 ; Populus, 2002 ; Populus *et al.*, 2001 ; Vanroye, 2011]. Néanmoins, elles se révèlent difficilement exploitables pour déterminer le sens des écoulements dans un marais sans correction [Hladik et Alber, 2012 ; Hubert-Moy *et al.*, 2005b]. Des essais ont été menés sur les marais de Noirmoutier à partir des relevés LIDAR topographiques de la baie de Bourgneuf. Pour appréhender au mieux la circulation des flux d'eau, il aurait fallu acquérir également la bathymétrie. Toutefois, la forte turbidité des eaux dans le marais aurait certainement empêché d'avoir une connaissance fine de la bathymétrie des chenaux sachant que la profondeur maximale mesurable est limitée à trois fois la distance de Secchi [Hitier *et al.*, 2010 ; Vanroye *et al.*, 2010].

Les modèles à base de réseaux de neurones (ou encore nommés automates cellulaires) nécessitent de connaître les entrées et les sorties du système à modéliser [Johannet, 2009 ; Langlois, 2005b]. Ne disposant pas des sorties, ce type de modèles est donc écarté.

Faute de données altimétriques / bathymétriques à haute résolution spatiale capables d'appréhender finement les variations du relief sur ce secteur³⁴, les modélisations basées sur l'utilisation d'un MNT sont de fait écartées [Charleux-Demargne, 2001 ; Gaillard *et al.*, 2006 ; Lomakine, 2005 ; Puech, 2000 ; Rollo, 2006, 2012 ; Wise, 2007]. L'étude des flux y devient difficile étant donnée que la pente y est d'environ de 0,03 pour mille. Les écoulements y sont donc très faibles [Mounès, 1974 ; Robin, 1992 ; Verger, 1968].

Les chemins empruntés par l'eau sont multiples pour atteindre l'exutoire du marais. Une partie de l'eau ruisselle sur des sols très hétérogènes et l'autre partie s'infiltré et circule dans des sols dont la texture, la nature, l'hétérogénéité conditionnent sa circulation dans le sol [Ambroise, 1998]. De multiples modèles permettent de modéliser la circulation de l'eau et des solutés dans le sol [Köhne *et al.*, 2009a, 2009b]. Etant dans un milieu considéré « comme imperméable » et avec une circulation latérale faible [Chevallier, 1991 ; Robin, 1992 ; Ters, 1978b ; Verger, 1964 ; Weng *et al.*, 2003], la modélisation se limitera à la circulation de l'eau en surface. L'hydrologie étant par nature empirique, la plupart des modèles sont de type conceptuel. En considérant les marais comme des plaines d'inondation, plusieurs recours peuvent être envisagés :

- utilisation des modèles issus de la dynamique des systèmes, appelés souvent globaux ou conceptuels, appliqués aux plaines d'inondation [Bonnifait *et al.*,

³⁴ Les données Litto3D ont été livrées trop tardivement pour qu'elles puissent être utilisées dans cette étude.

2009 ; Hostache, 2006 ; Puech, 2000 ; Raclot, 2003a], aux marais [Giraud, 1992 ; ISL Ingénierie, 2004 ; SCE, 2003] ;

- couplage de modèles 1D (pour les chenaux) – 2D (pour les surfaces) [Finaud-Guyot *et al.*, 2011 ; Hassan *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2009 ; Malleron *et al.*, 2011] ;
- approches hybrides [Liu et Cao, 2011] ;
- rasterisation de l'espace [Bates et De Roo, 2000 ; Marant, 2009].

L'inconvénient principal de ces méthodes est qu'elles nécessitent des données à haute résolution spatiale pour avoir une connaissance fine de la plaine d'inondation. Par ailleurs, la précision obtenue avec ces approches ne justifie pas pour autant les surcoûts générés par l'acquisition de ces données et des ressources informatiques pour la mise en œuvre de telles modélisations. Des approches plus modestes donnent des résultats tout à fait acceptables au regard des résultats prévus [Hunter *et al.*, 2007].

La modélisation des écoulements en réseau nécessite de tenir compte de facteurs comme [Chocat, 2009 ; Dutartre *et al.*, 1998] :

- la complexité des réseaux, avec la présence de nombreux ouvrages et des singularités hydrauliques ;
- le nombre et la méconnaissance des connexions, en particulier entre fossés et surfaces en eau permanentes et temporaires ;
- la complexité des écoulements influencés par l'aval et le maillage du réseau ;
- la variabilité de ces relations modifiant les écoulements (fermeture de fossé, pose de buses, ...).

L'appréciation de l'ensemble de ces facteurs est difficile, elle passe par une connaissance fine du terrain.

La modélisation hydraulique du réseau secondaire et tertiaire n'étant pas envisageable, la modélisation des flux d'eau dans la présente étude sera donc axée sur les principaux axes d'écoulement, comme suggéré pour de tels secteurs [Faure, 2009]. Les modèles de courantologie fluviale peuvent être soit de type hydraulique soit de type hydrologique. Le choix du modèle dépend des domaines d'application et de la simplification des processus hydrauliques appliquée (Tableau C-2). Pour le modèle 1D, le processus majeur considéré est le transfert d'amont en aval. Une valeur unique est alors intégrée sur la section d'écoulement. L'usage d'un modèle 2D permet de tenir compte de la variabilité des processus soit dans la largeur, soit dans la colonne d'eau. Enfin, le modèle 3D offre la possibilité de modéliser l'ensemble des processus (Figure C-8).

Domaines d'application		Usages
Hydrologie	2D	
	Modèle complet	Peu d'application : trop complexe du fait des fortes pentes des bassins amont et des hétérogénéités de surface
	Onde diffusante	Peu d'application
	Onde cinématique	Approche 1D est préférée en suivant la direction d'écoulement par gravité
	1D	
	Modèle complet	Couplage à des modèles hydrologiques pluie débit dans les parties amont des bassins versants Utilisation temps réel en cours d'expérimentation
	Onde diffusante	Peu utilisé car nécessiterait une approche 2D
Onde cinématique	Estimation des lames d'eau dans les bassins, couplage avec des modèles d'infiltration Utilisé dans son approche pseudo 2D	
Hydraulique fluviale	2D	
	Modèle complet	Confluents, défluents, courbes de rivière
		Impact d'ouvrages biais en lit mineur ou lit majeur
		Débordements avec écoulements différenciés (lit mineur et majeur)
		Rupture de digues
	1D	
	Modèle complet	Calcul de ligne d'eau en régime permanent
		Propagation de crues sur de longs linéaires de cours d'eau
		Impact d'ouvrages biais en lit mineur ou lit majeur
		Débordements avec écoulements différenciés (modèles à casiers)
		Rupture de barrages (longitudinal)
Utilisation dans le domaine de la prévision des crues		

Tableau C-2 : Domaines d'application des modèles de courantologie fluviale
(d'après [Tanguy, 2009a])

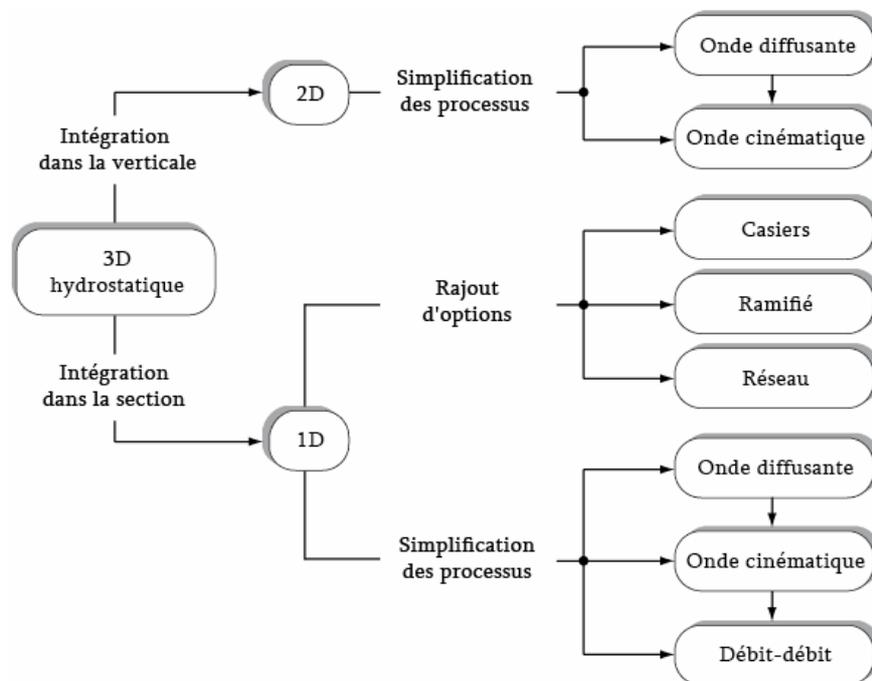


Figure C-8 : Arborescence des modèles utilisés en hydrodynamique
(d'après [Tanguy, 2009a])

Le modèle retenu sera issu de la mécanique des fluides et de l'hydraulique, appliqué à la courantologie fluviale [Tanguy, 2009a]. Les modèles hydrauliques sont basés sur la résolution des équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes, Reynolds, Barré de Saint-Venant, Euler, ...). Ces logiciels sont créés par chaque organisme, établissement ou plus humblement doctorant travaillant dans le domaine afin de répondre à leur problématique.

L'hydraulique travaille dans un milieu assez bien délimité et mesurable [Fourmigué et Arnaud, 2009]. Le choix d'un modèle 1D / 2D dépend des termes pouvant être négligés dans les équations, mais aussi de la disponibilité et de la précision des données en entrée.

Des études comparatives entre différents types de modèles hydrauliques ont montré que les modèles 1D sont plus adaptés à la modélisation du lit mineur et les modèles 2D au lit majeur ou à la plaine d'inondation [Bonnifait *et al.*, 2009 ; Finaud-Guyot *et al.*, 2011 ; Horritt et Bates, 2002 ; Marant, 2009 ; MEDAD, 2007d ; Moussa et Bocquillon, 2009].

Au niveau de la qualité de l'eau, l'objectif est de spatialiser le transfert et la dégradation des flux dans le marais, pas leur production. Avec le modèle monodimensionnel (1D), une valeur moyenne est intégrée dans la section tandis qu'avec le modèle bidimensionnel (2D), l'intégration des valeurs s'effectue dans la verticale [Tanguy, 2009a]. Il est par conséquent inutile de procéder à une intégration dans la verticale de la qualité de l'eau. Un modèle 1D, faisant l'intégration des flux dans la section, suffit pour ce type d'étude. Ce choix de modèle est également contraint par l'absence de données permettant de tenir compte de la variabilité des concentrations dans la colonne d'eau, tout comme des échanges avec les particules solides au fond des chenaux [Anras, 1997 ; Chen *et al.*, 2008 ; Du *et al.*, 2011 ; Ståhlberg *et al.*, 2006].

Enfin, le choix du modèle 1D est justifié par le fait que les processus de mélange dominants sur de telles distances sont la dispersion longitudinale [Ani *et al.*, 2009 ; Chin, 2006 ; Hansen, 1996 ; Wallis et Manson, 2005].

L'usage d'un modèle de transfert des débits et des flux polluants nécessite les hypothèses suivantes [Chocat, 2009] :

- les fluides et les polluants s'écoulent à la même vitesse moyenne (dans ce cas, le transport par charriage est négligé) ;
- l'écoulement n'est pas perturbé par la concentration ;
- la concentration correspond à la valeur moyenne dans la section en travers ;
- la capacité de transport de l'écoulement et de sa concentration détermine les échanges avec le fond.

Il est également important de noter :

- que la masse sortante peut être différente de la masse entrante (inférieure ou supérieure) à cause des phénomènes de dépôt ou au contraire d'érosion ;

- que le modèle de transfert de la pollution doit être choisi conjointement avec le modèle hydraulique. En effet, la description mécaniste des phénomènes de transport de particules suppose que la simulation hydraulique ait été effectuée préalablement par la méthode de Barré de Saint-Venant.

Par souci de simplification, certains paramètres sont négligés malgré leur influence sur la dynamique des flux d'eau et l'évolution des milieux : le degré de sinuosité des chenaux [Duan et Julien, 2010 ; Seo *et al.*, 2008 ; Yoshida et Ishikaw, 2008], la charge mobile au fond des chenaux [Zhang et Duan, 2011].

Comme le montre [Moussa et Bocquillon, 1996, 2009 ; Shaghaghian et Talebbeydokhti, 2008], le choix de la méthode numérique de résolution des équations mathématiques n'est pas anodin. Cependant, les études récentes en hydraulique cherchent à en réduire la complexité en faisant les hypothèses que les résultats des modèles sont plus impactés par les incertitudes sur la topographie et les coefficients de rugosité que par les simplifications mathématiques [Bates et De Roo, 2000 ; Hunter *et al.*, 2007].

C.1.3.3 Modèle Fudaa-Mascaret

La modélisation a été réalisée avec le logiciel Fudaa-Mascaret (Figure C-9), co-développé depuis plus de vingt ans par les équipes copropriétaires du Laboratoire National d'Hydraulique et département Environnement (LNHE) de EDF et du CETMEF.

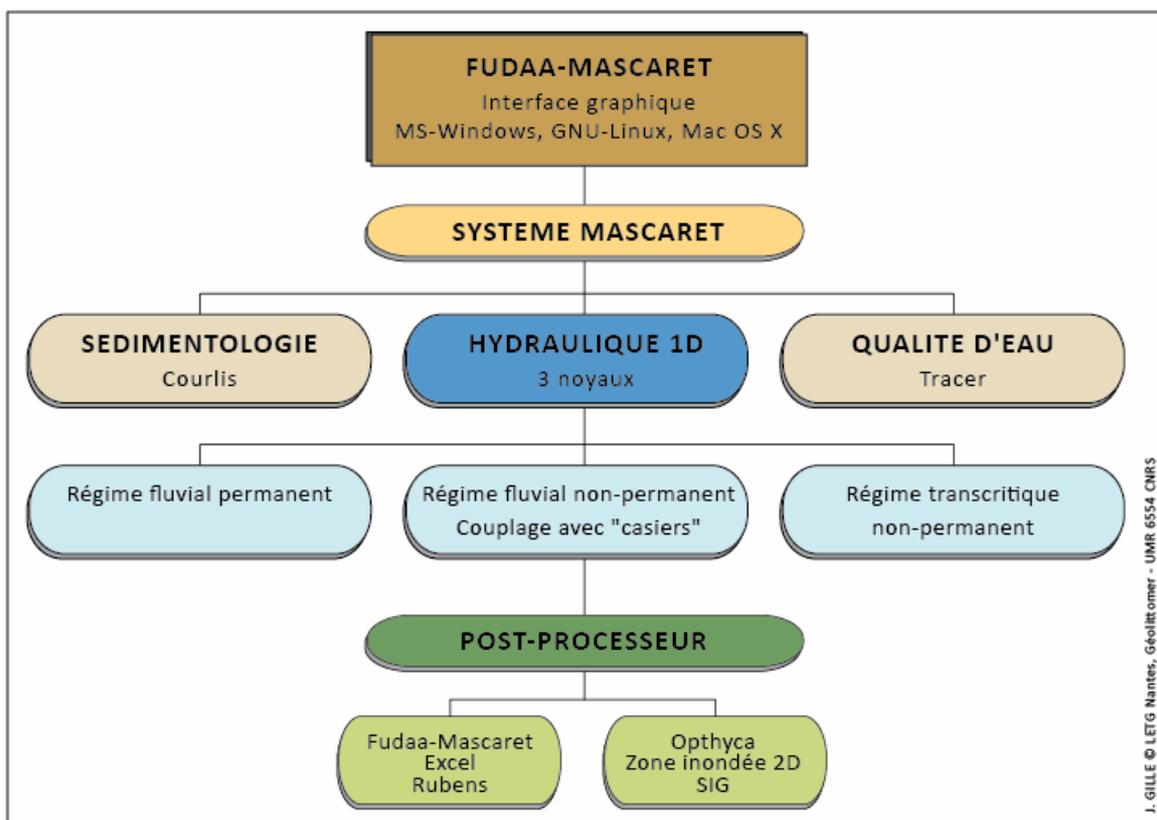


Figure C-9 : Architecture du logiciel Mascaret
(d'après [Goutal et Zaoui, 2010])

Fudaa est un projet d'intégration de codes de calcul dans des interfaces graphiques homogènes et communicantes. Le modèle de données objet unique offert par Fudaa favorise les échanges entre modules et autorise ainsi les enchaînements et les couplages de codes. Le projet Fudaa est conduit par le Département Recherche, Informatique et Modélisation du CETMEF. Il est distribué sous la licence LPG 2 (GPL 2).

Mascaret est un ensemble d'outils dédiés à la modélisation monodimensionnelle (1D) des écoulements à surface libre en rivière. Il résout les équations de Saint-Venant à l'aide d'un schéma du type « différences finies » [CETMEF, 2008].

Il est composé de trois noyaux de calcul hydrodynamique lui permettant de simuler les écoulements en régime fluvial permanent, non permanent ou en régime transcritique non permanent. Il comporte également deux autres modules : un pour la simulation des phénomènes liés à la qualité de l'eau (Tracer), et un autre pour le transport de sédiments cohésifs (Courlis).

Seul le module Tracer a été utilisé dans cette étude. Couplé avec le noyau hydraulique fluvial (permanent ou non) du code de calcul Mascaret, il permet d'obtenir les évolutions temporelles et spatiales des concentrations en traceur(s) dans les cours d'eau [Luck, 2004a, 2004b ; MEDAD, 2007c]. Il est constitué de six modèles de qualité d'eau [Luck, 2004a] :

- O2 : modèle simplifié d'oxygène dissous,
- BIOMASS : modèle de biomasse phytoplanctonique,
- EUTRO : modèle d'oxygénation et d'eutrophisation,
- MICROPOL : modèle d'évolution de micropolluants (de type métaux lourds ou radioéléments) avec prise en compte de leur interaction avec les matières en suspension,
- THERMIC : modèle d'évolution de la température de l'eau sous l'influence des flux atmosphériques,
- TRANSPORT_PUR : modèle de transport de traceurs quelconques, ne réagissant pas entre eux et avec le milieu.

Le choix d'un modèle 1D comme Mascaret implique de faire les hypothèses suivantes [Bernard et Baleyrier, 2004 ; EDF et CETMEF, 2011b ; MEDAD, 2007d] :

- les écoulements sont graduellement variés (hypothèse de Saint-Venant) ;
- les écoulements sont laminaires, c'est-à-dire que le flux a une direction privilégiée suivant l'axe du lit mineur et que la vitesse est relativement homogène dans toute la section d'écoulement (faible courbure des lignes de courant) ;
- les accélérations verticales sont négligeables ;
- la répartition des pressions est quasi hydrostatique ;
- la pente moyenne des écoulements est faible (cosinus de l'angle entre le fond et l'horizontale proche de 1) ;

- les contraintes de viscosité sur le fond et les berges sont prises en compte à l'aide des lois empiriques de frottement (loi de Strickler) ;
- l'influence du vent est négligée ;
- la géométrie des biefs est ici figée.

Un critère de choix important pour les modèles est leur coût total de mise en œuvre (temps de calcul et ressources informatiques, temps et coût d'acquisition et de mise en forme des données, temps d'interprétation) [Ambroise, 1998]. De ce point de vue, Mascaret possède plusieurs avantages [CETMEF, 2008 ; Goutal et Demay, 2008] :

- modèle mis à disposition gratuitement avant sa diffusion libre ;
- possibilité de rencontrer et de communiquer avec l'équipe chargée du développement et la communauté des utilisateurs avec l'organisation des clubs d'utilisateurs ;
- fonctionnement dans des délais raisonnables avec les équipements standards actuels en bureautique ;
- intégration dans des plateformes de modélisation 1D-2D dans le continuum terre / mer [Malleron *et al.*, 2011] ;
- méthodes pour tester les incertitudes et la sensibilité des paramètres [Arnaud *et al.*, 2010 ; Couplet *et al.*, 2010 ; Goutal et Demay, 2008 ; Monte, 2009].

Les études menées avec ce modèle portent sur :

- la propagation de crues et modélisation des champs d'inondations [CETE Méditerranée, 2008 ; Chassé, 2009 ; Herman, 2012 ; Ladreyt, 2012 ; Le Pape, 2012] ;
- l'onde de submersion résultant de la rupture d'ouvrages hydrauliques ;
- la régulation des rivières aménagées ;
- la propagation d'onde dans les canaux (intumescences, éclusées, mise en eau) [Bristeau *et al.*, 2011] ;
- le transport et la dispersion de substances dans les cours d'eau [Goutal *et al.*, 2008 ; Marang *et al.*, 2011 ; Monte *et al.*, 2008].

Fin 2008, quarante bureaux d'études (français et canadiens) et deux centres de recherche disposaient de Mascaret [Goutal et Zaoui, 2009]. Depuis juin 2011, Mascaret est en open-source, ainsi que son interface Fudaa-Mascaret. Il est diffusé en tant que gratuiticiel et téléchargeable sur le site internet du projet (<http://www.openmascaret.org>).

Les versions de base utilisées sont :

- Fudaa-Mascaret 3.1.1 pour l'interface et l'environnement de travail,
- Mascaret 7.0 pour le noyau hydraulique,
- Tracer 5.1 pour le module de qualité de l'eau.

Quelques modifications ont été apportées à ces versions, avec l'aide des développeurs et de l'équipe Assistance Fudaa-Mascaret, afin de répondre aux particularités et aux objectifs de l'étude [Gille, 2010b, 2011a, 2012].

C.2 Données

C.2.1	Inventaire et structuration des données	147
C.2.2	Choix et acquisition des données pour la modélisation.....	151
C.2.3	Bilan hydrologique	165

En géographie physique, le modèle quantitatif nécessite de récolter sur le terrain de plus en plus de faits précis (Observations écrites de J. Demangeot, [Racine, 1974]).

C.2.1 Inventaire et structuration des données

L'étape d'inventaire et d'intégration de l'existant permet de produire un état des connaissances sur la zone étudiée. La comparaison des caractéristiques de l'information intégrée permet la mise en évidence de ses points faibles et de ses lacunes. Les apports des SIG dans la phase d'inventaire sont de plusieurs ordres [Le Berre, 2008] :

- l'archivage d'un état de référence,
- l'identification des besoins d'informations complémentaires,
- la validation d'une information nouvelle ou issue d'une modélisation.

L'inventaire et le recueil des données existantes [Bersani, 2006 ; Robin *et al.*, 2005] ont permis d'évaluer ainsi l'adéquation des données pour l'atteinte des objectifs de l'étude. Elles ont été acquises conjointement pour les bassins versants et le Marais Breton. Elles sont regroupées en huit thèmes dans le SIG (cf Annexe 3, p.303). Une différenciation est faite entre (Figure C-10) :

- les couches SIG, constituées exclusivement de couches d'information géographique ;
- les BD, formés de données alphanumériques et pouvant être en lien direct ou non avec une couche SIG.

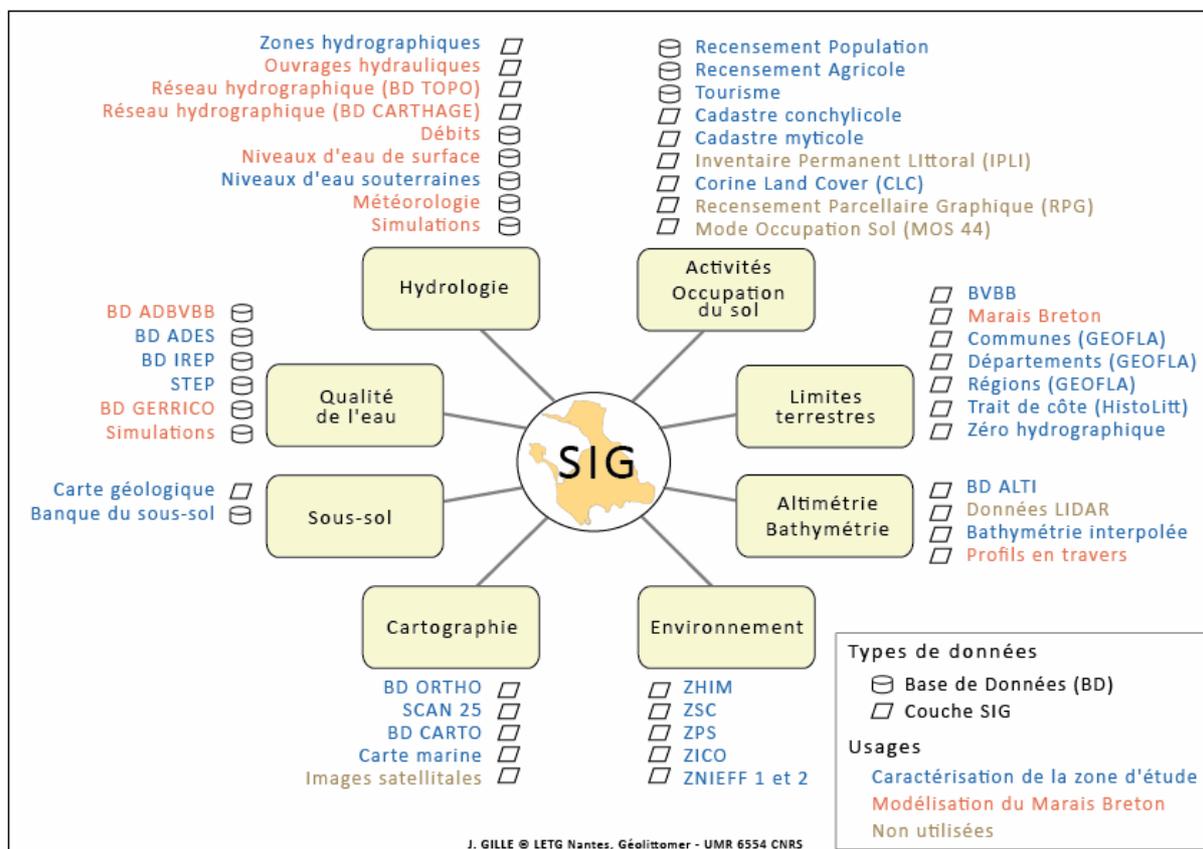


Figure C-10 : Organigramme des données intégrées au SIG

Certaines sont spécifiques à une entité géographique, d'autres sont propres à un usage. Une distinction est donc faite entre celles qui ont servi uniquement à la caractérisation de la zone d'étude et celles utiles à la mise en œuvre de la modélisation dans le Marais Breton. Les données restantes n'ont pas été utilisées à cause d'une échelle, d'une résolution ou d'un échantillonnage spatio-temporel inadapté ou encore d'une mise à disposition tardive.

Les premières acquisitions se sont basées sur les fonds du laboratoire Géolittomer / IGARUN et de l'Ifremer de Nantes. En parallèle, les données utiles et disponibles sur Internet ont été téléchargées. L'étude approfondie de la dynamique des flux et le paramétrage du modèle ont nécessité l'acquisition de données spécifiques. De nombreuses conventions ont été mises en place à cet effet, avec des établissements publics et des acteurs / gestionnaires locaux. Enfin, quelques achats ont également été effectués afin de soit compléter les séries à disposition, soit bénéficier de données plus précises (Figure C-11).

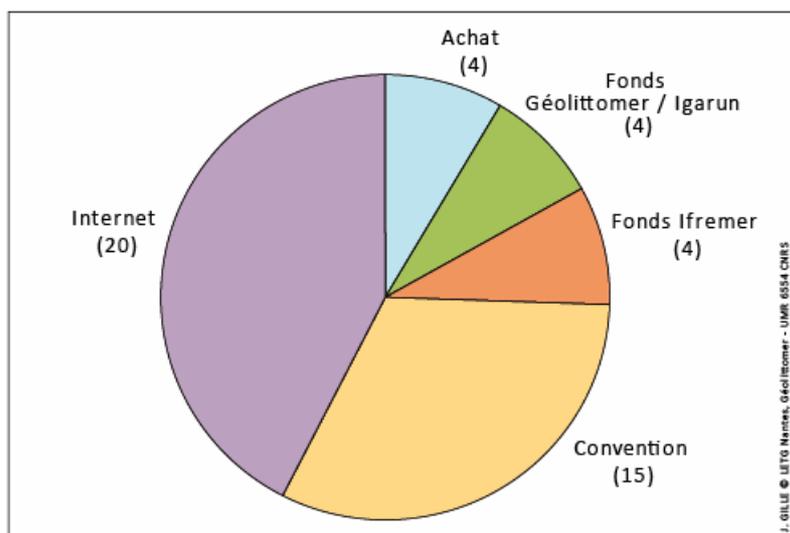


Figure C-11 : Différents types d'acquisition des données

Les métadonnées sont synthétisées dans la table des données (cf Annexe 3, p.303). Neuf champs y sont renseignés (Tableau C-3).

1) Thème	4) Echelles / résolution / Echantillonnage	7) Systèmes de projection
2) Données	5) Emprises spatiales	8) Sources / Origines
3) Années	6) Types de données / Formats	9) Types d'acquisition

Tableau C-3 : Métadonnées renseignées pour chaque donnée

La phase d'inventaire a été longue et fastidieuse car elle nécessite l'intégration de données hétérogènes dans une base d'information cohérente géométriquement et sémantiquement [Le Berre, 2008]. Dans la réalité, la disponibilité, la qualité, l'organisation, l'accessibilité et la mise en commun des informations géographiques posent souvent problèmes [Hubert-Moy *et al.*, 2005a]. Chaque organisme, chaque personne a des pratiques bien différentes (Figure C-12). Un important travail de standardisation s'avère nécessaire au niveau local afin de faciliter la mise en œuvre d'étude environnementale.

Dans le cadre de cette étude, c'est la version 9.3 du logiciel ArcGIS (ESRI) qui est utilisée dans le but de :

- de créer et/ou structurer les données nécessaires à l'étude ;
- de traiter, croiser et formater ces données pour l'alimentation du modèle en entrée ;
- de spatialiser les résultats des simulations pour les restituer sous forme cartographique.

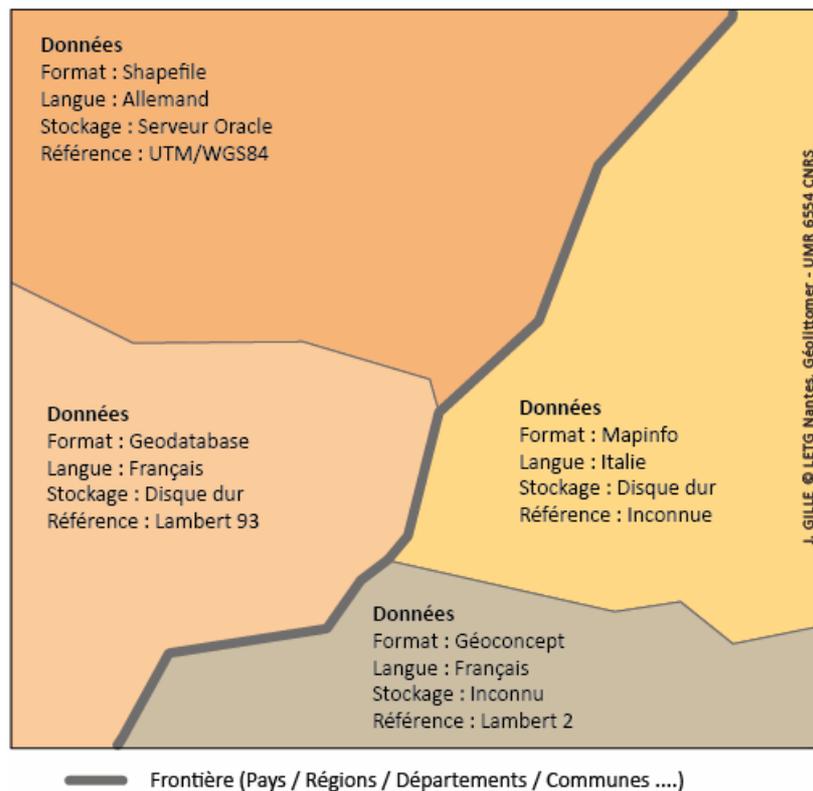


Figure C-12 : Exemple de problème d'interopérabilité
(inspiré de [IGN Conseil, 2011])

ArcGIS constitue un ensemble complet d'applications SIG professionnelles permettant de résoudre des problèmes, remplir une mission, prendre de meilleures décisions et communiquer, visualiser et comprendre des informations géographiques. Son environnement est constitué de trois applications : ArcCatalog, ArcMap et ArcToolbox. La première permet de gérer les stocks de données spatiales et la conception des bases de données ainsi que d'enregistrer et de visualiser les métadonnées. La seconde est utilisée pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour ainsi que pour les analyses associées aux cartes. La troisième est une fenêtre ancrable présente dans les applications ArcGIS qui permet d'effectuer les tâches de conversion et de géotraitement. ArcGIS stocke et gère les données géographiques dans plusieurs formats. Les trois modèles de données de base utilisés par ArcGIS sont les suivants : vecteur (point, polyligne, polygone), raster (photographie aérienne, satellitale, modèle numérique de terrain) et TIN (réseau triangulé irrégulier). Les données tabulaires peuvent également être importées [ESRI, 2005].

C.2.2 Choix et acquisition des données pour la modélisation

C.2.2.1	Topographie et bathymétrie	151
C.2.2.2	Niveaux d'eau et débits	153
C.2.2.3	Météorologie	157
C.2.2.4	Qualité de l'eau.....	158

Les données sur le littoral existantes sont nombreuses [Bersani, 2006 ; Robin *et al.*, 2005]. Leur inventaire a permis de faire un état des lieux de leurs disponibilités / accessibilités, leurs qualités et les carences pour la bonne atteinte des objectifs. La précision des résultats en dépend [De Vries et Hromadka, 1993].

L'ensemble de ces données a été récolté grâce aux téléchargements sur les sites internet des producteurs de données, à la mise en place de conventions³⁵, à l'achat de données spécifiques et *in fine* par des mesures *in situ* lorsque cela s'est avéré nécessaire et possible.

C.2.2.1 Topographie et bathymétrie

Les données topographiques et bathymétriques sont nécessaires pour la mise en œuvre d'un modèle reproduisant la circulation de l'eau (Tableau C-4).

Modèle	Données nécessaires	Instruments	Alimentation des modèles
Hydrologique Hydraulique maritime ou fluviale	Niveau du sol (hors d'eau) Topographie	Station totale GPS - DGPS Photogrammétrie Laser aéroporté Satellite	Constitution de MNT puis de MST Modèles 1D : construction de profils en travers en lit majeur Modèles 2D et 3D : construction de grilles et points
Hydraulique maritime ou fluviale	Niveau du fond du lit d'un cours d'eau (sous l'eau) Bathymétrie	Sondages à la perche Sondage ultrasonore Laser aéroporté (faible profondeur)	Constitution de MNT puis de MST Modèles 1D : construction de profils en travers en lit mineur Modèles 2D et 3D : construction de grilles et points

Tableau C-4 : Alimentation des modèles

[Tekatlian, 2009]

Les marais maritimes sont des zones de faible amplitude altimétrique. La précision des MNT de l'IGN est très insuffisante pour une connaissance de l'hypsométrie fine dans ce type de milieu : l'équidistance des courbes de niveau nécessaire doit être, en effet, d'une dizaine de centimètres pour apprécier la microtopographie du marais. Un microrelief d'une vingtaine de centimètres suffit pour entraver la propagation d'une inondation [Robin, 1992]. Si localement, il est possible de pallier à ce manque de

³⁵ Afin de pouvoir établir une collaboration entre Géolittomer / Université de Nantes et d'autres établissements, des conventions ont été mises en place pour récupérer des BD et des ressources bibliographiques.

précision en recourant à une station *Differential Global Positioning System* (DGPS), cette technique est peu envisageable pour une grande zone d'étude. Le réseau hydrographique est généralement dense, ce qui en limite l'accès et complique la réalisation de campagnes topographiques homogènes.

Certains paramètres hydrauliques peuvent être définis grâce à la télédétection [Lukac, 2001 ; Raclot, 2003b ; Roux *et al.*, 2003]. Si la résolution spatiale des images satellites [Lopez, 2003] et leur échantillonnage temporel [Castaings *et al.*, 2003 ; Robin, 1992] ont été pointés à un moment donné, de nos jours, ils apparaissent plus compatibles pour la caractérisation des processus hydrologiques.

L'utilisation de lasers aéroportés est préférable pour l'étude du relief en zone côtière : rouge pour la mesure de la topographie, bleu vert pour les zones de petits fonds de grande étendue et pour des eaux assez claires [Tekatlian, 2009]. Cette technique peut donc s'avérer utile pour la délimitation d'UHC en zone de marais, mais est en revanche insuffisante pour établir des profils longitudinaux ou en travers des biefs, ou encore pour connaître le volume de ces casiers hydrauliques³⁶. La faible largeur du réseau hydrographique empêche également l'usage de moyens de relevés bathymétriques embarqués à grand rendement. Il ne reste donc plus que les mesures ponctuelles bathymétriques par sondage pour mesurer la cote du fond. Cette méthode peut rapidement avoir un coût humain, matériel et temporel non négligeable selon la technique employée, mais elle reste cependant la plus adaptée à ce jour pour des milieux tels que les marais maritimes. Elle est notamment utilisée par les bureaux d'études pour évaluer l'altération de la fonction hydraulique des cours d'eau [Hydroconcept, 2007b, 2010 ; ISL Ingénierie, 2004].

C'est ce dernier type de données qui a été récupéré auprès d'Hydroconcept à l'occasion du CREZH sur le SAH du Sud Loire. 425 km de chenaux ont été parcourus dans la partie nord du Marais Breton, avec un profil en travers tous les cents mètres environ. Ils ont été réalisés à l'aide d'une tige graduée à partir d'une embarcation. Ces mesures ont permis de définir 1267 séquences homogènes sur ce secteur [Hydroconcept, 2010]. Les informations à disposition sont la largeur du bief (AB), la hauteur de berges (CD), la hauteur d'eau (DE) et la hauteur de vase (EO) (Figure C-13).

³⁶ Fréquemment, le disque de Secchi disparaît au bout de quelques centimètres à quelques décimètres en zones de marais [Anras, 2004].

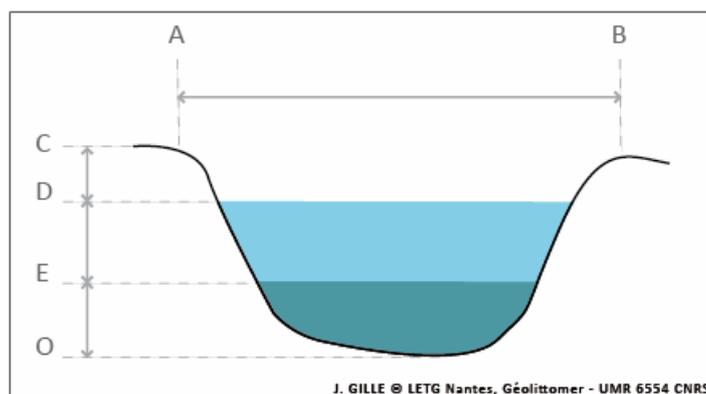


Figure C-13 : Détail des mesures réalisées dans un bief par Hydroconcept

L'emplacement des profils, les méthodes utilisées et l'expertise de l'opérateur sont autant de paramètres qui influent sur la fiabilité des données [Salomon, 2000]. Compte tenu de leur date récente de création, de la précision des données et de l'expertise d'Hydroconcept dans le domaine, il est considéré que les présentes données sont fiables pour les calculs hydrauliques.

C.2.2.2 Niveaux d'eau et débits

Les niveaux d'eau et/ou des débits dans les cours d'eau constituent l'information de base pour l'évaluation des stocks en eau et leur écoulement. En fluctuant, les débits peuvent constituer une cause des évolutions de la concentration d'un paramètre dans l'eau. L'étude des écoulements est par conséquent indispensable pour suivre l'évolution des flux de polluants. Plusieurs techniques permettent d'obtenir ces informations selon les caractéristiques des cours d'eau [AELB, 2006 ; Cosandey et Robinson, 2000 ; Le Coz *et al.*, 2011 ; MATE, 1998 ; OMM, 1994 ; Roche, 1963]. Un inventaire en est fait dans le tableau suivant (Tableau C-5).

Parmi toutes ces techniques, la plus adaptée est l'échelle limnimétrique (ou limnomètres). Les raisons sont multiples.

Les flux d'eau sont entièrement maîtrisés dans le Marais Breton par les ouvrages hydrauliques. Leurs manœuvres dépendent de plusieurs paramètres difficilement prévisibles à l'échelle mensuelle (météorologie, maintien des niveaux d'eau) et donc compatible avec la logistique d'une sortie sur le terrain (réservation de véhicule, disponibilité du matériel et du personnel habilité à l'utiliser le cas échéant).

Technique	Mesure	Condition d'utilisation des instruments	
		Profondeur du cours d'eau	Débit du cours d'eau
Echelle Limnimètre	Niveau d'eau	Indifférent	Indifférent
Jaugeage au moulinet	Vitesse point par point	Moyenne à profonde	Moyen à fort mais limité
Jaugeage au micromoulinet	Vitesse point par point ou vitesse verticale	Faible	Faible
Courantomètre	Vitesse	Faible	Faible
ADCP	Vitesse 3D	Moyenne	Moyen
Dérive de flotteurs	Vitesse 2D surface	Indifférent	Moyen et fort Utilisation adaptée très fort débit
Jaugeage chimique	Vitesse moyenne section	Faible	Fort voire très fort
Jaugeage par dilution	Vitesse moyenne section	Faible à moyenne	Fort
Analyse d'images	Niveau d'eau Vitesse 2D surface Vue section	Indifférent pour profondeur	Moyen à fort, voire très fort
Seuils fixes	Niveau d'eau Débit	Faible	Faible
Mesure directe par ultrasons	Niveau d'eau Débit	Moyenne à forte	Indifférent

Tableau C-5 : Données fournies par les instruments de mesures et conditions optimales d'utilisation
[Tanguy, 2009b]

La circulation dans le réseau hydrographique peut-être bi-directionnelle selon les manœuvres. Si l'objectif est à l'évacuation des eaux à la mer, le sens du courant sera bien d'amont vers l'aval. Maintenant selon les secteurs, cette gestion des flux d'eau peut être différente momentanément ou périodiquement. La circulation de l'eau est inversée :

- dans le marais géré en eau salée afin de le remplir suite à sa vidange ;
- dans le canal situé entre l'ouvrage du Nouveau Collet et l'écluse du Fresne pour stocker de l'eau et effectuer des chasses d'eau pour le désenvasement du Port du Collet ;
- avec la création d'un gradient du niveau d'eau inverse suite à l'ouverture d'une écluse connexe, sur un autre axe hydraulique, comme au Port la Roche par exemple.

La mise à l'eau d'une embarcation (télécommandée ou non, équipée d'un ADCP ou non) est également difficile dans le marais pour utiliser les méthodes d'exploration du champ de vitesse³⁷. Il faut garder l'embarcation dans une position stationnaire afin de réaliser l'exploration du champ des vitesses dans un plan perpendiculaire aux berges.

³⁷ Mesures des débits le long d'une section transversale d'un cours d'eau avec des instruments appropriés (moulinets, courantomètres).

Il faut également que le lieu soit accessible en voiture avec une remorque, que la hauteur d'eau soit de plein bord et que les berges soient stables. Or la réunion de tous ces paramètres n'est pas aisée comme cela a pu être vérifiée lors de la sortie sur le terrain avec les agents du service hydrométrie / hydrologie de la DREAL PdL en octobre 2009. La hauteur d'eau et le degré d'envasement des chenaux rendent également dangereux l'utilisation de pontonniers³⁸ pour réaliser les mesures dans les chenaux.

Les jaugeages chimiques et par dilution sont préconisés lorsque les méthodes d'exploration du champ de vitesse ne peuvent être appliquées, comme par exemple pour les cours d'eau à très faible débit. Des essais ont été réalisés sur un petit cours d'eau avec de faibles vitesses d'écoulement par l'injection instantanée en un point d'une solution de chlorure de sodium (NaCl) en juillet 2009. La conductivité a été mesurée en aval, à une distance suffisamment grande, afin de s'assurer de l'homogénéisation des concentrations dans le cours d'eau. Les essais n'ont pas donné des résultats satisfaisants et encourageants pour les mettre en œuvre dans le Marais Breton, avec des débits plus faibles et des sections d'écoulements beaucoup plus grandes.

S'il est assez aisé d'avoir une estimation du débit par l'usage d'un flotteur (branche, bouteille) à un endroit du cours d'eau où la section mouillée est connue, son caractère trop imprécis rend son usage impossible pour calibrer et valider les résultats issus d'un modèle.

La variabilité de la circulation de l'eau est telle que des mesures ponctuelles semblent totalement inadaptées pour estimer les volumes écoulés. Il se poserait le problème alors de la représentativité de la mesure et de la connaissance précise des manœuvres aboutissant à cette circulation (objectif, durée et hauteur de l'ouverture de l'écluse) pour pouvoir les comparer aux résultats issus du modèle.

La pose d'un ADCP de l'IFREMER (la Tremblade) dans le Port du Collet a été envisagée pour l'enregistrement d'un cycle de vidange / remplissage du marais salé, ainsi que l'évacuation des flux issus du marais doux. Mais cette opération n'a pas pu avoir lieu, malgré toutes les autorisations obtenues pour son installation, à cause du dysfonctionnement de l'ADCP et des manques de moyens pour le remettre en état de marche.

³⁸ Plus communément connue sous son terme anglosaxon *waders*, ce sont des accessoires de protection contre l'eau, jusqu'au dessus de la ceinture, utilisés notamment par les pêcheurs mais aussi par les égoutiers et les spéléologues.

Il ne reste donc plus que les échelles et les limnimètres qui permettent de connaître la vitesse en un point donné si la courbe de tarage, reliant les hauteurs aux débits, est connue. L'avantage des échelles réside dans leur faible coût ainsi que dans leur simplicité d'utilisation. Leur inconvénient est de ne pouvoir disposer des mesures télétransmises, mise à part leur éventuel couplage avec un système d'analyse d'images. Pour y remédier, l'usage de limnimètres est préférable. Certes, le coût est plus élevé, mais il représente un bon compromis du moment que la courbe de tarage est connue et que l'appareil n'est pas vandalisé.

Les seules mesures de débits existantes à proximité du secteur étudié se situent hors marais (Figure C-14). Trois stations hydrométriques sont suivies par la DREAL PdL le long du Falleron sur les communes de Falleron (Q1), Saint-Etienne-de-Mer-Morte (Q2) et Machecoul (Q3)³⁹. Une quatrième se situe à Challans sur le Grand Etier de Sallertaine (Q4).

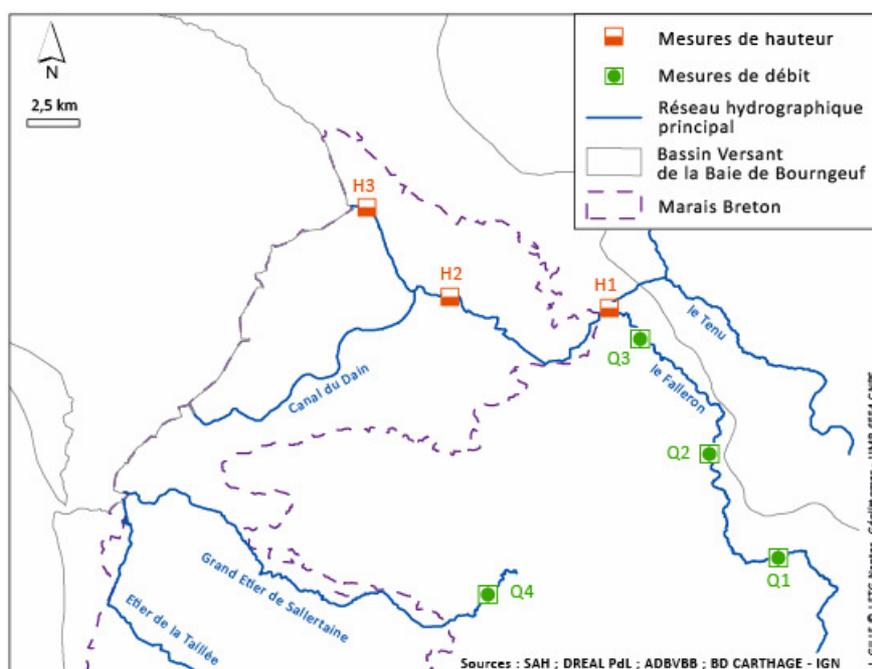


Figure C-14 : Localisation des stations hydrométriques

Les débits ne sont jamais mesurés dans le Marais Breton car la gestion de l'eau se réalise uniquement en fonction des niveaux d'eau. La mesure des hauteurs d'eau ne se fait qu'en quelques points et il est très difficile d'en apprécier les valeurs en d'autres secteurs du marais, les informations le permettant étant plus rares [ADBVBB, 2011]. En outre, la forte densité du réseau hydrographique rend la tâche délicate, de nombreux canaux et fossés tertiaires sont gérés par les agriculteurs et il est difficile d'évaluer l'état de curage ou encore la gestion hydraulique (systèmes de vannage).

³⁹ Station fermée depuis septembre 2009, à cause des assecs fréquents entre juin et septembre (communication orale DREAL, 2008).

Sur le secteur étudié, les hauteurs d'eau sont enregistrées par des limnimètres en trois points (Figure C-14) : à l'entrée à Machecoul (H1), dans la partie centrale au Port-la-Roche (H2)⁴⁰ et à la sortie au vannage du Nouveau Collet (H3). Ces données sont centralisées à la centrale des Champs Neufs à Frossay. Chaque mois, la CEP / SAH publie un rapport faisant état des niveaux d'eau et des manœuvres hydrauliques pour l'ensemble des ouvrages du SAH du Sud Loire. Avec la mise en place de règlements d'eau concernant la gestion des niveaux d'eau, des échelles limnimétriques devraient être mises en place sur le réseau hydrographique secondaire, voire tertiaire. Il est envisagé de même de remettre en état certains ouvrages hydrauliques et de les équiper de capteurs de niveau, reliés à la centrale des Champs Neufs à Frossay (communication orale CEP / SAH, 2008). Les données recueillies auprès de la CEP / SAH sont les hauteurs minimales, maximales et moyennes pour 2006. La fréquence des relevés est variable en fonction des manœuvres et des sites de mesures. Elle varie de deux relevés à la journée à un relevé tous les deux jours pour le vannage du Nouveau Collet. Pour l'aval du Port la Roche, la fréquence est journalière. Les données fournies par la CEP sont des cotes marines pour le vannage du Nouveau Collet. Pour avoir les valeurs dans le référentiel altimétrique légal (IGN69), 3,2 m ont été soustraits à la cote en se référant aux références altimétriques maritimes données pour le Port de Pornic [SHOM, 2009].

C.2.2.3 Météorologie

Les données météorologiques de huit stations ont été acquises auprès de Météo France, depuis leur mise en service jusqu'au 22 juin 2008. Sept paramètres différents sont retenus, lorsqu'ils sont disponibles (Figure C-15).

⁴⁰ Mesures en amont et aval du vannage.

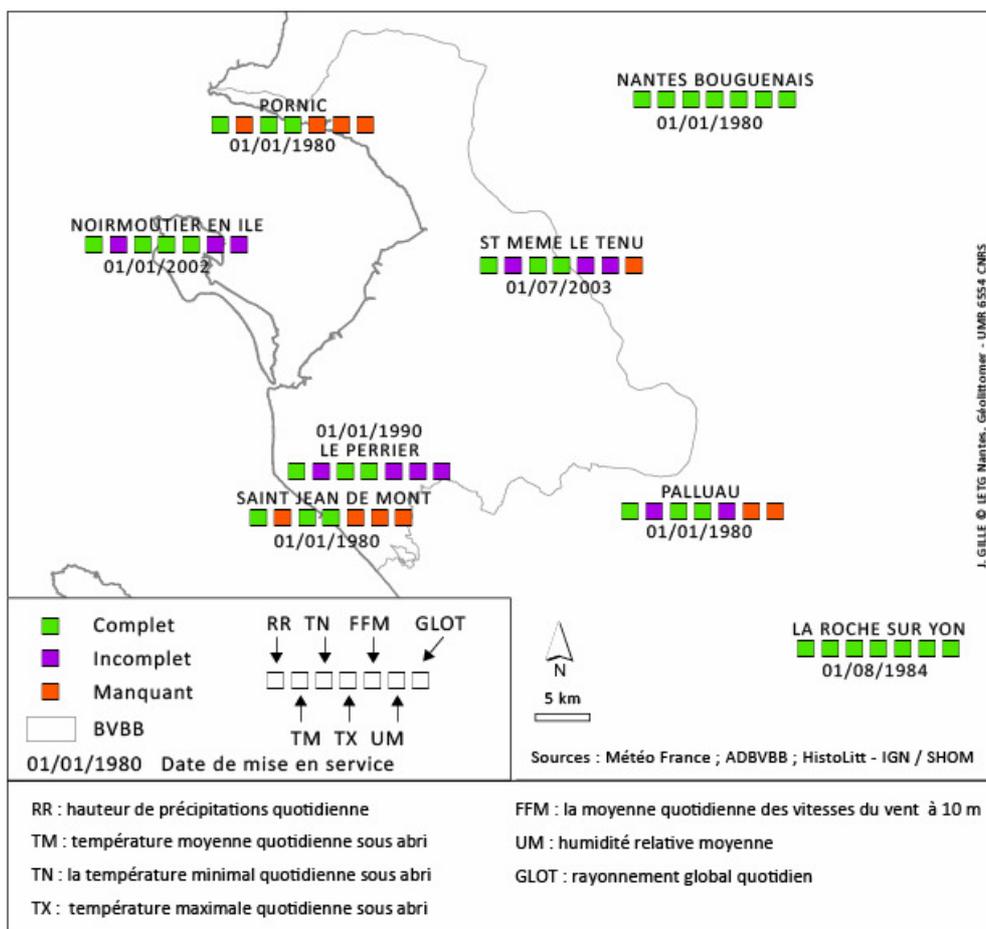


Figure C-15 : Bilan des données disponibles par station météorologique pour la période du 1er janvier 2002 au 22 juin 2008

C.2.2.4 Qualité de l'eau

Il existe trois BD pour la qualité des eaux douces de surface :

- BD OSUR contenant les données de l'AELB ;
- BD du Réseau National de Bassin (RNB) des Pays de la Loire regroupant les données de la DREAL des Pays de la Loire, de la CREPEPP et de l'AELB ;
- BD de l'Observatoire de l'Eau du BVBB regroupant les données de l'Observatoire, de la DREAL des Pays de la Loire, du Conseil Général de Vendée, de la DDASS de Loire-Atlantique, du Service Maritime et de Navigation de Loire-Atlantique.

La BD de l'Observatoire de l'Eau du BVBB est la plus complète des trois BD. Elle contient les mesures des deux autres BD, le nombre de points de mesures est plus conséquent, ainsi que la fréquence d'échantillonnage (cf Annexe 2, p.301). Le bilan de la qualité de l'eau a toutefois mis en évidence de fortes hétérogénéités en fonction des points de prélèvements, des années et des paramètres (B.3.3.3, p.108).

Une campagne de prélèvements en 2009 a été mise en place à raison de deux fois par mois [Gille, 2009 ; Malgogne, 2009]. Ces nouvelles mesures ont eu pour objectif :

- d'établir un diagnostic d'état et de contrôle du milieu,
- d'affiner l'évaluation du rôle du marais sur la qualité de l'eau.

L'échantillonnage constitue la procédure de prélèvement d'une quantité représentative d'eau à partir d'un point d'eau. Plusieurs méthodes existent [Goblet et Evans, 2009 ; OMM, 1994 ; Rodier *et al.*, 1996]. Son choix résulte de nombreux facteurs comme le type d'éléments devant être échantillonnés, le type d'échantillon et le paramètre de qualité à analyser, lesquels déterminent à leur tour l'équipement et les procédures à utiliser [Goblet et Evans, 2009].

Les observations sont souvent issues de mesures discontinues (ou discrètes) pour des échelles spatiale et temporelle données. Cela implique que leurs dimensions spatiales (et temporelles) peuvent être caractérisées par les trois composantes suivantes (Figure C-16) :

- la dimension de la mesure (« support »),
- l'espacement des valeurs observées (« spacing »),
- l'extension du domaine d'étude (« extent »).

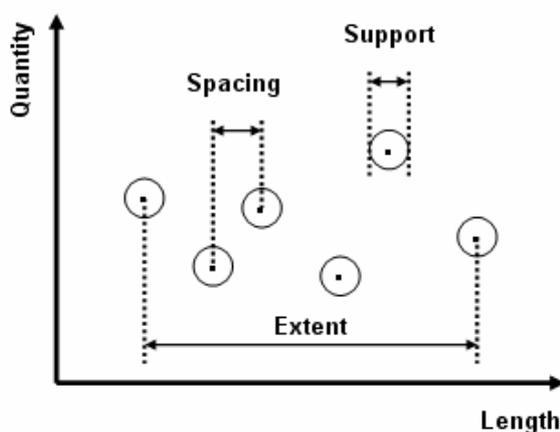


Figure C-16 : Paramètres d'échelle
(d'après [Blöschl et Sivapalan, 1995])

Idéalement, le prélèvement d'un échantillon doit être effectué à une échelle capable de capturer toute la variabilité liée à la nature des processus hydrologiques étudiés. Cependant, dans la pratique, les contraintes logistiques ou la méconnaissance des processus hydrologiques peuvent conduire à une représentation très partielle de la variabilité naturelle (Figure C-17). Ces imperfections dans l'échantillonnage s'expliquent par le choix d'un espacement trop lâche (a), d'une extension trop petite (b) ou d'un support de mesure trop grand (c).

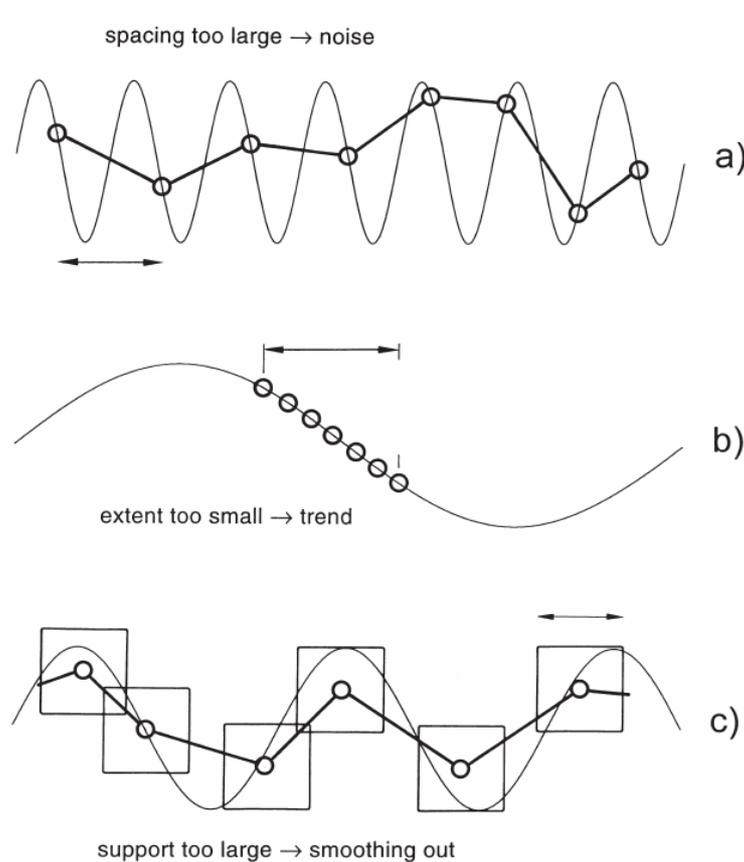


Figure C-17 : Imperfections de l'échantillonnage

[Grayson et Blöschl, 2000]

Le protocole pour l'acquisition de ces nouvelles données a été mis en place à la suite de lectures bibliographiques [AELB, 2006 ; Aminot et Kérouel, 2004 ; Anras, 2004 ; OMM, 1994 ; Rodier *et al.*, 1996] et surtout d'une série de rencontres de personnes ayant déjà travaillé sur ces mêmes secteurs ou d'autres similaires de la façade atlantique (ADBVB, CEMAGREF/IRSTEA, CEP/SAH Sud Loire, BRGM, DREAL, FMA, IFREMER, LCPC, MMS, SMGEMB). Il fut ensuite présenté et validé lors d'une réunion avec une partie des personnes consultées, après les premières sorties sur le terrain et les ajustements effectués [Gille, 2009].

L'évolution bio-géochimique des nutriments et des matières en suspension est différente de celle des bassins versants à cause de la dynamique des flux d'eau et de la ripisylve. Des phénomènes d'adsorption et de désorption sont observés à différentes échelles tant spatiales que temporelles avec la végétation et les sédiments. Compte-tenu de la complexité de ces échanges et de leur très forte variabilité, il est conseillé de faire deux points de prélèvements à l'entrée du Marais Breton (A : Chapelle de Prigny, B : Machecoul) et un seul à l'exutoire de la partie douce du Falleron (C : Pont du Fresne), en régime stabilisé sur une année, avec deux sorties par mois (Figure C-18). Ces trois stations ont été sélectionnées pour leur facilité d'accès en voiture, et leur situation à la périphérie du marais doux et de la zone pilote choisie pour la mise en œuvre de la modélisation (cf D.2.1 p.189).

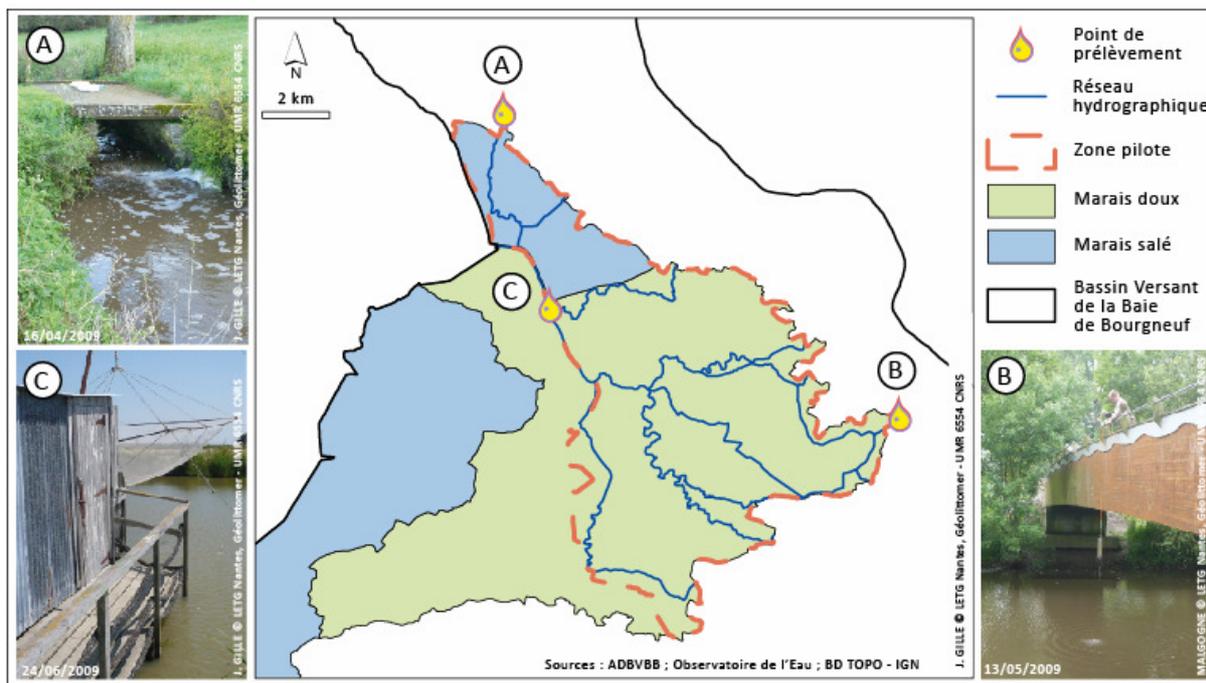


Figure C-18 : Localisation des sites de prélèvements

Un échantillon ponctuel est prélevé en un lieu, à une profondeur et à un moment donnés. L'objectif est qu'il soit homogène et aussi représentatif que possible de la section du cours d'eau. Le prélèvement est donc effectué :

- en aval d'un seuil pour le point A,
- dans la partie médiane du cours d'eau à partir d'une passerelle pour le point B ou d'un carret pour le point C.

Les paramètres physico-chimiques mesurés sont le pH, la conductivité, la température de l'air et de l'eau, la salinité, la turbidité et les MES. Ils sont considérés prioritaires dans la mesure où ils influent sur le développement de la vie, à la fois en structurant l'écosystème dans le temps (changements mesurables journallement et au rythme des saisons), et dans l'espace (biotopes bien différenciés) [Anras et Guesdon, 2007].

Viennent s'y ajouter les nutriments (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , SiO_3), les bactéries indicatrices d'une contamination fécale (*E. Coli*, coliformes totaux, streptocoques) et plus d'une centaine de molécules de produits phytosanitaires.

Les métaux lourds n'ont pas été retenus car les concentrations retrouvées dans la baie de Bourgneuf sont faibles et ne représentent pas un danger sanitaire pour la conchyliculture [Pellouin-Grouhel et Ratiskol, 2011].

Des observations qualitatives (présence ou non d'une averse, d'un écoulement) et des photographies ont également été prises afin de caractériser chaque prélèvement et les éventuelles évolutions de l'environnement sur toute la campagne.

La conductivité, le pH, la saturation en oxygène dissous, la température de l'eau et de l'air peuvent changer au cours du stockage. Ces paramètres, ainsi que la salinité,

sont donc mesurés directement *in situ* en début et fin de chronique (Photographie C-1).

Plusieurs échantillons sont prélevés en une seule fois :

- un flacon de 1 L pour les bactéries ;
- un flacon de 1 L pour les MES et la turbidité ;
- deux flacons de 1 L et un flacon de 50 mL pour les pesticides ;
- un flacon de 80 mL, servant de blanc pour la mesure de l'ammonium en laboratoire.

Pour les nutriments, cinq prélèvements sont réalisés (un tous les quarts d'heure) :

- un flacon de 80 mL pour l'ammonium,
- un flacon de 80 mL pour l'ammonium avec dilution,
- un flacon de 80 mL pour les autres nutriments.

Deux réactifs sont ajoutés immédiatement aux échantillons destinés à l'analyse de l'ammonium afin de stabiliser la réaction. Ils sont ensuite conservés à température ambiante, à l'abri de la lumière. Les autres flacons sont conservés dans une glacière avec des pains de glace (Photographie C-2).



Photographie C-1 : Sondes utilisées pour la mesure des paramètres physico-chimiques



Photographie C-2 : Réactifs et échantillons conservés dans la glacière

L'analyse des échantillons s'échelonne dans le temps et les laboratoires. L'ensemble des méthodes analytiques utilisées et des normes afférentes est détaillé par Aminot et Kérouel (2004) et Rodier *et al.* (1996).

Le soir même, deux opérations sont réalisées au LER-MPL : la mesure de la turbidité avec un turbidimètre (Photographie C-3) ; la filtration des MES, puis la congélation des filtres (Photographie C-4). La quantification des MES s'est effectuée à la fin de la campagne de mesure en une seule fois en brûlant puis pesant les filtres.



Photographie C-3 : Turbidimètre



Photographie C-4 : Echantillons prélevés et filtres après filtration

Le lendemain de la sortie, deux autres analyses sont faites au laboratoire MMS. Un spectromètre est utilisé pour quantifier l'ammonium par l'absorbance dans les échantillons gardés à l'obscurité (Photographie C-5). L'ajout des deux réactifs permet le développement d'un précipité bleu, dont l'intensité est fonction de l'ammonium présent dans l'échantillon (Photographie C-6).



Photographie C-5 : Spectromètre



Photographie C-6 : Echantillons après réaction

Pour les bactéries, les échantillons sont d'abord filtrés, puis les filtres sont déposés sur de la gélose (Photographie C-7). Enfin, il suffit de compter les colonies caractéristiques (Photographie C-8).



Photographie C-7 : Système de filtration



Photographie C-8 : Colonies de bactéries sur gélose

Après avoir déposé les échantillons le soir même à l'IDAC, la recherche des pesticides est réalisée sous une quinzaine de jours :

- par chromatographie LC/MS/MS pour l'analyse de base « multi-résidus » (Photographie C-9) ;
- par HPLC/fluorimétrie pour l'analyse du glyphosate et de l'AMPA (Photographie C-10).

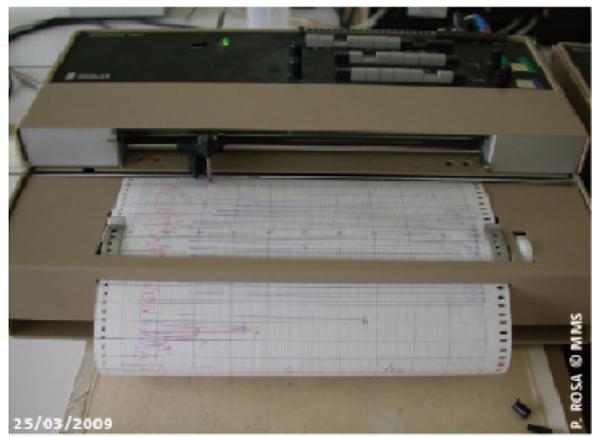
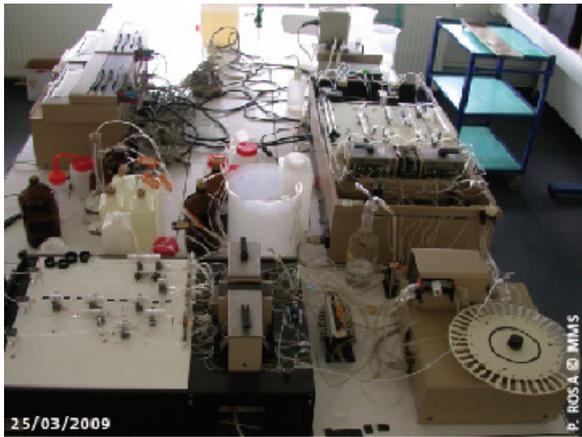


Photographie C-9 : Chromatographie LC/MS/MS



Photographie C-10 : HPLC/fluorimétrie

L'analyse des nutriments (excepté l'ammonium) est effectuée tous les trois mois au laboratoire MMS. Après avoir pris soin de les décongeler, les échantillons sont passés sur un autoanalyseur de type Skalar en flux continu (Photographies C-11).



Photographies C-11 : Autoanalyseur de type Skalar

L'ensemble des résultats de la campagne de mesures sur le terrain est regroupé au sein de la BD GERRICO. Ils seront présentés ultérieurement (cf D.1, p.175).

C.2.3 Bilan hydrologique

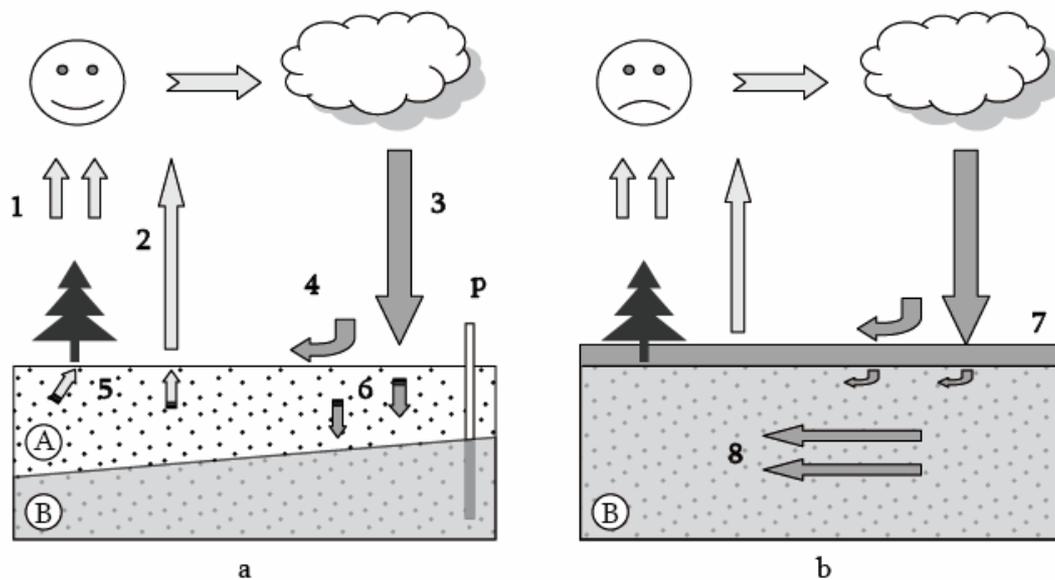
C.2.3.1	Etat des connaissances.....	166
C.2.3.2	Calcul de l'évapotranspiration (ETP)	167
C.2.3.3	Calcul de la lame écoulée.....	168
C.2.3.4	Résultats.....	168

Le bilan hydrologique est un outil essentiel pour permettre de suivre l'état hydrique d'un bassin. Le calcul est basé sur le suivi du déroulement de l'année hydrologique, rythmée par les valeurs relatives des pluies et de la demande climatique. On peut donc scinder l'année en deux périodes (Figure C-19) : une première où la pluie est supérieure à la demande d'évaporation (reconstitution des réserves) et une seconde durant laquelle l'évaporation l'emporte sur les apports pluviométriques (épuisement des réserves). La première saison est appelée hiver hydrologique et la seconde, l'été hydrologique [Cosandey *et al.*, 2003].

Le bilan hydrologique d'une zone humide se calcule comme pour un bassin versant en comptabilisant les entrées et les sorties :

$$dS = Q_s + P - ET (\pm Q_a \pm Q_m) \quad (\text{Eq C-1})$$

Avec dS : variation du stock d'eau dans le marais, Q_s : débit de surface provenant du bassin versant, P : précipitations sur le marais, ET : Evapo-transpiration des plans d'eau et des parcelles (Q_a : échanges verticaux entre les canaux et l'aquifère, Q_m : échanges horizontaux entre les canaux et le marais).



(a) hors période d'inondation ; (b) en période d'inondation phréatique ; (P) piézomètre permettant de mesurer le niveau de l'eau dans la nappe.

(A) zone non saturée ; (B) zone saturée.

(1) transpiration de la végétation ; (2) évaporation ; (3) précipitation ; (4) ruissellement ;

(5) reprise de l'eau par l'évapotranspiration ; (6) infiltration ; (7) submersion ;

(8) écoulement souterrain.

Figure C-19 : Bilan hydrologique d'une zone humide

(d'après [Bendjoudi et de Marsily, 2000])

C.2.3.1 Etat des connaissances

Si certains éléments du bilan hydrologique sont connus ou peuvent être calculés facilement, d'autres sont plus difficilement quantifiables.

Le débit Q_s provient des données hydrologiques de la DREAL PdL, les précipitations P sont récupérées auprès de Météo France et l'évapotranspiration ET est calculée par la formule empirique de Thornthwaite à partir des données de Météo France.

Les recherches bibliographiques n'ont pas permis de quantifier spécifiquement les échanges avec l'aquifère pour le Marais Breton. La connaissance de ces échanges nécessite de combiner des outils hydrologiques et géochimiques sur le terrain. D'après les études menées sur les marais de Moëze et de Rochefort en Charente-Maritime [Anras, 1997 ; Fashi, 2000 ; Giraud, 1992 ; Giraud *et al.*, 1991 ; Ladouche et Weng, 2005 ; Weng *et al.*, 2003], la recharge de la nappe par les fossés en zone de prairie naturelle est marginale au regard de la surface en eau libre par rapport à l'échelle du marais. Elle est évaluée de l'ordre 1 mm/j pour les fossés et 5 mm/j pour les canaux. Cette généralisation doit cependant être modulée en fonction de l'usage du sol. Lorsque la parcelle est mise en culture, les fossés peuvent alors avoir une influence bien plus importante, du fait de l'abaissement du niveau piézométrique.

C.2.3.2 Calcul de l'évapotranspiration (ETP)

La formule de Thornthwaite (1944) permet d'estimer les valeurs moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

$$ETP(m) = 16 * \left[\frac{10 * \overline{T(m)}}{I} \right]^a * F(m, \varphi) \quad (\text{Eq C-2})$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \quad (\text{Eq C-3})$$

$$i(m) = \left[\frac{\overline{T(m)}}{5} \right]^{1.514} \quad (\text{Eq C-4})$$

$$a = 0.016 * I + 0.5 \quad (\text{Eq C-5})$$

Avec :

- ETP (m) : ETP moyenne du mois m (1 < m < 12) en mm
- F(m,φ) : facteur correctif fonction du mois m et de la latitude φ (ici φ=47° N)
- $\overline{T(m)}$: moyenne interannuelle des températures du mois en °C
- I : indice thermique annuel

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0,77	0,8	1,02	1,14	1,3	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73

Tableau C-6 : Coefficient de correction F(m) de la formule de Thornthwaite pour une latitude de 47° N

D'après les études sur des secteurs similaires [Giraud *et al.*, 1991], l'évapotranspiration réelle (ETR) pour de la prairie naturelle représente un peu plus de la moitié des volumes évapotranspirés. Elle est évaluée à environ 80 % de l'ETP⁴¹ [Communication orale de Benjoudi, 2009]. L'autre partie des volumes évapotranspirés vient de la végétation aquatique, dont le rapport ETR/ETP est généralement supérieur à 1. Ce rapport peut aller jusqu'à 3 selon le climat et l'espèce végétale [Giraud *et al.*, 1991].

A ces pertes naturelles, il faut ajouter les prélèvements, plus ou moins légaux, par les usagers (irrigants, chasseurs) [Ferre, 2000].

⁴¹ 75 % pour [Giraud *et al.*, 1991 ; Weng *et al.*, 2003], 85 % pour [Fashi, 2000]

C.2.3.3 Calcul de la lame écoulée

Les écoulements correspondent aux débits moyens mensuels, exprimés en m³/s. Afin de pouvoir les insérer dans l'équation du bilan hydrologique, il faut les convertir en millimètres, comme les autres termes [Cosandey *et al.*, 2003 ; Réméniéras, 1986].

$$Q_s = \frac{Q * 86400 * n}{S} \quad (\text{Eq C-6})$$

Avec Q_s : lame d'eau écoulée mensuelle en mm/mois, Q : débit moyen mensuel en m³/s, n : nombre de jours dans le mois multiplié par le nombre de secondes dans une journée, S : surface du bassin versant en m².

C.2.3.4 Résultats

Le bilan hydrologique (Figure C-20) a été calculé sur quatre années, au niveau de l'entrée de la zone pilote, à partir des données météorologiques de la station de Saint-Même-le-Tenu (Météo France) et des débits de la station de Machecoul (DREAL).

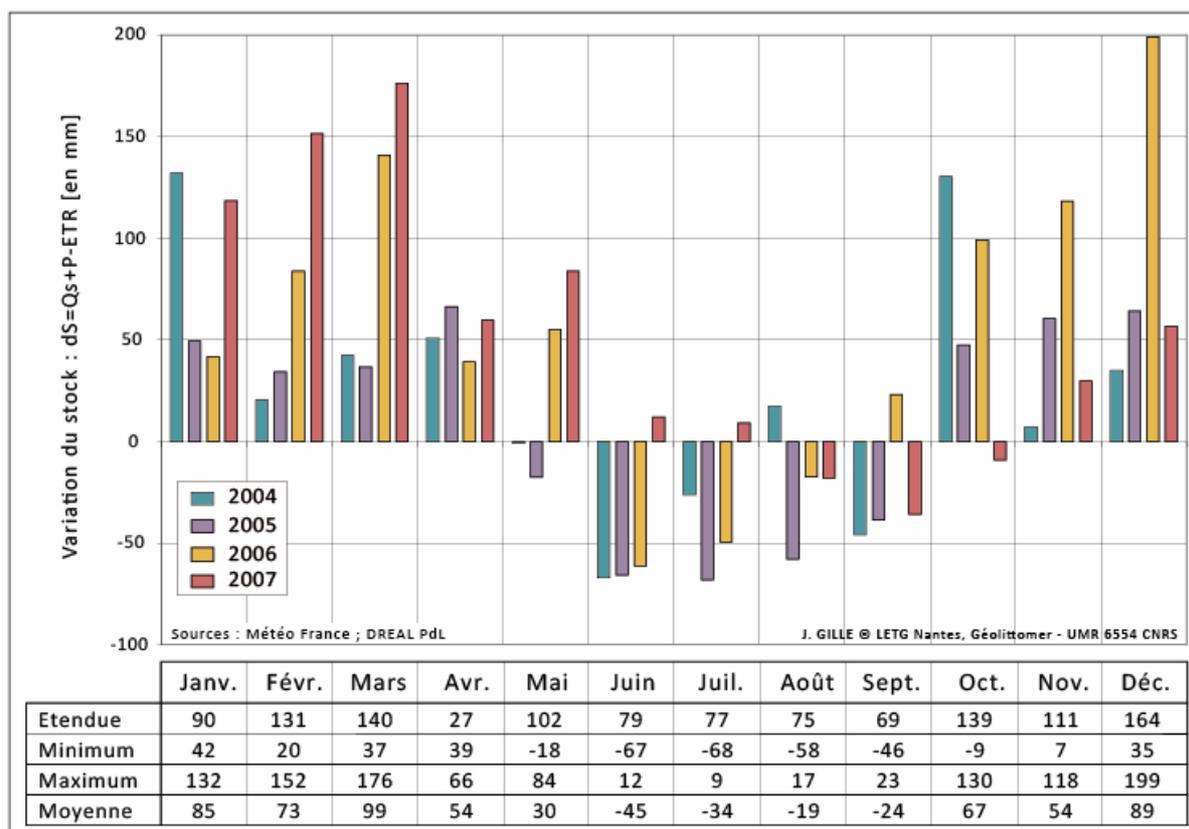


Figure C-20 : Bilan hydrologique à l'entrée de la zone pilote de 2004 à 2007

Globalement, il est excédentaire d'octobre à mai, avec un maximum de 199 mm en décembre 2006. De juin à septembre, il est déficitaire. La perte maximale est de 68 mm en juillet 2005. La période hivernale est marquée par une forte variabilité du stock d'eau dans le sol, avec des écarts interannuels allant de 90 à 164 mm par mois. Les fluctuations sont quasiment constantes de juin (79 mm) à septembre (69 mm).

Sur la période étudiée, la variation la plus faible est observée pour le mois d'avril avec 27 mm.

Ce bilan hydrologique est significatif d'un régime pluvio-évaporal [Giret, 2007]. En hiver, les précipitations alimentent les chenaux et permettent la recharge des stocks. En été, les précipitations ne sont pas suffisantes. L'évaporation prédomine et tend à puiser dans les stocks, d'où la nécessité d'alimenter en eau douce le Marais Breton, à partir du mois d'avril jusqu'aux premières précipitations automnales, afin d'en limiter l'importance et de maintenir les niveaux d'eau dans les canaux.

D. Analyse et modélisation

D.1	Résultats de la campagne sur le terrain de 2009	175
D.2	Modélisation des flux dans le marais.....	189
D.3	Chaînage des modèles	211

Un premier bilan de la qualité de l'eau a été réalisé à partir des données de l'Observatoire de l'Eau. La campagne de terrain de 2009 a été mise en place pour tenter d'en savoir plus, notamment grâce à un échantillonnage temporel plus fin. Elle a porté sur les nutriments, les bactéries et les pesticides. Elle a donné l'occasion de faire un bilan annuel plus détaillé sur le Falleron pour les bactéries, les pesticides et ainsi fixer quelques ordres de grandeur sur leur abattement entre l'entrée et la sortie du marais doux. Le bilan pour les nutriments n'a pas pu être réalisé, compte-tenu des incertitudes de mesures.

La modélisation a été mise en œuvre sur la partie nord du Marais Breton, alimentée et drainée par le Falleron. Plusieurs simulations sont présentées afin de déterminer l'influence de certains paramètres sur la dynamique des flux d'eau et d'un pesticide.

Ces essais de modélisation sont ensuite mis en perspective avec leur intégration dans une chaîne de modèles, pour suivre l'évolution des flux d'eau et de nitrate en zone côtière. Enfin, le point est fait sur la calibration et la validation des modèles.

D.1 Résultats de la campagne sur le terrain de 2009

D.1.1	Nutriments	175
D.1.2	Bactéries	177
D.1.3	Pesticides.....	182

D.1.1 Nutriments

Les résultats ont montré que les concentrations mesurées pour le nitrate étaient quasi nulles. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs minimales mesurées par l'Observatoire de l'Eau entre 2004 et 2007. Les concentrations en nitrite et ammonium sont du même ordre que celles mesurées par l'Observatoire de l'Eau sur la même période. Les concentrations en phosphate sont supérieures à celles de l'Observatoire de l'Eau la moitié de l'année (Figure D-1). Les silicates ne sont pas suivis par l'Observatoire de l'Eau, mais les valeurs mesurées en 2009 sont du même ordre de grandeur que celles observées au niveau du Polder du Dain [Rocq, 2007].

Les concentrations en nitrate sont anormalement faibles et les concentrations en phosphate semblent sensiblement majorées. Afin de vérifier ces constatations et déceler l'éventuelle source d'erreur, il a été décidé de faire de nouvelles analyses⁴². L'objectif était de savoir si ce hiatus provenait des conditions de prélèvement et de conditionnement des échantillons, ou d'une erreur analytique en laboratoire.

⁴² Ces nouveaux prélèvements ont été réalisés le 28 avril 2010 en présence de la personne chargée des prélèvements pour l'Observatoire de l'eau. Cette décision a été prise lors de la présentation des résultats au comité de suivi de thèse [Gille, 2010a].

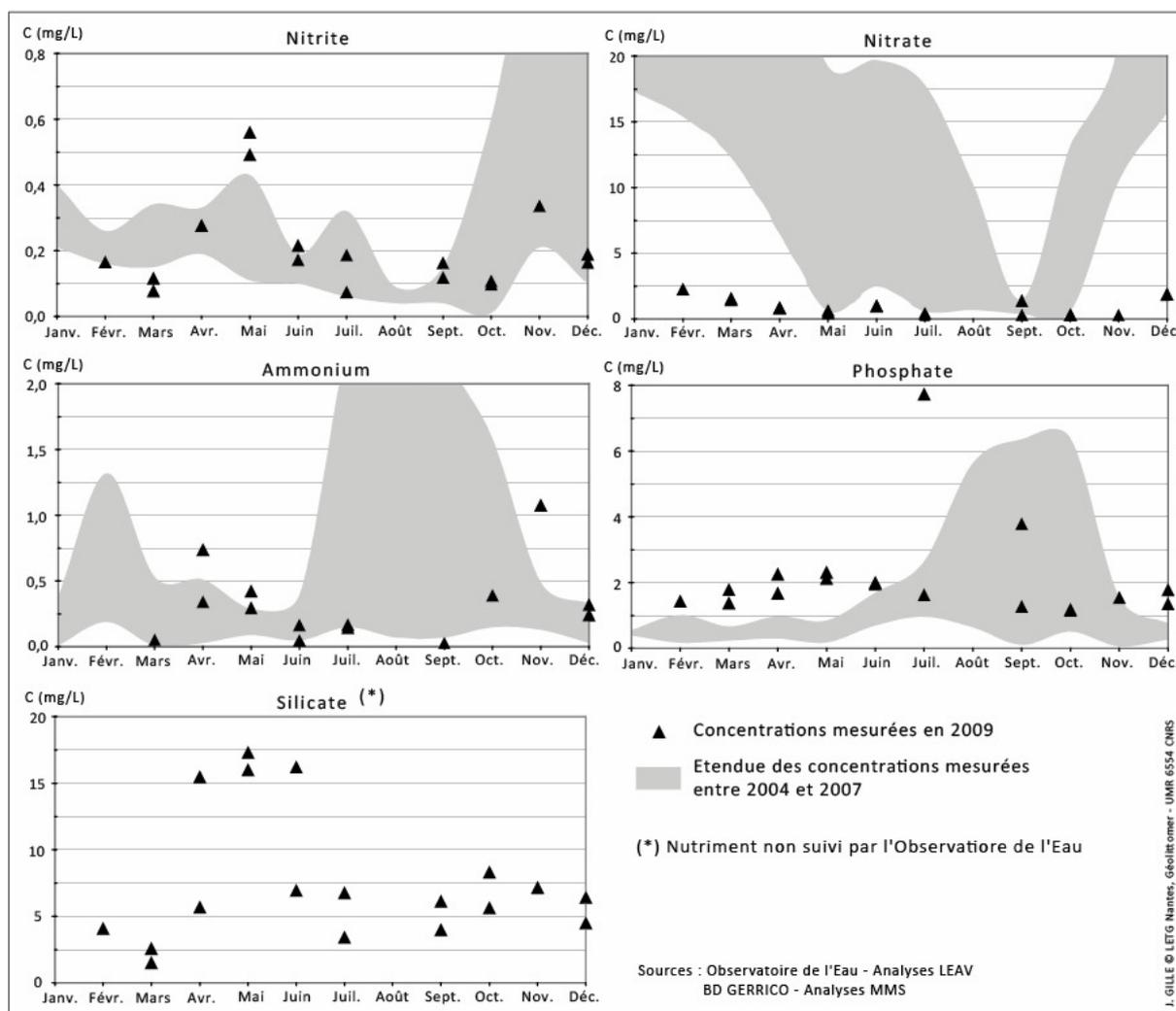


Figure D-1 : Evolution des nutriments à l'entrée du marais au niveau de Machecoul

Une analyse interlaboratoire a été menée afin de comparer les résultats. Un même échantillon pour chaque site a été prélevé et analysé par quatre laboratoires différents (Tableau D-1). Le choix des trois autres laboratoires est motivé par des critères distincts :

- LEAV à la Roche-sur-Yon (85) : laboratoire qui réalise les analyses pour le compte de l'Observatoire de l'Eau,
- LER-MPL à l'Ifremer-Nantes (44) : laboratoire partenaire du programme de recherche GERRICO,
- UMR 7619 Sisyphe de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris (75) : laboratoire rattaché à l'UMR dont fait partie un membre du comité de suivi de thèse.

Lieu	Laboratoire	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	SiO ₃
Machecoul	MMS	0,161	0,100	1,630	1,020	2,440
	LEAV	0,126	0,290	32,500	0,360	2,130
	LER-MPL	---	---	24,366	0,380	3,040
	UMR 7619 Sisyphe	0	0	18,063	---	---
Ecluse du Fresne	MMS	0,020	0,010	0,700	0,210	1,220
	LEAV	0,073	0,080	<2,000	0,090	0,990
	LER-MPL	---	---	0,595	0,086	1,360
	UMR 7619 Sisyphe	0	0	0	---	---
Prigny	MMS	0,607	0,010	1,010	3,170	6,340
	LEAV	0,476	0,130	<2,000	0,300	4,870
	LER-MPL	---	---	1,147	0,380	7,448
	UMR 7619 Sisyphe	0	0	0	---	---

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

(--- : paramètre non recherché par le laboratoire ; <2,000 : paramètre détecté mais inférieur à la LQ)

Tableau D-1 : Résultats des analyses des 4 laboratoires pour les nutriments

Ces nouvelles analyses révèlent quelques disparités. La plus importante est pour le nitrate à Machecoul. La concentration fournie par le MMS est bien inférieure à celles des trois autres laboratoires. Pour le phosphate, le laboratoire MMS trouve par contre des concentrations légèrement supérieures à celles des trois autres laboratoires pour les trois échantillons. Les nutriments ont donc été écartés pour la modélisation, compte tenu de l'incertitude des analyses réalisées par le laboratoire MMS.

La forte variabilité observée pour les concentrations de nitrate à Machecoul interpelle par ailleurs sur les méthodes d'analyse utilisée par les laboratoires et les conditions de conservation des échantillons⁴³.

D.1.2 Bactéries

Les objectifs fixés par la CLE pour les eaux douces correspondent à ceux de la grille du SEQ Eau, usage « Loisirs et Sports Aquatiques » [Agences de l'Eau, 1999]. Ils visent, pour 95 % des résultats, le non dépassement de 2 000 *E. Coli*/100 mL et 10 000 coliformes totaux/100 mL. Aucun objectif de qualité n'est en revanche fixé dans le SAGE pour les streptocoques fécaux [ADBVB, 2006b].

Le SEQ-Eau n'est pas applicable aux eaux saumâtres ou salées. Il est conçu pour les eaux douces, c'est-à-dire de salinité inférieure à 0,5 g/L. C'est la raison pour laquelle la qualité bactériologique des eaux saumâtres à marée haute ou basse est évaluée à partir d'une grille définie par la CLE en s'inspirant du classement de salubrité des zones de production conchylicole [Ravoux *et al.*, 1994] et de la Directive 91/492/CEE fixant les règles sanitaires régissant la production et la mise sur le marché de mollusques bivalves vivants [CEE, 1991].

Ainsi, en prenant en compte les règles ci-dessus et le fait que les coquillages, se trouvant en aval, concentrent par filtration la pollution, des seuils de qualité ont été

⁴³ Les échantillons ont été analysés au maximum 15 jours après la sortie.

retenus pour l'interprétation des résultats bactériologiques des eaux saumâtres. Seul le paramètre *E. Coli* est retenu dans le SAGE. Pour les eaux saumâtres prélevées à marée haute et dont la teneur en sel est supérieure à 20 ‰, les objectifs annuels sont [ADBVB, 2006b] :

- au moins 60 % des prélèvements ayant une teneur inférieure à 20 *E. Coli* /100 mL,
- aucun prélèvement présentant plus de 230 *E. Coli*/100 mL.

Ces objectifs sont plus contraignants que ceux des Directives européennes 79/923/CEE et 2006/113/CE qui visent le non dépassement des 300 coliformes fécaux /100 mL [CE, 2006 ; CEE, 1979b].

Concernant les gisements naturels de coquillages, la CLE a retenu l'objectif global annuel suivant [ADBVB, 2006b] :

- absence de prélèvements supérieurs à 1000 *E. Coli*/100 g CLI,
- au minimum 80 % des prélèvements inférieurs à 230 *E. Coli*/100 g CLI.

Dans plus de la moitié des cas, les seuils fixés dans le SAGE sont dépassés pour les coliformes totaux à Machecoul et à Prigny (Figure D-2). En moyenne, la concentration à l'écluse du Fresne est trois fois inférieure qu'à Machecoul, même si ponctuellement elle peut être supérieure comme par exemple en février et en mars. La concentration minimale à l'écluse du Fresne (900/100 mL) est plus élevée que celle de Machecoul (560/100 mL). Durant la période estivale, l'évolution des concentrations à Prigny est semblable à celle de l'écluse du Fresne. Cette similitude peut s'expliquer par le fait qu'aucun écoulement n'est constaté en amont de ces deux sites. C'est à Prigny que l'étendue des concentrations est la plus importante, avec un minimum de 650/100 mL et un maximum de 110000/100 mL.

La fréquence de dépassements pour les *E. Coli* est la même que pour les coliformes totaux à Machecoul, et légèrement inférieure à Prigny (Figure D-3). Les concentrations moyennes sont au-dessus du seuil fixé dans le SAGE pour les deux sites. A l'écluse du Fresne, les concentrations sont une seule fois supérieure au seuil fixé dans le SAGE (le 13 mai). La concentration minimale y est quasiment égale à celle de Machecoul (écart de 4 u./100 mL). La concentration moyenne y est plus de deux fois inférieure qu'à celle de Machecoul. La plus grande étendue est obtenue à l'écluse du Fresne, à cause du pic élevé de concentration (16500 u./ 100 mL) obtenu lors du dépassement du seuil fixé dans le SAGE.

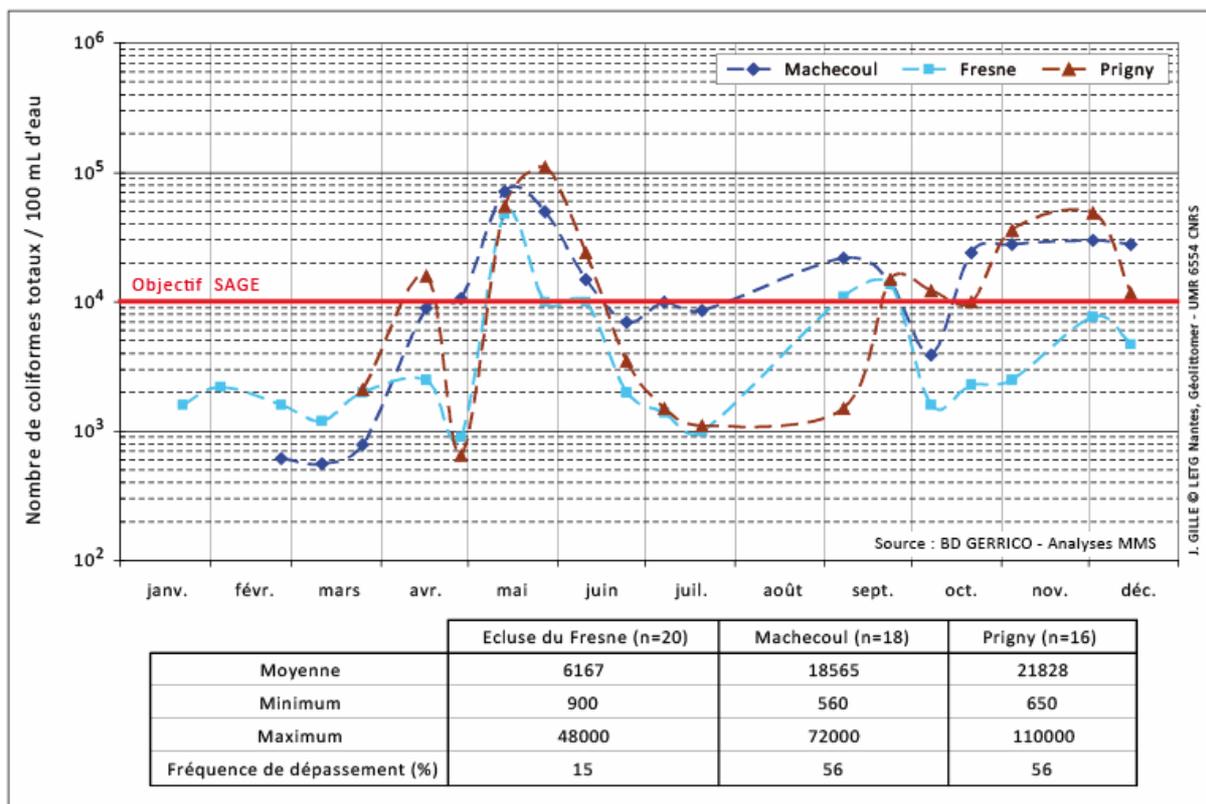


Figure D-2 : Concentration en coliformes totaux au niveau des trois sites échantillonnés en 2009

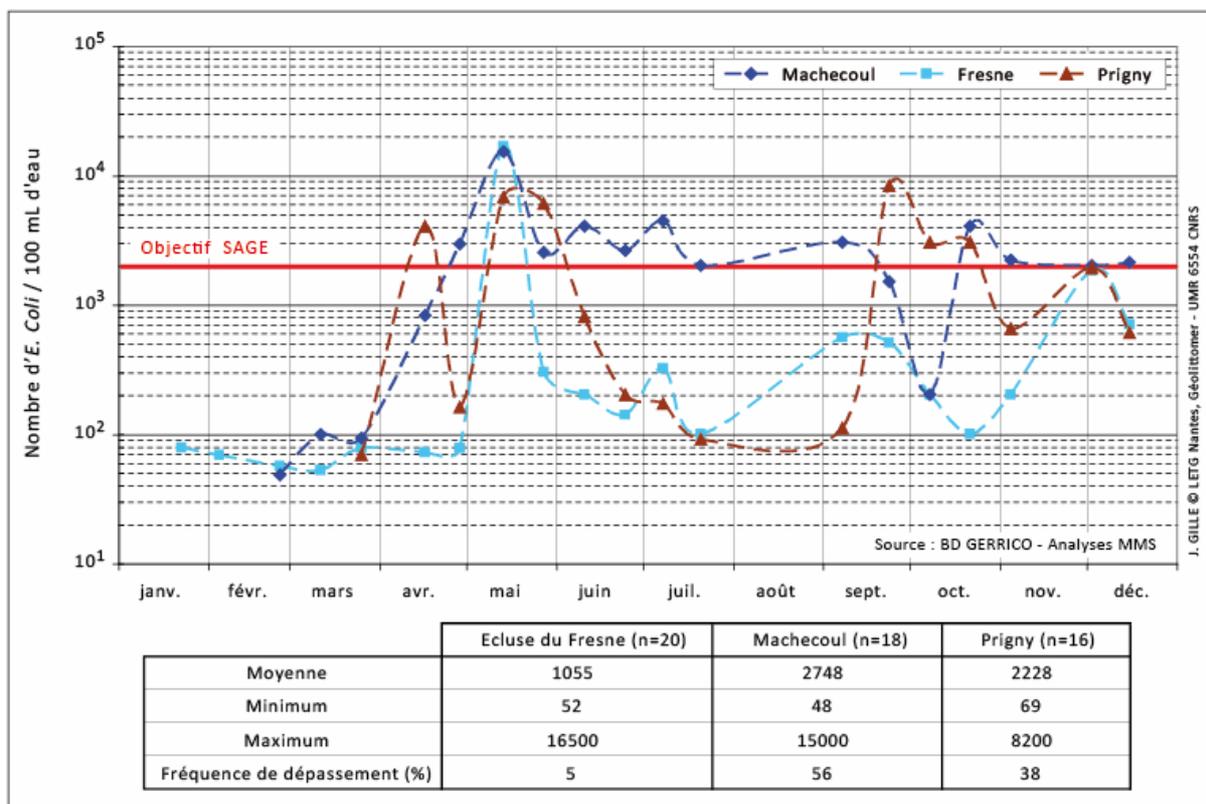


Figure D-3 : Concentration en E. Coli au niveau des trois sites échantillonnés en 2009

Les concentrations en streptocoques fécaux à l'écluse du Fresne sont, en moyenne, presque divisées par quatre par rapport à celles observées à Machecoul, avec respectivement une moyenne de 30 u./100 mL et de 113 u./100 mL (Figure D-4). Ponctuellement, elles peuvent cependant être plus élevées au niveau de l'écluse du Fresne qu'à Machecoul, comme par exemple pour le 25 février, le 15 mai, le 20 juillet ou le 23 septembre. Les plus fortes concentrations sont retrouvées au niveau de Prigny avec une moyenne de 166 u./100 mL et un pic à 800 u./100 mL. L'évolution des concentrations est similaire pour Machecoul et Prigny, excepté pour le mois d'octobre. Le pic en avril peut potentiellement s'expliquer par la mise en pâture des animaux après l'hiver. Celui de l'automne semble plus être dû à la consommation des éléments nutritifs.

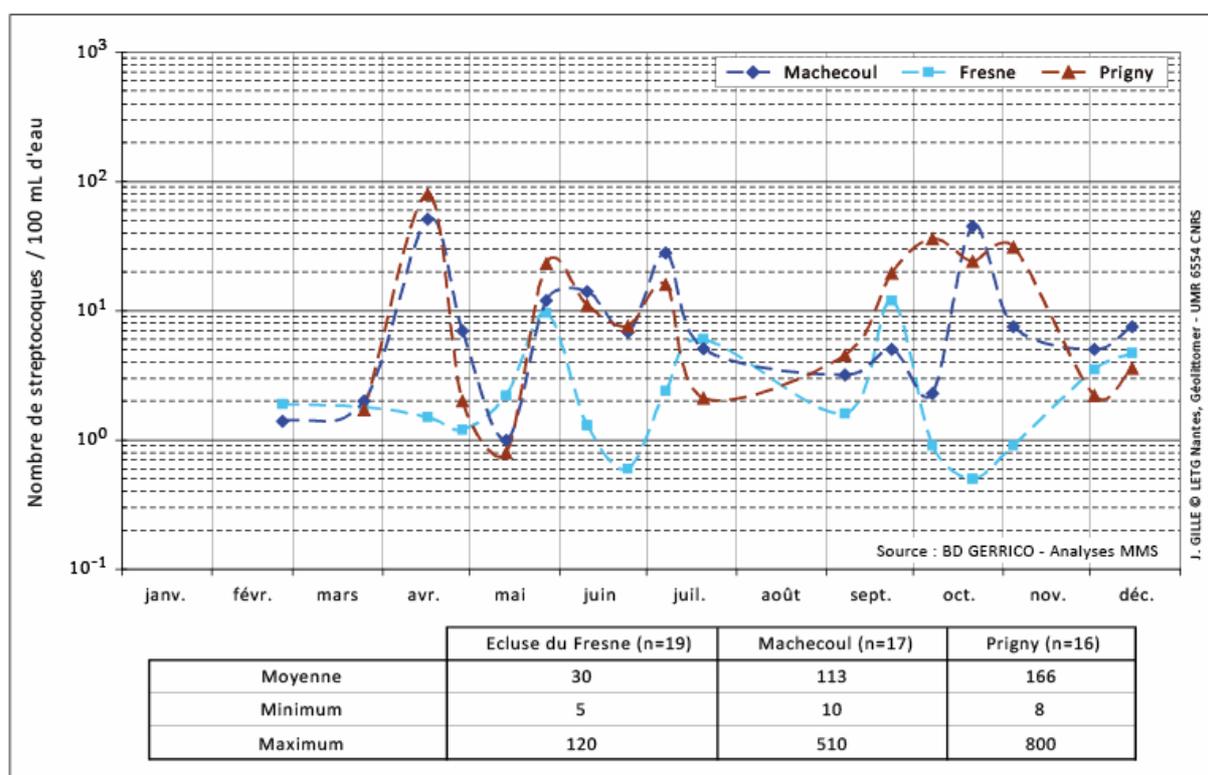


Figure D-4 : Concentration en streptocoques au niveau des trois sites échantillonnés en 2009

Les streptocoques fécaux sont principalement excrétés par les animaux. Le rapport R entre les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux permet donc de définir la nature de la contamination [Bourrier, 2008] :

- $R \leq 1$: contamination d'origine animale ;
- $R > 2$: contamination d'origine humaine.

Le rapport R est toujours supérieur à 2 pour les trois sites, tout au long de l'année 2009. La contamination bactérienne est par conséquent principalement d'origine humaine au regard de ces quelques mesures (Figure D-5). La tendance est globalement la même pour les trois sites étudiés, à l'exception du 7 septembre.

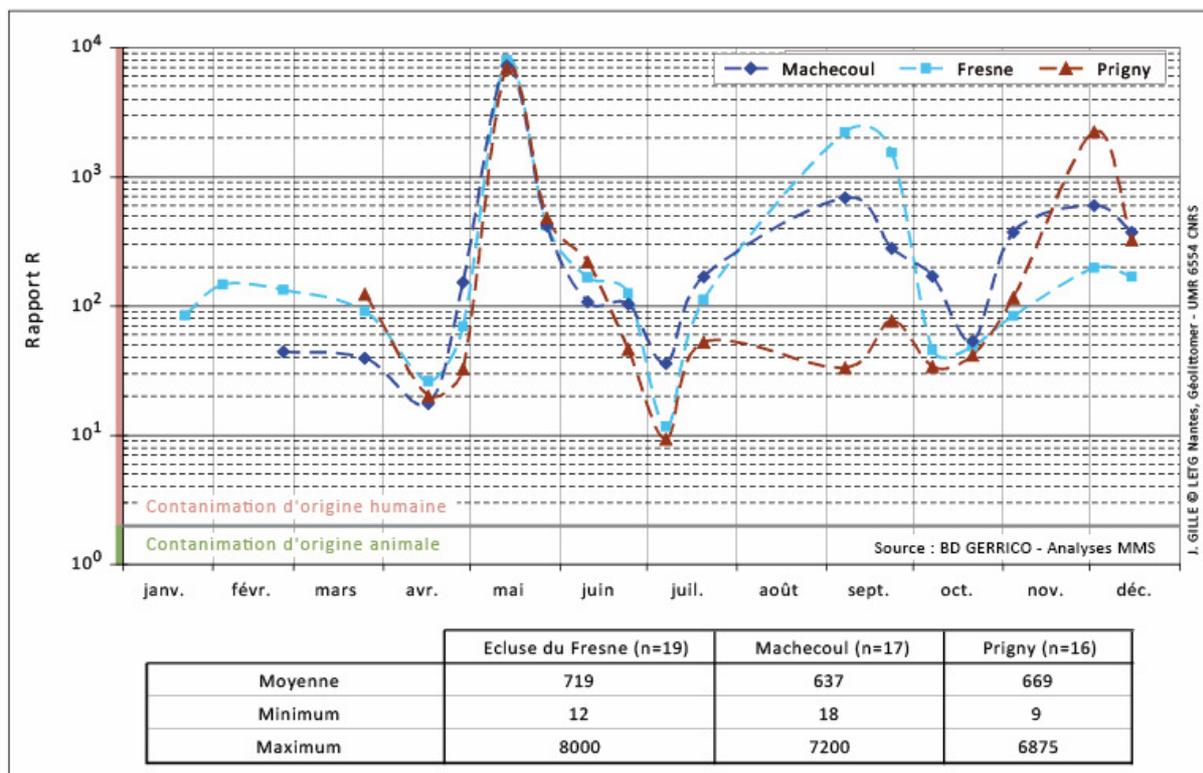


Figure D-5 : Evolution de la nature de la contamination fécale en 2009

Des pics sont observés sur l'ensemble des sites pour le 13 mai et le 2 décembre. Les creux sont quant à eux localisés le 16 avril, le 7 avril et au mois d'octobre. Seule une divergence est notée pour le 7 septembre : il y a un pic pour Machecoul et l'écluse du Fresne, et un creux pour Prigny.

Si en terme de moyenne et d'étendue, c'est au niveau de l'écluse du Fresne que le rapport R est le plus élevé, il n'y a pas d'ordre défini au cours de l'année. La valeur maximale du rapport R n'est pas obtenue pour le même site tout au long de l'année.

Les eaux dans le marais sont dans l'ensemble de bien meilleures qualités bactériologiques, même si ponctuellement les concentrations dans le marais peuvent être du même ordre de grandeur, voire supérieures que sur le bassin versant. Le tiers des concentrations moyennes mesurées à Machecoul est retrouvé à l'écluse du Fresne (rapport entrée / sortie égal à 3,01 pour les coliformes totaux, 2,60 pour les *E. Coli* et 3,76 pour les streptocoques).

Ce gain au niveau de la qualité bactériologique de l'eau peut s'expliquer par la pratique d'un élevage extensif (limitation des apports) et par un temps de résidence plus important dans le marais en fonction des manœuvres hydrauliques. Les travaux d'assainissement entrepris dans le cadre du contrat territorial de bassin versant [ADBVB, 2008] devraient permettre de réduire les contaminations épisodiques de l'eau par des matières fécales.

D.1.3 Pesticides

Le nombre de pesticides recherchés par l'IDAC a évolué au cours du temps. Jusqu'au 21 octobre 2010, ce nombre a varié entre 114 et 117 molécules. Au-delà, 201 pesticides ont été recherchés pour les trois dernières sorties (Tableau D-2).

Dates	Sites		
	Prigny	Fresne	Machecoul
27/05/2009	114	115	114
10/06/2009	117	117	117
24/06/2009	117	117	117
07/07/2009	117	117	117
20/07/2009	116	116	116
07/09/2009	117	117	117
23/09/2009	116	116	116
07/10/2009	117	117	117
21/10/2009	117	117	117
04/11/2009	201	201	201
02/12/2009	201	201	201
15/12/2009	201	201	201

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

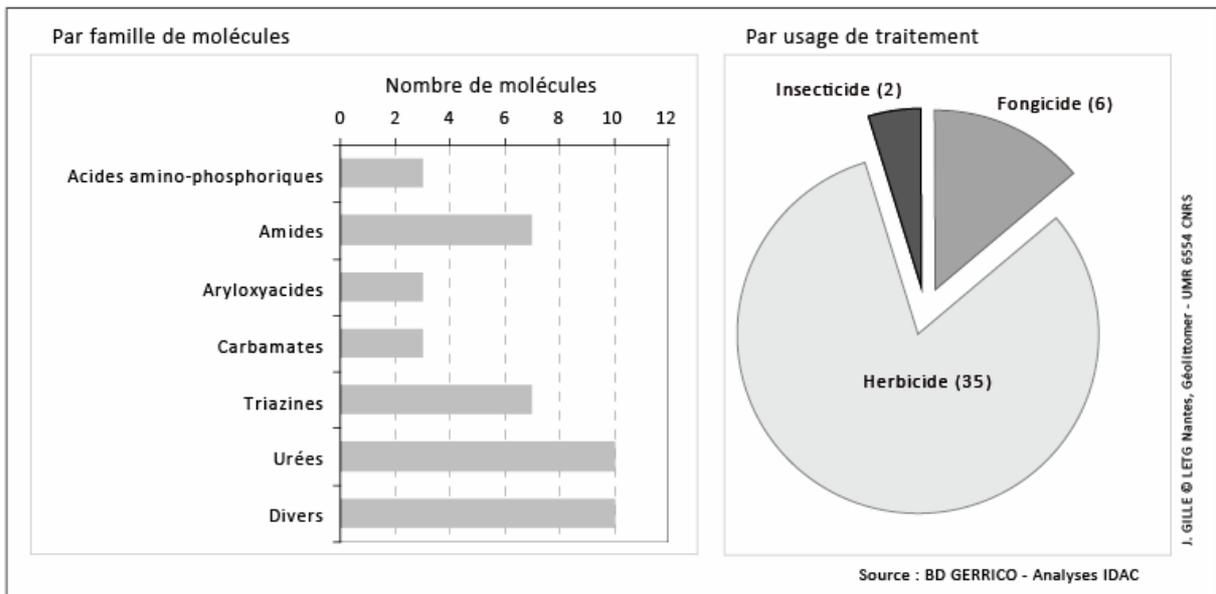
Source : BD GERRICO - Analyses IDAC

Tableau D-2 : Evolution du nombre de pesticides recherchés au cours du temps

Ces variations ont deux origines (communication orale de C. Fraisse, IDAC, 2011) :

- lorsque le laboratoire n'est pas sûr de ses analyses, il préfère ne donner aucun résultat ;
- le passage à une méthode d'analyse à balayage plus universel.

Ce sont les herbicides qui sont majoritairement retrouvés, utilisés pour les cultures céréalières et le maraîchage. Ils sont suivis dans une moindre mesure par les fongicides appliqués sur les mêmes cultures et en dernier les insecticides (Figures D-6). Tous ces pesticides appartiennent à six classes principales. Une septième nommée « Divers » est ajoutée, regroupant les classes à pesticide unique.



Figures D-6 : Nombre de pesticides détectés
(Classification réalisée à l'aide des BD [AERU, 2012 ; ANSES, 2012])

Sur cette campagne de mesures de 2009, les concentrations totales de pesticides à Prigny sont à deux reprises nettement supérieures au seuil fixé dans le SAGE (3,27 et 2,64 $\mu\text{g/L}$). Elles lui sont quasiment égales trois autres fois. Le reste du temps (58 %), l'eau s'avère de bonne qualité avec des concentrations totales variant entre 0,13 et 0,72 $\mu\text{g/L}$ (Figure D-7).

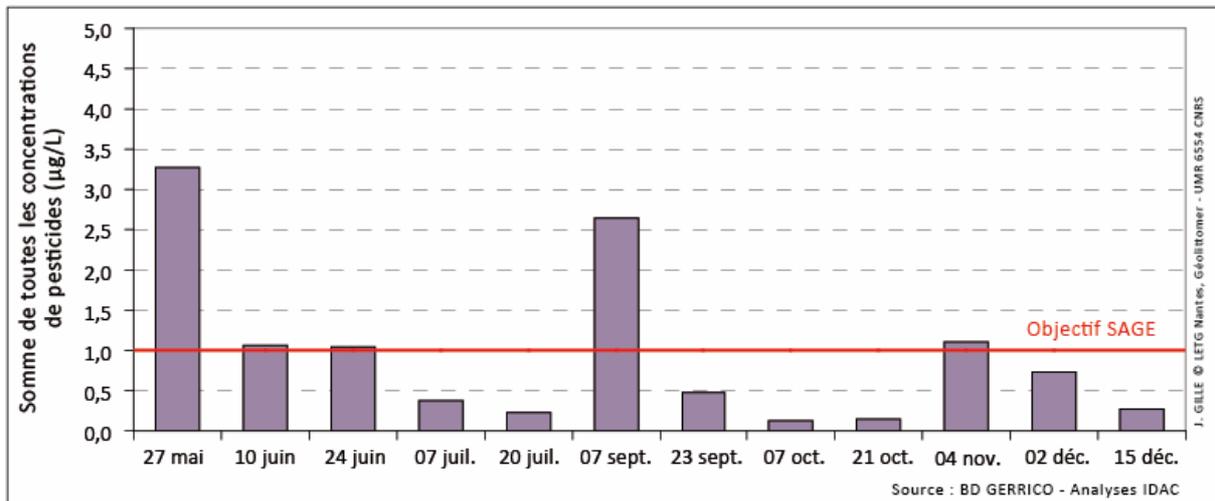


Figure D-7 : Concentrations totales de pesticides à Prigny en 2009

Dans la majeure partie des cas (83 %), la concentration totale des pesticides à Machecoul est supérieure au seuil fixé dans le SAGE (Figure D-8). Le dépassement est inférieur ou voisin à 0,5 $\mu\text{g/L}$ dans 33 % des cas et supérieur à 1 $\mu\text{g/L}$ dans 50 % des cas. Le dépassement maximal observé est de 4 $\mu\text{g/L}$ pour le 27 mai.

Au niveau de l'écluse du Fresne, les dépassements ont lieu dans 33 % des cas et sont inférieurs ou voisins de 0,5 $\mu\text{g/L}$.

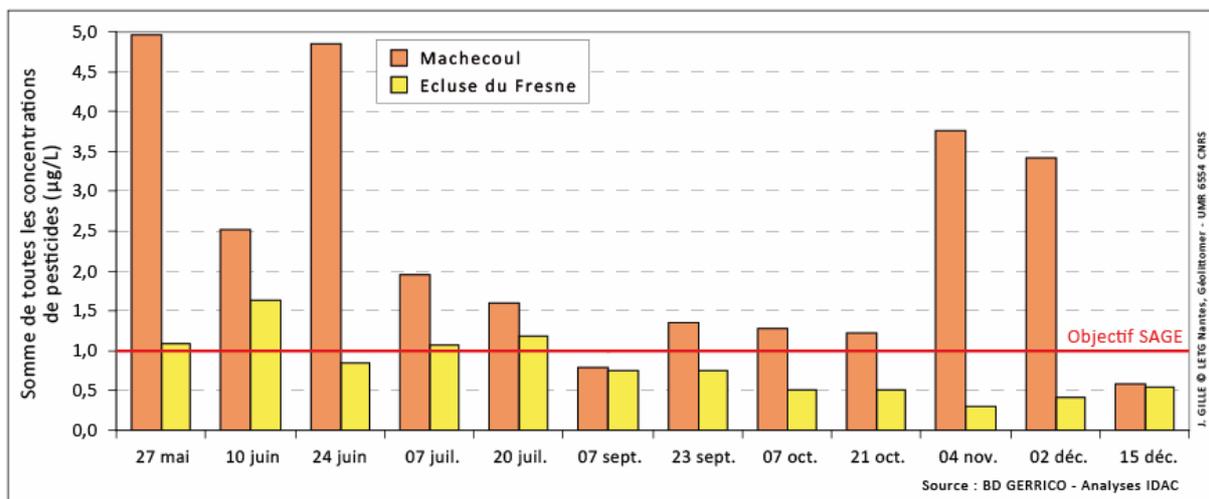


Figure D-8 : Concentrations totales de pesticides à Machecoul et à l'écluse du Fresne en 2009

La baisse en concentrations totales entre les deux points de prélèvements est en moyenne de 52 % avec un minimum de 4 % et un maximum de 92 %. Les masses d'eau successives véhiculées par les étiers ont des contenus différents. La fréquence temporelle des prélèvements ne permet pas de suivre l'évolution de la même masse d'eau entre Machecoul et l'écluse du Fresne. Ceci se confirme au regard du nombre de pesticides quantifiés, très fluctuant pour chaque sortie : entre 3 et 23 à Machecoul, et entre 1 et 16 à l'écluse du Fresne. Dans la majorité des cas (66 %), les pesticides décelés sont bien moindres en nombre à l'écluse du Fresne qu'à Machecoul (Figure D-9).

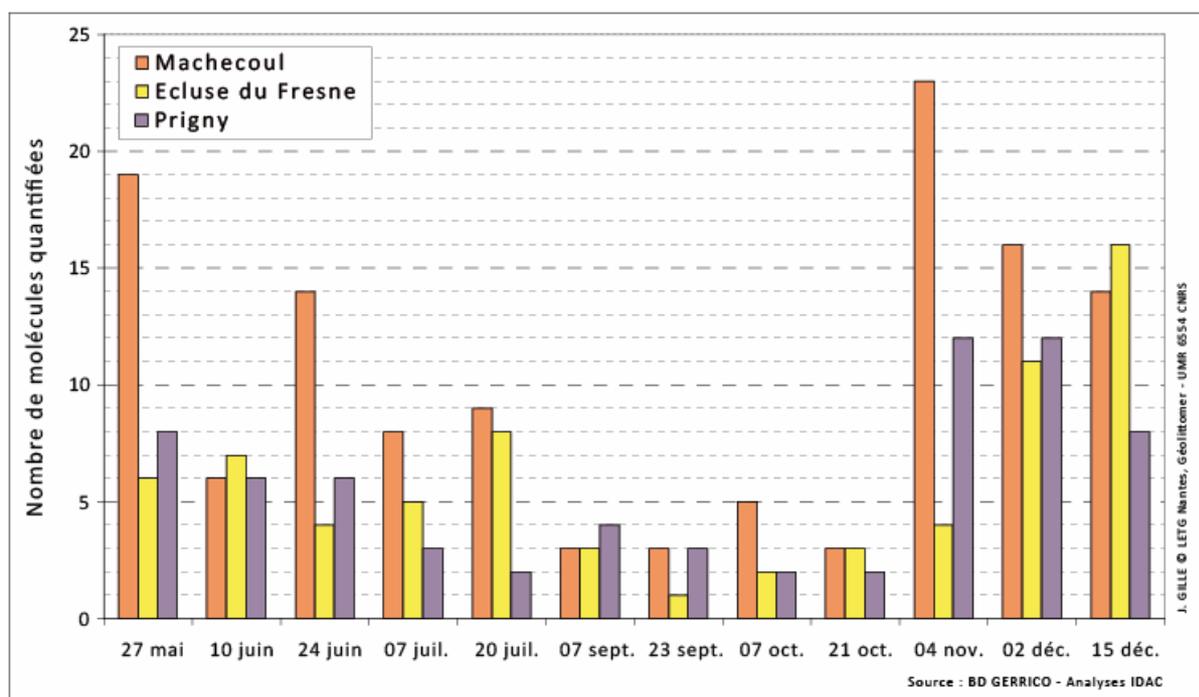


Figure D-9 : Nombre total de pesticides quantifiés par site en 2009

A deux reprises, ce nombre est identique pour les deux points de prélèvements (7 septembre et 21 octobre) et deux autres fois, il est supérieur d'une ou deux unités pour l'écluse du Fresne (10 juin et 15 décembre).

Le nombre de pesticides quantifiés à Prigny oscille quant à lui entre 2 à 12.

Au final, 43 pesticides ont été quantifiés au moins une fois sur un site, 14 d'entre eux l'ont été sur deux sites et 13 autres sur les trois sites (Tableau D-3).

Pesticides	LQ (µg/L)	PRIGNY (n=12)			MACHECOUL (n=12)			FRESNE (n=12)		
		TQ (%)	TQ pour C > 0,1µg/L (%)	C max (µg/L)	TQ (%)	TQ pour C > 0,1µg/L (%)	C max (µg/L)	TQ (%)	TQ pour C > 0,1µg/L (%)	C max (µg/L)
1-(3,4-DiChloroPhényl)-3-MéthylUrée	0,01				8	0	0,03			
2,4-D	0,05				25	8	0,12	8	0	0,09
Acétochlore	0,03				17	8	0,21			
Aclonifen	0,05				8	8	0,34			
Alachlore	0,05				8	8	0,45			
AMPA	0,1	25	25	2,40	100	100	1,68	100	100	0,75
Atrazine	0,05				25	8	0,15	8	0	0,07
Atrazine 2 hydroxy	0,05 / 0,01	100	75	0,24	83	25	0,11	92	33	0,13
Bentazone	0,03				25	0	0,08	33	0	0,06
Bromoxynil	0,03	8	0	0,09	8	0	0,05			
Carbendazime	0,03 / 0,01				17	0	0,03			
Carbofuran	0,03 / 0,01	25	8	0,31	17	8	0,60			
Chlortoluron	0,01	17	0	0,09	25	17	0,30	17	8	0,13
Cyanazine	0,05				8	0	0,08			
Desméthylisoproturon	0,01	17	0	0,06	8	0	0,03			
Dichlorprop	0,05	8	0	0,06						
Diflufenicanil	0,01	8	0	0,01	8	0	0,02			
Diméthénamid	0,05 / 0,01				17	8	0,10	17	0	0,08
Diuron	0,05 / 0,01	42	17	0,13	75	17	0,15	33	0	0,07
Fluroxypyr	0,05				8	0	0,07			
Glufosinate	0,1				17	17	2,10			
Glyphosate	0,1	33	33	0,52	92	92	1,62	33	33	0,77
Imidaclopride	0,01	25	0	0,07	25	0	0,03	17	0	0,03
Isoproturon	0,05 / 0,01	25	17	0,51	33	8	0,73	25	0	0,06
Isoxaben	0,05 / 0,01	25	0	0,03	17	8	0,11	17	0	0,01
Linuron	0,01				17	0	0,02	8	0	0,01
Mecoprop	0,05				8	8	0,19			
Métalaxyl	0,05 / 0,01				33	8	0,18			
Méthabenzthiazuron	0,05				8	8	0,10			
Métobromuron	0,05 / 0,01				25	17	0,39	17	0	0,03
Métolachlore	0,05 / 0,01	42	17	2,00	33	0	0,07	8	0	0,02
Napropamide	0,01				25	8	0,22	17	0	0,02
Nicobifen	0,02				8	0	0,04			
Nicosulfuron	0,03 / 0,01	8	0	0,05	42	0	0,06	17	0	0,02
Pencycuron	0,01							17	0	0,02
Prosulfocarbe	0,01	17	0	0,09	17	0	0,03	17	0	0,01
Pyriméthanil	0,05				17	8	0,53	25	0	0,08
Simazine hydroxy	0,01	25	0	0,01	8	0	0,01			
Sulcotrione	0,05	17	8	0,25	17	17	0,13	8	0	0,09
Tébuconazole	0,01				8	0	0,01			
Tébutame	0,05				8	8	0,13			
Terbuthylazine hydroxy	0,03 / 0,01	100	0	0,08	50	0	0,05	42	0	0,05
Terbutryne	0,01				25	0	0,06	8	0	0,01

Source : BD GERRICO - Analyses IDAC

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Tableau D-3 : Récapitulatif des pesticides quantifiés par site en 2009

(n : nombre d'échantillons ; LD : Limite de Détection ; TQ : Taux de Quantification ;
C max : Concentration maximale)

Pour 12 d'entre eux, la LQ fut abaissée suite à l'amélioration des performances des techniques d'analyse. Le taux de quantification peut donc s'avérer biaisé pour les pesticides dont les concentrations sont inférieures à la première LQ (la plus haute) mais supérieures à la seconde LQ (la plus basse). Par exemple, l'isoxaben, le métobromuron, le métolachlore ou le nicosulfuron ont un faible taux de quantification (entre 8 et 17 %) à l'écluse du Fresne. Ce taux bas peut s'expliquer par leur absence,

ou leur présence dans des concentrations inférieures à la LQ la plus élevée (la moins précise) pour les premiers échantillons.

Sur les 19 pesticides détectés à Prigny, 8 d'entre eux ont été quantifiés au moins une fois à des concentrations supérieures à 0,1 µg/L (Tableau D-3). L'atrazine 2 hydroxy et le terbuthylazine hydroxy sont quantifiés systématiquement. Dans 75 % des cas, les concentrations en atrazine 2 hydroxy sont supérieures à 0,1 µg/L, avec un maximum de 0,24 µg/L. Pour le terbuthylazine hydroxy, aucun échantillon ne présente des concentrations supérieures à 0,08 µg/L. Les autres pesticides sont moins présents mais peuvent avoir ponctuellement des concentrations élevées. Les concentrations maximales mesurées sont inférieures à 0,52 µg/L, à l'exception de l'AMPA et du métolachlore, quantifiés respectivement à 2,4 et 2 µg/L.

A Machecoul, 43 pesticides sont quantifiés en tout : 13 d'entre eux qu'une seule fois (8 %) et 10 autres à deux reprises (17 %) (Tableau D-3). Les pesticides les plus présents sont le diuron (75 %), l'atrazine 2 hydroxy (83 %), le glyphosate / sulfosate (92 %) et l'AMPA (100 %). 23 ont des concentrations supérieures à 0,1 µg/L et 15 d'entre eux sont quantifiés qu'une seule fois (8 %) entre 0,1 et 0,73 µg/L. Le glufosinate, quantifié qu'à deux reprises (17 %), est celui qui présente la plus forte concentration avec 2,1 µg/L, suivi par le glyphosate / sulfosate avec 1,62 µg/L et l'AMPA avec 1,68 µg/L.

Le nombre de pesticides présents à l'écluse du Fresne (23) est quasiment de moitié moindre qu'à Machecoul (Tableau D-3). Leur fréquence d'apparition est également inférieure, 6 d'entre eux ne sont mesurés qu'une seule fois (8 %) et 9 autres à deux reprises (17 %). Mais leur concentration peut être proche du seuil fixé dans le SAGE (0,9 µg/L pour le 2,4 D et le sulcotrione, et 1,13 µg/L pour le chlortoluron). L'AMPA (100 %) et l'atrazine 2 hydroxy (92%) sont les pesticides les plus retrouvés. Le premier est systématiquement supérieur à 0,1 µg/L avec un maximum de 0,73 µg/L. Le second est bien moins présent avec un dépassement du même seuil dans 33 % des cas et une concentration maximale égale à 0,13 µg/L. Le pencycuron, quantifié à deux reprises (17 %), est le seul qui n'a jamais été retrouvé à Machecoul. Il est présent en faible quantité (concentration maximale égale à 0,02 µg/L), légèrement supérieure à sa LQ (0,01 µg/L). Le pyriméthanol, le bentazone et l'atrazine-2-hydroxy ont un taux de quantification légèrement supérieurs qu'à celui de Machecoul. L'atrazine-2-hydroxy est également le seul à avoir une concentration maximale sensiblement supérieure (2 centièmes) qu'à Machecoul. Enfin, c'est le glyphosate / sulfosate qui a présenté la plus forte concentration avec 0,77 µg/L.

L'AMPA est fréquemment détecté en plus forte concentration que le glyphosate dans les eaux du fait que sa durée de vie est bien supérieure à celle du glyphosate (Figure D-10).

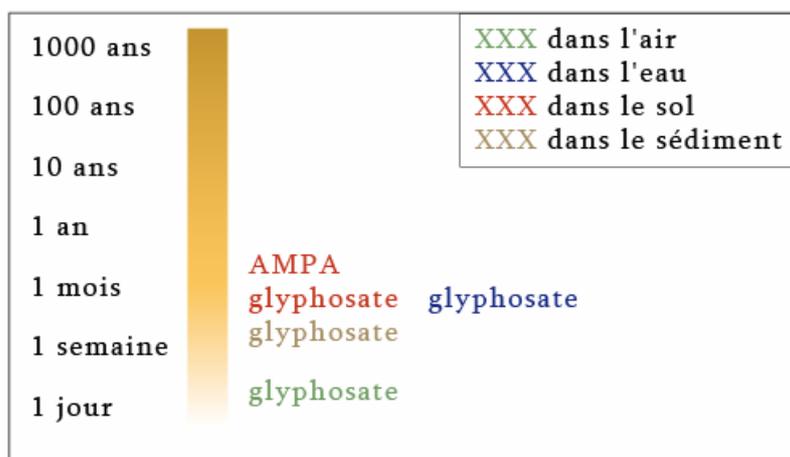


Figure D-10 : Demi-vies du glyphosate et de l'AMPA dans l'environnement
(d'après [AQUASCOP et AESN, 2008])

Les concentrations de l'AMPA sont plus élevées à Machecoul qu'à l'écluse du Fresne, à l'exception de la fin de la période estivale (07 septembre). Elles oscillent entre 0,22 et 1,68 µg/L à Machecoul et entre 0,11 et 0,75 µg/L à l'écluse du Fresne. Trois pics sont observés au niveau de Machecoul alors qu'à l'écluse du Fresne, seul un pic est visible (Figure D-11). Un lissage est observé en sortie du marais du fait des manœuvres hydrauliques (cf B.3.1.3, p.89) et d'un espacement trop lâche dans la fréquence d'échantillonnage (cf C.2.2.4, p.158).

Une diminution de 0,29 µg/L est observée à Machecoul entre le 20 juillet et le 7 septembre, soit en 49 jours. En considérant qu'il n'y a pas d'apports supplémentaires durant cette période, le temps de demi-vie est évalué à 68 jours.

A l'écluse du Fresne, la baisse est de 0,06 µg/L sur la même période. Dans ces conditions-là, le temps de demi-vie est égal à 278 jours.

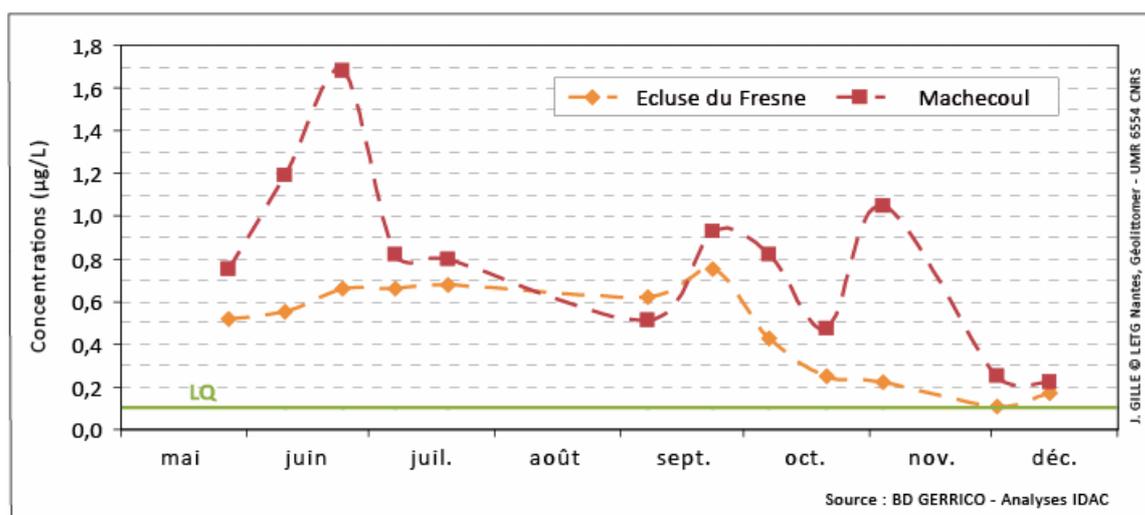


Figure D-11 : Concentrations de l'AMPA à Machecoul et à l'écluse du Fresne en 2009

Dans la très grande majorité des cas, les pesticides ne sont pas présents à des concentrations supérieures aux LQ dans la baie. Sur le secteur de Bouin, seul l'AMPA a été quantifié une fois en 2010 à une concentration de 0,34 µg/L [Bérail, 2011].

Ces analyses révèlent qu'il y a un abattement des concentrations et du nombre de pesticides entre Machecoul et l'écluse du Fresne. Le marais est par conséquent bénéfique pour les activités en aval, nécessitant une eau de bonne qualité. Les pesticides non retrouvés à l'écluse du Fresne ont généralement un temps de demi-vie inférieur à 30 jours. Ces analyses montrent également la persistance de certains pesticides malgré leur interdiction, comme par exemple l'atrazine, le diuron et le terbuthylazine en 2003, ou l'alachlore et le carbofuran en 2008.

D.2 Modélisation des flux dans le marais

D.2.1	Mise en œuvre de la modélisation	189
D.2.2	Définition de scénarii de simulation	193
D.2.3	Intégration des données.....	195
D.2.4	Simulations des flux d'eau dans la zone pilote.....	200

D.2.1 Mise en œuvre de la modélisation

Le système hydraulique est complexe. Il est constitué de tronçons consécutifs assurant la continuité de l'écoulement dans le réseau ramifié, et de singularités hydrauliques au niveau de chaque nœud. Pour obtenir l'adéquation des résultats avec les objectifs visés, il est nécessaire au préalable de déterminer les phénomènes d'écoulements : libre / en charge, régime permanent / transitoire.

L'étude des écoulements en régime permanent dans un réseau ramifié demeure un problème simple en fonction des caractéristiques des sections et des contraintes. L'espace est dans ce cas la seule variable. Cette approche est par ailleurs essentielle avant d'envisager le passage en régime transitoire et l'ajout d'une variable supplémentaire, le temps [Bourrier, 2008].

La modélisation de la qualité de l'eau avec Mascaret est possible uniquement pour un réseau hydrographique de type dentritique, formé par des chenaux à surface libre. Mascaret ne permet pas l'usage de plaines d'inondation / zone de stockage, d'îles et de barrages latéraux. Il ne distingue pas lit mineur / lit majeur, et les diffluences dans le réseau ne sont pas autorisées [EDF et CETMEF, 2011a, 2011c].

Il a été choisi de mettre en œuvre le modèle sur une zone pilote, à savoir la partie nord du Marais Breton (Figure D-12).

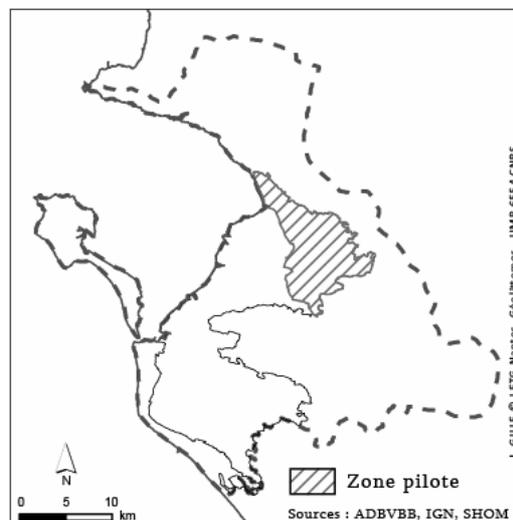


Figure D-12 : Localisation de la zone pilote

Cette zone a été choisie préférentiellement par rapport aux autres secteurs du Marais Breton car elle est la seule qui dispose de données de hauteur d'eau en continu. La zone pilote couvre une superficie quasiment égale au cinquième du Marais Breton. Ses caractéristiques spatiales sont similaires à celles du reste du Marais Breton (cf B.1.2.3, p.51), ce qui en fait une zone représentative (Tableau D-4).

Type de réseau	Longueur		Densité (km/km ²)	Largeur (m)		Sources
	(km)	(%)		Moyenne	Médiane	
Primaire	74	5,7	0,95	9,69	8	Hydroconcept
Secondaire	185	14,4	2,40	5,25	5	Hydroconcept
Tertiaire	1025	79,9	13,30	---	---	BD TOPO - Hydroconcept
Total	1284	---	---	---	---	BD TOPO

Surface zone pilote : 77,13 km²

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Tableau D-4 : Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau primaire correspond à celui pris en compte pour la modélisation, le secondaire au reste du réseau fourni par Hydroconcept et le tertiaire à la différence entre le réseau de la BD TOPO et celui d'Hydroconcept.

Le paramétrage de Mascaret est long car il nécessite de renseigner chaque tronçon par ses caractéristiques physiques et hydrauliques d'où la simplification du réseau hydrographique aux principaux axes de drainage. La modélisation est axée sur les étiers de la partie nord du Marais Breton, émissaires principaux assurant la propagation des flux des bassins versants amont à la baie, ce qui représente environ 75 kilomètres de linéaire. Chaque tronçon est renseigné par ses paramètres physiques (longueurs, profils en travers, coefficients de rugosité, ...) ainsi que par les lois hydrauliques qui les régissent en entrée et en sortie. Les conditions limites amont sont les débits et les concentrations des traceurs provenant de 9 bassins versants. Tous ces flux arrivent dans la baie en un seul point au niveau du Port du Collet (Figure D-13).

Les principaux axes d'écoulement sont modélisés par 21 biefs et 153 profils en travers. Les nœuds hydrauliques sont constitués de 10 confluences et de 2 diffluences. La modélisation de ces dernières n'est pas compatible avec le module de qualité de l'eau [EDF et CETMEF, 2011c]. Ces tronçons ont donc été déconnectés du réseau. Des simulations en cascade ont été réalisées pour déterminer le débit au niveau des diffluences. La répartition des flux d'eau a été calculée en fonction de la section mouillée [Bourrier, 2008]. Sur l'axe principal, un déversoir latéral est placé en lieu et place de la diffluence et le débit déversé est ré-injecté en amont du tronçon déconnecté (Figure D-14).

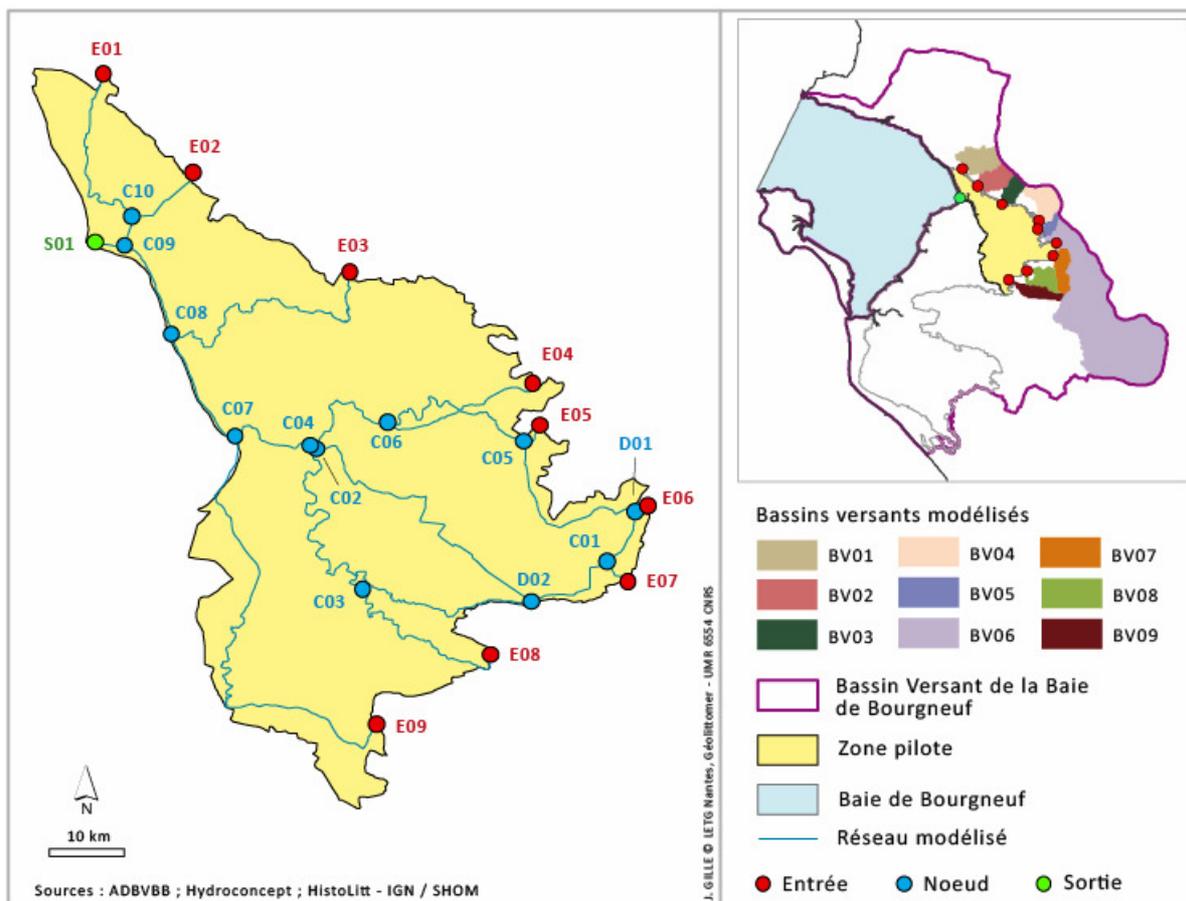


Figure D-13 : Réseau modélisé de la zone pilote

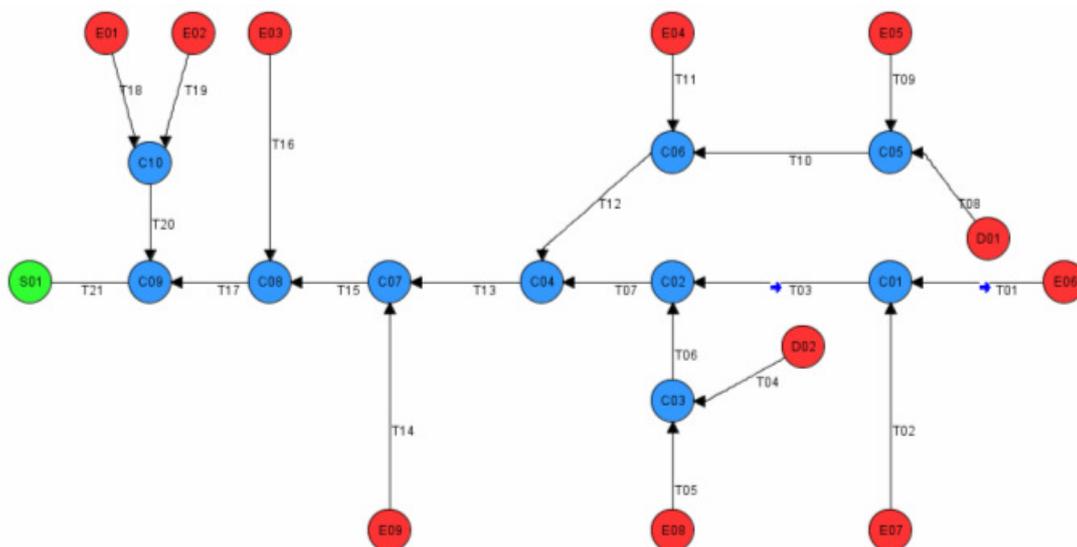


Figure D-14 : Architecture du réseau hydrographique modélisé dans le modèle Mascaret

Trois niveaux de modélisation sont utilisables pour le transfert de polluants [Chocat, 2009 ; Tanguy, 2009a] :

- convection seule,
- convection plus érosion/dépôt sans gestion du stock,
- convection plus dépôt avec gestion du stock.

Il a été choisi de réaliser le transfert de polluants d'amont en aval via le premier niveau de modélisation. Dans ces conditions, la vitesse moyenne de transfert du polluant est égale à celle du courant. Il n'y a pas d'échanges avec le fond.

Le code source du module Tracer a été modifié pour tenir compte de la dégradation d'un pesticide, généralement modélisée par une équation cinétique du premier ordre.

$$C_t = C_0 \cdot e^{(-k \cdot t)} \quad (\text{Eq D-1})$$

$$k = -\frac{\ln(0.5)}{DT_{50}} \quad (\text{Eq D-2})$$

$$DT_{50} = \frac{\ln 2}{k} \quad (\text{Eq D-3})$$

Avec :

- C_t : concentration du pesticide au temps t ,
- C_0 : concentration initiale du pesticide,
- k : taux de dégradation ou constante de dissipation (T^{-1}),
- DT_{50} : temps de demi-vie.

D'autres équations plus complexes peuvent être utilisées pour tenir compte des autres processus physiques, mais elles nécessitent des paramètres supplémentaires comme la teneur en oxygène dissous, la teneur dans les sédiments, ... [Bedos *et al.*, 2002 ; Chocat, 2009 ; Köhne *et al.*, 2009b ; Petit *et al.*, 1995 ; Pomiès *et al.*, 2013].

La réalisation d'une modélisation avec Mascaret nécessite l'exécution d'une série de manipulations avant de pouvoir exploiter les résultats :

- Recueil des données relatives à la bathymétrie et la topographie (profils en travers, lignes de berges ...) ;
- Développement de plusieurs routines en java et VBA⁴⁴ pour formater les données en entrée ;
- Edition du réseau hydrographique à l'aide de l'interface graphique ;
- Sélection du noyau de calcul (utilisation du noyau de calcul fluvial permanent pour calculer les lignes d'eau initiales, utiles par la suite pour la modélisation via le noyau fluvial non permanent) ;
- Désignation des conditions limites amont (hydrogrammes⁴⁵) / aval (limnigramme⁴⁶) et des manœuvres des ouvrages hydrauliques (sélection de l'évènement à modéliser) ;

⁴⁴ Visual Basic for Application.

⁴⁵ Variation du débit en fonction du temps

- Position des sections de calcul dans les différents biefs (maillage) ;
- Discrétisation des profils en travers en tranche horizontale (planimétrie) ;
- Indication des paramètres temporels (temps initial et final, pas de temps) ;
- Renseignement des paramètres généraux de modélisation (type de débordement, loi de frottement, composition des lits ...) ;
- Options des résultats de calcul (variables à enregistrer, fréquence d'enregistrement et d'écriture, ...) ;
- Affichage graphique des profils temporels ou spatiaux des variables sélectionnées ;
- Exportation des données vers un tableur pour leur post-traitement.

D.2.2 Définition de scénarii de simulation

La situation au regard des pollutions d'origine agricole est préoccupante en Pays de la Loire. 75 % des masses d'eau superficielles présentent des risques de non-atteinte du bon état demandé par la DCE et 17 % déclassées par les paramètres nitrates ou pesticides [DRAAF PdL, 2010]. Le glyphosate est encore le pesticide le plus utilisé par les communes en 2010 [CREPEPP 2018, 2010]. Pour lutter contre la pollution par des pesticides, les communes s'engagent progressivement dans une démarche de réduction de pesticides (Figure D-15).

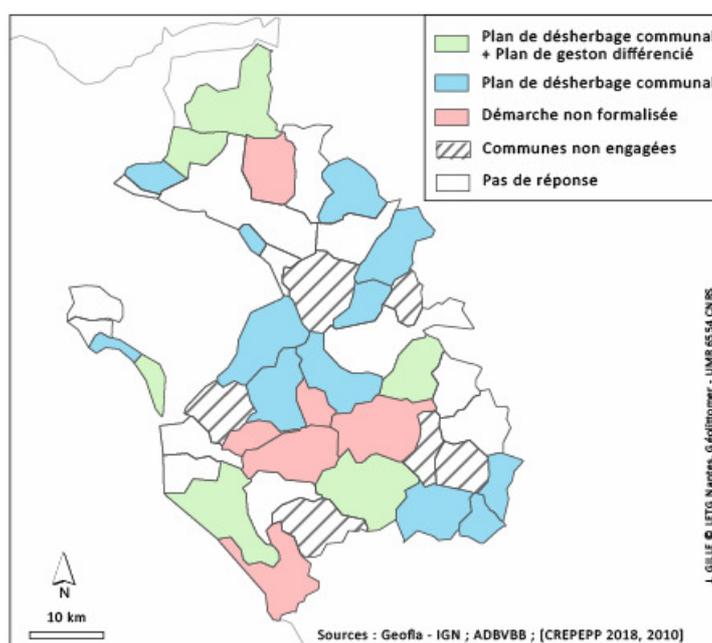


Figure D-15 : Engagement des communes dans une démarche de réduction des pesticides en 2009

⁴⁶ Variation de la cote d'eau en fonction du temps

Le glyphosate est peu absorbé par la plante. Par conséquent, il lui est adjoint des surfactants (POER) soupçonnés de présenter des toxicités aquatiques plus importantes et potentialisant son efficacité. Il est systémique, il bloque la biosynthèse des acides aminés aromatiques. Il présente une toxicité modérée. Le glyphosate est utilisé à des fins agricoles (tous les types de culture) et non agricoles (espaces verts, jardins, routes, voies ferrées).

La principale voie de dégradation du glyphosate est la biodégradation (biotique) par l'action des micro-organismes (microbes, bactéries, champignons) présents dans le sol et dans l'eau. La dégradation chimique (abiotique) est quant à elle mineure. Son principal métabolite est l'AMPA, lequel se détériore en dioxyde de carbone, en eau et en ion phosphate [Capri et Vicari, 2010 ; Dick et Quinn, 1995 ; Schuette, 1998]. L'AMPA est suspecté d'être plus dangereux pour l'environnement que la molécule-mère, mais cette substance est également produite par dégradation d'autres substances utilisées au sein de produits phytosanitaires et/ou de détergents [AERU, 2012 ; ANSES, 2012 ; AQUASCOP et AESN, 2008]. Son autorisation de mise sur le marché date de 2001 [CE, 2001b]. Il n'est pas mentionné dans la liste des substances prioritaires de la DCE. Il est cependant retenu depuis 2008 en tant que substance soumise à révision pour sa possible identification comme substance prioritaire ou substance dangereuse prioritaire [CE, 2008b].

Les facteurs de risque de contamination de l'eau de surface ou souterraine par des substances actives sont liés au milieu (perméabilité des surfaces, proximité d'un point d'eau, forte pente) et aux caractéristiques des molécules (solubilité élevée des molécules dans l'eau, demi-vie élevée) [CREPEPP, 2000]. Son temps de demi-vie est de 69 jours pour un pH de 7 [AERU, 2012 ; ANSES, 2012]. Cette valeur est cohérente avec le temps de demi-vie estimé à Machecoul, à partir des résultats de la campagne de mesures de 2009 (cf D.1.3, p.182).

Par application de l'équation D-2, le coefficient k est égal à $1,162686E^{-7} \text{ s}^{-1}$. Le calcul de ce coefficient permet ainsi la prise en compte de la dégradation du glyphosate dans Mascaret (Figure D-16).

```

SUBROUTINE CALCS_RIEN( RNU , S , &
                    Nbssect , NBTRA , Nbsing , &
                    Q , A , H , RH , ST , C , &
                    SA , T , DT )

use M_PRECISION
use M_CONSTANTES_TRACER_T
use M_PARAMETRES_QUALITE_EAU_T

Implicit none

real(DOUBLE) , Dimension(:,:) , intent(inout) :: RNU , S , SA
real(DOUBLE) , Dimension(:) , intent(in ) :: Q , A , H , ST, RH
real(DOUBLE) , Dimension(:,:) , intent(inout) :: C
INTEGER      :: Nbssect , NBTRA , nbsing
REAL(DOUBLE) :: T, DT

REAL(DOUBLE), Dimension (Nbssect,nbtra) :: RNUS , SS , SSA , SV
INTEGER I, K

DO K = 1 , Nbtra
  DO I = 1 , nbssect
    S(I,K) = SA(I,K) - C(I,K)*1.162686D-7
    RNU(I,K) = 0
  ENDDO
ENDDO

RETURN
END SUBROUTINE CALCS_RIEN

```

Figure D-16 : Code du module Transport_Pur, avec la modification apportée en rose

D.2.3 Intégration des données

D.2.3.1	Construction du réseau hydrographique.....	195
D.2.3.2	Coefficient de rugosité	197
D.2.3.3	Coefficient de diffusion	199

D.2.3.1 Construction du réseau hydrographique

La modélisation des bassins versants se base sur le réseau hydrographique de la BD CARTHAGE. La connexion entre les tronçons des bassins versants et ceux des marais maritimes n'est pas systématique dans la BD CARTHAGE [Boudeau et Guionneau, 2004]. La topologie de quelques tronçons a donc été modifiée afin de coïncider avec les limites du Marais Breton, en fonction du réseau hydrographique de la BD TOPO et la BD ORTHO.

Par soucis de simplification, le profil est considéré comme symétrique, avec des rives et un fond plats, afin de pouvoir reconstituer les profils en travers à partir des données fournies par Hydroconcept. Les distances AB et AL sont connues. Il ne manque plus que l'angle α et/ou la distance MN (Figure D-17).

Une valeur unique de l'angle α ne peut être choisie pour l'ensemble du réseau hydrographique, compte tenu de la variabilité du gabarit des tronçons. Plusieurs

profils ont donc été créés en faisant varier l'angle α . Plus la largeur est faible, plus l'angle α tend vers 90° . Au-delà d'un certain gabarit, il est impossible de construire un profil correspondant à des angles faibles (Figure D-18).

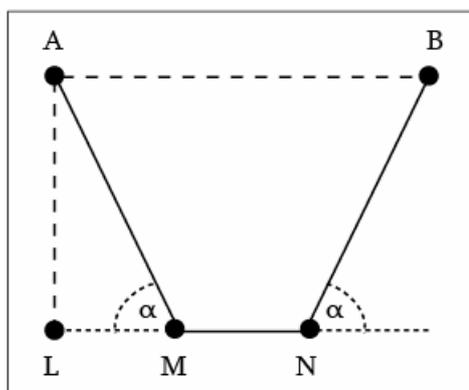


Figure D-17 : Schéma d'un profil en travers reconstitué

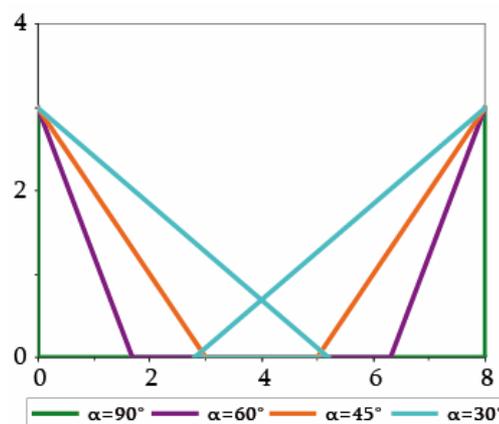


Figure D-18 : Profils en travers en fonction de l'angle α

Pour la partie aval du Falleron, la simplification des tronçons à des profils en travers quasi rectangulaires peut conduire à de larges surestimations de débit. En supposant que l'angle réel α soit égal à 30° , la surface de la section mouillée serait surestimée d'environ 16 m^2 (Tableau D-5).

α ($^\circ$)	Surface mouillée (m^2)
90	60,0
60	54,8
45	51,0
30	44,4

(AB = 20 m et AL = 3 m)

Tableau D-5 : Estimation de la section mouillée en fonction de l'angle α

Deux valeurs de l'angle α ont donc été utilisées pour construire les profils en travers. La première valeur est 30° pour les tronçons T13, T17, T20, T21 et une partie des tronçons T03 et T16 (Figure D-14). Dans 85 % des cas restant, la valeur de 70° est choisie de telle sorte que M et N soient confondus au maximum. Cette seconde valeur a été déterminée par incrémentation jusqu'à ce que tous les profils en travers puissent être construits. Ces valeurs sont conformes à celles obtenues par des levés terrain sur le Grand Etier de Sallertaine [ISL Ingénierie, 2004 ; SCE, 2002].

La pente hydraulique n'est également pas connue précisément. Mounès (1974) et Robin (1992) informent juste qu'elle est inférieure à 0,03 pour mille. Pour cette étude, elle sera considérée comme constante et égale à 0,03 pour mille, ce qui représente un dénivelé de 0,55 m sur le Falleron, entre son entrée dans le Marais Breton à Machecoul et sa sortie dans la baie au niveau du Port du Collet.

D.2.3.2 Coefficient de rugosité

L'écoulement naturel d'un flux d'eau est modifié par la présence de corps naturels ou artificiels dans le chenal.

La résistance à l'écoulement est la résultante de plusieurs phénomènes conjugués [Vidal, 2005] :

- la résistance de surface, correspondant aux effets induits dans le profil vertical de vitesse par le degré de turbulence de l'écoulement, par la rugosité relative du lit et la forme de la section en travers ;
- la résistance due au changement de forme ou de la taille de la section en travers le long de l'axe du cours d'eau, générant des modifications du profil de vitesse ;
- la résistance due à la nature de l'écoulement ;
- la résistance due à la variabilité temporelle.

La végétation dans un cours d'eau ralentit l'écoulement car elle augmente les forces de frottements. Les sédiments ont alors tendance à être freinés par les feuilles et piégés par les racines [Ohmoto et Tanaka, 2008 ; Shi *et al.*, 2008 ; Yan et Wang, 2008 ; Yang *et al.*, 2008].

Le coefficient de rugosité représente donc globalement la perte de charge linéaire sur le fond, le frottement sur les berges, et les effets de dissipation d'énergie par les courants transversaux éventuels dans le lit mineur.

Le coefficient n de Manning peut être déterminé par des tables (Tableau D-6) qui reprennent les éléments suivants [Bravard et Petit, 2000 ; Giret, 2007] :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (\text{Eq D-4})$$

où n_0 dépend du matériau qui constitue le chenal ; n_1 dépend du degré d'irrégularité de la surface ; n_2 dépend des variations de la forme de la section transversale ; n_3 dépend des effets d'obstruction (embâcles, pont ...) ; n_4 dépend de la végétation (aquatique ou riparienne) qui modifie les conditions d'écoulement ; m_5 est le degré de sinuosité du chenal.

n_0 = matériau du lit	terre	0,020
	sable grossier et fin gravier	0,025
	gravier grossier	0,028
n_1 = degré d'irrégularité de la section	faible	0,005
	moyenne	0,010
	forte	0,020
n_2 = variations des sections transversales	graduelles	0,000
	alternance occasionnelle	0,005
	alternance fréquente	0,010-0,015
n_3 = effet d'obstruction	négligeable	0,000
	faible	0,010-0,015
	appréciable	0,020-0,030
	fort	0,040-0,060
n_4 = présence de végétation	faible	0,005-0,010
	moyenne	0,010-0,025
	importante	0,025-0,050
	très importante	0,050-0,100
m_5 = degré de méandration	faible	1,0
	appréciable	1,15
	fort	1,30

Tableau D-6 : Evaluation du coefficient de rugosité de Manning
(d'après [Chow, 1959])

D'autres méthodes plus élaborées existent pour en tenir compte [Kang et Choi, 2008 ; Kim et Choi, 2008 ; Liu et Cao, 2011], mais au regard de cette étude, l'approche simplifiée est préférable, en se basant sur les valeurs données dans la littérature (Tableau D-7).

	Best		Good		Fair		Bad	
	n	K	n	K	n	K	n	K
(1)	0,025	40	0,028	36	0,030	33	0,033	30
(2)	0,030	33	0,033	30	0,035	29	0,040	25
(3)	0,033	30	0,035	29	0,040	25	0,045	22
(4)	0,040	25	0,045	22	0,050	20	0,055	18
(5)	0,035	29	0,040	25	0,045	22	0,050	20
(6)	0,045	22	0,050	20	0,055	18	0,060	17
(7)	0,050	20	0,060	17	0,070	14	0,080	13
(8)	0,075	13	0,100	10	0,125	8	0,150	7

(n) Manning coefficient ; (K) Strickler coefficient

Naturel stream channels

- (1) Clean straight bank, full stage, no rifts or deep pools
- (2) As (1), but some weeds and stones
- (3) Winding, some pools and shoals, clean
- (4) As (3), lower stages, more ineffective slope and sections
- (5) As (3), some weeds and stones
- (6) As (4), stony sections
- (7) Sluggish river reaches, rather weedy or with very deep pools
- (8) Very weedy reaches

Tableau D-7 : Coefficients de rugosité en fonction de la nature des chenaux
[Brater et al., 1996]

Si les formules empiriques peuvent donner des valeurs satisfaisantes pour les débits de plein bord, ces coefficients ne peuvent pas raisonnablement être estimés en utilisant les équations de Manning, en raison du trop large éventail des valeurs pour les faibles débits normaux [Kim *et al.*, 2008]. Deux coefficients de Strickler sont

retenus dans le cadre de cette étude afin d'évaluer l'impact de ce paramètre dans des conditions favorables ($K_s : 30$) ou moins ($K_s : 10$) à l'écoulement.

D.2.3.3 Coefficient de diffusion

Dans l'absolu, le coefficient de diffusion doit être déterminé par des mesures afin de tenir compte au mieux de la morphologie des cours d'eau, des zones mortes, des méandres, de la faune et de la flore aquatique, des paramètres physico-chimiques, des caractéristiques physiques du fluide, des conditions hydrauliques et sédimentaires [EDF et CETMEF, 2011c ; Hansen, 1996 ; Nepf *et al.*, 1997 ; Perucca *et al.*, 2009]. Ce coefficient peut avoir une gamme de valeurs très large pour un même cours d'eau et des conditions d'écoulement similaires [Pujol et Sanchez-Cabeza, 2000]. Dans la pratique, son estimation par des mesures n'est pas toujours possible. A partir de l'étude de plusieurs rivières, des formules empiriques sont données dans la littérature pour déterminer ce coefficient de diffusion, basées sur les principaux paramètres hydrauliques : profondeur, largeur, vitesse, vitesse de cisaillement (Tableau D-8).

Ref.	Eq. no.	Equation	Author (year)
Tayfour and Singh (2005)	(7)	$K_x = 5.93Hu_s$	Elder (1959)
Deng et al. (2001)	(8)	$K_x = 0.58 \left(\frac{H}{u_s}\right)^2 UB$	McQuivey and Keffer (1974)
Fisher et al. (1979)	(9)	$K_x = 0.011 \frac{U^2 B^2}{Hu_s}$	Fisher (1967)
Seo and Bake (2004)	(10)	$K_x = 0.55 \frac{Bu_s}{H^2}$	Li et al. (1998)
Seo and Bake (2004)	(11)	$K_x = 0.18 \left(\frac{U}{u_s}\right)^{0.5} \left(\frac{B}{H}\right)^2 Hu_s$	Liu (1977)
Tavakollizadeh and Kashefipour (2007)	(12)	$K_x = 2.0 \left(\frac{B}{H}\right)^{1.5} Hu_s$	Iwasa and Aya (1991)
Seo and Cheong (1998)	(13)	$K_x = 5.92 \left(\frac{U}{u_s}\right)^{1.43} \left(\frac{B}{H}\right)^{0.62} Hu_s$	Seo and Cheong (1998)
Sedighnezhad et al., (2007)	(14)	$K_x = 0.6 \left(\frac{B}{H}\right)^2 Hu_s$	Koussis and Rodriguez-Mirasol (1988)
FaghforMaghrebi and Givehchi, (2007)	(15)	$K_x = 0.2 \left(\frac{B}{H}\right)^{1.3} \left(\frac{U}{u_s}\right)^{1.2} Hu_s$	Li et al. (1998)
Deng et al. (2001)	(16)	$K_x = \frac{0.15}{8c_t} \left(\frac{U}{u_s}\right)^2 \left(\frac{B}{H}\right)^{1.67} Hu_s, \quad c_t = 0.145 + \frac{1}{3520} \left(\frac{U}{u_s}\right) \left(\frac{B}{H}\right)^{1.38}$	Deng et al. (2001)
Kashefipour and Falconer (2002)	(17)	$K_x = 10.612 \left(\frac{U}{u_s}\right) HU$	Kashefipour and Falconer (2002)
Tavakollizadeh and Kashefipour (2007)	(18)	$K_x = 7.428 + 1.775 \left(\frac{B}{H}\right)^{0.82} \left(\frac{U}{u_s}\right)^{1.572} HU$	Kashefipour and Falconer (2002)

Tableau D-8 : Equations empiriques pour l'estimation du coefficient de dispersion longitudinal

(K_x : coefficient de dispersion longitudinal, B : largeur, H : profondeur, U : vitesse, u^* : vitesse de cisaillement) [Riahi-Madvar et al., 2009]

Leur usage n'est pas aisé, compte tenu de l'étendue des valeurs obtenues pour le coefficient de diffusion à partir des mêmes paramètres hydrauliques [Kashefipour et

Falconer, 2002 ; Riahi-Madvar *et al.*, 2009]. Des tests comparatifs de plusieurs de ces formules sur des sites différents ont également révélé que la formule universelle *ad hoc*, valable pour tous les cas d'étude n'existe pas. Aucune formule ne permet de reproduire les variations temporelles et spatiales dans son ensemble. Une formule peut par exemple donner de très bons résultats lorsqu'il y a une forte variation du débit et s'avérer totalement inadéquate en régime permanent, pour de faibles débits [El Kadi Abderrezzak *et al.*, 2012].

Par conséquent, le coefficient de diffusion a été choisi comme constant pour l'ensemble du réseau hydrographique. Trois valeurs du coefficient de dispersion longitudinal (0,5 ; 2 ; 10) seront testées sur la base des valeurs trouvées dans la littérature pour des rivières aux caractéristiques hydrodynamiques similaires [Ani *et al.*, 2009 ; Deng et Jung, 2009 ; Hansen, 1996 ; Mossman et Mulki, 1996].

D.2.4 Simulations des flux d'eau dans la zone pilote

D.2.4.1	Conditions initiales	200
D.2.4.2	Sans gestion hydraulique	203
D.2.4.3	Avec gestion hydraulique.....	205

L'hypothèse a été faite dans un premier temps que tous les ouvrages sont ouverts, ils n'entravent ou ne modifient pas l'écoulement de l'eau. Plusieurs scénarii ont été construits à cet effet. Dans un second temps, la gestion d'un ouvrage est prise en compte et son influence est testée sur un seul scénario.

D.2.4.1 Conditions initiales

Le marais est alimenté par des cours d'eau drainant de petits bassins versants d'une superficie inférieure à 10 km², excepté celui du Falleron, d'une superficie de 137 km². Seul le débit du Falleron est connu à l'entrée du marais (Figure D-19).

Cette station est marquée par des assecs en période estivale et des débits journaliers de pointe pouvant être supérieurs à 20 m³/s. L'année 2005 est une année de sécheresse, les débits journaliers n'ont pas dépassé le seuil de 2,5 m³/s.

La période simulée s'étend sur 100 jours à partir du 26 mai 2007 (Figure D-19), de telle sorte que le débit soit inférieur à 3 m³/s. Ce débit seuil marque le débordement du cours d'eau. Il est généralement dépassé entre 30 et 50 jours par an selon les années. Le débit moyen annuel est lui égal à 1,2 m³/s en 2007.

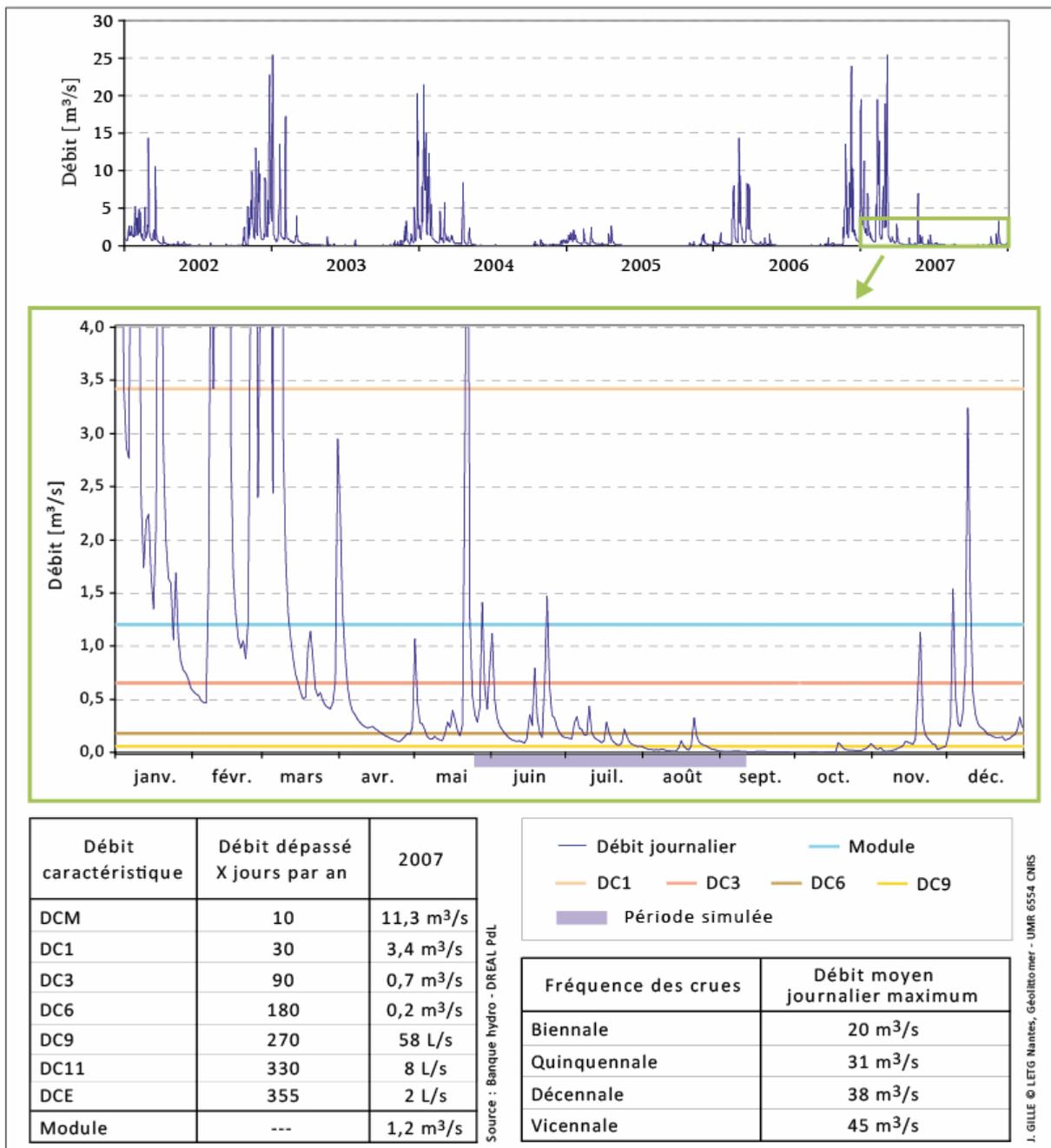


Figure D-19 : Débits journaliers et caractéristiques à Machecoul

Pour les autres cours d'eau, l'objectif initial était d'utiliser les débits simulés par le modèle SWAT. Suite au changement de stratégie dans la procédure de validation (cf Annexe 4, p.307), une répartition des débits du Falleron a été réalisée en fonction de la superficie de leurs bassins versants (Tableau D-9). Cette méthode est préconisée par rapport à la répartition des débits selon le volume lorsque la vidange des stocks d'eau souterraine est rapide. Bien qu'étant la plus satisfaisante, la méthode par répartitions analogiques selon des similitudes climatiques et géomorphologiques [Luyet, 1990] est également écartée car les bassins versants côtiers sont peu jaugés.

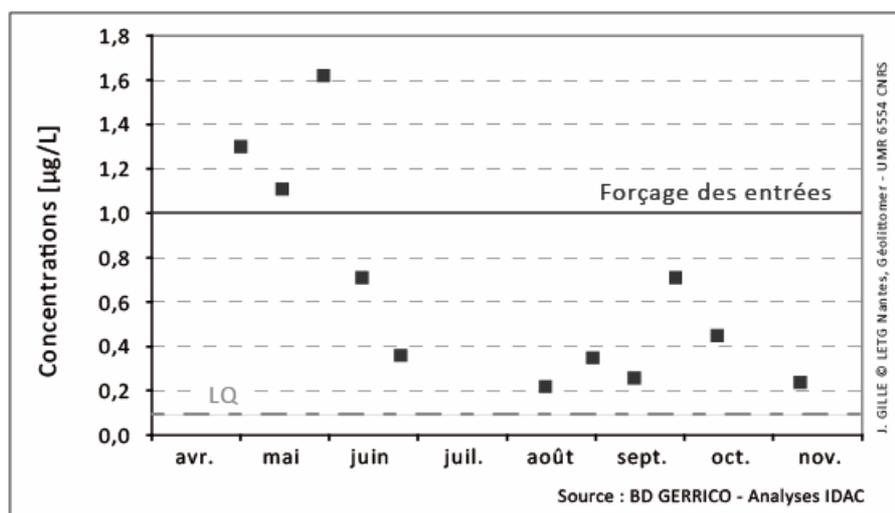
Bassin versant amont	Surface (ha)	% E06
E01	14	10,5
E02	9	6,7
E03	5	3,6
E04	14	10,0
E05	3	2,5
E07	8	6,1
E08	8	6,0
E09	7	5,4
E06	137	100

Source : BD ALTI - IGN

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Tableau D-9 : Volumes et flux entrants dans le marais

Les concentrations de glyphosate rencontrées dans le Falleron à Machecoul varient de 0,22 à 1,62 µg/L. Le forçage des concentrations en entrée est fixé à 1 µg/L en continu (Figure D-20), en référence au seuil de non dépassement fixé dans le SAGE [ADBVB, 2004, 2011].



Source : BD GERRICO - Analyses IDAC

Figure D-20 : Concentrations de glyphosate dans le Falleron à Machecoul en 2009

La cote aval de 1,8 m est choisie pour s'assurer que tous les biefs soient en eau.

Un pas de planimétrie trop grand ne permet pas de voir les variations fines des hauteurs d'eau entre les profils. Pour ajuster au mieux ce pas, il est admis de prendre la différence de cote entre le point le plus bas et le point le plus haut du profil divisé par 50 [CETMEF, 2008]. L'amplitude maximale dans une section est de l'ordre de 0,50 m. Le pas de planimétrie a donc été pris égal à 0,01 m pour l'ensemble du réseau.

Le pas de temps de calcul a été choisi empiriquement. Il est contraint par le planimétrie et le nombre de sections de calculs. Pour cette étude, la simulation ne peut aboutir lorsqu'il est supérieur à 60 s, car le modèle bogue. Un pas inférieur rallonge le temps de calcul. Le nombre total de pas de calcul est donc égal à 144000.

L'enregistrement d'un résultat par jour pour chaque section de calculs est retenu, compte tenu de l'échantillonnage temporel des données en entrée.

D.2.4.2 Sans gestion hydraulique

Les simulations présentées ci-après ont pour but d'évaluer l'influence des paramètres suivants sur la concentration de glyphosate en sortie : le maillage (M : 100 ; 200 ; 400), la dégradation (SD : sans, AD : avec), la méthode aux volumes finis (VF : 1 ; 2), le coefficient de diffusion (Kd : 0,50 ; 2 ; 10), le coefficient de Strickler (Ks : 10 ; 30).

La création de sections de calculs intermédiaires aux profils de terrain s'avère nécessaire pour affiner le calcul et obtenir une ligne d'eau la plus représentative possible. Ces « profils » intermédiaires sont interpolés entre les profils réels [CETMEF, 2008]. La médiane et la moyenne des écarts de concentrations sont inférieurs à 1 % entre un maillage de 100 m et un autre de 200 m, et autour de 2 % entre un maillage de 100 m et un autre de 400 m. Au maximum, ces écarts s'élèvent respectivement à 6,37 % et 17,85 % (Tableau D-10). Compte tenu de l'échantillonnage spatial des levés bathymétriques [Hydroconcept, 2010], la valeur de 100 m a été retenue pour le reste de l'étude.

Scénario : AD VF:1 Kd:10 Ks:10	Médiane	Moyenne	Maximum
Ecarts (%) entre M:200 et M:100	0,47	0,77	6,37
Ecarts (%) entre M:400 et M:100	1,23	2,06	17,85

J. GILLE © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Tableau D-10 : Ecarts entre différents maillages

La concentration moyenne au Port du Collet est de 0,75 µg/L sans dégradation et de 0,62 µg/L avec dégradation (Figure D-21). L'injection d'une concentration continue et constante en entrée permet d'évaluer la baisse due à la dilution et celle relative à la dégradation. Cette différence s'élève en moyenne à 0,12 µg/L et au maximum à 0,22 µg/L. Sur la période étudiée, la concentration minimale atteinte est de 0,44 µg/L avec dégradation. Cette dernière devient négligeable lorsque le débit est supérieur à 2 m³/s. La concentration maximale obtenue pour les simulations S4 et S6 (avec dégradation et Ks égal à 10) est quasiment égale à la S1 (sans dégradation et Ks égal à 30).

Le choix de la méthode de résolution est le paramètre le plus influent du point de vue de la moyenne (Figure D-21). L'écart entre les deux méthodes de résolution est en moyenne de 0,05 µg/L et au maximum de 0,10 µg/L. Le coefficient de Strickler est lui peu influent, voire négligeable pour des débits inférieurs à 2 m³/s. Au-delà, son influence devient par contre majeure, devant la méthode de résolution. Pour le coefficient de diffusion longitudinal, la plage de valeurs testée ne permet pas de relever de modifications significatives en sortie.

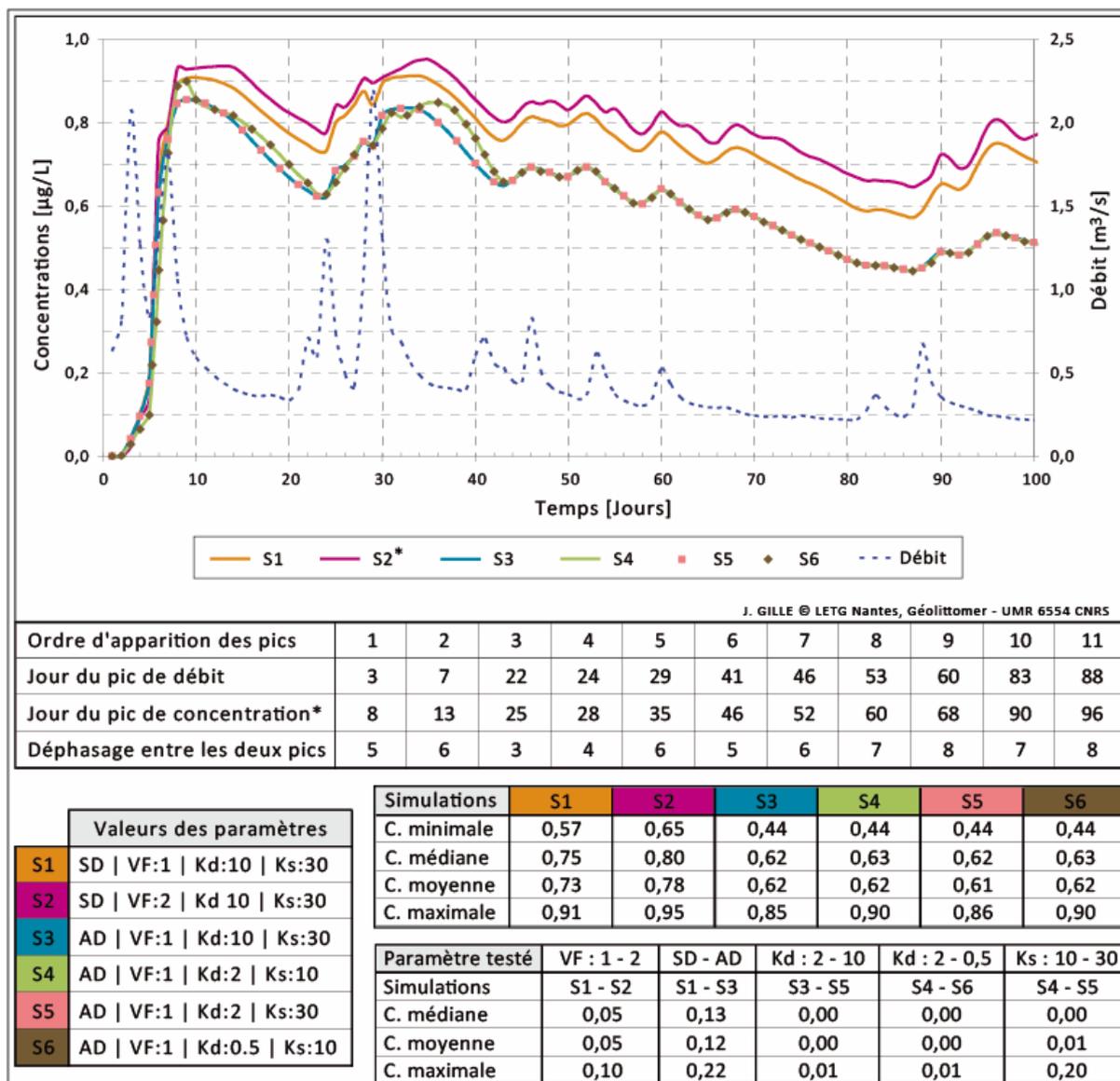


Figure D-21 : Evolution du débit et des concentrations de glyphosate au Port du Collet

Sur la période étudiée, 11 pics sont dénombrés (Figure D-21). Il y a un déphasage entre celui de débit et celui de concentration, qui varie de 3 à 8 jours. Lorsque le débit de pointe est supérieur à $2 \text{ m}^3/\text{s}$, le jour d'apparition du pic de concentrations fluctue selon la simulation (écart de 4 jours pour le 4^e pic). En dessous, le débit est trop faible pour que les variations de concentration de glyphosate soient visibles avec cet échantillonnage temporel. En effet, à partir du 43^e jour, la concentration de glyphosate évolue de façon similaire à l'exutoire du marais, quelque soit le coefficient de diffusion et le coefficient de Strickler. Seul le choix de la méthode de résolution impacte les résultats.

Dans l'hypothèse où les manœuvres hydrauliques ne modifient pas la circulation de l'eau, le temps de transfert d'un pesticide dans le marais, entre Machecoul et le Port du Collet, est estimé à environ 1,5 jours pour un débit constant égal à $2 \text{ m}^3/\text{s}$, et à environ 8 jours pour un débit constant égal à $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les tendances observées au Port du Collet se confirment à l'intérieur du marais (Figure D-22).

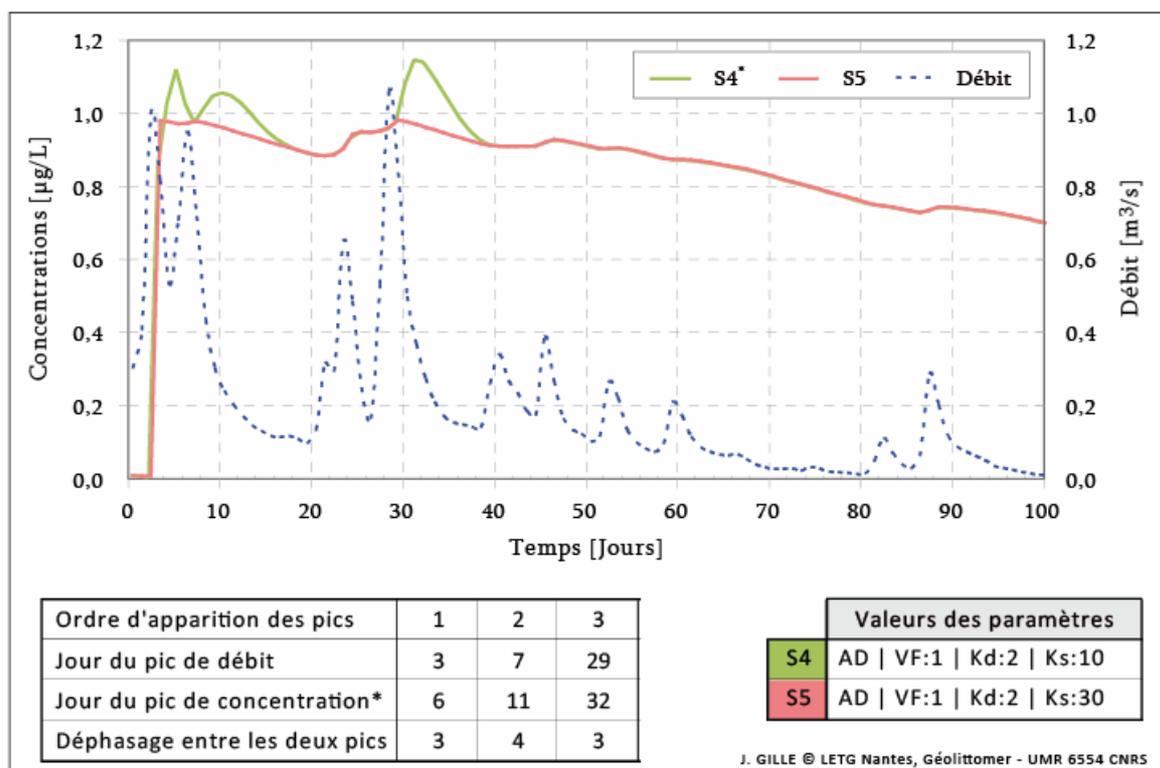


Figure D-22 : Evolution du débit et des concentrations de glyphosate dans le Falleron au Port la Roche

Seule la rugosité impacte la concentration de glyphosate. Un faible coefficient de Strickler produit un ralentissement du panaché de pollution dans le réseau et tend à générer des pics de concentrations supérieures aux concentrations initiales présentes à Machecoul. A l'inverse, un coefficient de Strickler élevé a tendance à lisser les pics. Pour un débit de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et un coefficient de Strickler égal à 10, un déphasage de 3 à 4 jours est observé entre un pic de l'hydrogramme et un autre du pollutogramme dans le Falleron au bout d'une dizaine de kilomètres, depuis Machecoul.

Dans ces conditions hydro-géomorphologiques et hydrodynamiques, le coefficient de diffusion longitudinal est peu influent. La méthode de convection est le paramètre le plus influent. Celle aux volumes finis 2 est moins diffusive que celle aux volumes finis 1, c'est-à-dire que les concentrations simulées sont plus élevées avec la première méthode (VF:2) qu'avec la seconde (VF:1). Enfin la rugosité devient le paramètre le plus influent lorsque le débit dépasse un certain seuil : voisin de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ au Port la Roche, supérieur à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ au Port du Collet.

D.2.4.3 Avec gestion hydraulique

En fonction des manœuvres des ouvrages hydrauliques, les débits et les vitesses peuvent être faibles, voire nulles. Les eaux se retrouvent donc vulnérables aux rejets

et flux de pollution. La concentration des substances dissoutes peut y atteindre des concentrations très élevées [Bourrier, 2008]. Les simulations suivantes ont été faites en prenant en compte le vannage du Nouveau Collet, en sortie du marais doux (Figure D-23). Il a été modélisé par une seule porte, d'une largeur de 15 m. Les effets de ce vannage sont évalués à partir des valeurs des paramètres utilisées pour la simulation S4.

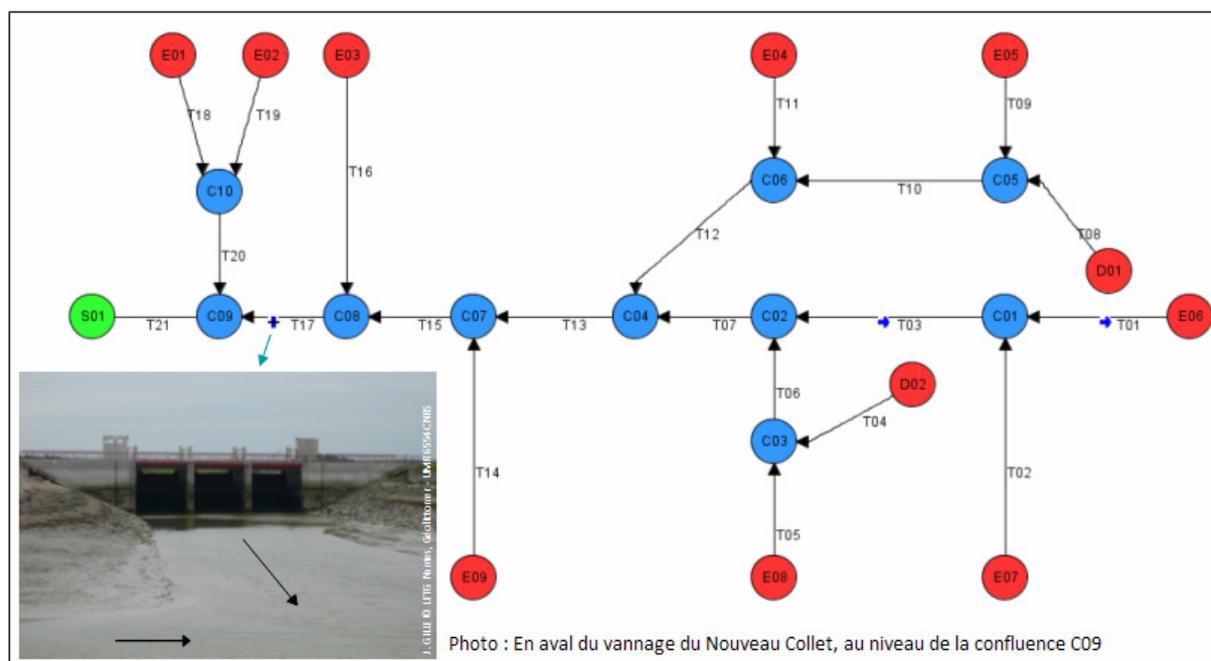


Figure D-23 : Architecture du réseau modélisé avec la prise en compte du vannage du Nouveau Collet

Au départ, la porte est ouverte à 2,0 m. Le second jour, elle est ensuite abaissée à la cote de 0,15 m et ne sera plus manœuvrée par la suite. La fermeture totale de la porte génère des courants négatifs⁴⁷, ce qui n'est pas compatible avec le module Tracer. Dans la réalité, la fermeture totale du vannage favorise la propagation des flux d'eau du primaire vers le secondaire, voire le tertiaire. Une faible ouverture (0,08 m) est donc maintenue afin d'éviter l'inversion du débit. La section ouverte est égale à 1,20 m².

Ce vannage permet la régulation des flux d'eau dans le marais. Les débits de pointe sont abaissés au maximum de 0,71 m³/s et au minimum de 0,06 m³/s. Ces variations dépendent de la valeur du débit. Plus il sera élevé, plus le débit de pointe sera abaissé (Figure D-24).

⁴⁷ Sens du courant qui s'inverse.

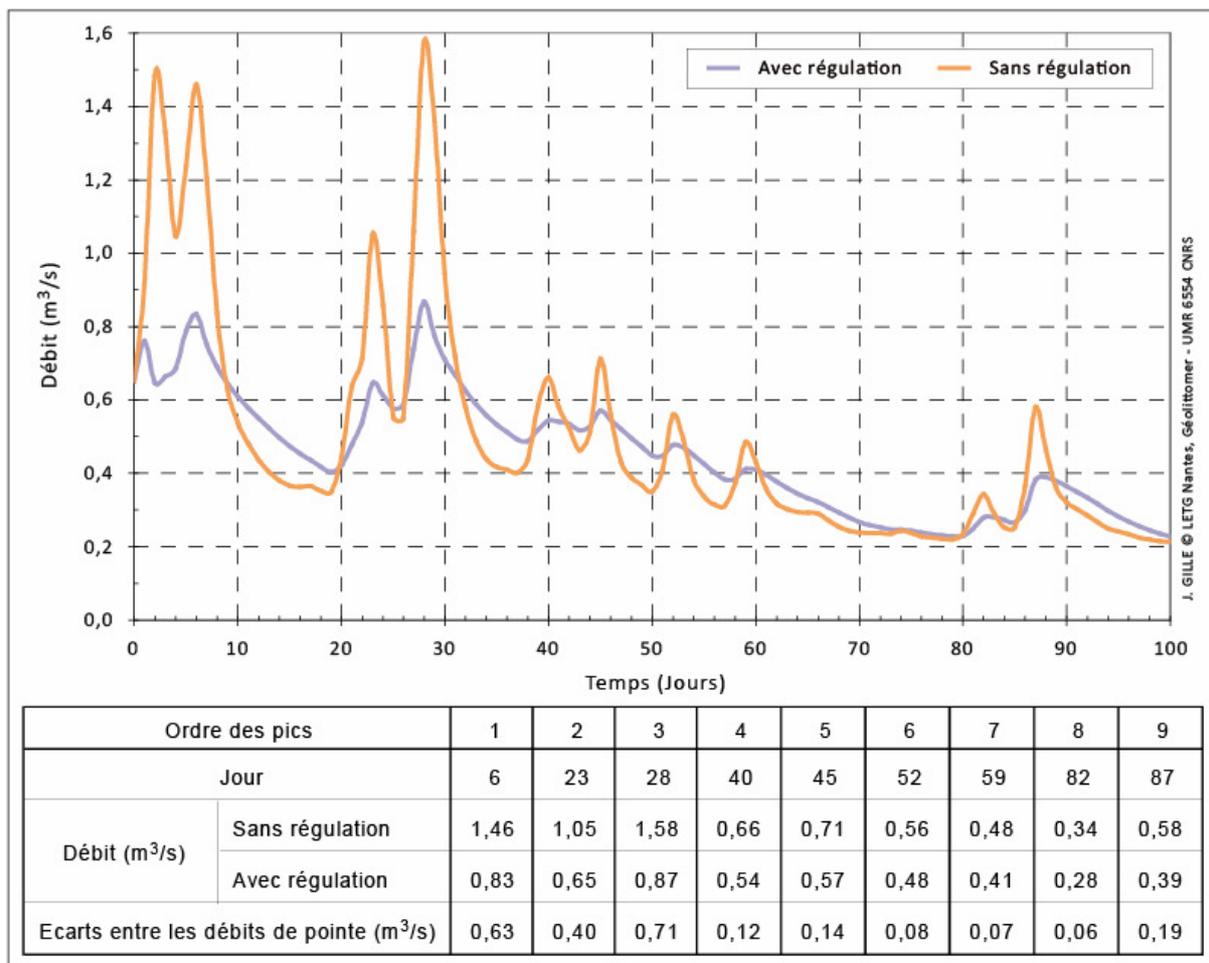


Figure D-24 : Evolution du débit au Port du Collet

La concentration croît lorsque le débit est faible car le panaché de glyphosate est moins dilué. La concentration avec régulation peut ainsi se retrouver supérieure à celle sans régulation comme par exemple entre le 12^e et le 28^e jour ou encore entre le 38^e et le 52^e jour (Figure D-25). Entre deux pics de débits, la concentration maximale observée est voisine de 1 µg/L au 44^e jour (avec régulation). A partir du 52^e jour, le débit est inférieur à 0,60 m³/s. La concentration dans les deux cas suit la même évolution. La concentration minimale est égale à 0,15 µg/L le 85^e jour.

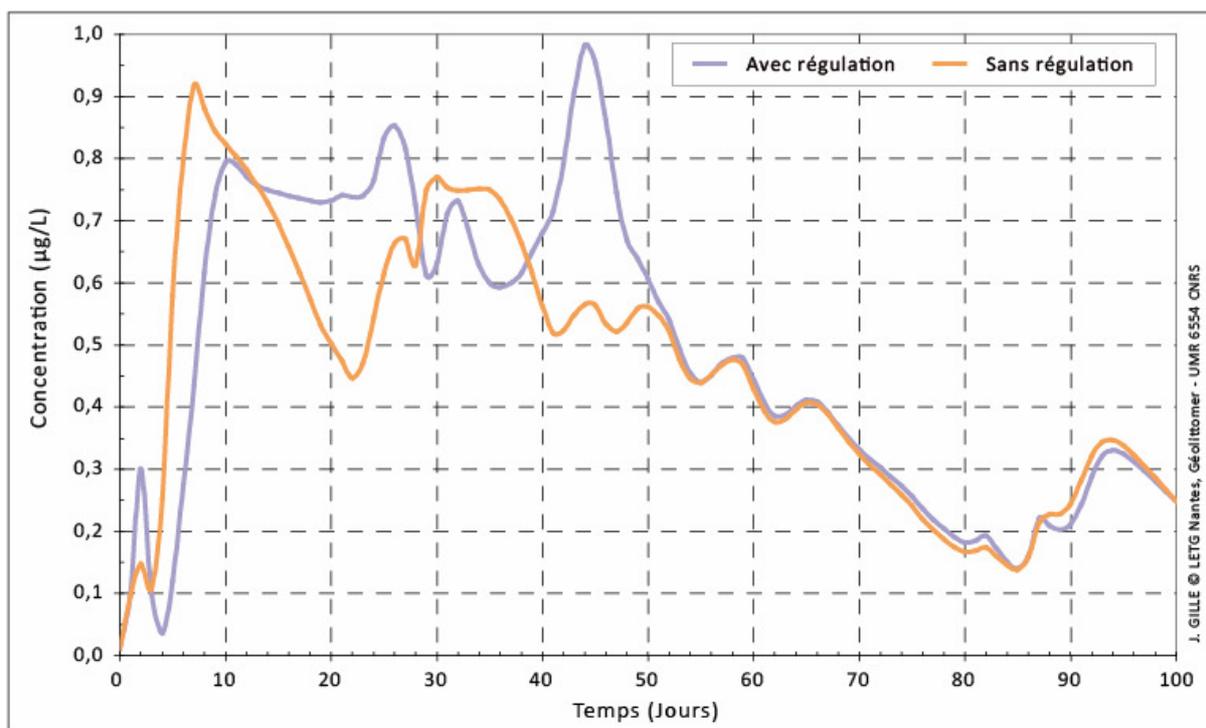


Figure D-25 : Evolution des concentrations de glyphosate au Port du Collet

Le volume écoulé est de $4,31 \times 10^6 \text{ m}^3$ sans régulation et de $3,94 \times 10^6 \text{ m}^3$ avec régulation, soit une rétention de $0,37 \times 10^6 \text{ m}^3$ dans les chenaux.

Sur la période étudiée, la masse entrante de glyphosate dans la zone pilote est de 2,80 kg. La majeure partie (1,73 kg) provient du bassin versant du Falleron. Le reste des apports varie entre 0,04 et 0,18 kg. Dans l'ensemble, ces estimations d'apports semblent être dans les mêmes ordres de grandeur qu'avec la réalité, bien qu'elles nécessitent d'être affinées. Dans la partie nord du Marais Breton, le glyphosate n'est pas utilisé. Il est épandu uniquement dans les aires urbaines hors marais (Figure D-26). La commune de Bois-de-Cené est celle qui en fait le plus usage (entre 10 et 50 kg). Les estimations faites à l'entrée du marais sont bien inférieures. Elles sont évaluées pour cette modélisation à 0,11 kg pour l'entrée E08 et à 0,09 kg pour l'entrée E09 (Figure D-23), soit respectivement à 0,40 et à 0,33 kg si ces estimations sont étendues sur l'année.

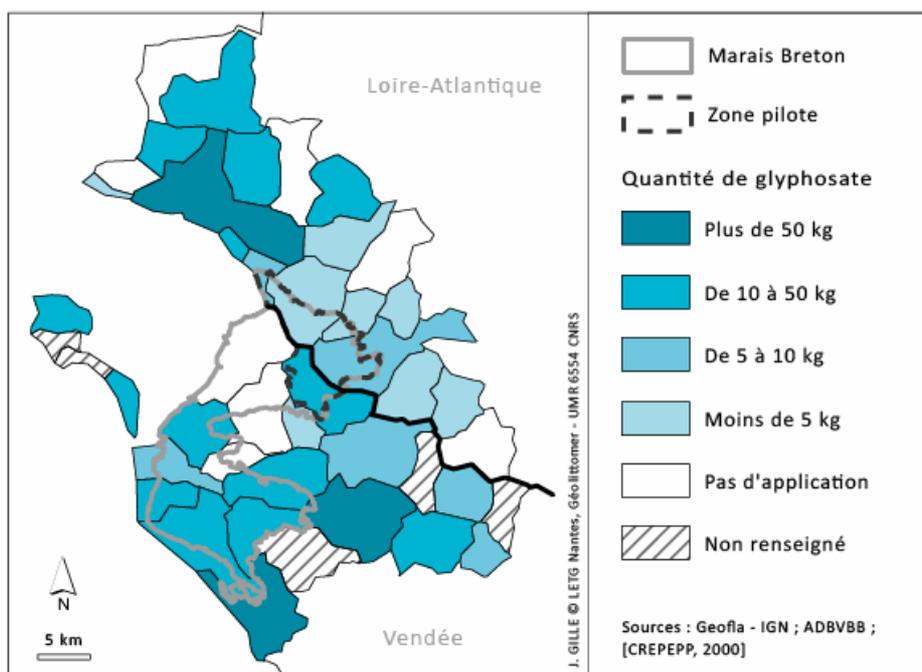


Figure D-26 : Consommation des communes en glyphosate

Ces estimations sont basées sur l'hypothèse qu'une concentration constante et continue de glyphosate est appliquée à l'entrée dans le marais tout au long de l'année, en respectant les seuils fixés par le SAGE. Hors dans la réalité, ce sont des applications ponctuelles dans le temps et donc à des quantités très supérieures aux objectifs visés par le SAGE. Les flux entrants au niveau de E08 et E09 mettent entre 1 et 2 jours pour parcourir respectivement les 10,27 et 11,90 km de chenaux avant de rejoindre le Falleron au niveau des confluences C02 (après avoir rejoint le tronçon T04 au niveau de C03) et C07 (Figure D-23). Une baisse de 0,02 kg est observée entre l'entrée dans le marais et la confluence avec le Falleron sur la période modélisée, soit 20 % des apports. Le temps de séjour de ces flux dans cette partie du marais n'apparaît donc pas suffisant pour ramener la concentration en dessous des seuils fixés par le SAGE.

La masse sortante de glyphosate est quant à elle de 2,16 kg sans régulation et de 2,06 kg avec régulation. La régulation des flux d'eau dans le marais accroît le temps de résidence des masses d'eau et contribue par conséquent à l'amplification de la dégradation du glyphosate (0,10 kg en plus de dégradé avec la régulation). Le flux maximal avec régulation (0,05 kg/J) est de moitié inférieur à celui sans régulation (0,10 kg/J) et le flux moyen de sortie est quasiment similaire dans les deux cas (0,02 kg/J) (Figure D-27). Enfin, cette modélisation met en évidence un abattement de 0,74 kg de glyphosate entre l'entrée et la sortie du marais, soit le quart des apports totaux.

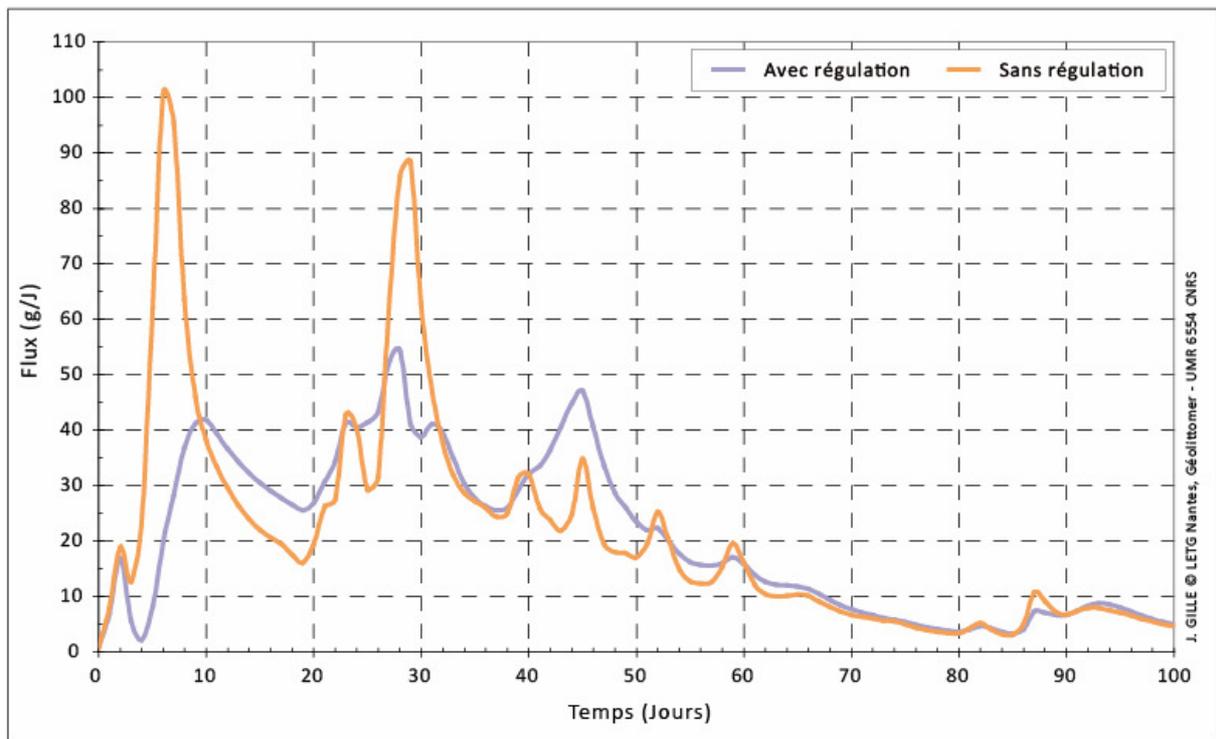


Figure D-27 : Evolution des flux de glyphosate au Port du Collet

D.3 Chaînage des modèles

D.3.1	Modèle SWAT.....	212
D.3.2	Modèle Mars 2D.....	213
D.3.3	Mise en œuvre à l'échelle du BVBB et de la Baie de Bourgneuf.....	213
D.3.4	Calibration et validation.....	215

La zone d'étude est constituée de trois compartiments hydrologiques distincts, avec des fonctionnements différents (Figure D-28). Un modèle est donc utilisé pour chaque compartiment afin de tenir compte des particularités de chacun. Trois modèles sont à cet effet chaînés pour étudier la circulation des flux d'eau dans les compartiments qui sont traversés : un premier (SWAT) pour les bassins versants, générateurs des flux, un second (MASCARET) pour la zone transitoire constituée des marais maritimes et un dernier (MARS 2D) pour la baie de Bourgneuf, réceptacle des flux.



Figure D-28 : Trois compartiments hydrologiques distincts

Il existe plusieurs modalités de couplages des modèles plus ou moins complexes selon les objectifs et les moyens (Tableau D-11).

Si dans la réalité il existe des rétroactions entre ces trois compartiments (effet des marées, inversions de courant dus au remplissage du marais salé, ...), elles sont à ce jour pas toutes identifiées et conceptualisées. Elles sont par conséquent écartées. Les modélisations se succèdent les unes après les autres, en cascade d'amont vers l'aval, d'où le terme retenu de chaînage des modèles. Le forçage des entrées se réalise ponctuellement au niveau des exutoires du modèle en amont. Le chaînage des modèles n'est pas automatisé en raison de la grande diversité et de la complexité des modèles eux-mêmes. Leur intégration au sein d'un outil unique est exclu dans le

cadre du programme GERRICO [Baud et Guillaudeau, 2010a, 2010b]. En revanche, les modèles utilisés pour modéliser la dynamique des flux au sein de chaque compartiment sont constitués de plusieurs modèles / modules couplés [Luck, 2004b ; Ménesguen *et al.*, 2007 ; Neitsch *et al.*, 2002].

Modalités de couplages	Du plus simple au plus complexe
Amont → Aval	Cascade simple, unidirectionnelle	Cascade complexe, partiellement rétroactive
Conditions limites et forçages	Pontuels, ou localisés aux frontières et interfaces	Spatialement distribués, sources volumiques
Structure du couplage	Couplage équationnel, interne au modèle	Couplage logiciel, externe (coupleur)

Tableau D-11 : Modalités de couplages des modèles
[Abadou *et al.*, 2009]

D.3.1 Modèle SWAT

Le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil Water Assessment Tool) développé par l'Agricultural Research Service (ARS) de l'USDA (United State Department of Agriculture) est un modèle physique semi-distribué. Il permet de simuler les impacts sur l'eau des activités humaines et des aménagements dans les bassins versants et d'évaluer les flux d'eau, de sédiments et de nutriments dans la zone racinaire, la nappe et les cours d'eau aux pas de temps journalier, mensuel ou annuel. Les processus hydrologiques simulés dans le sol sont le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration, le prélèvement par les végétaux, l'écoulement latéral et l'écoulement vers des horizons inférieurs [Neitsch *et al.*, 2002]. L'unité spatiale de base aux calculs de SWAT est l'unité de réponse hydrologique. Elle constitue le résultat de la combinaison d'un type de sol, d'une classe d'occupation du sol et d'un bassin versant. Dans chacune, les volumes représentés sont le sol, l'aquifère peu profond et l'aquifère profond. Le modèle SWAT suppose que chaque unité de réponse hydrologique présente un comportement agro-hydrologique homogène et des pratiques de gestion communes [Laurent *et al.*, 2007]. L'interfaçage de ce modèle avec un système d'information géographique comme ArcView (ESRI) permet de spatialiser l'information et de visualiser les résultats.

SWAT a été validé sur de nombreux bassins dans le monde depuis les années 2000. Il a également été utilisé sur plusieurs bassins versants côtiers en Loire-Atlantique et Bretagne [Bougeard *et al.*, 2008 ; Lomakine, 2005 ; Rollo, 2006, 2012].

D.3.2 Modèle Mars 2D

Le modèle MARS 2D est un modèle hydrodynamique développé par l'Ifremer, qui permet de suivre l'évolution des flux d'eau et de matières dans la baie. Le comportement physique du système est décrit par les équations de Saint-Venant. Il effectue le calcul des courants, des hauteurs d'eau et des concentrations en substances dissoutes dans un écoulement liquide plan, quasi-horizontale. C'est un modèle dit 2DH, c'est-à-dire à deux dimensions spatiales horizontales et à valeurs moyennées sur la verticale. Trois types d'informations sont nécessaires pour le faire tourner : la bathymétrie du domaine, les conditions aux limites sur les frontières ouvertes du domaine et les flux d'eau et de matières dissoutes à l'intérieur du domaine (rivières, émissaires...) [Stanisière *et al.*, 2006]. Ce modèle mathématique utilise une technique d'emboîtement de modèles gigognes permettant de travailler à l'échelle de la baie ou du parc ostréicole (maille régulière de 75 m). Les résultats sont stockés dans une matrice multidimensionnelle qui permet une exploitation graphique sous forme de courbes d'évolution temporelle d'une (des) variable(s) à une maille du modèle ou de sortir des fichiers maillés à un instant donné [Gille *et al.*, 2010].

MARS 2D est utilisé depuis plusieurs années dans les zones côtières et estuariennes [Huret *et al.*, 2005 ; Jeanneret *et al.*, 2006 ; Lazure et Dumas, 2008 ; Ménesguen et Gohin, 2006 ; Plus *et al.*, 2009 ; Plus *et al.*, 2006a ; Plus *et al.*, 2006b ; Riou *et al.*, 2007 ; Stanisière *et al.*, 2006 ; Thomas *et al.*, 2012].

Les éléments chimiques ou bactériologiques sont traités par une équation dite d'advection-diffusion, correspondant respectivement au transport et à la dispersion. Un terme de décroissance peut être ajouté pour prendre en compte la dégradation de certaines molécules ou la mortalité des bactéries, dont le comportement n'est pas conservatif. Dans le cas des germes tests *E. Coli*, par exemple, c'est la valeur du T90 (temps au bout duquel 90 % des bactéries ont disparu) qui est prise en compte. La nature même du code de calcul (2DH) fait qu'il ne s'applique qu'à des substances dissoutes dans l'eau : le transport des sédiments n'est pas reproduit dans cette version du modèle [Baud et Guillaudeau, 2010b].

D.3.3 Mise en œuvre à l'échelle du BVBB et de la Baie de Bourgneuf

La prise en main et la mise en œuvre de ces modèles a nécessité beaucoup de temps. Au cours de cette étude, plusieurs chaînages ont été réalisés pour en tester la faisabilité, en attendant que les trois modèles soient opérationnels [Baud et Guillaudeau, 2010b ; Gille, 2011b ; Gille *et al.*, 2010 ; Gille *et al.*, 2009]. Suite au changement de stratégie opéré en amont avec le modèle SWAT (cf Annexe 4, p.307) le chaînage final avec l'ensemble des étiers dans le marais n'a pas pu avoir lieu. Les résultats présentés ci-après se limiteront donc à montrer l'intérêt et la faisabilité d'un tel chaînage de modèles.

Seul le Falleron y est modélisé dans le marais (Figure D-29). Les données en entrée sont le débit et les concentrations de nitrate⁴⁸, simulés par le modèle SWAT pour le bassin versant du Falleron. En sortie, ces données viennent ensuite alimenter le modèle MARS 2D au niveau du Port du Collet pour voir l'évolution du nitrate dans la baie.

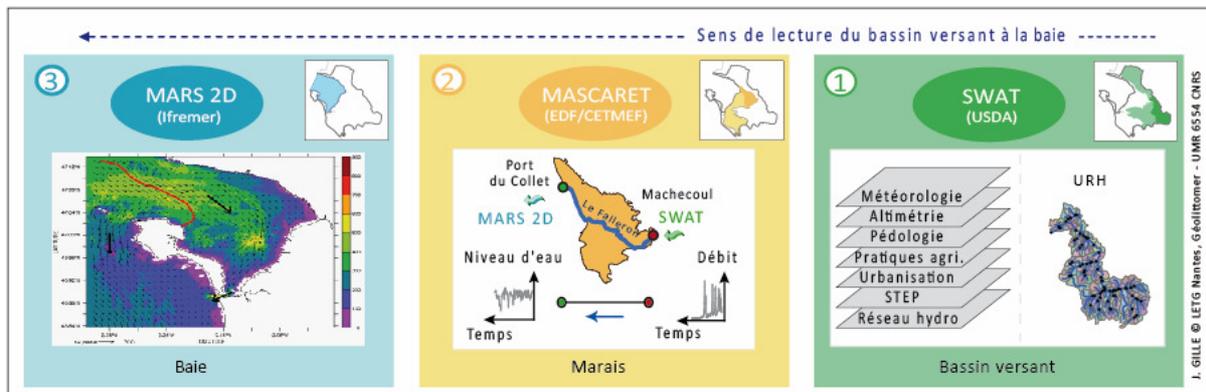


Figure D-29 : Chaînage des modèles

La simulation débute le 10 septembre 2006 et se termine le 09 octobre 2006. Au cours de cette période, deux événements pluvieux importants (le 33^e et le 13^e en 2006), à un jour d'intervalle, générèrent deux pics de nitrate dans les eaux à l'entrée du marais à Machecoul pendant une semaine (Figure D-30).

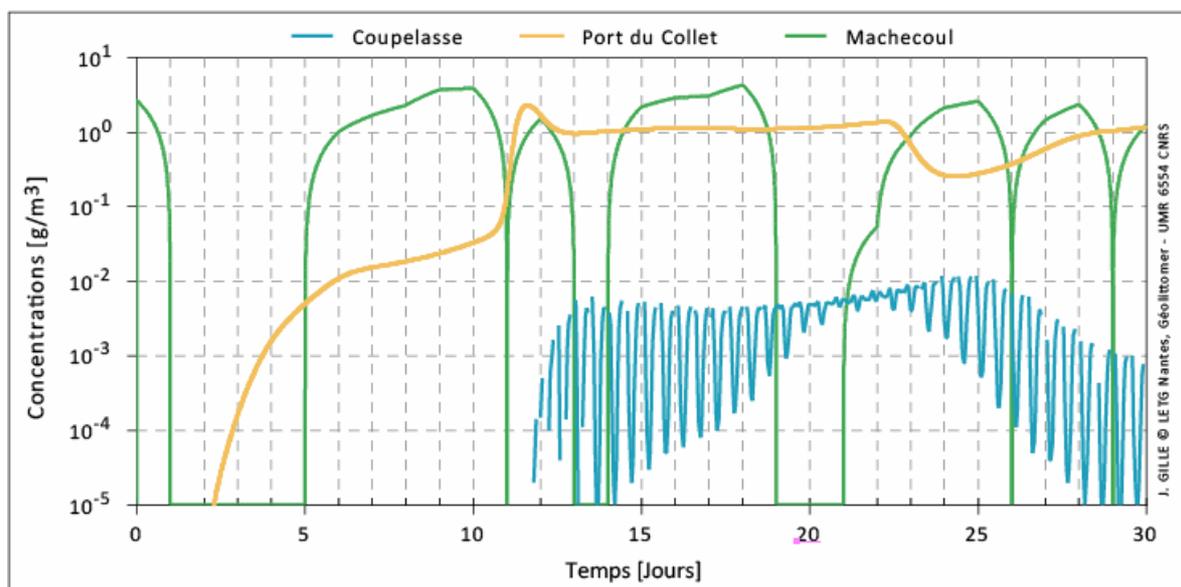


Figure D-30 : Evolution des concentrations de nitrate de l'entrée du marais jusqu'aux parcs conchylicoles de la Coupelasse

⁴⁸ A ce stade de l'étude, la modélisation portait sur le nitrate. Ce n'est que plus tard qu'elle fut orientée sur un pesticide.

L'évolution du nitrate dans le marais est modélisée le long du Falleron, dans les conditions suivantes : un seul tronçon de 17868 m de long, une profondeur de 3 m et une largeur de 8 m, une pente hydraulique de 0,03 pour mille, un coefficient de Strickler égal à 33, un réseau curé, sans pertes de charge et tous les vannages ouverts. Certains paramètres météorologiques utiles pour la modélisation des flux de nitrate étaient en cours d'acquisition. De ce fait, ils n'ont pu être pris en compte [Gille *et al.*, 2010].

Le nitrate arrive au Port du Collet 6 jours après son apparition à Machecoul et y disparaît au bout de 21 jours, ce qui représente une présence d'environ 14 jours au Port du Collet. L'évolution des concentrations en mer suit une double sinusoïde : la première est semi-diurne tandis que la seconde est semi-mensuelle et se calque sur celle des coefficients de marée.

Le nitrate augmente quasiment simultanément au Port du Collet et à la Coupelasse, mais diminue de manière différente. La décroissance à la sortie du Falleron est « brutale » (2 jours) tandis que celle du côté marin est plus douce (6 jours) et sinusoïdale comme celle de la marée.

Le nitrate met 10 jours à arriver sur les parcs ostréicoles à partir du Port du Collet. Sa dilution dans l'eau de mer est bien visible (environ 1000 fois). La concentration croît lentement durant 2 semaines environ. La simulation n'est pas assez longue pour voir le phénomène disparaître totalement à la Coupelasse. Toutefois elle est inférieure à 10^{-4} u/m³ pour une valeur proche de 1 u/m³ à Machecoul.

En dépit des hypothèses de modélisations et des conditions initiales, ce chaînage montre que la qualité de l'eau peut être suivie sur l'ensemble du continuum terre-mer, avec la prise en compte du marais. Les temps de transfert et la dilution peuvent ainsi être estimées dans chaque compartiment.

Une fois opérationnel, ce type de chaînage peut s'avérer utile pour la mise en place d'une GIZC. Plusieurs scénarii peuvent ainsi être testés pour une meilleure gestion des milieux anthropisés dans le but d'améliorer la qualité des eaux. Ces prévisions serviraient ensuite de base au dialogue et à la prise de décision pour engager des mesures favorables aux activités en zone côtière, comme les cultures marines par exemple.

D.3.4 Calibration et validation

Le calcul hydraulique est sujet fortement à l'incertitude à cause de la complexité des écoulements hydrauliques dans une géométrie naturelle de lit, elle-même complexe, avec des interactions perturbées par les fluctuations du type de couverture végétale des sols immergés. Ces sources d'incertitude peuvent provenir [MEDAD, 2007b] :

- des données mesurées, soumises aux incertitudes de la mesure elle-même ;

- de la représentativité des données, potentiellement affectée par leur provenance, leur âge ;
- des hypothèses faites par l'hydraulicien pour remplacer les données manquantes ;
- des hypothèses faites par l'hydraulicien pour mettre en œuvre un outil d'analyse ;
- de l'évolutivité des données significatives.

A ces sources « techniques » d'incertitude peut s'ajouter l'incertitude « décisionnelle » liée à la définition sécuritaire ou non des hypothèses de travail. Elle peut être alors caractérisée par l'élaboration d'un scénario « moyen » et d'un scénario « précaution » ou encore d'un scénario « minorant ».

La calibration représente qu'une partie du processus de modélisation. L'objectif est d'ajuster la valeur des paramètres du modèle afin de reproduire la réalité avec un maximum de vraisemblance [Refsgaard et Henriksen, 2004]. Les données sont nécessaires à chaque étape du processus de modélisation (Figure D-31). Un jeu de données distinct est utilisé pour la calibration et pour la validation.

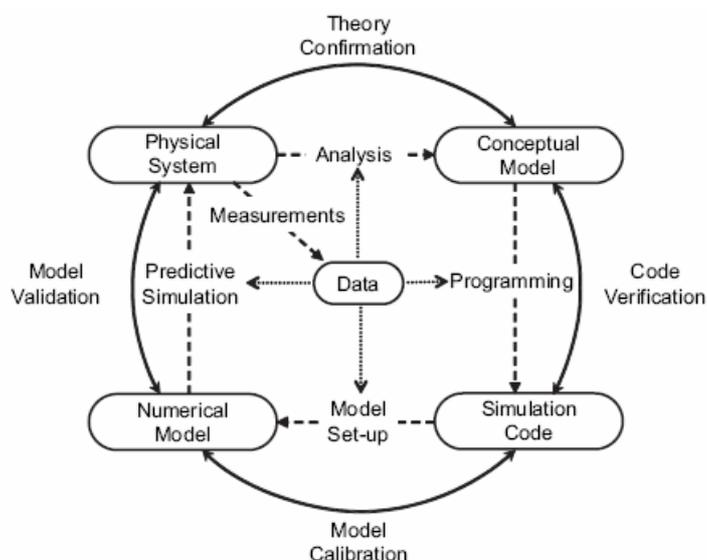


Figure D-31 : Place des données dans le processus de modélisation
[Vidal et al., 2007]

En hydrologie, la vérité n'est pas visée. Seuls la cohérence, la plausibilité, l'ordre de grandeur et l'incertitude associée sont recherchés. En testant plusieurs valeurs plausibles, la sensibilité du modèle peut donc être évaluée. En revanche, l'incertitude sur l'estimation d'un paramètre est moins aisée. Une fourchette ne peut pas toujours être déterminée [MEDAD, 2007a]. Le recours aux statistiques peut s'avérer utile pour calculer le maximum de vraisemblance d'un paramètre [Couplet *et al.*, 2010] ou la recherche d'estimateurs de quantile avec une faible variance [Arnaud *et al.*, 2010].

L'étude de la sensibilité des paramètres tend ainsi à supprimer toutes pratiques abusives des modélisateurs, dont le but est la recherche de la correspondance entre les

données de terrain et les résultats du modèle à tout prix, au détriment de la signification physique des paramètres [Cunge, 2003 ; Guinot et Gourbesville, 2003 ; Sargent, 2009 ; van der Perk et Bierkens, 1997 ; Vidal *et al.*, 2007]. Cette étape devient rapidement coûteuse en temps de calcul dès que la recherche de la meilleure adéquation des résultats avec la réalité est requise (Figure D-32). Le coût de l'étude de la sensibilité du modèle varie entre 500 et 6000 euros, en fonction du degré d'importance porté à cette évaluation [MEDAD, 2007b].

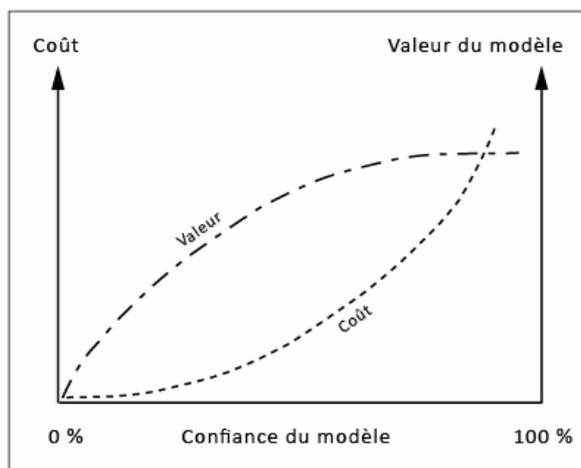


Figure D-32 : Confiance du modèle
(d'après [Sargent, 2009])

La calibration du modèle SWAT (cf Annexe 4, p.301) a été faite sur le bassin versant du Falleron pour l'hydrologie sur 9 ans en calibration (1997-2005) et sur 2 ans en validation (2006-2007). La méthodologie utilisée est une approche stochastique basée sur une analyse d'incertitude. Le fonctionnement du modèle est étudié sous la forme d'une bande de prédiction de l'incertitude qui intègre toutes les incertitudes inhérentes à une procédure de calage. Les résultats produits en sortie sont représentés sous la forme de plages de valeurs pour les paramètres calibrés et les résultats simulés. Cette méthodologie est préférée à l'approche déterministe, car il existe de nombreuses simulations uniques qui fournissent des solutions proches mais avec des jeux de paramètres très différents en entrée.

La fiabilité du modèle hydrodynamique dépend, entre autre, de la qualité des données de la bathymétrie du secteur d'étude. Les données bathymétriques disponibles pour la baie de Bourgneuf étaient très partielles. Une campagne topographique aéroportée (LIDAR) a donc été réalisée sur l'ensemble de l'estran et de l'île de Noirmoutier du 4 au 7 mai 2008. Les quelques données disponibles (annuaires de marées et de courants du SHOM) ont permis le calage du modèle MARS 2D. Il fut validé par les mesures de courant sur la verticale des deux ADCP (Figure D-33), installés le 7 octobre 2008 et retirés définitivement en juin 2010 : un entre la pointe Saint Gildas et l'île de Noirmoutier et l'autre à proximité des Moutiers-en-Retz [Baud et Guillaudeau, 2010b].

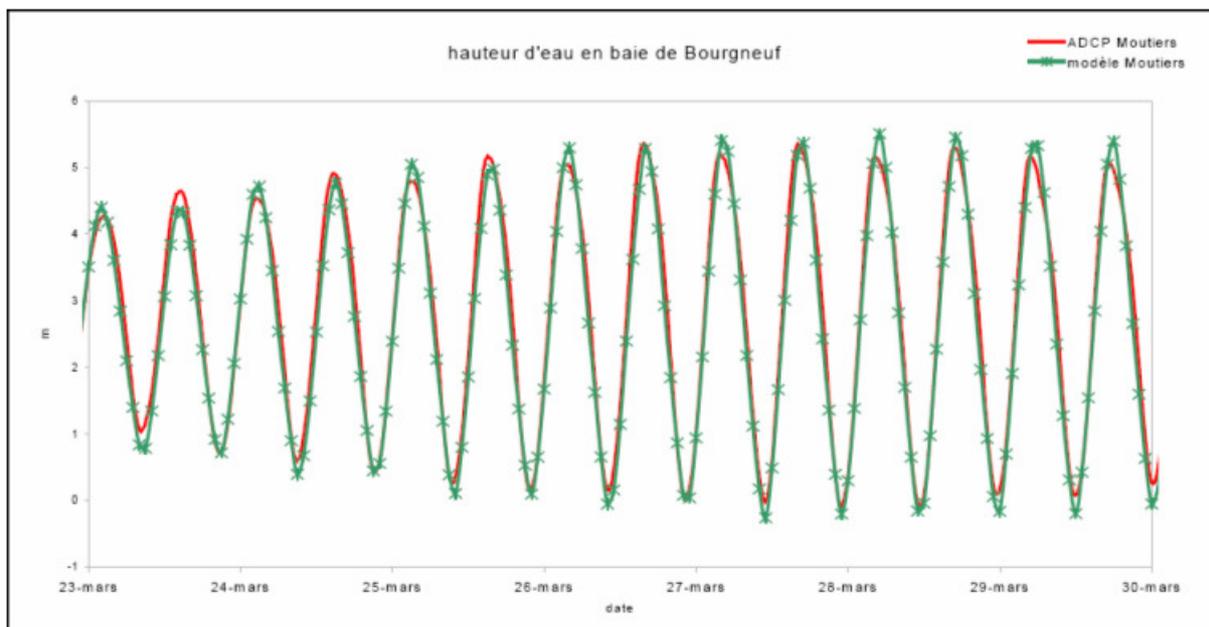


Figure D-33 : Validation des hauteurs d'eau simulées par MARS 2D avec celles enregistrées par un ADCP
[Baud et Guillaudeau, 2010b]

E. Discussions

E.1	Avantages de Mascaret	221
E.2	Vers une meilleure modélisation des flux dans le marais.....	222
E.3	Intérêts du chaînage des modèles	225
E.4	Recommandations pour des études futures	227

E.1 Avantages de Mascaret

C'est la première fois que le modèle Mascaret est utilisé pour la modélisation des flux d'eau et de polluants dans un marais maritime. Son usage s'est révélé fructueux à plus d'un titre :

- Il ne nécessite pas de grosses ressources informatiques. Un ordinateur dans les « standards » actuels permet de réaliser des simulations dans des temps « raisonnables » [Malleron *et al.*, 2011].
- Il peut être intégré dans des plateformes de modélisation pour évaluer la sensibilité des paramètres ou suivre l'évolution des flux d'eau dans le continuum terre – mer [Abadou *et al.*, 2009 ; Gille *et al.*, 2010 ; Goutal et Demay, 2008 ; Malleron *et al.*, 2011].
- Des méthodes et des modules existent pour tester la sensibilité des paramètres, caler les paramètres à partir de données réelles, et définir les incertitudes des résultats.
- Le passage en open source de Mascaret offre la possibilité de modifier le code du module Tracer pour tenir compte des processus de dégradation d'une substance dans l'eau, faciliter le formatage de données. Cette évolution vers la diffusion libre du modèle favorise son expansion et tend à renforcer la communauté des utilisateurs, déjà bien active.
- Dans le cadre de la commande publique, il est important d'avoir une politique de pérennisation de la disponibilité des modélisations hydrauliques. L'usage de codes libres de bonne qualité et polyvalents offre la possibilité, à long terme, d'envisager la mise à disposition de modélisations libres, réutilisables et améliorables.
- Les dernières mises à jour du modèle et la rédaction de guides d'utilisateurs plus complets en facilitent la prise en main par ailleurs [EDF et CETMEF, 2011a, 2011b, 2011c].
- Au cours du temps, le profil en travers des chenaux subit des modifications naturelles et anthropiques (érosion, sédimentation, reprofilage ...). Il convient de procéder à de nouveaux levés pour vérifier la fiabilité des données, voire les réactualiser avant d'effectuer la modélisation des écoulements [Salomon, 2000]. A terme, ce modèle pourrait permettre d'étudier l'impact du reprofilage des

biefs (effondrement de berges si trop abruptes, augmentation de la capacité d'évacuation du chenal) ainsi que l'impact du degré d'envasement des biefs à l'aide du module Courlis.

E.2 Vers une meilleure modélisation des flux dans le marais

Dans cette étude, une des limites à la modélisation des flux dans le marais a été la gestion des flux d'eau et de polluant lorsque le débit de plein bord est atteint. Cette modélisation des flux dans le marais a donc été effectuée pour des périodes où le débit est « faible » (plus de 85 % des conditions hydrologiques rencontrées), afin d'éviter le débordement des chenaux. Une solution pour y remédier serait d'ajouter des zones d'expansion de crue (ou de stockage) de chaque côté du bief, afin de reconstituer le « lit majeur » (Figure E-1) et ainsi être capable de modéliser aussi bien des périodes de fort et de faible débit.

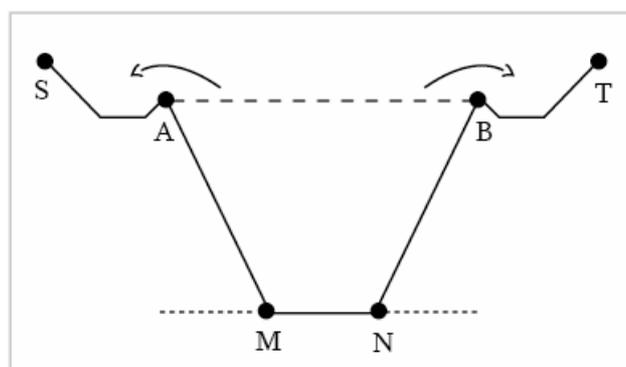


Figure E-1 : Profil en travers avec lit majeur

La gestion de l'eau dans le marais est basée sur les niveaux d'eau. Lors de certains événements climatiques, il peut y avoir une inondation. L'extension du « lit majeur » / zone de stockage n'est pas bien définie dans les marais. Elle peut varier suivant l'importance de la crue. Les relevés de laisse de crue sont donc nécessaires pour la prendre en compte [ISL Ingénierie, 2004 ; SCE, 2003].

Lorsque les zones de stockage sont susceptibles de générer des écoulements transversaux dans la plaine d'inondation, il est préconisé de recourir au couplage avec un système de casiers et/ou à une modélisation bidimensionnelle [EDF et CETMEF, 2011b ; Malleron *et al.*, 2011]. Mascaret peut servir à modéliser le champ d'inondation et les hauteurs de submersion par l'usage de casiers. A cet effet, le regroupement des biefs est nécessaire compte tenu de la densité du réseau hydrographique. Ce regroupement est conditionné par le nombre de connexions, la rugosité et la longueur des biefs de jonction [Giraud, 1992].

La modélisation hydrologique / hydraulique du Marais Breton est partielle. Seuls les étiers sont modélisés. Pour aller plus loin, il faudrait intégrer la transformation pluie-

débit sur les parcelles drainées comme le montre Giraud [1992] avec le modèle SIDRA, à partir de données hydro-pédologiques et climatiques. Les sorties de ce type de modèle peuvent ensuite être intégrées dans Mascaret par l'intermédiaire de débits d'apports au niveau du réseau hydrographique.

Enfin la prise en compte de la circulation de l'eau dans le réseau secondaire et tertiaire constitue par ailleurs un axe essentiel d'amélioration de la modélisation hydraulique. D'un point de vue conceptuel, il est probable que :

- la circulation aux niveaux des connexions primaire-secondaire s'effectue par effet piston lorsqu'un ouvrage hydraulique est fermé ;
- le réseau primaire joue le rôle de drain en période d'évacuation ;
- des cheminements préférentiels se créent au travers du réseau secondaire qui « court-circuitent » les grands axes d'écoulement.

La vérification de ces hypothèses reste difficile sur le terrain. Seul l'usage de traceurs semble permettre d'accéder à ce gain de connaissance mais leur mise en œuvre n'est pas autorisée ou acceptée par les maraîchers et acteurs locaux.

C'est aussi pour cette raison que la modélisation s'est axée sur le primaire uniquement dans le cadre de ce travail. Ce choix méthodologique⁴⁹ tend par conséquent à la sous-évaluation des volumes d'eau écoulés en sortie du marais et à son impact sur la qualité de l'eau.

La modélisation de la qualité de l'eau a été orientée principalement sur un pesticide dans le cadre de cette étude. Avec la mise en open source du code de Mascaret, la modélisation d'autres substances ou processus peuvent être envisagées.

Il conviendrait de voir si la présence de ces pesticides est due à des apports (usages agricoles ou domestiques) à proximité des points de prélèvements dans le marais ou est en provenance des bassins versants drainés par les étiers. Un des moyens pour y répondre serait de déterminer l'origine locale des transferts de polluants en délimitant les parcelles contribuant ou non au ruissellement et donc à un possible transfert.

Il existe plus d'une quarantaine d'indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation de pesticides. Leur échelle d'application va de la parcelle à l'échelle nationale, et s'adresse à un public varié (agriculteurs, décideurs institutionnels, chercheurs, ...) [Devillers *et al.*, 2005]. Ces méthodes permettent de hiérarchiser les risques de transferts des pesticides à partir de plusieurs types de données. Les données de base sont le parcellaire, le réseau hydrographique, le MNT, l'occupation du sol et les caractéristiques pédoclimatiques. Peuvent s'y ajouter d'autres données comme les pratiques culturales, les aménagements anthropiques, les périodes d'épandages ... pour affiner le classement [Aurousseau *et al.*, 1998 ; Aurousseau *et al.*, 2009 ; Balestrat, 2006 ; Gascuel-Oudoux *et al.*, 2009 ; Laubier, 2001 ; Tortrat *et al.*, 2004]. Parmi les données disponibles sur l'occupation du sol, seules celles du RPG, de

⁴⁹ Soustraction des volumes d'eau stockés dans le réseau hydrographique.

l'IPLI et du MOS possèdent une description suffisamment fine de l'espace. Mais aucune ne couvre l'ensemble du secteur d'étude, les deux premières pour des raisons méthodologiques, la troisième étant limitée à la Loire-Atlantique.

Le risque d'entraînement d'éléments particuliers et dissous dans le marais dépend de la nature des sols et du mode de drainage (Figure E-2). Aucune donnée n'est à disposition à ce jour pour tenir compte de cette hétérogénéité spatiale.

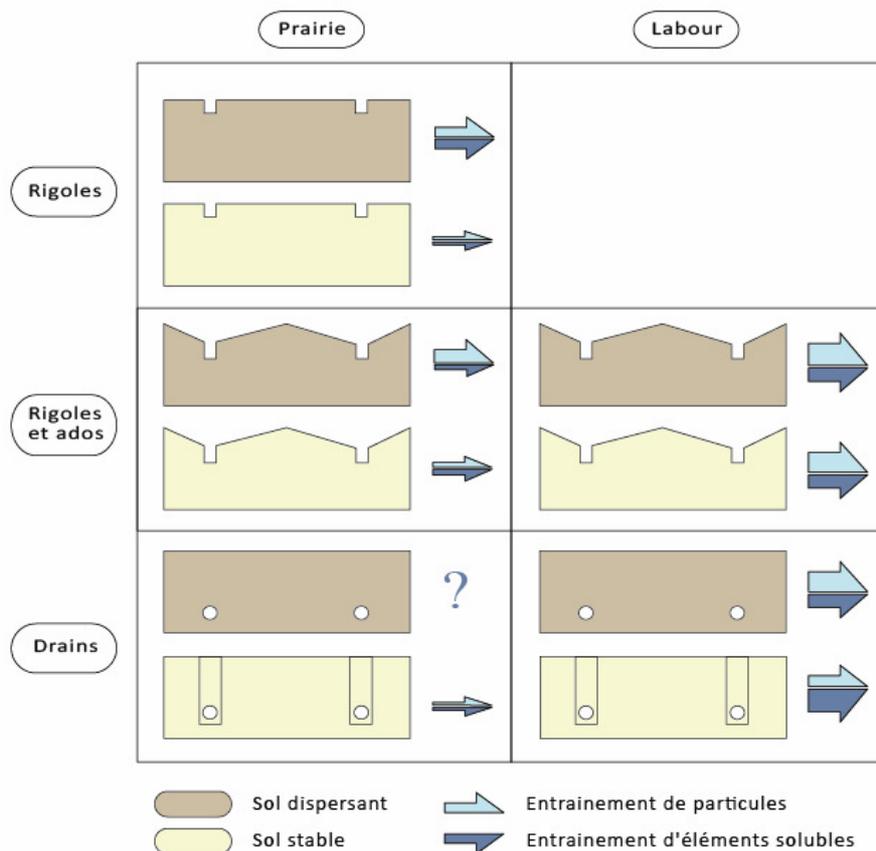


Figure E-2 : Schéma de risque d'entraînement d'éléments particuliers et solubles sous différents systèmes de drainage
(d'après [Chevallier, 1991])

Les transferts de surface sont très sensibles aux variations de topographie. Etant importantes dans les marais et d'amplitude inframétrique à métrique, la mise en œuvre de ces méthodes nécessite d'avoir une connaissance fine du relief. Ce gain d'information dans les marais requiert des données de télédétection à très haute résolution spatiale [Long et Pavelsky, 2013 ; Marani *et al.*, 2006 ; Silvestri *et al.*, 2003 ; Töyrä et Pietroniro, 2005]. Depuis la fin 2011, le Marais Breton est couvert par un modèle altimétrique continu terre-mer (Litto3D) [Martinoty, 2011]. Quelle que soit la zone considérée, sa précision en altimétrie est meilleure que 0,20 m et en planimétrie, meilleure que 0,50 m [David, 2011]. L'arrivée de ce type de données permet d'envisager la mise en œuvre de ces méthodes de hiérarchisation des risques de transferts de pesticides.

Les marais maritimes sont localisés entre la terre et la mer. Ils sont donc des lieux de transfert, rétention, concentration, transformation, production et dégradation. Dans ce travail de modélisation, seules la dégradation et la dilution d'un pesticide sont prises en compte. Il faudrait coupler cette modélisation à un modèle biogéochimique pour tenter de prendre en compte l'ensemble des processus mis en jeu au cours du transit des flux d'eau dans le marais et ainsi évaluer son influence réelle sur la qualité de l'eau.

E.3 Intérêts du chaînage des modèles

L'intérêt du chaînage entre ces trois modèles réside dans la possibilité :

- d'évaluer l'impact des apports liés aux activités humaines sur la zone côtière ;
- de connaître les secteurs à risque, tant sur les bassins versants que dans la zone côtière ;
- d'élaborer des scénarii destinés à prévoir les effets de l'augmentation ou de la diminution des apports contaminants par les bassins versants et leur impact sur les zones conchylicoles par exemple, en fonction de conditions hydro-météorologiques ;
- de proposer des actions correctrices afin d'améliorer la qualité de l'eau et de garantir la durabilité des usages.

Le transfert des outils développés aux acteurs locaux n'est pas envisageable en l'état actuel. Ces outils nécessitent une certaine expertise pour le paramétrage des modèles en entrée et l'exploitation des résultats en sortie comme cela a pu être montré dans le cadre du programme GERRICO [Baud et Guillaudeau, 2010a, 2010b]. Mais avec quelques recherches complémentaires, ces travaux peuvent apporter une plus-value intéressante dans le diagnostic d'une zone humide (Figure E-3). En effet, ce genre de modélisation représente un nouvel outil, contribuant à l'établissement de scénarii et à la définition de programme d'actions. Hydroconcept utilise par exemple le logiciel azhur pour gérer les données et l'analyse fonctionnelle par UHC [Hydroconcept, 2010]. Il suffirait de développer des routines pour formater les données en sortie et faciliter l'implémentation des BD dans un modèle hydraulique 1D comme Mascaret.

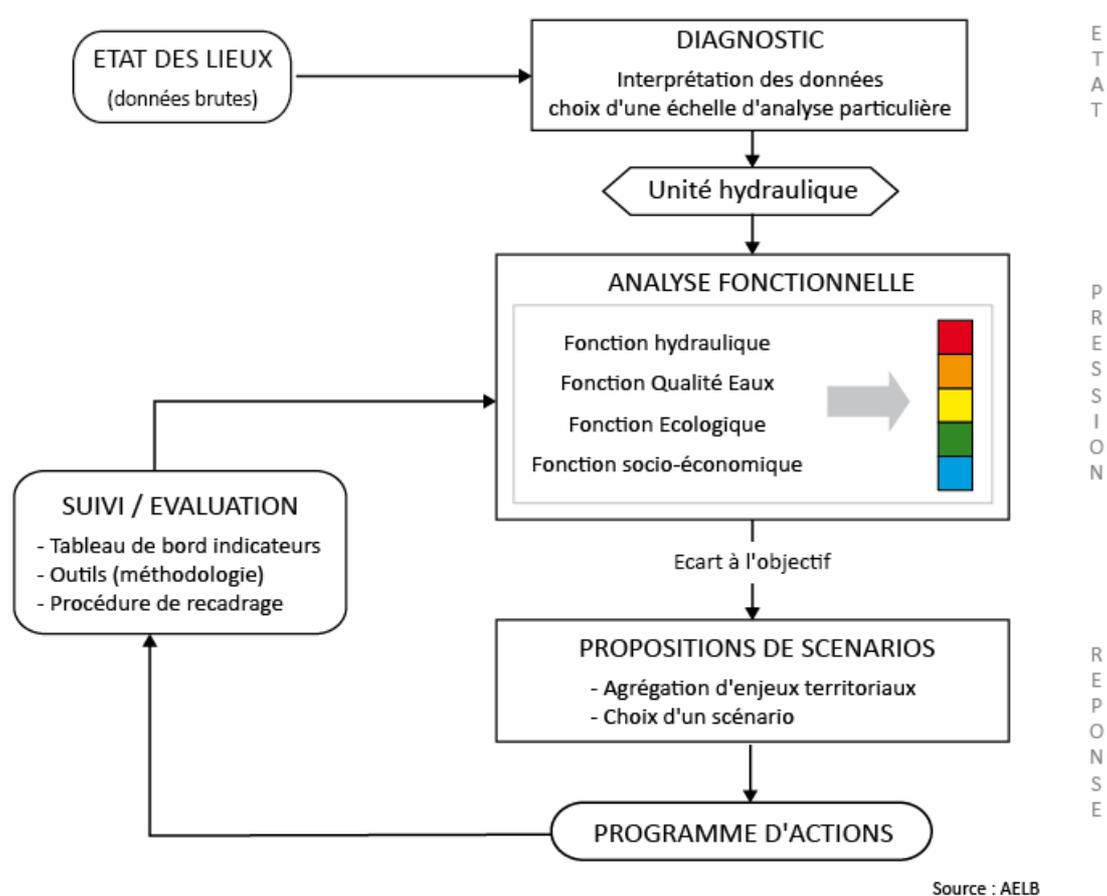


Figure E-3 : Démarche globale de la mise en place d'un CREZH
(d'après [Hydroconcept, 2010])

Cette méthodologie peut être transposable à d'autres secteurs, du moment qu'ils ont fait l'objet de CREZH et qu'un SIG multi-thématiques opérationnel existe. Cette méthode peut donc être appliquée à l'ensemble du Marais Breton, suite aux CREZH réalisés récemment par Hydroconcept [Hydroconcept, 2007b, 2009]. Il est possible de citer également les Communautés de Communes de l'île de Ré [Paticat, 2007], de l'île de Noirmoutier [Muller, 2006] et le GIP Loire Estuaire pour les marais nord Loire [GIP Loire Estuaire, 2009] qui sont impliqués depuis longtemps dans la gestion des marais et la structuration de l'information géographique. Après travaux, cette méthodologie peut également permettre la vérification des objectifs initiaux définis dans les contrats territoriaux [ADBVBB, 2008].

Les savoir-faire et l'expérience acquis au cours de ce travail de recherche peuvent être réutilisés pour l'étude des zones humides estuariennes et littorales comme dans le cadre des programmes de recherche LITEAU [MEEDDM, 2009b], Eaux & Territoires [MEEDDM, 2010c], le Plan Loire Grandeur Nature [CBLB, 2007], ou le nouveau programme de l'Agence Nationale de la Recherche intitulé Contaminants et Environnements : Métrologie, Santé, Adaptabilité, Comportements et Usages (CESA) [ANR, 2011].

E.4 Recommandations pour des études futures

E.4.1	Echantillonnage et méthodes analytiques.....	227
E.4.2	Accès et diffusion de l'information environnementale.....	230

E.4.1 Echantillonnage et méthodes analytiques

Les moyens mis à disposition dans le cadre de cette étude sont conséquents [Baud et Guillaudeau, 2010a ; Gille, 2010c], mais restent encore insuffisants pour aller jusqu'à la validation du modèle. Un panaché de pollution met plusieurs jours pour atteindre la baie. Les masses d'eau visitées lors d'une même journée de terrain correspondent donc à des conditions hydro-météorologiques et des usages du sol différents. Pour pouvoir valider le modèle, il faudrait des mesures en continu, avec une fréquence infra journalière et une connaissance fine de la gestion hydraulique (ouverture / fermeture des écluses, niveaux d'eau dans les chenaux) afin de suivre l'évolution du panaché dans le marais.

Le suivi des flux entrants et sortants du marais permet de mettre en évidence une amélioration de la qualité de l'eau, mais ne permet pas de comprendre les phénomènes mis en jeu. Ce gain de connaissance nécessite un échantillonnage spatio-temporel plus fin, notamment à l'intérieur du marais.

La campagne de mesures de 2009 a permis de mettre en évidence l'amélioration de la qualité de l'eau entre l'entrée et la sortie du marais pour les pesticides. La comparaison de ces analyses avec le point suivi par l'Observatoire de l'Eau à l'intérieur du marais (Port la Roche) est complexe. L'interprétation est confuse et rend difficile leur exploitation pour expliquer l'amélioration de la qualité de l'eau en privilégiant un processus plutôt qu'un autre. 28 pesticides sont détectés à la fois à Machecoul et au Port du Fresne au moins une fois. 13 d'entre eux le sont également à l'écluse du Fresne (Tableau E-1).

Ces résultats montrent donc l'importance du choix du laboratoire pour l'analyse des échantillons et des méthodes analytiques. Les méthodes d'analyse pour une substance ou un groupe de substances diffèrent entre laboratoires, ainsi que la précision des analyses⁵⁰ [AQUASCOP, 2010]. Il est nécessaire de se renseigner sur la méthode analytique utilisée par chaque laboratoire. Dans le cas où elles sont dissemblables, le biais peut venir du fait qu'une des méthodes produit des métabolites. Avant toute mise en place d'une campagne de prélèvement sur le terrain, il est primordial de réaliser une analyse interlaboratoire et/ou utiliser des matériaux de référence certifiés⁵¹ afin d'évaluer l'exactitude et la fiabilité des processus de mesure en laboratoire et *in situ* [Brunori *et al.*, 2007 ; Gille, 2006 ; Gonzalez *et al.*, 2007 ; Ricci *et al.*, 2007 ; Ricci *et al.*, 2012 ; Strub *et al.*, 2008].

La distribution d'un micropolluant organique dans le milieu naturel est fonction de la solubilité dans l'eau (S), du coefficient de distribution eau/sédiment (K_{OC}) et du logarithme du coefficient de distribution octanol/eau ($\log K_{OW}$), fortement dépendant des conditions opératoires et notamment du pH (Tableau E-2).

S (mg/L)	K_{OC} (cm ³ /g)	$\log K_{OW}$
<10 : peu soluble	< 200 : peu absorbable	< 2 : bioaccumulation négligeable
10 < < 20 : moyennement soluble	200 < < 1000 : moyennement absorbable	3 < : bioaccumulation élevée
20 < : soluble	1000 < : adsorbable	---

Tableau E-2 : Valeurs limites de paramètres de solubilité et de distribution pour les micropolluants organiques
(d'après [Pontié, 2010])

Les concentrations observées dans le marais peuvent s'expliquer par la remise en suspension des polluants piégés dans les sédiments [Spongberg *et al.*, 2004]. Ce phénomène peut avoir plusieurs origines : soit causé par un écoulement turbulent lors du prélèvement ou jusqu'à 24-48 heures auparavant, soit provoqué par une augmentation de la minéralisation de l'eau [Ståhlberg *et al.*, 2006]. La re-suspension peut être aussi due au matériel préleveur, surtout pour de faibles hauteurs d'eau [AELB, 2006 ; Anras, 2004 ; OMM, 1994].

Les étiers sont le lieu de nombreuses réactions d'adsorption sur des particules organiques et minérales. Pour pousser les investigations, il aurait été intéressant de coupler à ces analyses dans l'eau l'extraction des pesticides sur les particules en

⁵⁰ Le LEAV donne la concentration des pesticides au millième alors que c'est au centième pour l'IDAC.

⁵¹ Echantillon d'eaux naturelles dont la concentration est certifiée à la suite d'analyses répétées utilisant différentes méthodes dans un ou plusieurs laboratoires accrédités.

fonction des formes majeures du soluté [Anras, 2004 ; Petit *et al.*, 1995 ; Pomiès *et al.*, 2013 ; Pontié, 2010].

Enfin, la dégradation du glyphosate et de l'AMPA est ralentie par la présence de certains métaux comme le cuivre et le fer [Aparicio *et al.*, 2013 ; Tsui et Chu, 2008]. Leur désorption est favorisée par la présence du phosphate [Prata *et al.*, 2003 ; Schuette, 1998]. Le suivi régulier de ces substances dans le marais devrait permettre de comprendre les processus d'adsorption et de dégradation qui s'y déroulent, et ainsi expliquer le rallongement du temps de demi-vie observé à l'écluse du Fresne (cf D.1.3, p.182).

E.4.2 Accès et diffusion de l'information environnementale

L'évaluation des BD existantes a révélé quelques lacunes, d'où la mise en place d'un protocole de terrain à minima pour l'acquisition de ces nouvelles données [Gille, 2009 ; Malgogne, 2009]. En effet, ce suivi ne peut être l'apanage que d'une seule personne. La mise en place d'un protocole *ad hoc* nécessite plus d'équipements et de personnes comme ont pu le montrer les études sur les marais de Moëze et de Rochefort (Charente Maritime) [Anras, 1997 ; Fashi, 2000 ; Giraud, 1992 ; Giraud *et al.*, 1991 ; Weng *et al.*, 2003]. L'atteinte de ces objectifs passe par la fédération et la coordination des études menées sur ces milieux littoraux, comme le démontre le projet GERRICO avec l'Institut Universitaire Mer et Littoral [Baud et Guillaudeau, 2010a].

De multiples usages peuvent être dégagés d'une même BD [Hansen, 1996]. La circulation et la dynamique des flux d'eau dans le marais est intéressante par exemple pour l'étude des peuplements piscicoles [Feunteun *et al.*, 1999], des macrophytes aquatiques [Gaston, 1995 ; Marchais, 1997 ; Mequignon *et al.*, 2005], des macroalgues [Bouquet et Pillet, 2008], des oiseaux [Bretagnolle *et al.*, 2002 ; Untermaier, 2007], la gestion et l'entretien du réseau hydrographique [Dutartre *et al.*, 1998], les pratiques agricoles [Brouca et Drique, 1998], ...

L'intérêt est à la mutualisation des moyens matériels, humains et financiers. Dans le cadre des appels à projet, il est donc important de développer des collaborations plus accrues entre les gestionnaires et les organismes privés / publics travaillant sur ces secteurs. Le FMA y contribue en coordonnant et animant des pôles de compétences sur l'ensemble des zones humides de la façade Manche, Atlantique et Mer du Nord. Son but est d'améliorer la connaissance à la fois des acteurs et de leurs actions mais également des habitats, des espèces et processus hydrologiques et écologiques ; de valoriser et de diffuser des informations et des connaissances ; d'informer et de sensibiliser tous les publics [Baron, 1999 ; Grasset, 2007].

Avec la création du Réseau Partenarial des Données sur les Zones Humides en 2009, le FMA cherche à aller plus loin en visant [FMA, 2009] :

- le « droit à l'information du citoyen » ;
- le renforcement du fonctionnement en réseau des acteurs ;
- la mutualisation des données à forte valeur ajoutée ;
- la création d'une interface de consultation de données et d'informations géographiques sur les zones humides et les rivières (prise en compte du bassin versant) via des réseaux de partenaires ;
- l'automatisation de la représentation cartographique à différentes échelles selon les données et les référentiels gratuits et disponibles ;
- l'intégration des projets locaux dans des démarches similaires à une échelle plus fine (départementale, régionale, nationale, européenne,...).

Il conviendrait de développer la même chose pour la recherche afin de :

- s'assurer d'une certaine continuité dans les projets de recherche,
- disposer de séries de données d'observation acquises dans des conditions normalisées,
- capitaliser les savoir-faire et ainsi, garantir le transfert des connaissances scientifiques et techniques.

A ce titre, la mise en place d'une approche pluridisciplinaire est nécessaire et souhaitable sur une même zone humide littorale (zone atelier, Bassin Versant de Recherche Expérimental) au sein d'une même structure (Observatoires de Recherche en Environnement, Observatoire des Sciences de l'Univers) [Gourmelon *et al.*, 2005], à l'image des actions thématiques du programme EC2CO sur l'écosphère continentale et côtière [CNRS-INSU, 2011] ou encore celles sur les zones humides du pourtour méditerranéen [MedWet, 2012].

F. Conclusion générale

De nos jours, la protection et la mise en valeur des zones humides font l'objet de nombreuses questions au niveau local, national et européen. Les acteurs des zones humides se doivent de redéfinir ensemble leurs stratégies en tenant compte des quatre aspects qualitatifs majeurs :

- les activités économiques et le développement durable,
- la préservation des qualités des milieux,
- la gestion de l'eau et des réseaux hydrauliques,
- les hommes et leur vie sociale.

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans une problématique générale de gestion de l'eau et de sa qualité dans les marais littoraux de la façade atlantique française. L'objectif est de trouver un équilibre entre les intérêts économiques et écologiques. Plusieurs enseignements peuvent en être tirés (Figure F-1).

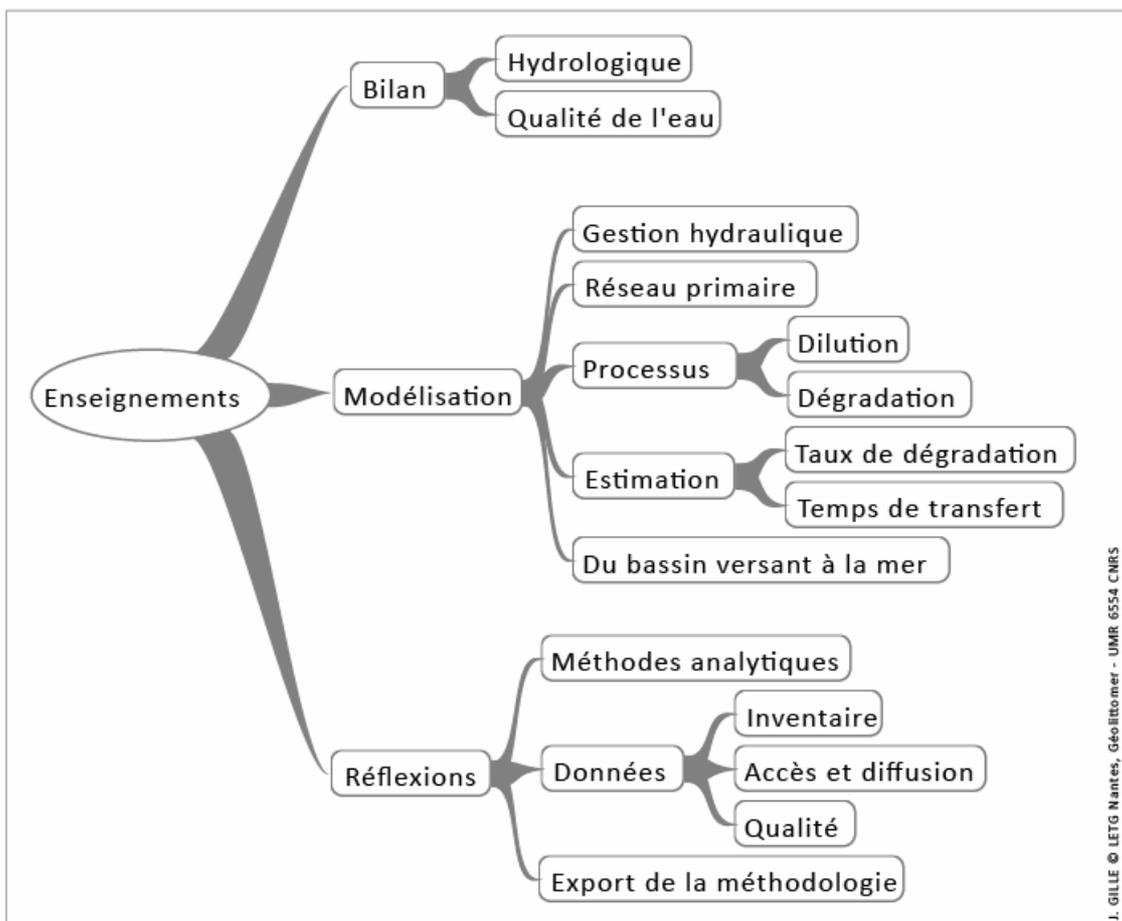


Figure F-1 : Enseignements de la thèse

La dynamique des flux d'eau est tout d'abord approchée avec le calcul du bilan hydrologique. Il met en évidence des périodes excédentaires et déficitaires en eau, justifiant ainsi la gestion hydraulique.

Le service de purification de l'eau et de traitement des eaux usées par les marais est souvent mis en avant. Aucune étude n'a été spécifiquement menée sur le Marais Breton jusqu'à présent [Bouscasse *et al.*, 2011b]. L'estimation du pouvoir épurateur d'un marais maritime repose généralement sur un bilan entrée/sortie des concentrations. Les données existantes et acquises au cours de cette étude mettent bien en évidence un gain au niveau de la qualité de l'eau. Cette étude démontre également qu'à l'intérieur du marais, les concentrations peuvent être plus élevées qu'à l'entrée. Elle marque donc l'existence de processus de stockage/relargage.

Ce travail de modélisation constitue une première du genre sur le BVBB. Il confirme qu'il est possible d'aller plus loin que ces approches empiriques, en calculant des temps de concentration, de résidence et de transfert dans le Marais Breton, en fonction de l'occupation du sol, des usages et des conditions hydro-météorologiques. Cette modélisation est basée sur le réseau primaire, soit les principaux axes d'écoulement. Les processus modélisés liés à la qualité de l'eau sont limités à la dilution et à la dégradation cinétique du premier ordre pour un pesticide. L'intégration du modèle de marais dans une chaîne de modèles prouve que des taux de dégradation et des temps de transfert peuvent être estimés et cartographiés en zone littorale. Cependant, ces essais de modélisation restent à calibrer et à valider.

L'inventaire et l'analyse des données existantes révèlent une forte hétérogénéité et des disparités dans l'échantillonnage spatio-temporel. La validation de telles études nécessite donc des efforts au niveau de l'acquisition et de la standardisation des données.

La création d'un SIG spécifique à la zone d'étude constitue un autre point fort de ce travail. Il pourra servir de base à des études futures sur la circulation et la qualité de l'eau dans le BVBB. Le développement d'un tel outil est préconisé dans le SAGE [ADBVB, 2004] et est inscrit dans le Contrat Territorial de Bassin Versant [ADBVB, 2008].

En replaçant les résultats de l'étude dans le processus de modélisation, cette thèse permet donc de comprendre le fonctionnement du marais. Elle propose un outil pour estimer son rôle sur la qualité de l'eau. Enfin, elle démontre son aide potentielle à la décision, bien que des études complémentaires devront être menées pour que cet outil puisse calculer en vue de prédire et agir.

Liste des sigles et acronymes

ABDVBB : Association pour le Développement du Bassin Versant de la Baie de Bourgneuf

ADCP : *Acoustic Doppler Current Profiler*

AELB : Agence de l'Eau Loire-Bretagne

AERU : Agriculture and Environment Research Unit

AMPA : Acide AminoMéthylPhosphorique

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BD : Base de Données

BVBB : Bassin Versant de la Baie de Bourgneuf

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

CBLB : Comité de Bassin Loire Bretagne

CE : Communauté Européenne

CEE : Communauté Economique Européenne

CEE-ONU : Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies

CEMAGREF : Centre d'Etudes du Machinisme, du Génie Rural, des Eaux et Forêts

CEP : Compagnie d'Exploitation des Ports

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

CGPC : Conseil Général des Ponts et Chaussées

CGGREF : Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CLE : Commission Locale de l'Eau

CLI : Chair et Liquide Intervalvaire

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CREZH : Contrat Restauration et Entretien de Zone Humide

CSEB : Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

DEB : Direction de l'Eau et de la Biodiversité

DGUHC : Direction Générale de l'Urbanisme de l'Habitat et de la Construction

DOCOB : DOcument d'OBjectif

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement

DRI : Direction de la Recherche et de l'Innovation

E. Coli : *Escherichia Coli*

EDF : Electricité De France

ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts

FDC : Fédération Départementale des Chasseurs

GERRICO : GEstion globale des Ressources marines et des RISques dans les espaces COtiers

GIP : Groupement d'Intérêt Public

GIZC : Gestion Intégrée des Zones Côtières

GNZH : Groupe National pour les Zones Humides

GPS : *Global Positioning System*

IFEN : Institut Français de l'ENvironnement

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

IGA : Inspection Générale de l'Administration

IGARUN : Institut de Géographie et d'Aménagement de l'Université de Nantes

IGE : Inspection Générale de l'Environnement

IGN : Institut de Géographie National

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et
l'Agriculture

LCHF : Laboratoire Centrale d'Hydraulique de France

LD : Limite de Détection

LEAV : Laboratoire de l'Environnement et de l'Alimentation de la Vendée

LER-MPL : Laboratoire Environnement Ressources Morbihan - Pays de la Loire

LIDAR : *LIght Detection And Ranging*

LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux

LQ : Limite de Quantification

LR : Languedoc Roussillon

MAE : Mesure Agro-Environnementale

MAP : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

MEDAD : Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durables

MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

MedWet : *Mediterranean Wetlands initiative*

MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer

MES : Matières En Suspension

MIAT : Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire

MMS : Mer Molécules Santé

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NGF : Nivellement Général de la France

OGAF : Opération Groupée d'Aménagement Foncier

OLAE : Opérations Locales Agro-Environnementales

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONZH : Observatoire National des Zones Humides

ONU : Organisation des Nations Unies

PdL : Pays de la Loire

PRPC : Préfecture de Région Poitou-Charentes

RA : Recensement Agricole

RF : République Française

RP : Recensement de la Population

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SAH : Syndicat d'Aménagement Hydraulique

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

SAU : Surface Agricole Utile

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SEQ : Système d'Évaluation de la Qualité

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SIG : Système d'Information Géographique

SMGEMB : Syndicat Mixte de Gestion Ecologique du Marais Breton

SMIDAP : Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de la Loire

SMMBMSJM : Syndicat Mixte des Marais de Beauvoir sur Mer et de Saint-Jean de Monts

SOeS : Service de l'Observation et des Statistiques

UMR : Unité Mixte de Recherche

SWAT : *Soil Water Assessment Tool*

UE : Union Européenne

UGB : Unité Gros Bétail

UHC : Unité Hydraulique Cohérente

Liste des figures

Figure A-1 : Différents éléments constitutifs d'un écosystème et leurs interactions	3
Figure A-2 : Hiérarchisation des systèmes écologiques	3
Figure A-3 : Répartition des zones humides d'importances majeures	4
Figure A-4 : Evolution de la perception des marais	5
Figure A-5 : Principaux textes internationaux se référant à la protection et à la gestion des zones humides entre 1971 et 2000	6
Figure A-6 : Politiques nationales de protection des espèces et des milieux de 1964 à 2004	8
Figure A-7 : Relations entre une définition de référence de zones humides et les critères, les indicateurs généraux ou spécifiques liés	9
Figure A-8 : Mille-feuille de la réglementation sur l'eau	10
Figure A-9 : Enchevêtrement d'acteurs institutionnels	11
Figure A-10 : Marais littoraux de la façade atlantique	12
Figure A-11 : Profil topographique type originel du littoral atlantique	12
Figure A-12 : Réseaux des chenaux sur les slikkes et les schorres.....	13
Figure A-13 : Dispositions conforme et contraire des marais maritimes	15
Figure A-14 : Ensemble des relations entre les caractéristiques des zones humides, les divers types de propriétés qui en découlent et leur valeur.....	19
Figure A-15 : Fonctions générées par les processus naturels internes des zones humides.....	20
Figure A-16 : Valeurs associées aux zones humides	20
Figure A-17 : Schéma récapitulatif des outils de protection des zones humides	22
Figure A-18 : Zones humides prestigieuses bénéficiant d'une multitude de mesures plus ou moins emboîtées de conservation ou de gestion aux objectifs en partie communs.....	24
Figure A-19 : Développement persistant des dégradations des zones humides entre 2000 et 2010	24
Figure A-20 : Evolution des surfaces des milieux humides moins préoccupante que leur état de conservation.....	25
Figure A-21 : Typologie des activités humaines et des usages des milieux côtiers.....	26
Figure A-22 : Zone OSPAR et son bassin hydrographique	27
Figure A-23 : Zones juridictionnelles de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, de la Convention OSPAR, de la Directive cadre sur l'eau de l'UE et de la Directive cadre Stratégie pour le milieu marin de l'UE.....	28
Figure A-24 : Organisation du projet GERRICO.....	31
Figure A-25 : Principe du chainage entre les modèles dans les différents compartiments	32
Figure A-26 : Modélisation du continuum terre-mer	33
Figure B-1 : Zones humides d'importance majeure de la région des Pays de la Loire	40
Figure B-2 : Emprise spatiale des communes du BVBB	40
Figure B-3 : Courbe hypsométrique du BVBB.....	41

Figure B-4 : Relief et entités géographiques du BVBB	41
Figure B-5 : Baie de Bourgneuf.....	44
Figure B-6 : Cinq valeurs des reliefs et des formes.....	45
Figure B-7 : Vues aériennes des différents secteurs du Marais Breton.....	48
Figure B-8 : Evolution de l'endiguement dans la baie de Bourgneuf.....	49
Figure B-9 : Evolution schématique de la gestion hydraulique le long d'un axe hydrographique traversant le marais.....	50
Figure B-10 : Zones hydrographiques du BVBB	52
Figure B-11 : Réseau hydrographique du BVBB.....	52
Figure B-12 : Diagramme ombrothermique à la station de Bouguenais.....	54
Figure B-13 : Répartition des cumuls annuels des précipitations de 2002 à 2007	55
Figure B-14 : Nombre moyen de jours de pluie par mois à la station de Bouguenais de 1980 à 2007	57
Figure B-15 : Répartition des cumuls mensuels de précipitations en fonction de l'intensité journalière à la station de Bouguenais de 1980 à 2007.....	57
Figure B-16 : Rose des vents annuelles	59
Figure B-17 : Localisation des deux stations de mesure directe d'insolation à proximité du BVBB	60
Figure B-18 : Répartition de la population sur le BVBB.....	62
Figure B-19 : Principaux types d'occupation du sol du BVBB.....	62
Figure B-20 : Occupation du sol du BVBB.....	63
Figure B-21 : Répartition de la surface agricole utile.....	64
Figure B-22 : Mortalité moyenne des naissains pour l'ensemble des bassins ostréicoles français.....	70
Figure B-23 : Évolution de la mortalité du naissain de captage et de la température de l'eau en baie de Bourgneuf en 2010	70
Figure B-24 : Périmètres de protection et d'inventaires.....	76
Figure B-25 : Principales contraintes liées à la ressource en eau par ordre de priorité.....	79
Figure B-26 : Schéma théorique du géosystème maraîchin atlantique	82
Figure B-27 : Syndicats de marais gérant le Marais Breton.....	83
Figure B-28 : Organisation de la gestion du Marais Breton.....	84
Figure B-29 : Circulation des flux d'eau au cours de la période hivernale.....	87
Figure B-30 : Circulation des flux d'eau au cours de la période estivale.....	88
Figure B-31 : Niveaux d'eau au Port la Roche en 2006	89
Figure B-32 : Niveaux d'eau au Port du Collet en 2006	90
Figure B-33 : Histogramme des pentes des bassins versants en amont du Marais Breton.....	92
Figure B-34 : Quantification de l'écoulement dans le BVBB.....	93
Figure B-35 : Schéma du contexte hydrogéologique de la partie Nord du Marais Breton	95
Figure B-36 : Evolution piézométrique de la nappe du bassin Eocène de Machecoul.....	96

Figure B-37 : Evolution du niveau de la nappe phréatique en fonction des précipitations à Bouin en 2006 (piézomètre du Pont Guérineau).....	97
Figure B-38 : Submersions marines dans la baie de Bourgneuf lors de la tempête Xynthia.....	99
Figure B-39 : Plans de Prévention des Risques Littoraux du BVBB.....	101
Figure B-40 : Zones inondables à l'entrée du Marais Breton, au niveau de Machecoul.....	102
Figure B-41 : Origine des produits rencontrés dans l'eau.....	104
Figure B-42 : Effets et actions sur le cycle écologique.....	105
Figure B-43 : Altérations physiques du Falleron.....	106
Figure B-44 : Altérations physiques du ruisseau du Grand Taizan.....	106
Figure B-45 : Evaluation de l'altération de la fonction hydraulique de la partie nord du Marais Breton.....	107
Figure B-46 : Degré d'envasement de la partie nord du Marais Breton.....	108
Figure B-47 : Localisation des stations étudiées pour la qualité de l'eau.....	109
Figure B-48 : Evolution de l'ammonium et du nitrite dans le marais doux.....	111
Figure B-49 : Evolution du nitrate et du phosphate dans le marais doux.....	112
Figure B-50 : Concentration en E. Coli au niveau du Port la Roche et de Machecoul de 2004 à 2006.....	113
Figure B-51 : Concentration en streptocoques au niveau du Port la Roche et de Machecoul de 2004 à 2006.....	114
Figure B-52 : Teneurs en E. Coli dans l'huître creuse à la Coupelasse.....	114
Figure B-53 : Concentrations totales de pesticides mesurées pour chaque point.....	116
Figure B-54 : Périodes d'application des produits phytosanitaires.....	119
Figure B-55 : Teneur en métaux dans l'huître creuse au niveau de la Coupelasse.....	120
Figure C-1 : Echelles de temps et d'espace des processus hydrologiques.....	130
Figure C-2 : Circulation des flux d'eau dans le continuum terre-mer.....	132
Figure C-3 : Construction et utilisation d'un SIG « Zones Humides ».....	133
Figure C-4 : Les trois systèmes.....	135
Figure C-5 : Fonctionnement d'un modèle.....	136
Figure C-6 : Différentes disciplines scientifiques impliquées dans l'étude des systèmes fluviaux et leurs objets d'analyse.....	138
Figure C-7 : Problématiques de la détermination du sens d'écoulement de l'eau.....	139
Figure C-8 : Arborescence des modèles utilisés en hydrodynamique.....	142
Figure C-9 : Architecture du logiciel Mascaret.....	144
Figure C-10 : Organigramme des données intégrées au SIG.....	148
Figure C-11 : Différents types d'acquisition des données.....	149
Figure C-12 : Exemple de problème d'interopérabilité.....	150
Figure C-13 : Détail des mesures réalisées dans un bief par Hydroconcept.....	153
Figure C-14 : Localisation des stations hydrométriques.....	156

Figure C-15 : Bilan des données disponibles par station météorologique pour la période du 1er janvier 2002 au 22 juin 2008.....	158
Figure C-16 : Paramètres d'échelle.....	159
Figure C-17 : Imperfections de l'échantillonnage	160
Figure C-18 : Localisation des sites de prélèvements	161
Figure C-19 : Bilan hydrologique d'une zone humide	166
Figure C-20 : Bilan hydrologique à l'entrée de la zone pilote de 2004 à 2007.....	168
Figure D-1 : Evolution des nutriments à l'entrée du marais au niveau de Machecoul.....	176
Figure D-2 : Concentration en coliformes totaux au niveau des trois sites échantillonnés en 2009	179
Figure D-3 : Concentration en E. Coli au niveau des trois sites échantillonnés en 2009	179
Figure D-4 : Concentration en streptocoques au niveau des trois sites échantillonnés en 2009.....	180
Figure D-5 : Evolution de la nature de la contamination fécale en 2009	181
Figures D-6 : Nombre de pesticides détectés	183
Figure D-7 : Concentrations totales de pesticides à Prigny en 2009	183
Figure D-8 : Concentrations totales de pesticides à Machecoul et à l'écluse du Fresne en 2009	184
Figure D-9 : Nombre total de pesticides quantifiés par site en 2009.....	184
Figure D-10 : Demi-vies du glyphosate et de l'AMPA dans l'environnement.....	187
Figure D-11 : Concentrations de l'AMPA à Machecoul et à l'écluse du Fresne en 2009	187
Figure D-12 : Localisation de la zone pilote	189
Figure D-13 : Réseau modélisé de la zone pilote	191
Figure D-14 : Architecture du réseau hydrographique modélisé dans le modèle Mascaret	191
Figure D-15 : Engagement des communes dans une démarche de réduction des pesticides en 2009	193
Figure D-16 : Code du module Transport_Pur, avec la modification apportée en rose	195
Figure D-17 : Schéma d'un profil en travers reconstitué.....	196
Figure D-18 : Profils en travers en fonction de l'angle α	196
Figure D-19 : Débits journaliers et caractéristiques à Machecoul	201
Figure D-20 : Concentrations de glyphosate dans le Falleron à Machecoul en 2009.....	202
Figure D-21 : Evolution du débit et des concentrations de glyphosate au Port du Collet.....	204
Figure D-22 : Evolution du débit et des concentrations de glyphosate dans le Falleron au Port la Roche.....	205
Figure D-23 : Architecture du réseau modélisé avec la prise en compte du vannage du Nouveau Collet	206
Figure D-24 : Evolution du débit au Port du Collet	207
Figure D-25 : Evolution des concentrations de glyphosate au Port du Collet	208
Figure D-26 : Consommation des communes en glyphosate.....	209
Figure D-27 : Evolution des flux de glyphosate au Port du Collet	210

Figure D-28 : Trois compartiments hydrologiques distincts.....	211
Figure D-29 : Chaînage des modèles.....	214
Figure D-30 : Evolution des concentrations de nitrate de l'entrée du marais jusqu'aux parcs conchylicoles de la Coupelasse.....	214
Figure D-31 : Place des données dans le processus de modélisation.....	216
Figure D-32 : Confiance du modèle	217
Figure D-33 : Validation des hauteurs d'eau simulées par MARS 2D avec celles enregistrées par un ADCP	218
Figure E-1 : Profil en travers avec lit majeur.....	222
Figure E-2 : Schéma de risque d'entraînement d'éléments particuliers et solubles sous différents systèmes de drainage	224
Figure E-3 : Démarche globale de la mise en place d'un CREZH.....	226
Figure F-1 : Enseignements de la thèse	235

Liste des photographies

Photographie B-1 : Panorama depuis la table d'orientation de Saint-Cyr-en-Retz (44).....	46
Photographie B-2 : Rigole d'une parcelle au niveau du Port du Collet, Les Moutiers-en-Retz (44)	51
Photographie B-3 : Drains souterrains d'une parcelle, se déversant dans le canal d'amenée, Machecoul (44)	51
Photographie B-4 : Prairie fauchée.....	65
Photographie B-5 : Pâturage de bovins.....	65
Photographie B-6 : Parcs conchylicoles de la Coupelasse, à marée basse	67
Photographie B-7 : Carrelets sur l'estran, à proximité du Port du Collet,	73
Photographie B-8 : Carrelets dans un étier, à proximité du Port des Brochets, Bouin (85).....	73
Photographie B-9 : Dégâts sur la voirie dans le secteur du Port du Collet, Les Moutiers-en- Retz (44).....	100
Photographie B-10 : Inondation de l'avenue de la mer, Les Moutiers-en-Retz (44).....	100
Photographie C-1 : Sondes utilisées pour la mesure des paramètres physico-chimiques	162
Photographie C-2 : Réactifs et échantillons conservés dans la glacière.....	162
Photographie C-3 : Turbidimètre	163
Photographie C-4 : Echantillons prélevés et filtres après filtration.....	163
Photographie C-5 : Spectromètre	163
Photographie C-6 : Echantillons après réaction	163
Photographie C-7 : Système de filtration	164
Photographie C-8 : Colonies de bactéries sur gélose.....	164
Photographie C-9 : Chromatographie LC/MS/MS	164
Photographie C-10 : HPLC/fluo.....	164
Photographies C-11 : Autoanalyseur de type Skalar	165

Liste des tableaux

Tableau A-1 : Typologie des milieux naturels	15
Tableau A-2 : Typologie des zones humides applicable aux SDAGE et SAGE	16
Tableau A-3 : Habitats rencontrés en marais côtiers selon la typologie Corine Biotope.....	17
Tableau B-1 : Synthèse non exhaustive des valeurs trouvées pour la superficie du Marais Breton.....	42
Tableau B-2 : Correspondance des trois niveaux de réseau entre le langage usuel et administratif.....	53
Tableau B-3 : Dimensions du réseau par type	53
Tableau B-4 : Caractéristiques annuelles des précipitations à la station de Bouguenais de 1980 à 2007	56
Tableau B-5 : Listes des MAE proposées sur le territoire	66
Tableau B-6 : Principales crises enregistrées par le secteur conchylicole	71
Tableaux B-7 : Production du port de l'Herbaudière - Noirmoutier.....	72
Tableau B-8 : Taux de fréquentation des hébergements en 2009 sur le BVBB	74
Tableau B-9 : Nombre de touristes en 2009 sur le BVBB.....	75
Tableau B-10 : Espèces Annexe 1 de la directive oiseaux	77
Tableau B-11 : Synthèse des préoccupations des usagers et des acteurs locaux	78
Tableau B-12 : Récapitulatif des services rendus par le Marais Breton.....	80
Tableau B-13 : Valeur économique des services rendus par le Marais Breton	81
Tableau B-14 : Règles de manœuvres de l'écluse du Collet	86
Tableau B-15 : Volumes écoulés en 24 heures au niveau des principaux émissaires du Marais Breton.....	95
Tableau B-16 : Niveaux marins extrêmes observés durant la tempête Xynthia en Loire-Atlantique.....	99
Tableau B-17 : Données chiffrées sur les surfaces submergées suite à la tempête Xynthia.....	100
Tableau B-18 : Valeurs caractéristiques des nutriments en amont et aval du marais doux	110
Tableau B-19 : Récapitulatif des pesticides quantifiés dans le Falleron au Port la Roche en 2009	117
Tableau B-20 : Récapitulatif des pesticides quantifiés dans le grand étier de Sallertaine à la Lavre et à la Maison Rousse en 2009	118
Tableau B-21 : Valeurs seuils pour les métaux lourds.....	121
Tableau C-1 : Classification des modèles.....	137
Tableau C-2 : Domaines d'application des modèles de courantologie fluviale.....	142
Tableau C-3 : Métadonnées renseignées pour chaque donnée	149
Tableau C-4 : Alimentation des modèles.....	151
Tableau C-5 : Données fournies par les instruments de mesures et conditions optimales d'utilisation.....	154

Tableau C-6 : Coefficient de correction F(m) de la formule de Thornthwaite pour une latitude de 47° N.....	167
Tableau D-1 : Résultats des analyses des 4 laboratoires pour les nutriments.....	177
Tableau D-2 : Evolution du nombre de pesticides recherchés au cours du temps.....	182
Tableau D-3 : Récapitulatif des pesticides quantifiés par site en 2009.....	185
Tableau D-4 : Caractéristiques du réseau hydrographique.....	190
Tableau D-5 : Estimation de la section mouillée en fonction de l'angle α	196
Tableau D-6 : Evaluation du coefficient de rugosité de Manning.....	198
Tableau D-7 : Coefficients de rugosité en fonction de la nature des chenaux.....	198
Tableau D-8 : Equations empiriques pour l'estimation du coefficient de dispersion longitudinal.....	199
Tableau D-9 : Volumes et flux entrants dans le marais	202
Tableau D-10 : Ecart entre différents maillages.....	203
Tableau D-11 : Modalités de couplages des modèles.....	212
Tableau E-1 : Récapitulatif des pesticides quantifiés le long du Falleron en 2009.....	228
Tableau E-2 : Valeurs limites de paramètres de solubilité et de distribution pour les micropolluants organiques.....	229

Références bibliographiques

Plusieurs sources de données sont utilisées tout au long de ce manuscrit pour étayer le propos. Une notation distincte est utilisée afin de différencier le cas où elles sont issues de la bibliographie de celui où elles proviennent directement d'organismes. Dans le premier cas, le renvoi à la source est identique à celui d'une référence bibliographique, à savoir entre crochets comme suit [Organisme, Année]. Dans le second cas, la source est indiquée entre parenthèse comme suit (Organisme, Année). La présentation des données utilisées sera faite dans la partie C consacrée aux données (cf C.2, p.147).

Des sigles et des acronymes sont utilisés pour référencer certaines sources bibliographiques. Ils sont détaillés dans la liste éponyme, comme ceux présents par ailleurs dans ce manuscrit.

1 - **Abadou R., Dartus D., Tanguy J.-M. (2009)**: "Couplage de modèles" in (Tanguy J.-M.), *Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*, Vol. 4 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.281-333

2 - **ADASEA de la Vendée (2002)**: "DOCOB Marais Breton, Baie de Bourgneuf, Ile de Noirmoutier et Forêt de Monts", Document d'objectifs NATURA 2000, ADASEA de la Vendée, 18 mars 2002, Saint-Hilaire de Riez, 154p.

3 - **ADBVB (2004)**: "Schéma d'aménagement et de gestion des eaux du marais breton et du bassin versant de la baie de Bourgneuf - Projet de SAGE", 19 juillet 2004, Barbâtre (85), 254p.

4 - **ADBVB (2006a)**: "Etude des incidences socio-économiques de la mise en œuvre du SAGE du Marais Breton et du bassin versant de la baie de Bourgneuf", Rapport final, Mars 2006, Barbâtre (85), 62p.

5 - **ADBVB (2006b)**: "Qualité bactériologique des eaux et coquillages du bassin versant de la baie de Bourgneuf de 1995 à 2004", Rapport n°2, Décembre 2006, Barbâtre (85), 92p.

6 - **ADBVB (2006c)**: "Qualité physico-chimique des cours d'eau du bassin versant de la baie de Bourgneuf de 1995 à 2004", Rapport n°1, Observatoire de l'eau du bassin de la baie de Bourgneuf, Juin 2006, Barbâtre (85), 89p.

7 - **ADBVB (2006d)**: "Qualité physico-chimique des eaux saumâtres et marines du bassin versant de la baie de Bourgneuf de 1995 à 2004", Rapport n°3, Décembre 2006, Barbâtre (85), 67p.

8 - **ADBVB (2008)**: "Contrat territorial du bassin versant de la baie de Bourgneuf 2008 - 2012", Document N°1, Etat des lieux – diagnostic du bassin versant de la baie de Bourgneuf, Octobre 2008, Barbâtre (85), 41p.

9 - **ADBVB (2009)**: "Inventaires des zones humides", Guide méthodologique pour la réalisation des inventaires, Novembre 2009, Barbâtre (85), 34p.

- 10 - **ADBVBB (2010)**: "DOCOB, ZPS « Marais Breton, baie de Bourgneuf, Ile de Noirmoutier et forêt de Monts »", Mars 2010, Barbâtre (85), 148p.
- 11 - **ADBVBB (2011)**: "Diagnostic global du bassin versant - Bilan du SAGE de 2004 depuis sa mise en œuvre", Révision du SAGE de 2004, Avril 2011, Barbâtre (85), 128p.
- 12 - **AELB (2005)**: "L'inventaire des zones humides dans les SAGE", Guide méthodologique, Février 2005, Orléans (45), 43p.
- 13 - **AELB (2006)**: "Le prélèvement d'échantillons en rivière - Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques", Guide technique, Novembre 2006, Orléans (45), 132p.
- 14 - **AERU (2012)**: "The FOOTPRINT Pesticide Properties Database", University of Hertfordshire (United Kingdom), <http://www.eu-footprint.org/ppdb.html>
- 15 - **AESN, FMA (SD)**: "Le modèle de données commun pour l'inventaire des zones humides", Document de travail, 20p.
- 16 - **Agences de l'Eau (1999)**: "Système d'évaluation de la qualité des cours d'eau", Etudes n°64 - Rapport de présentation SEQ-Eau (version 1), 59p.
- 17 - **Alonso Villalobos C., Ménanteau L. (2006)**: "Paléoenvironnements et techniques de production du sel marin (par ignition ou insolation) durant l'Antiquité : les cas des baies de Bourgneuf (France) et de Cadix (Espagne)" in, *Colloque international - 6^e congrès de la Commission Internationale d'Histoire du Sel Le « sel de la Baie » et ses concurrents à travers les âges, 16-18 septembre 2004*, Presses Universitaires de Rennes, Nantes, pp.87-103
- 18 - **Alsumard M. (1999)**: "Apport de la télédétection et des S.I.G. pour la connaissance des zones humides : étude du caractère humide du marais de Bourgneuf (Vendée, Loire-Atlantique)", Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Louis Pasteur / Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (67), 118p.
- 19 - **Ambroise B. (1998)**: "La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles", Editions HGA Bucarest, Office Fédéral de l'Education et de la Science Suisse, 206p.
- 20 - **Aminot A., Kérouel R. (2004)**: "Hydrologie des écosystèmes marins - Paramètres et analyses", Méthodes d'analyse en milieu marin, Ifremer, 336p.
- 21 - **Ani E.-C., Wallis S., Kraslawski A., Agachi P.S. (2009)**: "Development, calibration and evaluation of two mathematical models for pollutant transport in a small river", *Environmental Modelling & Software*, 24(10), pp.1139-1152
- 22 - **Anonyme (2006)**: "Texte de la charte de Nantes" in (Bersani C.), *Rapport relatif au schéma d'organisation des dispositifs de recueil de données et d'observation sur le littoral*, MIAT - IGA, MTETM - CGPC, MEDD - IGE, Paris (75), pp.165-170
- 23 - **ANR (2011)**: "Programmation 2011-2013 de l'Agence Nationale de la Recherche", Édition 2012, 360p.

- 24 - **Anras L. (1997)**: "Influence du réseau hydraulique sur la qualité des eaux de surface dans un marais littoral agricole : rôle des processus géochimiques à l'interface eau-sédiment", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (86), 172p.
- 25 - **Anras L. (2001)**: "Etude d'identification d'indicateurs hydrologiques en marais littoraux", Forum des Marais Atlantiques, Décembre 2001, Rochefort (17), 23p.
- 26 - **Anras L. (2004)**: "Trame méthodologique pour la mise en place de suivis hydrologiques en marais", Cahier technique, Forum des Marais Atlantiques, Juin 2004, Rochefort (17), 50p.
- 27 - **Anras L. (2007)**: "L'analyse fonctionnelle des zones humides côtières - Support pour l'aide à la décision de gestion et de réhabilitation", Rapport d'étude, Forum des Marais Atlantiques, Juin 2007, Rochefort, 43p.
- 28 - **Anras L., Blachier P., Hussenot J., Lagardère J.-P., Lapouyade P., Massé J., Poitevin B., Rigaud C. (2004)**: "Les marais salés Atlantiques - Mieux connaître pour mieux gérer", Cahier technique, Forum des Marais Atlantiques, Juillet 2004, Rochefort, 76p.
- 29 - **Anras L., Boudeau P., Guionneau A. (2006)**: "Contribution des zones humides au bon état des masses d'eau", Forum des Marais Atlantiques, Avril 2006, Rochefort (17), 63p.
- 30 - **Anras L., des Touches H. (2007)**: "Curage des canaux et fossés d'eau douce en Marais littoraux", Forum des Marais Atlantiques, Rochefort (17), 76p.
- 31 - **Anras L., Guesdon S. (2007)**: "Hydrologie des marais littoraux - Mesures physicochimiques de terrain", Forum des Marais Atlantiques, 76p.
- 32 - **ANSES (2012)**: "Base de données sur les substances actives phytopharmaceutiques (AGRITOX)", INRA, <http://www.agritox.anses.fr>
- 33 - **Aparicio V.C., De Gerónimo E., Marino D., Primost J., Carriquiriborde P., Costa J.L. (2013)**: "Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins", *Chemosphere*, 8p., (Article in press)
- 34 - **AQUASCOP (2010)**: "Synthèse régionale de la qualité de l'eau des bassins versants bretons", Année hydrologique 2007-2008, Aquascop n°6821, 274p.
- 35 - **AQUASCOP, AESN (2008)**: "Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin Seine-Normandie", Collection de guides pratiques "Eau et Santé", Octobre 2008, Paris (75), 272p.
- 36 - **Arnaud A., Bect J., Couplet M., Pasanisi A., Vazquez E. (2010)**: "Evaluation d'un risque d'inondation fluviale par planification séquentielle d'expériences", 42èmes Journées de Statistique, 24-28 mai 2010, Marseille (13)
- 37 - **Aurousseau P., Gascuel-Odoux C., Squidant H. (1998)**: "Eléments pour une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire pour la contamination des eaux superficielles par les pesticides", *Etude et Gestion des Sols*, 5(3), pp.143-156

- 38 - **Aurousseau P., Gascuel-Oudoux C., Squividant H., Trepos R., Tortrat F., Cordier M.O. (2009)**: "A plot drainage network as a conceptual tool for the spatial representation of surface flow pathways in agricultural catchments", *Computers & Geosciences*, 35, pp.276-288
- 39 - **Bailly J.S., Puech C., Massé J. (2003)**: "Applications de l'imagerie à très haute résolution spatiale pour le suivi de l'hydromorphie du marais atlantique de Bourgneuf", *Photo-interprétation*, (1), pp.22-30
- 40 - **Balestrat M. (2006)**: "Usage de la télédétection et du SIG pour construire une méthode d'évaluation du risque potentiel de pollution diffuse des eaux de surface par les produits phytosanitaires. - Adaptation au transfert d'échelle spatiale sur les Coteaux de Gascogne (Gers)", Master 2, Université de Toulouse - Le Mirail, Toulouse (31), 145p.
- 41 - **Barillé-Boyer A.-L., Haure J., Baud J.-P. (1997)**: "L'ostréculture en baie de Bourgneuf - Relation entre la croissance des huîtres *Crassostrea gigas* et le milieu naturel : Synthèse de 1986 à 1995", Ifremer Bouin, 173p.
- 42 - **Barnaud G. (2000a)**: "Du sauvetage d'espèces et de milieux prestigieux à la restauration de fonctions et de valeurs" in (Fustec E., Lefeuvre J.-C.), *Fonctions et valeurs des zones humides*, Environnement, Technique et Ingénierie, Dunod, Paris (75), pp.329-349
- 43 - **Barnaud G. (2000b)**: "Identifier et caractériser les zones humides : une variété de points de vue" in (Fustec E., Lefeuvre J.-C.), *Fonctions et valeurs des zones humides*, Environnement, Technique et Ingénierie, Dunod, Paris (75), pp.39-59
- 44 - **Barnaud G., Fustec E. (2007)**: "Conserver les zones humides : pourquoi ? comment ?" Educagri Editions / Quæ Editions, Paris (75), 230p.
- 45 - **Baron P. (1999)**: "Le plan d'action pour les zones humides. L'urgence d'une deuxième étape, réellement opérationnelle", *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, 14, Avril 1999, pp.90-92
- 46 - **Barusseau P., Brigand L., Denis J., Gérard B., Grignon-Logerot C., Hénocque Y., Lointier M. (1997)**: "Guide méthodologique d'aide à la gestion intégrée de la zone côtière", Manuels et Guides COI 36, UNESCO, Juillet 1997, 49p.
- 47 - **Bates P.D., De Roo A.P.J. (2000)**: "A simple raster-based model for flood inundation simulation", *Journal of Hydrology*, 236(1-2), pp.54-77
- 48 - **Baud J.-P., Guillautreau P. (2007)**: "Gestion globale des ressources marines et des risques dans les espaces côtiers (GERRICO)", Dossier d'avant projet, IFREMER - Université de Nantes, Nantes (44), 86p.
- 49 - **Baud J.-P., Guillautreau P. (2010a)**: "Gestion globale des ressources marines et des risques dans les espaces côtiers (GERRICO)", Volume 1 : Rapport de synthèse - Rapport final du programme de recherche au Conseil Régional des Pays de Loire, IFREMER - Université de Nantes, Juin 2010, Nantes (44), 78p.
- 50 - **Baud J.-P., Guillautreau P. (2010b)**: "Gestion globale des ressources marines et des risques dans les espaces côtiers (GERRICO)", Volume 2 : Fiches actions par axe - Rapport final du

programme de recherche au Conseil Régional des Pays de Loire, IFREMER - Université de Nantes, Juin 2010, Nantes (44), 145p.

51 - **Baudet J., Bouzillé J.-B., Godeau M., Gruet Y., Maillard Y. (1987a)**: "Ecologie du marais "breton-vendéen" - Etude d'une unité hydrologique", *Bulletin de la société botanique du centre-ouest*, 18, 01 octobre 1987, pp.13-44

52 - **Baudet J., Gruet Y., Maillard Y. (1987b)**: "Evolution historique des gestions hydrauliques dans le marais "breton-vendéen" - Conséquences hydrologiques et biologiques", *Bull. Ecol.*, 18(4), pp.439-455

53 - **Baudet J., Gruet Y., Maillard Y. (1987c)**: "Les remaniements historiques du régime des eaux d'un marais littoral : le marais breton-vendéen", *Norois*, 34(133-135), pp.11-22

54 - **Beaulieu J.-C. (2003)**: "Déclaration en faveur de l'élevage et des prairies humides des marais atlantiques", FMA, Janvier 2003, 4p.

55 - **Beaulieu J.-C., Callens L., Anras L., Chastaing C. (2005)**: "Ouvrages hydrauliques et gestionnaires en marais atlantiques", Forum des Marais Atlantiques, Rochefort, 9p.

56 - **Beaulieu J.-C., Callens L., Vizioz L. (2003)**: "Aquaculteurs en marais littoraux atlantiques", Forum des Marais Atlantiques, Décembre 2003, Rochefort, 15p.

57 - **Bedos C., Calvet R., Carluer N., Coquet Y., Golaz C., Gouy V., Guyot C., Kloppmann W., Mouvet C., Normand B., Soulas G. (2002)**: "Modélisation des transferts de pesticides dans l'environnement", Ecrin - Club Environnement et société, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris (75), 207p.

58 - **Béguin M., Pumain D. (2000)**: "La représentation des données géographiques - Statistique et cartographie", 2e édition, Armand Colin, Paris (75), 192p.

59 - **Bendjoudi H., de Marsily G. (2000)**: "Le fonctionnement hydrologique des zones humides" in (Fustec E., Lefeuvre J.-C.), *Fonctions et valeurs des zones humides*, Environnement, Technique et Ingénierie, Dunod, Paris (75), pp.61-81

60 - **Bendjoudi H., Weng P., Guérin R., Pastre J.F. (2002)**: "Riparian wetlands of the middle reach of the Seine river (France) : historical development, investigation and present hydrologic functioning - A case study", *Journal of hydrology*, 263, pp.131-155

61 - **Benyoucef I. (2009)**: "Valorisation des données LIDAR acquises en baie de Bourgneuf", Master 2, Université de Nantes (44), 63p.

62 - **Bérail G. (2011)**: "Recherche de pesticides dans l'eau de mer et les huîtres vendéennes en liaison avec les surmortalités observées par les conchyliculteurs", Comité scientifique et technique du SMIDAP - Restitution des travaux d'études de l'année 2010, 11 février 2011, Ifremer, Nantes (44)

63 - **Bernard G., Baleyrier A. (2004)**: "Modélisation du stade d'eau vive d'Athènes (Jeux Olympiques 2004)", *La Houille Blanche*, 4, pp.59-62

- 64 - **Bernard P. (1994)**: "Les zones humides. Rapport d'évaluation", Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques. Premier Ministre - Commissariat au Plan, Rapport d'évaluation, La Documentation française, Paris, 391p.
- 65 - **Bersani C. (2006)**: "Rapport relatif au schéma d'organisation des dispositifs de recueil de données et d'observation sur le littoral", MIAT - IGA, MTETM - CGPC, MEDD - IGE, Octobre 2006, 120p. + annexes
- 66 - **Bersani C., Helias A., Roussel P., Simoni M.-L. (2005)**: "Gestion intégrée de la zone côtière de la Baie de Bourgneuf", Mission d'appui technique - Rapport d'étape, MIAT - IGA, MTETM - CGPC, CGGREF, MEDD - IGE, Novembre 2005, 13p.
- 67 - **Bertin J. (1967)**: "Sémiologie graphique", Editions Gauthier-Villars, Mouton & Cie, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris (75), 431p.
- 68 - **Besnard E. (2012)**: "Les apports sédimentaires en milieux côtiers : l'exemple de la Baie de Bourgneuf", Master 1, Université de Nantes (44), 28p.
- 69 - **Besse T., Baisez A. (2012)**: "Poursuite du Tableau de bord Anguille du bassin de la Loire, des Côtiers vendéens et de la Sèvre niortaise", Rapport d'activité 2011-2012, LOGRAMI, Saint Pourçain-Sioule (03), 47p.
- 70 - **Bioret F., Dupont P. (1986)**: "Les milieux naturels du littoral de la Baie de Bourgneuf : Intérêt, dégradations, problèmes de conservation et de gestion", *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.43-55
- 71 - **Blöschl G., Sivapalan M. (1995)**: "Scale issues in hydrological modelling : a review", *Hydrological Processes*, 9, pp.251-290
- 72 - **Bonnifait L., Delrieu G., Lay M.L., Boudevillain B., Masson A., Belleudy P., Gaume E., Saulnier G.-M. (2009)**: "Distributed hydrologic and hydraulic modelling with radar rainfall input: Reconstruction of the 8-9 September 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France", *Advances in Water Resources*, 32(7), pp.1077-1089
- 73 - **Botto S., Deat E., Baudet J., Massé J., Thomas A., Rigaud C. (1999)**: "Curages et fonctions biologiques des fossés des marais littoraux", Etude, Forum des Marais Atlantiques, Rochefort, 118p.
- 74 - **Boudeau P., Guionneau A. (2004)**: "Aide à la conception des SIG en zones humides - Synthèse méthodologique des actions menées en 2003", Forum des Marais Atlantiques, Février 2004, Rochefort, 62p.
- 75 - **Bougeard M., Le Saux J.-C., Gnouma R., Dupont S., Pommeypuy M. (2008)**: "Modélisation des flux de contamination fécale et de leur impact sur la zone littorale (conséquences sur la qualité des eaux conchylicoles) - Application au bassin versant de l'estuaire de la rivière de Daoulas", (Partie 1), Ifremer, Septembre 2008, 89p.
- 76 - **Bouquet A.L., Pillet F. (2008)**: "Limitation du développement des macroalgues en marais salé", Centre Régional d'Expérimentation et d'Application Aquacole, Novembre 2008, 73p.

- 77 - **Bourrier R. (2008)**: "Les réseaux d'assainissement - Calculs, Applications, Perspectives", Editions TEC & DOC, Lavoisier, 5^e édition, Paris (75), 1014p.
- 78 - **Bouscasse H., Defrance P., Amand B., Grandmougin B., Strosser P., Beley Y. (2011a)**: "Amélioration des connaissances sur les fonctions et usages des zones humides : évaluation économique sur des sites tests", Rapport principal, AELB, Mai 2011, 91p.
- 79 - **Bouscasse H., Defrance P., Amand B., Grandmougin B., Strosser P., Beley Y. (2011b)**: "Amélioration des connaissances sur les fonctions et usages des zones humides : évaluation économique sur des sites tests", Le cas du Marais Breton, AELB, Mai 2011, 96p.
- 80 - **Bousquet B., Miossec A. (1986)**: "Le littoral du Pays de Retz", *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.27-41
- 81 - **Brater E.F., King H.W., Lindell J.E., Wei C.Y. (1996)**: "Handbook of hydraulics", Mc Graw Hill, 7^eme édition, United States, 640p.
- 82 - **Bravard J.-P., Petit F. (2000)**: "Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial", Géographie, Armand Colin, Paris (75), 222p.
- 83 - **Bretagnolle V., Houte S., Boileau N. (2002)**: "Restauration hydraulique d'un marais et conséquences pour les oiseaux : contraintes d'échelles d'espace et de temps dans les processus écologiques", *Revue d'Ecologie (Terre & Vie)*, 9, pp.175-187
- 84 - **Bristeau M.-O., Goutal N., Sainte-Marie J. (2011)**: "Numerical simulations of a non-hydrostatic shallow water model", *Computers & Fluids*, 47(1), pp.51-64
- 85 - **Brouca C., Drique E. (1998)**: "L'agriculture du Marais Breton : diverses stratégies développées face à une contrainte naturelle forte, typologie de fonctionnement", Ingénieur, Ecole Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles, Bordeaux (33), 85p.
- 86 - **Brunet R. (1987)**: "La carte, mode d'emploi", Fayard / Reclus, Paris (75), 270p.
- 87 - **Brunori C., Morabito R., Ipolyi I., Pellegrino C., Ricci M., Bercaru O., Ulberth F., Sahuquillo A., Rosenberg E., Madrid Y. (2007)**: "The SWIFT-WFD Proficiency Testing campaigns in support of implementing the EU Water Framework Directive", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26(10), pp.993-1004
- 88 - **Buyer M. (2002)**: "Transport de flux en réseau d'assainissement : modèle 1D pour l'hydraulique des collecteurs et déversoirs avec prise en compte des discontinuités", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I (67), 238p.
- 89 - **Callens L., Miossec G. (2003)**: "Gestion raisonnée de la ressource piscicole en marais", Actes de séminaire du 27 Juin 2002, FMA, Juillet 2003, Rochefort, 72p.
- 90 - **Candau J., Le Floch S. (2000)**: "Dossiers ouverts sur un marais oublié - Actions publiques et paysage en Marais Breton Loire-Atlantique", Rapport d'études, GIP Hydrosystèmes - CEMAGREF, Cestas (33), 82p.
- 91 - **Capri E., Vicari A. (2010)**: "Environmental fate and behaviour of glyphosate and its main metabolite", °Vu, European Glyphosate Environmental Information Source, 3p.

- 92 - **Castaings W., Le Dimet F.-X., Dartus D. (2003)**: "Assimilation de données in situ et télédétection pour la modélisation hydrologique", *SFPT*, 172(4), pp.50-60
- 93 - **CBLB (2007)**: "Plan Loire Grandeur Nature - Contrat de projets interrégional Loire (2007-2013)", 57p.
- 94 - **CE (1998)**: "Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine", *Journal Officiel de l'Union Européenne*, L 330, 05 décembre 1998, 23p.,
- 95 - **CE (2000)**: "Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 327, 22 décembre 2000, 72p.,
- 96 - **CE (2001a)**: "Décision 2455/2001/CE du Parlement Européen et du Conseil du 20 novembre 2001 établissant la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau et modifiant la directive 2000/60/CE", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 331, 15 décembre 2001, 5p.,
- 97 - **CE (2001b)**: "Directive 2001/99/CE de la Commission du 20 novembre 2001 modifiant l'annexe I de la directive 91/414/CEE du Conseil concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques en vue d'y inscrire les substances actives glyphosate et thifensulfuron-méthyle", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 304, 21 novembre 2001, 14-16p.,
- 98 - **CE (2006)**: "Directive 2006/113/CE du Parlement Européen et du Conseil du 12 décembre 2006 relative à la qualité requise des eaux conchylicoles", *Journal Officiel de l'Union Européenne*, L 376, 27 décembre 2006, 7p.,
- 99 - **CE (2008a)**: "Directive 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre «stratégie pour le milieu marin»)", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 164, 25 juin 2008, 22p.,
- 100 - **CE (2008b)**: "Directive 2008/105/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 2000/60/CE", *Journal Officiel de l'Union Européenne*, L 348, 24 décembre 2008, 14p.,
- 101 - **CEE (1975)**: "Directive 75/440/CEE du Conseil du 16 juin 1975 concernant la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production alimentaire dans les Etats membres", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 194, 25 juillet 1975, 6p.,
- 102 - **CEE (1979a)**: "Directive 79/409/CEE du Conseil du 2 avril 1979 concernant des oiseaux sauvages", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 103, 25 avril 1979, 18p.,
- 103 - **CEE (1979b)**: "Directive 79/923/CEE du Conseil du 30 octobre 1979 relative à la qualité requise des eaux conchylicoles", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 281, 10 novembre 1979, 6p.,

- 104 - **CEE (1991)**: "Directive 91/492/CEE du Conseil du 15 juillet 1991 fixant les règles sanitaires régissant la production et la mise sur le marché de mollusques bivalves vivants", *Journal officiel des Communautés Européennes*, L 268, 24 septembre 1991, 14p.,
- 105 - **CEE (1992)**: "Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages", *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 206, 22 juillet 1992, 44p.,
- 106 - **CEMAGREF (1994)**: "Programme NORSPA – Baie de Bourgneuf. Restauration du réseau secondaire du marais doux", Rapport intermédiaire n° 1, CEMAGREF - Groupement de Bordeaux, 146p.
- 107 - **CETE Méditerranée (2008)**: "Modélisation hydraulique de l'Huveaune sur le secteur de l'échangeur de Florian" in (CETMEF), *Guide de prise en main de Fudaa-Mascaret 3.0*, pp.102-117
- 108 - **CETMEF (2008)**: "Guide de prise en main de Fudaa-Mascaret 3.0", Notice n°GT 08.01, Avril 2008, 137p.
- 109 - **CGDD-SOeS (2012a)**: "L'évolution des zones humides entre 2000 et 2010. Des pressions toujours fortes", *le Point sur*, 144, Octobre 2012, 4p.,
- 110 - **CGDD-SOeS (2012b)**: "Résultats de l'enquête nationale à dire d'experts sur les zones humides. Etat en 2010 et évolution des zones humides entre 2000 et 2010", *Etudes et Documents*, n°70, Octobre 2012, Paris (75), 96p.
- 111 - **Chancel-Lesueur H., Samyn E. (2009)**: "L'activité maritime 2009 dans le département de la Vendée", Monographie, DDTM Vendée, Les Sables d'Olonne, 23p.
- 112 - **Charleux-Demargne J. (2001)**: "Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie - Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants", Thèse de Doctorat, Université Paris-Est Marne-la-Vallée (77), 350p.
- 113 - **Chassé P. (2009)**: "Propagation d'une crue dans un réseau ramifié (Marne, 1999)" in (Tanguy J.-M.), *Applications des modèles numériques en ingénierie 1*, Vol. 7 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.89-97
- 114 - **Chauveau E., Chadenas C., Comentale B., Pottier P., Blanloeil A., Fuillet T., Mercier D., Pourinet L., Rollo N., Tillier I., Trouillet B. (2011)**: "Xynthia : leçons d'une catastrophe", *Cybergeo : European Journal of Geography*, 21p., <http://cybergeo.revues.org/23763>
- 115 - **Cheize R. (1986a)**: "Perspectives du tourisme en baie de Bourgneuf", *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.173-183
- 116 - **Cheize R. (1986b)**: "Un contrat de station pour une île ?" *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.185-198
- 117 - **Chen M., Xiao Y., Wang D. (2008)**: "Adsorption of phosphorus on different sediments" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 3 Fluvial Processes and River Engineering, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.1090-1095

- 118 - **Chevallier C. (1991)**: "Drainage et marais littoraux", Journées Eau, ADEMAREF, Impr. Parenthèses, 1-5 juillet 1991, Nantes (44), 26p.
- 119 - **Chin D.A. (2006)**: "Water-quality Engineering in Natural Systems", John Wiley & Sons, United States, 610p.
- 120 - **Chocat B. (2009)**: "Modèles en hydrologie urbaine" in (Tanguy J.-M.), *Modèles mathématiques en hydrologie et en hydraulique fluviale*, Vol. 3 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.185-247
- 121 - **Chorley R., Hagget P. (1967)**: "Models in geography", Methuen, Londres (United Kingdom), 816p.
- 122 - **Chow V.T. (1959)**: "Open-channel hydraulics", International student, McGraw-Hill, New York (United States), 680p.
- 123 - **Cizel O. (2006)**: "Protection et gestion des zones humides - Révision du SDAGE RM&C", Groupe d'Histoire des Zones Humides - Pôle relais lagunes méditerranéennes, Septembre 2006, 121p.
- 124 - **Cizel O. (2010)**: "Protection et gestion des espaces humides et aquatiques", Guide juridique d'accompagnement des bassins de Rhône-Méditerranée et de Corse, Groupe d'Histoire des Zones Humides / Pôle relais lagunes méditerranéennes / Agence de l'eau RM&C, 566p.
- 125 - **CNRS-INSU (2011)**: "Initiative Structurante EC2CO - Écosphère Continentale et Côtière", Note de cadrage & Appel d'offres 2012, 2p.
- 126 - **Cochennec-Laureau N., Baud J.-P., Pépin J.-F., Benabdelmouna A., Soletchnik P., Lupo C., Garcia C., Arzul I., Boudry P., Huvet A., Pernet F., Bachere E., Bedier E., Petton B., Gaussem F., Stanisière J.Y., Dégremont L. (2011)**: "Les surmortalités des naissains d'huîtres creuses, *Crassostrea gigas* : acquis des recherches en 2010", RST/LER/MPL/11.07, Ifremer, 4 avril 2011, La Trinité sur Mer (56), 30p.
- 127 - **Coïc B. (2009)**: "Mise en place d'un protocole d'évaluation socioéconomique des Mesures Agri-Environnementales dans les Zones Humides de la région des Pays de la Loire", Ingénieur, Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers (49), 60p.
- 128 - **Corbin C., Baraer F. (2003)**: "Etude des conditions climatiques du bassin versant de la Baie de Bourgneuf", Météo-France Ouest / Association pour le développement du bassin versant de la Baie de Bourgneuf, Mars 2003, 33p.
- 129 - **Corlay J.-P. (1986a)**: "Conclusion générale : A la recherche de nouveaux équilibres, réflexions pour l'aménagement", *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.215-224
- 130 - **Corlay J.-P. (1986b)**: "Les marais maritimes de la Vilaine à la Gironde : géosystème maraîchin atlantique et promesses aquacoles", *Norois*, 132, pp.547-569
- 131 - **Cosandey C., Bigot S., Dacharry M., Gille E., Laganier R., Salvador P.-G. (2003)**: "Les eaux courantes", Collection Belin Sup Géographie, Belin, Paris (75), 240p.
- 132 - **Cosandey C., Robinson M. (2000)**: "Hydrologie continentale", Collection Universités - Géographie, Armand Colin / HER, Paris (75), 360p.

- 133 - **Couplet M., Le Brusquet L., Pasanisi A. (2010)**: "Caractérisation des coefficients de Strickler d'un fleuve par inversion probabiliste", 42^{èmes} Journées de Statistique, 24-28 mai 2010, Marseille (13)
- 134 - **Cowardin L.M., Carter V., Golet F.C., LaRoe E.T. (1979)**: "Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States", U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington D.C. (United States), 131p.
- 135 - **Cox B.A. (2003)**: "A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers", *Science of The Total Environment*, 314-316, pp.335-377
- 136 - **CREPEPP 2018 (2010)**: "Enquête régionale sur les pratiques phytosanitaires en 2010 et l'évolution depuis 2000", Enquête réalisée par la FREDON Pays de la Loire avec le concours technique et financier de la DRAF-SRPV, DREAL Pays de la Loire
- 137 - **CREPEPP (2000)**: "Enquête régionale sur les pratiques phytosanitaires des usagers non agricoles", Enquête réalisée par la FREDON Pays de la Loire avec le concours technique et financier de la DRAF-SRPV, DREAL Pays de la Loire, 130p.
- 138 - **CREPEPP (SD)**: "Jardiner en protégeant sa santé, l'eau et l'environnement", Plaquette à destination des particuliers, DREAL Pays de la Loire, 8p.
- 139 - **Croix N. (1986)**: "Agriculture et société agricole dans la baie de Bourgneuf", *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.57-77
- 140 - **Cunge J.A. (2003)**: "Of data and models", *Journal of Hydroinformatics*, 05.2, pp.75-98
- 141 - **David B. (2011)**: "La précision des données Litto3D® - Analyse comparative Litto3D® / levés topographiques", Atelier régional Litto3D®, 22 septembre 2011, IFSTTAR, Bouguenais (44)
- 142 - **DDTM 44 (2010)**: "La tempête Xynthia en Loire-Atlantique", Réunion de présentation avec les communes du littora sur les zones de vigilance en Loire-Atlantique 15 octobre 2010
- 143 - **DDTM 44 (2012)**: "Plan de prévention des risques littoraux (PPRL) en Baie de Bourgneuf Nord", Réunion de présentation (phase 1) - Avancement des études techniques du PPRL, 2 octobre 2012
- 144 - **De Vries J.J., Hromadka T.V. (1993)**: "Computer models for surface water" in (Maidment D. R.), *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, United States, pp.21.1 - 21.39
- 145 - **Delanoë Y., Dieuchon A., Gouleau D. (1971)**: "Structures et formations sédimentaires de la baie de Bourgneuf (Loire-Atlantique) étudiées par sondage sismique réflexion", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série D(272), pp.797-799
- 146 - **Deng Z.-Q., Jung H.-S. (2009)**: "Scaling dispersion model for pollutant transport in rivers", *Environmental Modelling & Software*, 24, pp.627-631
- 147 - **Derex J.-M. (2001)**: "Pour une histoire des zones humides en France (XVIIe-XIXe SIÈCLE) - Des paysages oubliés, une histoire à écrire" in, *Histoire et Sociétés Rurales*, Vol. 15, pp.11-36

- 148 - **Derruau M. (1979)**: "Les formes du relief terrestre", Masson, Paris (75), 120p.
- 149 - **des Touches H., Anras L. (2005)**: "Curage des canaux et fossés d'eau douce en marais littoraux", Cahier technique, Forum des Marais Atlantiques, Février 2005, Rochefort, 50p.
- 150 - **Desaunay Y., Perodou N., Beillois D. (1981)**: "Etude des nurseries à poissons du littoral de la Loire-Atlantique", Rapport ISTPM, Nantes (44), 35p. + annexes
- 151 - **Devaux E., Désiré G., Boura C., Lowenbruck J., Berenger N., Rouxel N., Romain N. (2012)**: "La tempête Xynthia du 28 février 2010 – Retour d'expérience en Loire-Atlantique et en Vendée. Volet hydraulique et ouvrages de protection", DREAL Pays de la Loire, DDTM Loire-Atlantique, DDTM Vendée, Septembre 2012, Nantes (44), 78p.
- 152 - **Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.-L., Soulas G. (2005)**: "Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides", Technique Et Documentation, Lavoisier, Paris (75), Londres (United Kingdom), New York (United States), 278p.
- 153 - **Dick R.E., Quinn J.P. (1995)**: "Glyphosate-degrading isolates from environmental samples: occurrence and pathways of degradation", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43, pp.545-550
- 154 - **DRAAF PdL (2010)**: "Document régional de développement rural 2007-2013", Version n°4, 321p.
- 155 - **DREAL-LR (2008)**: "Protection et gestion des zones humides : les modes d'actions institutionnels", Diaporama sur les zones humides, 9p.
- 156 - **Du S.T., Shentu J.L., Luo B.F., Shamsi I.H., Lin X.Y., Zhang Y.S., Jin C.W. (2011)**: "Facilitation of phosphorus adsorption onto sediment by aquatic plant debris", *Journal of Hazardous Materials*, 191(1-3), pp.212-218
- 157 - **Duan J.G., Julien P.Y. (2010)**: "Numerical simulation of meandering evolution", *Journal of Hydrology*, 391(1-2), pp.34-46
- 158 - **Dufil P. (1986)**: "Les résidences secondaires des nantais dans la Baie de Bourgneuf", *Cahiers Nantais*, 27, Janvier 1986, pp.199-203
- 159 - **Dugan P. (1990)**: "Wetland conservation : a review of current issues and required action", IUCN, Gland (Suisse), 96p.
- 160 - **Durand-Dastes M.F. (1974)**: "Quelques remarques sur l'utilisation des modèles", *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, (413-414), pp.43-50
- 161 - **Durand M. (2006)**: "Le Robert pour tous", Paris (75), 1278p.
- 162 - **Dutartre A., Merle V., Masse J., Rigaud C., Raclot D. (1998)**: "Restauration du réseau secondaire du marais doux - Programme NORSPA Baie de Bourgneuf - Rapport n°4", Rapport d'études, CEMAGREF, Cestas (33), 76p.
- 163 - **EDF, CETMEF (2011a)**: "MASCARET v7.1", Application Guide, 95p.
- 164 - **EDF, CETMEF (2011b)**: "MASCARET v7.1", Note de principe, 152p.

- 165 - **EDF, CETMEF (2011c)**: "Système MASCARET v7.1 - L'outil de simulation de qualité d'eau TRACER", Note de principe, 38p.
- 166 - **El Kadi Abderrezzak K., Zaoui F., Goutal N. (2012)**: "Applicability of longitudinal dispersion coefficient formulas in 1-D numerical modeling of solute transport in open channels", Water infinitely deformable but still limited - 2nd IAHR Europe Congress, 27-29 June 2012, Technische Universität München / Munich (Germany), 6p.
- 167 - **ESRI (2005)**: "Prise en main d'ArcGIS", Manuel d'utilisation, Meudon (92), 290p.
- 168 - **Estupina Borrell V. (2004)**: "Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair - Application à de petits bassins versants du sud de la France", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (31), 254p.
- 169 - **Fashi Y. (2000)**: "Modélisation du fonctionnement hydrique du marais de Rochefort", Diplôme d'Etudes Approfondies, INRA / Université Paris VI Pierre et Marie Curie / Ecole Normale Supérieure, Paris (75), 42p.
- 170 - **Faure J.-B. (2009)**: "Propagation de crues dans un réseau maillé (Wateringues)" in (Tanguy J.-M.), *Applications des modèles numériques en ingénierie 1*, Vol. 7 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.99-108
- 171 - **FDC Vendée, LPO Vendée (2010)**: "Diagnostic écologique – Document d'objectifs du site « Marais Breton, baie de Bourgneuf, Ile de Noirmoutier et forêt de Monts »", Mars 2010, Barbâtre (85), 258p.
- 172 - **Ferre F. (2000)**: "Amélioration de la gestion des niveaux d'eau dans le Marais breton Nord, l'été", Brevet de Technicien Supérieur Agricole, 51p.
- 173 - **Feuillet T., Chauveau E., Pourinet L. (2012)**: "Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête, et des risques de surcotes associés sur la façade atlantique française", *Norois*, 222, pp.27-44
- 174 - **Feunteun E., Rigaud C., Elie P., Lefeuvre J.-C. (1999)**: "Les peuplements piscicoles des marais littoraux endigués atlantiques : un patrimoine à gérer ? Le cas du marais de Bourgneuf-Machecoul." *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, (352), pp.63-79
- 175 - **Finaud-Guyot P., Delenne C., Guinot V., Llovel C. (2011)**: "1D-2D coupling for river flow modeling", *Comptes Rendus Mécanique*, 339(4), pp.226-234
- 176 - **Fleurant C. (2009)**: "Contribution à la modélisation des formes et des flux biophysiques dans le géosystème", Habilitation à Diriger des Recherches, Agrocampus Ouest - Université d'Angers (49), 276p.
- 177 - **Fleury J., Guyomarc'h J.-P. (2003)**: "Le défi de la qualité des eaux en Bretagne", Région Bretagne – Conseil Économique et Social de Bretagne, Juin 2003, Rennes, 585p.
- 178 - **FMA (2009)**: "Charte du Réseau Partenarial des Données sur les Zones Humides", 5p.
- 179 - **Forré P., Ménanteau L. (2007)**: "Géoarchéologie du golfe de Machecoul du Néolithique au Moyen Âge", pp.05-16

- 180 - **Fourmigué P., Arnaud P. (2009)**: "Modèles à réservoirs en hydrologie" in (Tanguy J.-M.), *Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*, Vol. 4 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.227-249
- 181 - **Friedrich M.-A. (2004)**: "Le Canal Maritime de la Basse Loire", Association Culturelle du Canal Maritime de la Basse Loire, Avril 2004, Brains (44), 33p.
- 182 - **Fromont N. (2008)**: "Cahier des clauses techniques particulières pour l'inventaire des zones humides comprises dans le périmètre du xxxx", Marais Mode d'emploi (en accompagnement du guide méthodologique d'inventaire et de caractérisation des zones humides), FMA, Rochefort (17), 14p.
- 183 - **Fustec E. (2000)**: "Les fonctions des zones humides : des acquis et des lacunes" in (Fustec E., Lefeuvre J.-C.), *Fonctions et valeurs des zones humides*, Environnement, Technique et Ingénierie, Dunod, Paris (75), pp.17-38
- 184 - **Fustec E., Frochot B. (1996)**: "Les fonctions des zones humides", Synthèse bibliographique - Rapport d'étude 96 ECOL 3 (Ecologie des milieux aquatiques), AESN, 134p.
- 185 - **Gaillard D., Delahaye D., Langlois P. (2006)**: "Modélisation du ruissellement-érosif par automate cellulaire. Intérêts d'une approche déterministe du risque", *Interactions Nature-Société, analyse et modèles*, 2006, La Baule (44), 5p.
- 186 - **Gascuel-Odoux C., Arousseau P., Cordier M.-O., Durand P., Garcia F., Masson V., Salmon-Monviola J., Tortrat F., Trepos R. (2009)**: "A decision-oriented model to evaluate the effect of land use and agricultural management on herbicide contamination in stream water", *Environmental Modelling & Software*, 24(12), pp.1433-1446
- 187 - **Gaston N. (1995)**: "Ecologie et quantification des hydrophytes d'une zone expérimentale du marais de Bourgneuf-Machecoul (44)", Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Université Bordeaux I (33), 209p.
- 188 - **Geffray O., Ménanteau L. (2004)**: "Géographie de l'inondation des marais de la basse-Loire : l'exemple de la crue de l'hiver 2000-2001", *Norwis*, 192 (2004/3), pp.11-28
- 189 - **George P., Verger F. (2006)**: "Dictionnaire de la géographie", Presses Universitaires de France, Paris (75), 496p.
- 190 - **Gérard B. (2012)**: "Peuplement piscicole des marais de Bourgneuf et de Machecoul - Etat des lieux avant travaux de restauration", Fédération de Loire – Atlantique pour la pêche et la protection du milieu aquatique, Nantes (44), 21p. + annexes
- 191 - **Gilardeau J.-M. (2008)**: "La gestion des zones humides par les Associations Syndicales de Propriétaires", Forum des Marais Atlantiques, Septembre 2008, Rochefort, 133p.
- 192 - **Gille J. (2006)**: "Caractérisation de la méthode de dosage Hach pour les phosphates", Master 1, Université Montpellier II (34), 25p.
- 193 - **Gille J. (2009)**: "Suivi expérimental du Marais Breton", Présentation et validation du protocole de terrain mis en place pour l'acquisition des BD complémentaires, 05 mai 2009, Géolittomer, Nantes (44)

- 194 - **Gille J. (2010a)**: "Comité de suivi de thèse", 18 mars 2010, Géolittomer, Nantes (44)
- 195 - **Gille J. (2010b)**: "Modélisation des flux d'eau et de sa qualité dans le Marais Breton à l'aide du module Tracer", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 18 mai 2010, EDF R&D, Chatou (78)
- 196 - **Gille J. (2010c)**: "Suivi et modélisation des flux d'eau et de matières dans le Marais Breton", Nouveau chapitre de la thèse, Association Bernard Grégory, Juin 2010, Nantes (44), 14p.
- 197 - **Gille J. (2011a)**: "Chaînage de Mascaret avec Mars 2D : Mise en œuvre à l'échelle de la baie de Bourgneuf", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 09 juin 2011, EDF R&D, Chatou, pp.14
- 198 - **Gille J. (2011b)**: "Chaînage de Mascaret avec Mars 2D : Mise en œuvre à l'échelle de la baie de Bourgneuf", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 09 juin 2011, EDF R&D, Chatou (78)
- 199 - **Gille J. (2012)**: "Modélisation monodimensionnelle (1-D) du transfert d'un pesticide dans le réseau de drainage du marais Breton-Vendéen (Côte Ouest de la France)", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 20 juin 2012, EDF R&D, Chatou, pp.20
- 200 - **Gille J., Gaillard S., Hitier B., Robin M., Oger-Jeanneret H., Lecomte P. (2010)**: "Modélisation des apports des bassins versants en baie de Bourgneuf" in, *Actes des XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 22-25 juin 2010*, © Editions Paralia CFL, Les Sables d'Olonne (85), pp.275-282
- 201 - **Gille J., Gaillard S., Hitier B., Robin M., Rollo N., Rosa P., Oger-Jeanneret H., Méléder V. (2009)**: "De la terre à la mer : la contribution des bassins versants à la qualité des eaux côtières", Festival International de Géographie, 1-4 octobre 2009, Saint-Dié (88), Poster
- 202 - **GIP Loire Estuaire (2009)**: "Schéma d'aménagement et de gestion des eaux de l'Estuaire de la Loire - Plan d'Aménagement et de Gestion Durable", Approuvé par arrêté préfectoral le 9 septembre 2009, 130p.
- 203 - **Giraud F. (1992)**: "Modélisation hydrologique d'une zone humide agricole : Perspective pour l'étude du transport d'azote et de phosphore dans le réseau hydraulique - Cas du marais de Moëze, Charente-Maritime", Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1 (35), 205p.
- 204 - **Giraud F., Chevallier C., Medion H., Fleury R. (1991)**: "Bilan hydrologique d'un marais littoral à vocation agricole : le marais de Moëze (Charente-Maritime, France)", *Revue des sciences de l'eau*, 4, pp.521-542
- 205 - **Giret A. (2007)**: "Hydrologie fluviale", Collection Universités - Géographie, Ellipses, Paris (75), 262p.
- 206 - **Goblet P., Evans S. (2009)**: "Mesures de la qualité de l'eau" in (Tanguy J.-M.), *Processus estuariens et littoraux : systèmes d'acquisitions des données*, Vol. 2 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.253-259
- 207 - **Goeldner-Gianella L. (1993)**: "Nouvelle perception de l'espace dans les littoraux : le marais Vernier", *Mappemonde*, Janvier 1993, pp.15-20

- 208 - **Gomez G. (1994a)**: "Schéma de mise en valeur de la mer - Baie de Bourgneuf", Annexe 2 : Qualité des eaux, Préfecture de la Région des Pays de la Loire - Secrétariat Général pour les Affaires Régionales, Février 1994, Nantes (44), 66p.
- 209 - **Gomez G. (1994b)**: "Schéma de mise en valeur de la mer - Baie de Bourgneuf", Rapport d'étape, Préfecture de la Région des Pays de la Loire - Secrétariat Général pour les Affaires Régionales, Février 1994, Nantes (44), 112p.
- 210 - **Gonzalez C., Spinelli S., Gille J., Touraud E., Prichard E. (2007)**: "Validation procedure for existing and emerging screening methods", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26(4), pp.315-322
- 211 - **Gouleau D. (1975)**: "Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques – Rôle de l'émersion", Thèse d'Etat de 3^e cycle, *Sciences naturelles*, Faculté des Sciences - Université de Nantes, 365p.
- 212 - **Gourmelon F., Le Visage C., Robin M. (2005)**: "Des SIG spécifiques pour un espace spécifique ?" in (Gourmelon F., Robin M.), *SIG et littoral*, Lavoisier, Hermès Science Publications, Paris, pp.21-47
- 213 - **Goutal N., Demay E. (2008)**: "Utilisation de modèles hydrauliques-métier dans des plateformes et application aux incertitudes", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 17 avril 2008, EDF R&D, Chatou (78)
- 214 - **Goutal N., Luck M., Boyer P., Monte L., Siclet F., Angeli G. (2008)**: "Assessment, validation and intercomparison of operational models for predicting tritium migration from routine discharges of nuclear power plants: the case of Loire River", *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(2), pp.367-382
- 215 - **Goutal N., Zaoui F. (2009)**: "Système Mascaret", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 1 avril 2009, EDF R&D, Chatou (78)
- 216 - **Goutal N., Zaoui F. (2010)**: "Système Mascaret", Club des Utilisateurs du système Mascaret, 18 mai 2010, EDF R&D, Chatou (78)
- 217 - **Grasset B. (2007)**: "Statuts du Syndicat Mixte", FMA, 31 mai 2007, Rochefort (17), 7p.
- 218 - **Grayson R., Blöschl G. (2000)**: "Spatial Patterns in Catchment Hydrology - Observations and Modelling", Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom), 416p.
- 219 - **Guermond Y. (2005)**: "Des modèles classiques à la modélisation incrémentale" in (Guermond Y.), *Modélisations en géographie - déterminismes et complexités*, Série Aménagement et gestion du territoire, Hermès Science Publications, Lavoisier, Paris (75), pp.49-72
- 220 - **Guermond Y., Delahaye D., Dubos-Paillard E., Langlois P. (2004)**: "From modelling to experiment", *GeoJournal*, 59(3), pp.171-176
- 221 - **Guinot V., Gourbesville P. (2003)**: "Calibration of physically based models: back to basics ?" *Journal of Hydroinformatics*, 05.4, pp.233-244

- 222 - **Hansen I.S. (1996)**: "Aquatic numerical modelling - A management tool regarding dispersion and decay of pollutants", *Resources, Conservation and Recycling*, 16(1-4), pp.167-177
- 223 - **Hassan A., Tanaka N., Tamai N. (2008)**: "Distributed water balance model in watershed coupling with river dynamic flow routing method" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 1 Water Resources and Hydrology, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.12-17
- 224 - **Haure J., Papin M., Dupuy B., Nourry M., Penisson C., Martin J.-L., Barillé L., Dutertre M., Rosa P., Beninger P., Barillé A.-L. (2008)**: "Etude de la croissance et de la reproduction de l'huître *crassostrea gigas* en baie de Bourgneuf", Rapport de synthèse des études 2005 & 2006, Ifremer / Université de Nantes, Avril 2008, Nantes (44), 96p.
- 225 - **Henocque Y. (2006)**: "Leçons et futur de la gestion intégrée des zones côtières dans le monde", *VertigO - La revue en sciences de l'environnement*, 7(3), Décembre 2006, 11p.,
- 226 - **Herman A. (2012)**: "Exemples de modèles de propagation développés par le SPC SAMA", Séminaire du Club "modélisation hydraulique", 25 juin 2012, La Défense, Paris (75)
- 227 - **Hervouet-Baranger J. (1998)**: "Un aperçu du fonctionnement hydraulique du marais Breton. Un "zoom" sur les communes de Bois-de-Cene et Chateauneuf", IUP, Université de Toulouse II - Le Mirail, Toulouse (31), 54p.
- 228 - **Hitier B., Populus J., Oger-Jeanneret H., Benyoucef I. (2010)**: "Airborne LIDAR in Support of Coastal Mapping and Hydrodynamic Modelling" in (Maanan M., Robin M.), *Geomatic Solutions For Coastal Environments*, Nova Science Publishers, Inc., New York (United States), pp.175-195
- 229 - **Hladik C., Alber M. (2012)**: "Accuracy assessment and correction of a LIDAR-derived salt marsh digital elevation model", *Remote Sensing of Environment*, 121, pp.224-235
- 230 - **Horn A.L., Rueda F.J., Hörmann G., Fohrer N. (2004)**: "Implementing river water quality modelling issues in mesoscale watershed models for water policy demands - an overview on current concepts, deficits, and future tasks", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(11-12), pp.725-737
- 231 - **Horritt M.S., Bates P.D. (2002)**: "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation", *Journal of Hydrology*, (268), pp.87-99
- 232 - **Hostache R. (2006)**: "Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'alea et l'aide à la modélisation hydraulique", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Montpellier (34), 256p.
- 233 - **Hubert-Moy L., Naizot T., Sandoz A., Bendjoudi H., Bourcier A., Couderchet L., Puech C., Loubersac L., Sajaloli B., Amoros C., Kergomard C. (2005a)**: "Les systèmes d'information géographique et les zones humides. Structurer et valoriser des données spatiales diversifiées" in (Michelot J.-L.), *PNRZH - Cahier thématique "Caractérisation des zones humides"*, Paris (75), pp.63-67

- 234 - **Hubert-Moy L., Naizot T., Sandoz A., Guérin R., Tabbagh J., Tabbagh A., Bourcier A., Couderchet L., Polidori L., Puech C., Loubersac L., Sajaloli B., Amoros C., Kergomard C. (2005b)**: "La télédétection. Des outils multiples pour mieux connaître les zones humides" in (Michelot J.-L.), *PNRZH - Cahier thématique "Caractérisation des zones humides"*, Paris (75), pp.54-62
- 235 - **Hunter N.M., Bates P.D., Horritt M.S., Wilson M.D. (2007)**: "Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review", *Geomorphology*, 90(3-4), pp.208-225
- 236 - **Huret M., Dadou I., Dumas F., Lazure P., Garçon V. (2005)**: "Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume", *Continental Shelf Research*, 25, pp.629-653
- 237 - **Hydroconcept (2007a)**: "Etude préalable à la mise en place d'un contrat restauration entretien zone humide et bassin versant", Document 11 : Définition des usages, des enjeux et des objectifs, SMMBMSJM, Le Château d'Olonne (85), 43p.
- 238 - **Hydroconcept (2007b)**: "Etude préalable à la mise en place d'un contrat restauration entretien zone humide et bassin versant", Document définitif, SMMBMSJM, Le Château d'Olonne (85), 110p.
- 239 - **Hydroconcept (2009)**: "Etude préalable à l'élaboration d'un Contrat Restauration Entretien de zones humides sur le Syndicat d'Aménagement Hydraulique du Sud Loire (2008-2010)", Phases 1 : Document de présentation, état des lieux et méthodologie, Rapport définitif, Le Château d'Olonne (85), 97p.
- 240 - **Hydroconcept (2010)**: "Etude préalable à l'élaboration d'un Contrat Restauration Entretien de zones humides sur le Syndicat d'Aménagement Hydraulique du Sud Loire (2008-2010)", Phases 1 : Diagnostic de l'état des marais et cours d'eau, Note de synthèse provisoire, Le Château d'Olonne (85), 276p.
- 241 - **IFEN (2004)**: "Inventaires des zones humides - Tronc commun national", 59p.,
- 242 - **IFEN (2006)**: "Les synthèses", pp.311-370
- 243 - **IFREMER (2007)**: "Mesure des flux hydrauliques dans les chenaux du Payré : lien avec la contamination microbiologique des zones ostréicoles - Approche hydrodynamique", Appel à proposition 2007 du Comité Scientifique et Technique et du SMIDAP pour la Région des Pays de la Loire, 15p.
- 244 - **IGN Conseil (2011)**: "La Directive INSPIRE - Formation des Géomaticiens", Région des Pays de la Loire, www.geopal.org
- 245 - **ISL Ingénierie (2004)**: "Etude hydraulique globale de l'entité hydrologique de l'Etier de Sallertaine", Rapport final, Juin 2004, 65p. + annexes
- 246 - **Jeanneret H., Gendronneau M., Haure J., Le Merrer Y., Lequette C., Lomakine C., Martin J.-L., Papin M., Ponthoreau C., Robin M. (2006)**: "Étude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé : estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchyliques", Fiche documentaire, Ifremer, Mars 2006, 118p. + annexes

- 247 - **Johannet A. (2009)**: "Modèles à réseaux de neurones formels" in (Tanguy J.-M.), *Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*, Vol. 4 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.251-277
- 248 - **Jousseaume M. (2010)**: "Origine des flux de polluants dans la baie de Bourgneuf : approches géomatique et statistique", Mémoire de Master 1 Mention *Biologie de l'environnement UFR Sciences et techniques*, Université de Nantes, Nantes, 31p.
- 249 - **Kang H., Choi S.U. (2008)**: "Turbulence modeling of solute transport in open-channel flows over submerged vegetation " in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 2 Environmental and Ecological Hydraulics, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.674-679
- 250 - **Kashefipour S.M., Falconer R.A. (2002)**: "Longitudinal dispersion coefficients in natural channels", *Water Research*, 36(6), pp.1596-1608
- 251 - **Kim J., Kim W., Lee C., Kim Y.J. (2008)**: "Characteristic of roughness coefficient associated with discharge in gravel-bed river" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 3 Fluvial Processes and River Engineering, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.963-968
- 252 - **Kim T.B., Choi S.U. (2008)**: "Depth-averaged modeling of vegetated open-channel flows using finite element method" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 2 Environmental and Ecological Hydraulics, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.411-416
- 253 - **Köhne J.M., Köhne S., Šimůnek J. (2009a)**: "A review of model applications for structured soils: a) Water flow and tracer transport", *Journal of Contaminant Hydrology*, 104(1-4), pp.4-35
- 254 - **Köhne J.M., Köhne S., Šimůnek J. (2009b)**: "A review of model applications for structured soils: b) Pesticide transport", *Journal of Contaminant Hydrology*, 104(1-4), pp.36-60
- 255 - **Laaribi A. (2000)**: "SIG et analyse multicritère", Lavoisier, Hermès Science Publications, Paris, 190p.
- 256 - **Ladouche B., Weng P. (2005)**: "Hydrochemical assessment of the Rochefort marsh : Role of surface and groundwater in the hydrological functioning of the wetland", *Journal of Hydrology*, 314, pp.22-42
- 257 - **Ladreyt S. (2012)**: "Utilisation de Mascaret en assimilation de données sur la Seine aval maritime", Séminaire du Club "modélisation hydraulique", 25 juin 2012, La Défense, Paris (75)
- 258 - **Langlois P. (2005a)**: "Complexité et systèmes spatiaux" in (Guermond Y.), *Modélisations en géographie - déterminismes et complexités*, Lavoisier, Hermès Science, Paris (75), pp.299-320

- 259 - **Langlois P. (2005b)**: "Les automates cellulaires pour la modélisation des systèmes spatiaux" in (Guermond Y.), *Modélisations en géographie - déterminismes et complexités*, Lavoisier, Hermès Science, Paris (75), pp.321-352
- 260 - **Langlois P., Reguer D. (2005)**: "La place du modèle et de la modélisation en Sciences Humaines et Sociales" in (Guermond Y.), *Modélisations en géographie - déterminismes et complexités*, Lavoisier, Hermès Science, Paris (75), pp.35-48
- 261 - **Laubier F. (2001)**: "La méthode de diagnostic parcellaire du risque de contamination des eaux superficielles par les produits phytosanitaires en Bretagne : fondements et mise en oeuvre", *Ingénieries - EAT* (spécial Agriculture et Environnement), pp.91-98
- 262 - **Laurent F., Ruelland D., Chapdelaine M. (2007)**: "Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT", *Revue des Sciences de l'Eau*, 20(4), pp.395-408
- 263 - **Lazarevic M., Pipaud P. (2010)**: "La rupture de la digue du Collet : une gouvernance locale", ENS CERES-ERTI, Atelier « Risques technologiques, environnement, gouvernance », Paris, Poster
- 264 - **Lazure P., Dumas F. (2008)**: "An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)", *Advances in Water Resources*, 31(2), pp.233-250
- 265 - **LCHF (1987)**: "Catalogue sédimentologique des côtes françaises : Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la baie du Mont Saint-Michel à la frontière espagnole", vol 65, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Edition Eyrolles, Paris (75), 562p.
- 266 - **Le Berre I. (2008)**: "SIG et services maritimes - Etude méthodologique pour la création de couches d'information sur le littoral", Notice n° GC 08.01, CETMEF, Janvier 2008, Plouzané (29), 64p.
- 267 - **Le Bihan V., Pardo S. (2012)**: "La couverture des risques en aquaculture. Une réflexion sur le cas de la conchyliculture en France", *Économie rurale*, 329, mai-juin 2012, pp.16-32
- 268 - **Le Borgne K., Balmain A. (2010)**: "Hydrométrie et qualité de l'eau : Instrumentation dans le Marais Breton", Projet tutoré (Licence 3 Professionnelle), Université de Nantes (44), 38p.
- 269 - **Le Coz J., Camenen B., Dramais G., Ribot-Bruno J., Ferry M., Rosique J.-L. (2011)**: "Contrôle des débits réglementaires", Guides techniques de la Police de l'eau, ONEMA, CEMAGREF, Septembre 2011, Vincennes (94), 132p.
- 270 - **Le Floch S., Candau J. (2001)**: "Le Marais Breton de Loire-Atlantique : la qualification paysagère d'un marais oublié", *L'Espace Géographique*, 2, pp.127-139
- 271 - **Le Pape C. (2010)**: "État du peuplement d'anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) et franchissabilité des ouvrages en marais breton vendéen", Master 1, Institut EGID Bordeaux 3 / Université Michel de Montaigne, Bordeaux (33), 54p.
- 272 - **Le Pape E. (2012)**: "Exploitation de mascaret en temps réel : outils développés par le SCHAPI", Séminaire du Club "modélisation hydraulique", 25 juin 2012, La Défense, Paris (75)

- 273 - **Le Pimpec C. (2004)**: "Etude des masses d'eau côtières et de transition fortement modifiées", Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Université de Caen (14), 191p.
- 274 - **Lefeuvre J.-C., Fustec E., Barnaud G. (2000)**: "De l'élimination à la reconquête des zones humides" in (Fustec E., Lefeuvre J.-C.), *Fonctions et valeurs des zones humides*, Environnement, Technique et Ingénierie, Dunod, Paris (75), pp.1-16
- 275 - **Lévy J., Lussault M. (2003)**: "Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés", Belin, Paris (75), 1034p.
- 276 - **Li W.F., Chen Q.W., Mao J.Q. (2009)**: "Development of 1D and 2D coupled model to simulate urban inundation: An application to Beijing Olympic Village", *Chinese Science Bulletin*, 54(9), pp.1613-1621
- 277 - **Liu S.-H., Cao B. (2011)**: "Hybrid simulation of the hydraulic characteristics at river and lake confluence", *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 23(1), pp.105-113
- 278 - **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, Université de Nantes (44), 284p.
- 279 - **Long C.M., Pavelsky T.M. (2013)**: "Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment", *Remote Sensing of Environment*, 129, pp.197-209
- 280 - **Lopez P.P. (2003)**: "Image satellitale et reconnaissance du relief suivant l'évolution de plans d'eau - Une application à deux marais de Moyenne Camargue avec SPOT2", Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Montpellier (34), 63p.
- 281 - **Loumagne C. (2001)**: "Observation spatiale et modélisation hydrologique pour la gestion des ressources en eau", Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Paris-Sud - Centre scientifique d'Orsay, Paris (75), 100p.
- 282 - **Lozachmeur O. (2005)**: "Le concept de «gestion intégrée des zones côtières» en droit international, communautaire et national", *Droit maritime français*, 657, Mars 2005, pp.259-277
- 283 - **Luck M. (2004a)**: "Système MASCARET : Note de principe de l'outil TRACER (transport de traceurs) et des modules de qualité d'eau O2, BIOMASS, EUTRO, MICROPOL et THERMIC", Note technique, Décembre 2004, EDF R&D, Chatou (78), 38p.
- 284 - **Luck M. (2004b)**: "Système MASCARET : Note de validation de TRACER (version 5.0) et exemples d'application des modules de qualité d'eau O2, BIOMASS, EUTRO, MICROPOL et THERMIC", Note technique, Décembre 2004, EDF R&D, Chatou (78), 52p.
- 285 - **Lukac F. (2001)**: "Caractérisation par télédétection THR du réseau hydraulique de surface d'un marais atlantique : qualité de caractérisation et résolution spatiale", Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Université Pierre et Marie Curie / Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Paris (75), 34p. + annexes
- 286 - **Luquiau A. (1996)**: "Le système d'endiguage du fond de la baie de Bourgneuf au coeur de la bataille de l'eau", *Revue Juridique NEPTUNUS*, 1, 9p.,

- 287 - **Luyet G. (1990)**: "Estimation des débits moyens mensuels sur cours d'eau alpins non mesurés : application à la Dranse de Bagnes", Hydrology in Mountainous Répons. I - Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia), August 1990, IAHS Publication n°193, pp.581-590
- 288 - **Malgogne J. (2009)**: "Mesures et suivis des flux de polluants transitant jusqu'en Baie de Bourgneuf : leurs influences sur la qualité de l'eau en zone côtière", Master 1, Université de Nantes (44), 38p.
- 289 - **Malleron N., Zaoui F., Goutal N., Morel T. (2011)**: "On the use of a high-performance framework for efficient model coupling in hydroinformatics", *Environmental Modelling & Software*, 26(12), pp.1747-1758
- 290 - **Maltby E., Hogan D.V., Immirzi C.P., Tellam J.H., Van der Peijl M.J. (1994)**: "Building a new approach to the investigation and assessment of wetland ecosystem functioning" in (Mitsch W. J.), *Global Wetlands : Old World and New*, Elsevier Science, Amsterdam (Netherlands), pp.637-658
- 291 - **MAP (2007)**: "Circulaire « mesures agroenvironnementales »", Texte législatif, 05 octobre 2007, Paris (75), 357p.
- 292 - **Marang L., Siclet F., Luck M., Maro D., Tenailleau L., Jean-Baptiste P., Fourré E., Fontugne M. (2011)**: "Modelling tritium flux from water to atmosphere: application to the Loire River", *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(3), pp.244-251
- 293 - **Marani M., Belluco E., Ferrari S., Silvestri S., D'Alpaos A., Lanzoni S., Feola A., Rinaldo A. (2006)**: "Analysis, synthesis and modelling of high-resolution observations of salt-marsh eco-geomorphological patterns in the Venice lagoon", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69, pp.414-426
- 294 - **Marant L. (2009)**: "Comparaison entre la modélisation de rivière unidimensionnelle (1D) et bidimensionnelle (2D) en vue d'une modélisation de la Basse Vallée de la Doller", Ingénieur, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (67), 97p.
- 295 - **Marchais J.-F. (1997)**: "Approche typologique des peuplements de macrophytes aquatiques du marais breton-vendéen - Suivi du réseau hydraulique d'une zone expérimentale", Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Université de Bordeaux II / Université d'Enseignement des Sciences Pharmaceutiques, Bordeaux (33), 190p.
- 296 - **Martinoty G. (2011)**: "Le programme Litto3D en Pays-de-la-Loire", Atelier régional Litto3D®, 22 septembre 2011, IFSTTAR, Bouguenais (44)
- 297 - **Massé J., Rigaud C., Castaing P., Dutartre A., Moreau A., Marchais J.-F., Bourdais J.-L., Merle V., Le Floch S., Nasr T., Chossat J.-C., Lechapt G., Puech C., Martin F., Raclot D. (2001)**: "Élaboration d'un système d'information à références spatiales pour l'aide à la gestion des zones humides littorales atlantiques", *Ingénieries - EAT* (spécial Agriculture et Environnement), pp.35-59
- 298 - **MATE (1998)**: "Charte qualité de l'hydrométrie - Code de bonnes pratiques", Septembre 1998, 47p. + annexes

- 299 - **Mathieu L., Scholl P., Durin V., Monaco M. (2009)**: "Atlas des zones inondables des cours d'eau côtiers", GINGER Environnement et infrastructures, Aix-en-Provence (13), 46p. + annexes
- 300 - **Maubourguet P. (1993)**: "Le petit Larousse", Grand Format, Paris (75), 1872p.
- 301 - **MEDAD (2007a)**: "Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques", Annexe 3 : Données hydrologiques, DGUHC, Avril 2007, 20p.
- 302 - **MEDAD (2007b)**: "Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques", Annexe 6 : Suivi de la réalisation de l'étude hydraulique, DGUHC, Avril 2007, 23p.
- 303 - **MEDAD (2007c)**: "Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques", Document principal, DGUHC, Septembre 2007, 58p.
- 304 - **MEDAD (2007d)**: "Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques", Annexe 4 : Choix de la modélisation, DGUHC, Avril 2007, 40p.
- 305 - **MedWet (2012)**: "Plan de Travail Stratégique MedWet 2012-2015", 11^{ème} réunion du Comité des Zones Humides Méditerranéennes, 5 juillet 2012, Bucarest (Roumanie), 10p.
- 306 - **MEEDDM (2009a)**: "Les zones humides : Un enjeu national", Bilan de 15 ans de politiques publiques, DEB - GNZH, Paris, 95p.
- 307 - **MEEDDM (2009b)**: "Programme LITEAU - Science & gouvernance en appui au développement durable de la mer et du littoral", Plaquette, DRI du CGDD, 2p.
- 308 - **MEEDDM (2010a)**: "Circulaire du 7 avril 2010 relative aux mesures à prendre suite à la tempête Xynthia du 28 février 2010", 25 mai 2010, pp.133-143
- 309 - **MEEDDM (2010b)**: "Plan national d'action en faveur des zones humides", GNZH, Février 2010, 28p.
- 310 - **MEEDDM (2010c)**: "Second appel à Propositions de Recherche pour le Programme Eaux & Territoires", Appel d'offres, DRI du CGDD, 16 février 2010, 16p.
- 311 - **Ménesguen A., Cugier P., Loyer S., Vanhoutte-Brunier A., Hoch T., Guillaud J.-F., Gohin F. (2007)**: "Two- or three-layered box-models versus fine 3D models for coastal ecological modelling ? A comparative study in the English Channel (Western Europe)", *Journal of Marine Systems*, 64(1-4), pp.47-65
- 312 - **Ménesguen A., Gohin F. (2006)**: "Observation and modelling of natural retention structures in the English Channel", *Journal of Marine Systems*, 63, pp.244-256
- 313 - **Mequignon L., Croisille G., Lejeune V. (2005)**: "Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières", Document technique, Institut français de l'environnement & Office national de la chasse et de la faune sauvage, 134p.
- 314 - **Merritt W.S., Letcher R.A., Jakeman A.J. (2003)**: "A review of erosion and sediment transport models", *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9), pp.761-799

- 315 - Mille D., Le Bihan V. (2011): "Mutations dans le secteur conchylicole ; Elaboration d'un outil opérationnel d'études et d'analyses technicoéconomiques", Synthèse des travaux 2010, Association du Grand Littoral Atlantique, Février 2011, 72p.
- 316 - Miossec A. (2004): "Les littoraux : entre nature et aménagement", Troisième édition, Armand Colin, Paris (75), 192p.
- 317 - Mitsch W.J., Gosselink J.G. (2000): "Wetlands", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Columbus, Ohio (United States), 920p.
- 318 - Moatar F. (2006): "Variabilités spatio-temporelles dans les systèmes fluviaux : descripteurs et modèles des couplages hydrologie – biogéochimie et hydraulique - morphologie", Habilitation à Diriger des Recherches, Université François-Rabelais, Tours (37), 147p.
- 319 - Monte L. (2009): "Multi-model approach and evaluation of the uncertainty of model results. Rationale and applications to predict the behaviour of contaminants in the abiotic components of the fresh water environment", *Ecological Modelling*, 220, pp.1469–1480
- 320 - Monte L., Boyer P., Brittain J.E., Goutal N., Heling R., Kryshev A., Kryshev I., Laptev G., Luck M., Periañez R., Siclet F., Zheleznyak M. (2008): "Testing models for predicting the behaviour of radionuclides in aquatic systems", *Applied Radiation and Isotopes*, 66(11), pp.1736-1740
- 321 - Monte L., Håkanson L., Periañez R., Laptev G., Zheleznyak M., Maderich V., Angeli G., Koshebutsky V. (2006): "Experiences from a case study of multi-model application to assess the behaviour of pollutants in the Dnieper–Bug Estuary", *Ecological Modelling*, 195, 247-263p.,
- 322 - Morena F. (2004): "Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé - Représentation des processus de production et développement du modèle URBS", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (38), 256p.
- 323 - Mossman D.J., Mulki N.A. (1996): "One-dimensional unsteady flow and unsteady pesticide transport in a reservoir", *Ecological Modelling*, 89(1-3), pp.259-267
- 324 - Mounès J. (1974): "Le Marais Breton et ses Marges : Etude de Géomorphologie et de sédimentologie", Thèse d'Etat de 3^e cycle, Université de Nantes (44), 425p.
- 325 - Moussa R., Bocquillon C. (1996): "Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels", *Journal of Hydrology*, 186, pp.1-30
- 326 - Moussa R., Bocquillon C. (2009): "On the use of the diffusive wave for modelling extreme flood events with overbank flow in the floodplain", *Journal of Hydrology*, 374, pp.116-135
- 327 - Muller J. (2006): "Développement d'un Système d'Informations Géographiques sur les dégradations du littoral : l'Ile de Noirmoutier", Master 1, Université Paris 1 / Panthéon / Sorbonne, Paris (75), 82p.
- 328 - Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., King K.W. (2002): "Soil and Water Assessment Tool", Theoretical documentation, 506p.

- 329 - **Nepf H.M., Mugnier C.G., Zavistoski R.A. (1997)**: "The Effects of Vegetation on Longitudinal Dispersion", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(6), pp.675-684
- 330 - **Nourry M., Baud D., Allenou J.-P. (1994)**: "Etude de salubrité des marais de Beauvoir-sur-Mer (Vendée)", Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral - IFREMER, 23 février 1994, Nantes (44), 33p.
- 331 - **NRC (1995)**: "Wetlands : Characteristics and boundaries", Committee on characterization of wetlands, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C. (United States), 328p.
- 332 - **Ohmoto T., Tanaka T. (2008)**: "Effects of vegetation arrangement pattern on flow resistance in an open channel" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 2 Environmental and Ecological Hydraulics, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.478-484
- 333 - **Olsen S.B. (2000)**: "Educating for the governance of coastal ecosystems: the dimension of the challenge", *Ocean and Coastal Management*, 43, pp.331-341
- 334 - **OMM (1994)**: "Guide des pratiques hydrologiques - Acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications", 5^e édition, 829p.
- 335 - **ONU (1971)**: "Convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau", 2 février 1971, Ramsar (Iran), 6p.
- 336 - **ONU (1972)**: "Déclaration sur l'Environnement", 5 - 16 juin 1972, Stockholm (Suède), 6p.
- 337 - **ONU (1979)**: "Convention sur la Conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage", 23 juin 1979, Bonn (Allemagne), 16p.
- 338 - **ONU (1982)**: "Convention des Nations Unies sur le droit de la mer", 10 décembre 1982, Montego Bay (Jamaïque), 178p.
- 339 - **ONU (1992a)**: "Convention sur la Diversité Biologique", 5 juin 1992, Rio de Janeiro (Brésil), 30p.
- 340 - **ONU (1992b)**: "Déclaration de Rio sur l'Environnement et le Développement", 3-14 juin 1992, Rio de Janeiro (Brésil), 6p.
- 341 - **ONU (1995)**: "Programme d'action mondial pour la protection du milieu marin contre la pollution due aux activités terrestres", 23 octobre - 03 novembre 1995, Washington (Etats-Unis), 65p.
- 342 - **ONU (2002)**: "Programme des Nations Unies pour l'Environnement", Rapport du Conseil d'Administration - Septième session extraordinaire, 13-15 février 2002, New York (Etats-Unis), 76p.
- 343 - **ONU (2012)**: "RIO+20 : Conférence des Nations Unies sur le développement durable", 20-22 juin 2012, Rio de Janeiro (Brésil), 60p.
- 344 - **OSPAR (1992)**: "Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est", Texte tel qu'amendé le 24 juillet 1998 et actualisé le 9 mai 2002, 7 février 2005 et le 18 mai 2006

/ Amendements aux Annexes II et III adoptés à OSPAR 2007, Commission OSPAR, 21-22 septembre 1992, Paris, 44p.

345 - **OSPAR (2000)**: "Quality Status Report 2000: Region IV - Bay of Biscay and Iberian Coast", OSPAR Commission, London (United Kingdom), 134p. + xiii p.

346 - **OSPAR (2010)**: "Bilan de santé 2010", Commission OSPAR, Londres (Royaume-Uni), 176p.

347 - **Paskoff R. (1993)**: "Côtes en danger", Masson, Pratiques de la Géographie, Paris (75), 250p.

348 - **Paticat F. (2007)**: "Flux et usages de l'eau de mer dans les marais salés endigués Charentais : Cas du marais salé endigué de l'île de Ré", Thèse de Doctorat, Université de Nantes (44), 387p.

349 - **Payraudeau S. (2002)**: "Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens", Thèse de Doctorat, *Spécialité : Sciences de l'eau*, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Montpellier,

350 - **Pellouin-Grouhel A., Ratiskol G. (2011)**: "Bulletin de la surveillance de la qualité du milieu marin littoral (Résultats acquis jusqu'en 2010)", Ifremer/RST.LER/MPL/11.05, Laboratoire Environnement Ressources de Nantes (44), Juin 2011, 107p.

351 - **Peron F., Rieucan J. (1996)**: "La maritimité aujourd'hui", Géographie et cultures, L'Harmattan, Clamecy (58), 335p.

352 - **Perrin C. (2000)**: "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (38), 287p.

353 - **Perrineau L., Blanchet F. (2011)**: "Manuel d'aide à l'identification des "zones humides prioritaires", des ZHIEP et des ZSGE", FMA, Rochefort, 72p.

354 - **Perucca E., Camporeale C., Ridolfi L. (2009)**: "Estimation of the dispersion coefficient in rivers with riparian vegetation", *Advances in Water Resources*, 32(1), pp.78-87

355 - **Petit V., Cabridenc R., Swannell R.P.J., Sokhi R.S. (1995)**: "Review of strategies for modelling the environmental fate of pesticides discharged into riverine systems", *Environment International*, 21(2), pp.167-176

356 - **Peuquet D.J. (1984)**: "A conceptual framework and comparison of spatial data models", *Cartografica*, 21, pp.66-113

357 - **Pierre D., Colmar A. (2009)**: "Diagnostic Régional - Réalisation d'une cartographie de l'impact potentiel des produits phytosanitaires sur les eaux superficielles de la région Pays de la Loire", Rapport technique pour la CREPEPP Pays de la Loire, Géo-Hyd, Olivet (45), 94p.

358 - **Piriou J.-Y., Coïc D., Merceron M. (1999)**: "Abattement de l'azote par le marais côtier de Kervigen et potentiel breton", Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral, 23-24 septembre 1999, Ploufragan (22), Ifremer, pp.275-287

359 - **Plus M., Dumas F., Stanisière J.-Y., Maurer D. (2009)**: "Hydrodynamic characterization of the Arcachon Bay, using model-derived descriptors", *Continental Shelf Research*, 29(8), pp.1008-1013

- 360 - **Plus M., La Jeunesse I., Bouraoui F., Zaldívar J.-M., Chapelle A., Lazure P. (2006a)**: "Modelling water discharges and nitrogen inputs into a Mediterranean lagoon - Impact on the primary production", *Ecological Modelling*, 193(1-2), March 2006, pp.69-89
- 361 - **Plus M., Maurer D., Stanisière J.-Y., Dumas F. (2006b)**: "Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale, le Bassin d'Arcachon", Rapport d'études, Ifremer - Laboratoire Environnement littoral - Ressources aquacoles d'ARcachon, 54p.
- 362 - **Pomiès M., Choubert J.M., Wisniewski C., Coquery M. (2013)**: "Modelling of micropollutant removal in biological wastewater treatments: A review", *Science of The Total Environment*, 443, pp.733-748
- 363 - **Pontié M. (2010)**: "Techniques récentes en analyses de l'environnement et des milieux biologiques", *Techniques de l'Ingénieur*, (Innovation 140), Décembre 2010, 12p.,
- 364 - **Populus J. (2002)**: "Altimétrie par Lidar aéroporté et Modèles Numériques de Terrain", Ifremer, Brest, 30p.
- 365 - **Populus J., Barreau G., Fazilleau J., Kerdreux M., L'Yavanc J. (2001)**: "Assessment of the Lidar topographic technique over a coastal area", Second International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management, June 18-20, 2001, Halifax (Canada)
- 366 - **Pottier P. (1994)**: "Dites-le avec des cartes", *Mappemonde*, 1, pp.37-39
- 367 - **Pottier P., (coord.), Chadenas C., Pouillaude A., Struillou J.-F. (2009)**: "Evaluer la capacité d'accueil et de développement des territoires littoraux - Approche et méthode", Cahier n°2, DREAL des Pays de la Loire, Avril 2009, 83p.
- 368 - **Prata F., Camponez V., Lavorenti A., Tornisielo V.L., Borges J. (2003)**: "Glyphosate sorption and desorption in soils with distinct phosphorus levels", *Scientia Agricola*, 60, pp.175-180
- 369 - **PRPC (1999)**: "Plan d'action pour le Marais poitevin - Délimitation et caractérisation de la zone humide du Marais poitevin", 52p.
- 370 - **Puech C. (2000)**: "Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes", Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble (38), 105p.
- 371 - **Puech C., Jeansoulin R., Masse J., Bailly J.S. (1999)**: "Apports de la télédétection et des relations topologiques pour la production d'indicateurs de l'état et du fonctionnement des zones humides", Projet PIR EVS - Zones humides - Convention 97/C/59, Octobre 1999, 16p.
- 372 - **Pujol L., Sanchez-Cabeza J.-A. (2000)**: "Use of tritium to predict soluble pollutants transport in Ebro River waters (Spain)", *Environmental Pollution*, 108(2), pp.257-269
- 373 - **Racine J.-B. (1974)**: "Modèles de recherche et modèles théoriques en géographie", *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 413-414, pp.51-66
- 374 - **Raclot D. (2003a)**: "Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine", Thèse de Doctorat, Université Montpellier II (34), 284p.

- 375 - **Raclot D. (2003b)**: "Télédétection des niveaux d'eau en plaine inondée - Démarche d'analyse spatiale guidée par le fonctionnement hydraulique", *SFPT*, 172(4), pp.87-98
- 376 - **Rameau J.-C., Bissardon M., Guibal L. (1997)**: "Corine Biotopes. Version originale - Types d'habitats français", Manuel, ENGREF, MNHN, 175p.
- 377 - **Ravoux G., Joly J.-P., Piquion J.-C. (1994)**: "Zones conchylicoles. Classement de salubrité des zones de production", Fiche pratique n°11, 5p.
- 378 - **Refsgaard J.C., Henriksen H.J. (2004)**: "Modelling guidelines - terminology and guiding principles", *Advances in Water Resources*, 27, pp.71-82
- 379 - **Réméniéras G. (1986)**: "L'hydrologie de l'ingénieur", 2^e édition revue et augmentée, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, Paris (75), 456p.
- 380 - **Reynard E. (2005)**: "Géomorphosites et paysages", *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, pp.181-188
- 381 - **RF (1986)**: "Loi n°86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral", *Journal Officiel de la République Française*, 4 janvier 1986, 7p.,
- 382 - **RF (1992)**: "Loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau", *Journal Officiel de la République Française*, 4 janvier 1992, 23p.,
- 383 - **RF (1995)**: "Loi n°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement", *Journal Officiel de la République Française*, 3 février 1995, pp.1840-1856
- 384 - **RF (2004)**: "Loi n°2004-338 du 21 avril 2004 portant transposition de la Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau", *Journal Officiel de la République Française*, 22 avril 2004, pp.7327-7329
- 385 - **RF (2005)**: "Loi n°2005-157 du 23 février 2005 relative au développement des territoires ruraux", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 1, 24 février 2005, 86p.,
- 386 - **RF (2006a)**: "Arrêté du 6 avril 2006 portant désignation du site Natura 2000 marais breton, baie de Bourgneuf, île de Noirmoutier et forêt de Monts (zone de protection spéciale)", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 34, 16 avril 2006, 1p.,
- 387 - **RF (2006b)**: "Arrêté du 17 mars 2006 relatif au contenu des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 65, 15 avril 2006, 5p.,
- 388 - **RF (2006c)**: "Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 3, 31 décembre 2006, 53p.,
- 389 - **RF (2007)**: "Décret n°2007-135 du 30 janvier 2007 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides figurant à l'article L. 211-1 du code de l'environnement", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 49, 1 février 2007, 1p.,

- 390 - **RF (2008a)**: "Arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 7, 9 juillet 2008, 69p.,
- 391 - **RF (2008b)**: "Arrêté du 30 octobre 2008 portant désignation du site Natura 2000 estuaire de la Loire - baie de Bourgneuf (zone de protection spéciale)", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 9, 6 novembre 2008, 1p.,
- 392 - **RF (2009)**: "Arrêté du 1^{er} octobre 2009 modifiant l'arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 2, 24 novembre 2009, 5p.,
- 393 - **RF (2010)**: "Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement", *Journal Officiel de la République Française*, Texte 1, 13 juillet 2010, 126p.,
- 394 - **Riahi-Madvar H., Ayyoubzadeh S.A., Khadangi E., Ebadzadeh M.M. (2009)**: "An expert system for predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by using ANFIS", *Expert Systems with Applications*, 36, pp.8589-8596
- 395 - **Ricci M., Bercaru O., Ulberth F., Morabito R., Brunori C., Ipolyi I., Pellegrino C., Sahuquillo A. (2007)**: "Critical evaluation of interlaboratory comparisons for PAHs and pesticides in organic standard solutions in support of the implementation of the Water Framework Directive", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26(8), pp.818-827
- 396 - **Ricci M., Kourtchev I., Emons H. (2012)**: "Chemical water monitoring under the Water Framework Directive with Certified Reference Materials", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 36, pp.47-57
- 397 - **Riou P., Le Saux J.C., Dumas F., Caprais M.P., Le Guyader S.F., Pommepuy M. (2007)**: "Microbial impact of small tributaries on water and shellfish quality in shallow coastal areas", *Water Research*, 41(12), pp.2774-2786
- 398 - **Rivron J.-P. (2010)**: "Historique des vimers, tempêtes et inondations aux Moutiers-en-Retz et sur les côtes de la Baie de Bourgneuf", *La Garzette*, (Numéro spécial n°1), Automne 2010, 11p.,
- 399 - **Robert J.-M. (1973)**: "La diatomée *Navicula ostrearia* Bory en baie de Bourgneuf", *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 37(3), Juillet 1973, pp.363-368
- 400 - **Robin M. (1992)**: "Téledétection des inondations : l'exemple du marais de Monts (Vendée. Ouest France)", *Norois*, 155, pp.317-335
- 401 - **Robin M., Morsetti V., Pichereau D., Babillot P., Colas S., Texier C., Thuillier A. (2005)**: "L'information géographique de référence en zone côtière : la situation française" in (Gourmelon F., Robin M.), *SIG et littoral*, Série Aménagement et gestion du territoire, Hermès Science Publications, Lavoisier, Paris (75), pp.49-83
- 402 - **Roche M. (1963)**: "Hydrologie de surface", Gauthier-Villars Editeur, Paris (75), 429p.

- 403 - **Rocq S. (2007)**: "Potentialités du polder du Dain (Bouin, 85) quant au développement de l'activité de prégrossissement de coquillages", Ingénieur, Établissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon (21), 53p.
- 404 - **Rodier J., Bazin C., Broutin J.-P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L. (1996)**: "L'Analyse de l'Eau : Eaux Naturelles, Eaux Résiduaire et Eau de Mer", Dunod (8e édition), Paris (75), 1384p.
- 405 - **Rolland G. (2005)**: "Synthèse bibliographique sur la Gestion Intégrée des Zones Côtières - Etat des lieux en France, dans son contexte européen et international", Rivages de France, Mai 2005, 50p.
- 406 - **Rollo N. (2006)**: "Modélisation agro-hydrologique de la partie amont du bassin versant du Loc'h", Master 2, Université de Nantes (44), 70p.
- 407 - **Rollo N. (2012)**: "Modélisation des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière d'Auray - Quantification, caractérisation et gestion des apports nutritifs terrigènes", Thèse de Doctorat, Université de Nantes (44), 394p.
- 408 - **Roux H., Raclot D., Dartus D. (2003)**: "Méthodes d'assimilation de données d'observation de la Terre appliquées à la reconstitution de paramètres hydrauliques", *SFPT*, 172(4), pp.40-49
- 409 - **SAFEGE (2011)**: "Compléments de modélisation hydrodynamique de la frange littorale nord du Marais Breton Vendéen", Rapport final, Conseil Général de Vendée, Juin 2011, 34p. + annexes
- 410 - **Saint-Gérand T. (2005)**: "Comprendre pour mesurer ... ou mesurer pour comprendre ? HBDS : pour une approche conceptuelle de la modélisation géographique du monde réel" in (Guermond Y.), *Modélisations en géographie - déterminismes et complexités*, Lavoisier, Hermès Science, Paris (75), pp.261-298
- 411 - **Salomon P. (2000)**: "Fiabilité des données topographiques et bathymétriques pour les calculs d'hydraulique", CETMEF, Blois (41), 73p.
- 412 - **Samaali M. (1999)**: "Etude de zones humides par approche spatiale : application à un marais anthropique (marais de Bourgneuf en Loire-Atlantique) et à un marais naturel (Kaw en Guyane)", Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Montpellier (34), 100p.
- 413 - **Samoudi S. (2000)**: "Etude des connectivités des surfaces parcellaires aux fossés. Aide à la compréhension du fonctionnement hydrologique des marais atlantiques. Apports et limites de la télédétection", Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Montpellier (34), 106p.
- 414 - **Sanchez M., Delanoë Y. (2006)**: "L'envasement dans différents ports de Loire-Atlantique" in, *Actes des IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006*, © Editions Paralia CFL, Brest (29), pp.419-430
- 415 - **SANDRE (2004)**: "Dictionnaire de données sur l'inventaire des zones humides", Version : 2004-1, MEDD, 27 août 2004, 135p.

- 416 - **Sargent R.G. (2009)**: "Verification and validation of simulation models", Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 13-16 december 2009, Austin, Texas (United States), Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp.162-176
- 417 - **Sarrazin J.-L. (2012)**: "« Vimers de mer » et sociétés littorales entre Loire et Gironde (XIV^e-XVI^e siècle)", *Norois*, 222, pp.91-102
- 418 - **Sauveterre (1980)**: "Approche agro-économique du Marais Breton - Vendée / Loire-Atlantique", Février 1980, Paris, 36p. + annexes
- 419 - **SCE (2000a)**: "SAGE du Marais Breton et du bassin versant de la Baie de Bourgneuf - Diagnostic global", Première partie : Caractéristiques générales, Avril 2000, 58p.
- 420 - **SCE (2000b)**: "SAGE du Marais Breton et du bassin versant de la Baie de Bourgneuf - Diagnostic global", Troisième partie : Sources d'altération des usages de l'eau et des milieux aquatiques, Juillet 2000, 45p.
- 421 - **SCE (2002)**: "Etude de faisabilité de l'augmentation de la capacité d'évacuation instantanée de l'étier de Sallertaine - Phase 1 : Recueil de données", Rapport définitif, SMMBMSJM / Conseil Général de Vendée, Juin 2002, 35p. + annexes
- 422 - **SCE (2003)**: "Etude hydraulique globale de l'étier de Sallertaine - Phase 2 : Etude hydraulique", Rapport définitif, SMMBMSJM / Conseil Général de Vendée, Juin 2003, 25p. + annexes
- 423 - **Schuette J. (1998)**: "Environmental fate of glyphosate. Environmental monitoring and pest management", Department of Pesticide Regulation, Sacramento, (United States), 13p.
- 424 - **Seo I.W., Park S.W., Choi H.J. (2008)**: "A study of pollutant mixing and evaluating of dispersion coefficients in laboratory meandering channel" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 2 Environmental and Ecological Hydraulics, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.485-490
- 425 - **Servigne S. (2006)**: "Concepts de base" in (Servigne S., Lirourel T.), *Fondements des bases de données spatiales*, Série Géomatique, Hermès Science Publications, Lavoisier, Paris (75), pp.21-36
- 426 - **Shaghaghian M.R., Talebbeydokhti N. (2008)**: "Comparison of several finite difference schemes in flow modeling over an ogee spillway" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 5 Hydraulic Structures for Water Projects, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.1725-1730
- 427 - **Shi B., Wang C., Zegao Y., Zhao L. (2008)**: "Roughness coefficient relations of open channel with flexible submerged vegetation" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 2 Environmental and Ecological Hydraulics, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.639-642
- 428 - **SHOM (2009)**: "Références altimétriques maritimes (zéros hydrographiques) - Zone Nord Gascogne", Edition 2009, 2p.

- 429 - **Silvestri S., Marani M., Marani A. (2003)**: "Hyperspectral remote sensing of salt marsh vegetation, morphology and soil topography", *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, pp.15-25
- 430 - **SMIDAP (2008)**: "Activités de l'année 2007 - Projets pour l'année 2008", Nantes (44), 43p.
- 431 - **Spongberg A.L., Gottgens J.F., Muller B.E. (2004)**: "Pesticide accumulation rates in a managed marsh along lake Erie", *Water, Air, and Soil Pollution*, 152, pp.387-404
- 432 - **Ståhlberg C., Bastviken D., Svensson B.H., Rahm L. (2006)**: "Mineralisation of organic matter in coastal sediments at different frequency and duration of resuspension", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70, pp.317-325
- 433 - **Stanisière J.-Y., Dumas F., Plus M., Maurer D., Robert S. (2006)**: "Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oléron", Rapport d'études, Ifremer - Laboratoire Environnement Ressources Poitou Charentes, 112p.
- 434 - **Strub M.P., Granier D., Lepot B., Charretier C. (2008)**: "Dosage du glyphosate et de l'AMPA - Essais interlaboratoires de caractérisation des projets de normes ISO/DIS 21458 et PrXP T 90-187-1", Rapport d'étude, INERIS, 11 janvier 2008, Verneuil-en-Halatte (60), 19p. + annexes
- 435 - **Tanguy J.-M. (2009a)**: "Modèles de courantologie fluviale et maritime" in (Tanguy J.-M.), *Modèles mathématiques en hydrologie et en hydraulique fluviale*, Vol. 3 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.119-184
- 436 - **Tanguy J.-M. (2009b)**: "Niveaux et débits dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs" in (Tanguy J.-M.), *Processus estuariens et littoraux : systèmes d'acquisitions des données*, Vol. 2 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.235-251
- 437 - **Tartinville B., Deleersnijder E., Lazure P., Proctor R., Ruddick K.G., Uittenbogaard R.E. (1998)**: "A coastal ocean model intercomparison study for a three-dimensional idealised test case", *Applied Mathematical Modelling*, 22(3), pp.165-182
- 438 - **Tekatlian A. (2009)**: "Données topographiques et bathymétriques" in (Tanguy J.-M.), *Processus estuariens et littoraux : systèmes d'acquisitions des données*, Vol. 2 Traité d'hydraulique environnementale, Lavoisier, Paris (75), pp.211-222
- 439 - **Ters M. (1978a)**: "Machecoul", BRGM, 1:50 000, Notice explicative de la carte géologique 507
- 440 - **Ters M. (1978b)**: "Mâchecoul", BRGM, 1:50 000, Notice explicative de la carte géologique 507
- 441 - **Ters M., Viaud J.-M. (1983)**: "Challans", BRGM, 1:50 000, Notice explicative de la carte géologique 534
- 442 - **Thimel A. (1994)**: "La pêche en baie de Bourgneuf", Ifremer, Septembre 1994, La Rochelle (17), 88p.
- 443 - **Thomas Y., Le Gendre R., Garen P., Dumas F., Andréfouët S. (2012)**: "Bivalve larvae transport and connectivity within the Ahe atoll lagoon (Tuamotu Archipelago), with application to pearl oyster aquaculture management", *Marine Pollution Bulletin*, 65(10-12), pp.441-452

- 444 - **Tortrat F., Arousseau P., Squidant H., Gascuel-Oudoux C., Cordier M.-O. (2004):** "Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et spatialisation des transferts de surface : utilisation de structures d'arbres reliant les exutoires de parcelles et leurs surfaces contributives", *SFPT*, 172, pp.128-136
- 445 - **Tournade F., Bouzillé J.-B. (1995):** "Déterminisme pédologique de la diversité végétale d'écosystèmes prairiaux du Marais Poitevin", *Etude et Gestion des Sols*, 2(1), Février 1995, pp.57-72
- 446 - **Töyrä J., Pietroniro A. (2005):** "Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques", *Remote Sensing of Environment*, 97, pp.174-191
- 447 - **Tsui M.T.K., Chu L.M. (2008):** "Environmental fate and non-target impact of glyphosate-based herbicide (Roundup) in a subtropical wetland", *Chemosphere*, 71(3), pp.439-446
- 448 - **Untermaier J. (2007):** "Zones humides infos", (55), Juillet 2007, 32p.,
- 449 - **van der Perk M., Bierkens M.F.P. (1997):** "The identifiability of parameters in a water quality model of the Biebrza River, Poland", *Journal of Hydrology*, 200, pp.307-322
- 450 - **Vanroye C. (2011):** "Les données altimétriques terre-mer au service de la gestion des risques littoraux : applications en Languedoc-Roussillon", Atelier régional Litto3D®[®], 22 septembre 2011, IFSTTAR, Bouguenais (44)
- 451 - **Vanroye C., Garcia C., Marion L., Pastol Y. (2010):** "Utilisation du lidar bathymétrique dans le golfe du Lion" in, *Actes des XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 22-25 juin 2010*, © Editions Paralia CFL, Les Sables d'Olonne, pp.565-572
- 452 - **Vergier F. (1964):** "Mottureaux et Gilgais", *Annales de Géographie*, 73(398), pp.413-430
- 453 - **Vergier F. (1968):** "Marais et wadden du littoral français", Biscaye frères, Bordeaux (33), 541p.
- 454 - **Vergier F. (1994):** "Un microrelief provoqué par l'alternance dessiccation / humidification : les gilgais", *Sécheresse*, 3(5), Septembre 1994, pp.211-217
- 455 - **Vergier F. (1995):** "Slikkes et Schorres : milieux et aménagement", *Norvoois*, 165, pp.235-245
- 456 - **Vergier F. (2005):** "Marais et estuaires du littoral français", Belin, Paris (75), 335p.
- 457 - **Vergier F. (2009):** "Zones humides du littoral français", Belin, Paris (75), 448p.
- 458 - **Vidal J.-P. (2005):** "Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale - Apports de l'intelligence artificielle", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (31), 310p.
- 459 - **Vidal J.-P., Moisan S., Faure J.-B., Dartus D. (2007):** "River model calibration, from guidelines to operational support tools", *Environmental Modelling & Software*, 22(11), pp.1628-1640
- 460 - **Wallis S.G., Manson J.R. (2005):** "On the theoretical prediction of longitudinal dispersion coefficients in a compound channel" in (Czernuszenko W., Rowinski P. M.), *Water Quality Hazards and Dispersion of Pollutants*, Springer, New York (United States), pp.69-84

- 461 - **Weng P., Bouarfa S., Chevallier C., Perrier A., Tuzet A., Giraud F., Kao C. (2003)**: "Quantification des différents termes du bilan hydrique de parcelles agricoles dans le marais de Rochefort en conditions estivales", Rapport BRGM RP-52606-FR, BRGM, Octobre 2003, 57p.
- 462 - **Weng P., Coudrain-Ribstein A., Kao C., Bendjoudi H., de Marsily G. (1999)**: "Mise en évidence de fortes circulations verticales temporaires entre zones humides et aquifères alluviaux et régionaux", *Sciences de la terre et des planètes*, 329, pp.257-263
- 463 - **Wise S.M. (2007)**: "Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model", *Computers & Geosciences*, 33(10), pp.1351-1365
- 464 - **Ximenès M.C., Fouque C., Barnaud G. (2007)**: "Etat 2000 et évolution 1990-2000 des zones humides d'importance majeure", Document technique, IFEN-ONCFS-MNHN-FNC, Orléans (45), 136p. + annexes
- 465 - **Yan Z., Wang X. (2008)**: "The effect of vegetation rigidity on flow resistance" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 2 Environmental and Ecological Hydraulics, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.643-645
- 466 - **Yang S.L., Li H., Ysebaert T., Bouma T.J., Zhang W.X., Wang Y.Y., Li P., Li M., Ding P.X. (2008)**: "Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: On the role of physical and biotic controls", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(4), pp.657-671
- 467 - **Yoshida K., Ishikaw T. (2008)**: "Quasi-3D solver of meandering river flows by cip-soroban scheme in cylindrical coordinates with support of boundary fitted coordinate method" in, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Vol. 3 Fluvial Processes and River Engineering, Tsinghua University Press / Springer, Hohai University, Nanjing (China), pp.951-956
- 468 - **Zhang S., Duan J.G. (2011)**: "1D finite volume model of unsteady flow over mobile bed", *Journal of Hydrology*, 405(1-2), pp.57-68

Table des matières

A.	INTRODUCTION	1
A.1	Les zones humides littorales	3
A.1.1	Vers une amélioration des consciences	4
A.1.2	Au sein de la législation française	7
A.1.3	De la façade atlantique française.....	11
A.2	Objectifs environnementaux.....	18
A.2.1	Fonctions et valeurs	18
A.2.2	Protections des zones humides : mesures et réglementations.....	21
A.3	Cadre scientifique.....	29
A.3.1	Modélisation des flux sur le continuum terre - mer	29
A.3.2	Programme de recherche GERRICO.....	30
A.3.3	Problématique	32
B.	MARAIS BRETON	37
B.1	Contexte général.....	39
B.1.1	Localisation et caractérisation physique.....	39
B.1.1.1	Les coteaux	42
B.1.1.2	Le Marais Breton.....	42
B.1.1.3	L'île de Noirmoutier.....	43
B.1.1.4	La Baie de Bourgneuf	43
B.1.2	Genèse du marais	45
B.1.2.1	Processus morphologiques.....	46
B.1.2.2	Actions de l'Homme.....	47
B.1.2.3	Réseau hydrographique.....	51
B.1.3	Climat.....	54
B.1.3.1	Précipitations.....	54
B.1.3.2	Température	58
B.1.3.3	Vent	58
B.1.3.4	Ensoleillement.....	59
B.2	Usages et pressions.....	61
B.2.1	Occupation du sol.....	61
B.2.2	Activités socio-économiques	64
B.2.2.1	Agriculture.....	64
B.2.2.2	Cultures marines.....	67
a)	Saliculture	68
b)	Conchyliculture	68
c)	Activités aquacoles.....	71
B.2.2.3	Ports et pêches.....	72
B.2.2.4	Tourisme.....	74

B.2.3	Zones protégées	75
B.2.4	Harmonisation des usages.....	77
B.3	Contexte hydrologique et qualité des eaux.....	82
B.3.1	Entretiens et gestion hydraulique du Marais Breton	82
B.3.1.1	Associations de propriétaires	83
B.3.1.2	Principe de gestion	85
a)	Marais salé	86
b)	Marais doux	86
•	En période hivernale.....	86
•	En période estivale.....	87
B.3.1.3	Manceuvres hydrauliques.....	89
B.3.2	Dynamique des flux d'eau	92
B.3.2.1	Régime hydrologique	92
B.3.2.2	Hydrogéologie du Marais Breton	95
B.3.2.3	Inondations dans le marais.....	97
a)	Crues par débordement.....	98
b)	Submersions marines.....	98
c)	Plans de prévention des risques	101
B.3.3	Qualité des milieux.....	103
B.3.3.1	Sources des pollutions.....	103
B.3.3.2	Etat hydromorphologique.....	105
B.3.3.3	Etat de la qualité des eaux.....	108
a)	Nutriments	109
b)	Bactéries.....	113
c)	Produits phytosanitaires	115
d)	Métaux	119
C.	MATERIELS ET METHODES	125
C.1	Modélisation.....	127
C.1.1	Définitions et objectifs.....	127
C.1.1.1	Définitions du modèle et des termes connexes.....	127
C.1.1.2	Démarche et activité de modélisation.....	128
C.1.2	Apports de la géographie et des outils informatiques	130
C.1.2.1	Approche graphique.....	130
C.1.2.2	Apports des SIG	132
C.1.2.3	Modélisation <i>in silico</i>	134
C.1.3	Cas des modèles hydrologiques.....	135
C.1.3.1	Principe et classification des modèles	136
C.1.3.2	Critères de choix pour la modélisation dans les marais.....	138
C.1.3.3	Modèle Fudaa-Mascaret.....	144
C.2	Données	147
C.2.1	Inventaire et structuration des données	147
C.2.2	Choix et acquisition des données pour la modélisation.....	151
C.2.2.1	Topographie et bathymétrie	151
C.2.2.2	Niveaux d'eau et débits	153
C.2.2.3	Météorologie	157
C.2.2.4	Qualité de l'eau.....	158

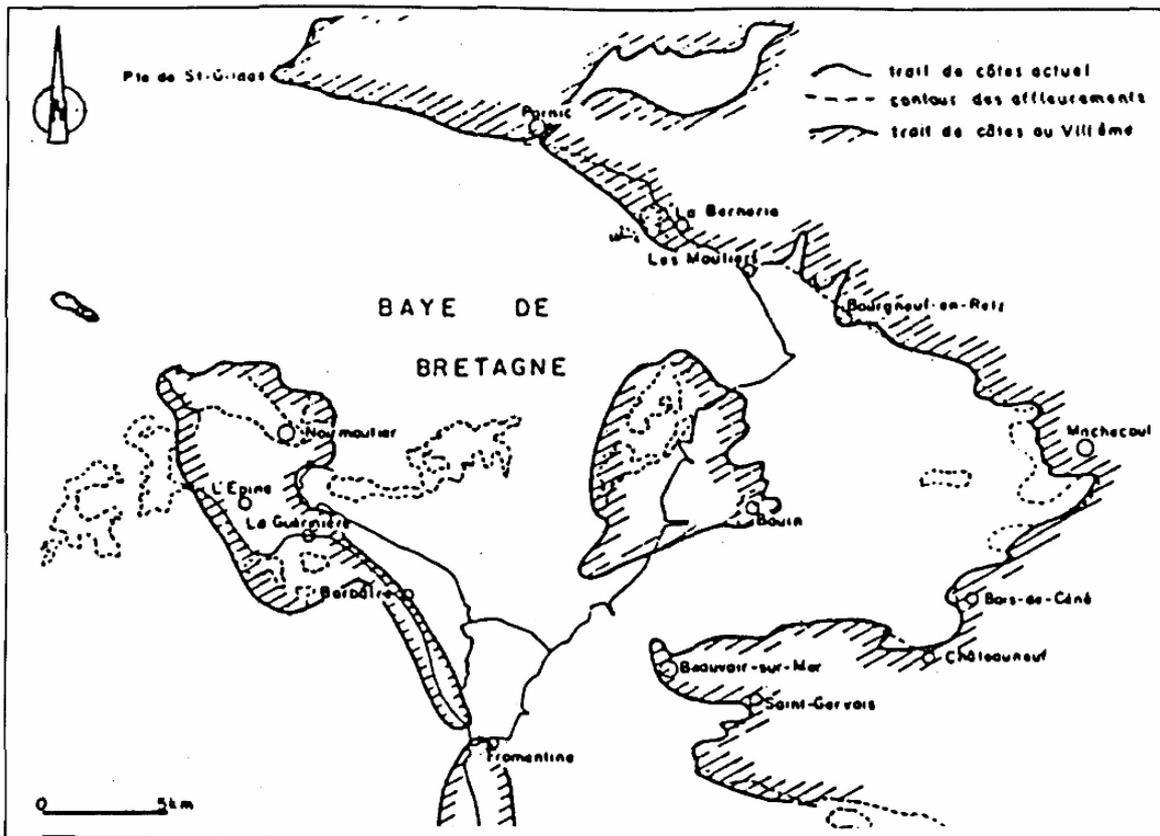
C.2.3	Bilan hydrologique	165
C.2.3.1	Etat des connaissances.....	166
C.2.3.2	Calcul de l'évapotranspiration (ETP)	167
C.2.3.3	Calcul de la lame écoulée.....	168
C.2.3.4	Résultats.....	168
D.	ANALYSE ET MODELISATION	173
D.1	Résultats de la campagne sur le terrain de 2009	175
D.1.1	Nutriments	175
D.1.2	Bactéries.....	177
D.1.3	Pesticides.....	182
D.2	Modélisation des flux dans le marais.....	189
D.2.1	Mise en œuvre de la modélisation	189
D.2.2	Définition de scénarii de simulation	193
D.2.3	Intégration des données.....	195
D.2.3.1	Construction du réseau hydrographique.....	195
D.2.3.2	Coefficient de rugosité	197
D.2.3.3	Coefficient de diffusion	199
D.2.4	Simulations des flux d'eau dans la zone pilote.....	200
D.2.4.1	Conditions initiales	200
D.2.4.2	Sans gestion hydraulique	203
D.2.4.3	Avec gestion hydraulique.....	205
D.3	Chaînage des modèles	211
D.3.1	Modèle SWAT.....	212
D.3.2	Modèle Mars 2D	213
D.3.3	Mise en œuvre à l'échelle du BVBB et de la Baie de Bourgneuf.....	213
D.3.4	Calibration et validation	215
E.	DISCUSSIONS	221
E.1	Avantages de Mascaret	221
E.2	Vers une meilleure modélisation des flux dans le marais.....	222
E.3	Intérêts du chaînage des modèles	225
E.4	Recommandations pour des études futures	227
E.4.1	Echantillonnage et méthodes analytiques.....	227
E.4.2	Accès et diffusion de l'information environnementale	230
F.	CONCLUSION GENERALE.....	235
	LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES.....	239
	LISTE DES FIGURES	243
	LISTE DES PHOTOGRAPHIES	249

LISTE DES TABLEAUX.....	251
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	255
TABLE DES MATIERES	291
ANNEXES	297

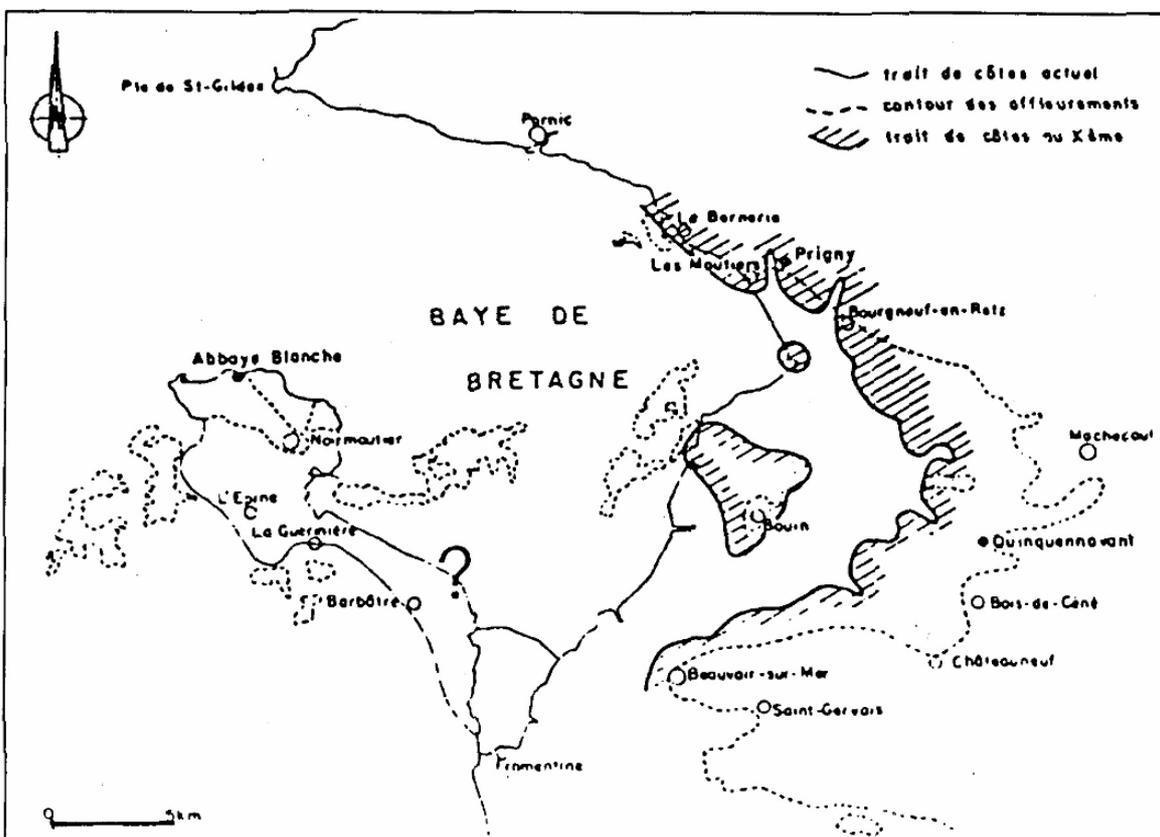
Annexes

Annexe 1 : Evolution du trait de côtes du sud de la Loire du VII ^{ème} au XVII ^{ème} siècle	299
Annexe 2 : Points suivis par l'Observatoire de l'Eau pour la qualité de l'eau douce de 1997 à 2009	301
Annexe 3 : Métadonnées des données utilisées dans cette étude	303
Annexe 4 : Rapport sur la calibration avec le modèle SWAT	307

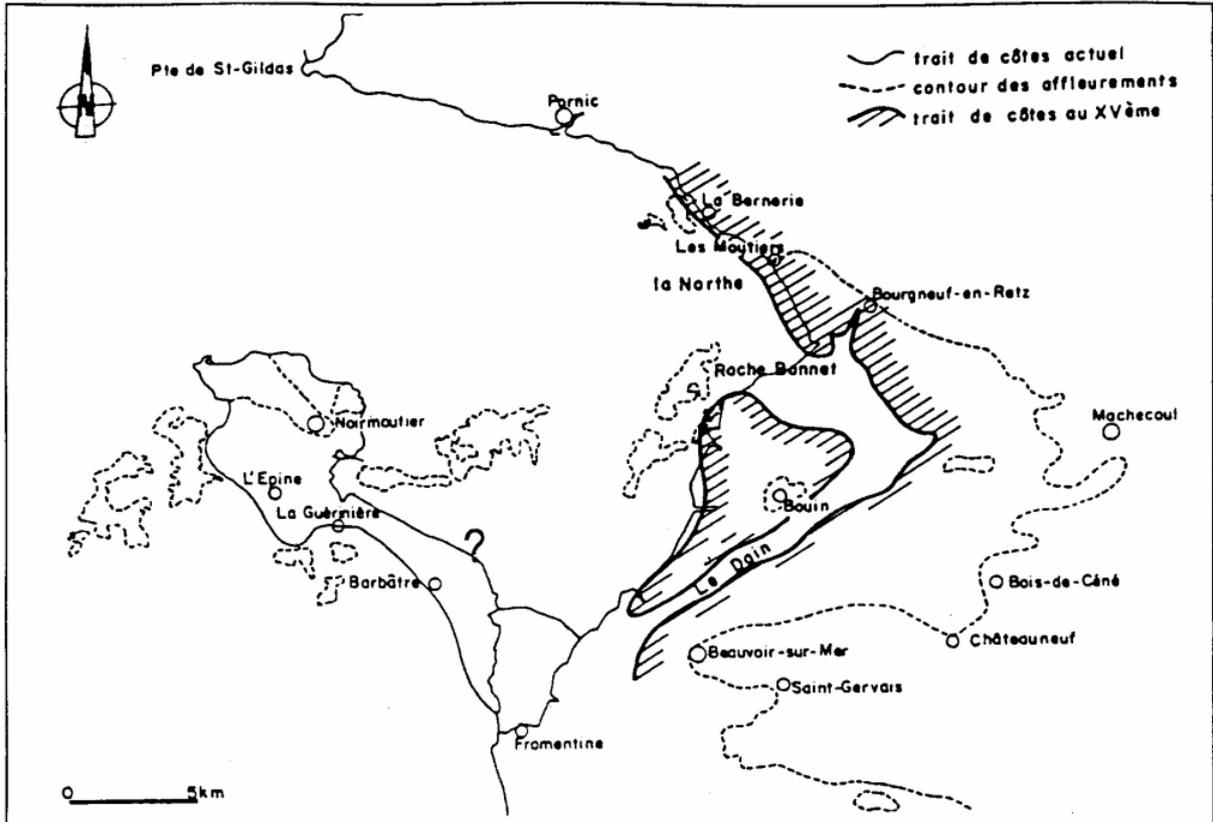
Annexe 1 : Evolution du trait de côtes du sud de la Loire du VII^{ème} au XVII^{ème} siècle
 [Gomez,1994b]



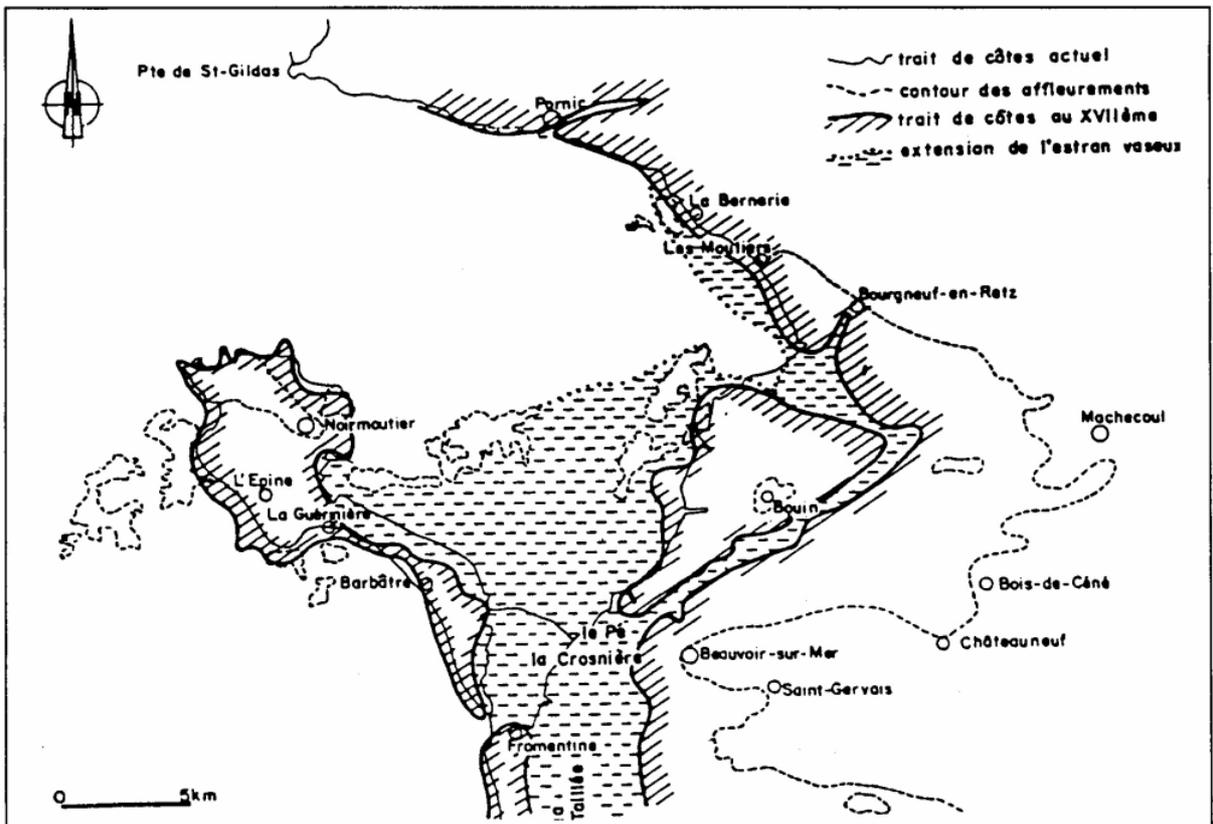
Reconstitution des traits de côtes du sud de la Loire au VII^{ème} siècle – D'après J. Mounès – 1960



Reconstitution des traits de côtes du sud de la Loire au X^{ème} siècle – D'après L. Lacroix – 1912

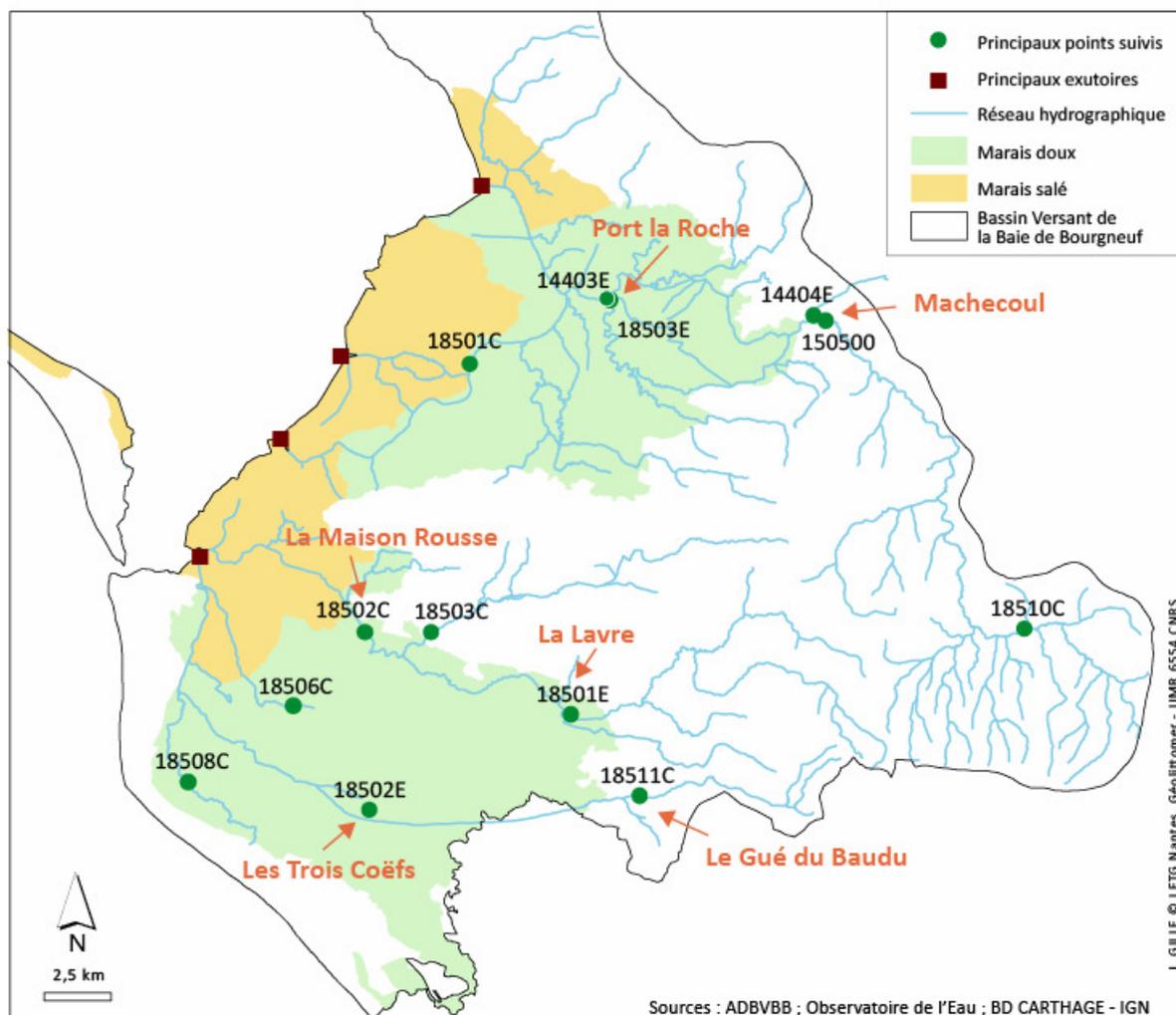


Reconstitution des traits de côtes du sud de la Loire au XV^{ème} siècle – D'après L. Lacroix – 1942



Reconstitution des traits de côtes du sud de la Loire au XVII^{ème} siècle – D'après A. Carré – 1974

Annexe 2 : Points suivis par l'Observatoire de l'Eau pour la qualité de l'eau douce de 1997 à 2009



Suivi bactériologique

Données	BV	CODE	ANNEE													
			1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
EC ST	BV_Ta	18502E		9	11	12	12	12	12		2					
		18506C	6	9	11	12	12	12	12		2					
		18508C										2				
		18511C										2				
	BV_Sa	18501E		9	10	12	12	12	12		2					
		18502C	6	9	11	12	12	12	12		2					
		18503C	6	9	11	12	12	12	12		2					
	BV_Fa	14403E	8	9	10	12	12	12	12	12	4	6	4			
		14404E	8	9	10	12	12	12	12	12	4	6	4			
		150500														
		18501C	6	9	11	12	12	12	12		2					
		18503E														
		18510C	8	9	9	12	12	12	12	12	4	6	4			

EC : Escherichia Coli
 ST : Streptocoques fécaux
 BV_Ta : Bassin versant de l'étier de la Taillée
 BV_Sa : Bassin versant du grand étier de Sallertaine
 BV_Fa : Bassin versant du Falleron

Source : Observatoire de l'Eau - Analyses LEAV

Annexe 2 : Suivi des nutriments

Données	BV	CODE	ANNEE													
			1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
NH4	BV_Ta	18502E	6	11	11	12	12	12	12	6	7	6	6	5	5	
		18506C	6	9	11	12	12	12	12		2	3	4	5	5	
		18508C									2	6	10	11	9	
		18511C									2	6	10	11	9	
	BV_Sa	18501E	6	11	11	12	12	12	12	6	7	8	12	11	10	
		18502C	6	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	
		18503C	6	9	11	12	12	12	12		2	6	10	11	9	
	BV_Fa	14403E	8	9	10	12	12	12	12	4	6	5				
		14404E	8	9	10	12	12	12	12	4	6	4				
		150500	9	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
		18501C	6	9	11	12	12	12	12		2	3	4	5	5	
		18503E											12	11		
		18510C	8	9	11	12	12	12	14	6	8	7	4	6	1	
	NO2	BV_Ta	18502E					7	6	6		1		3	5	4
			18506C					12	12	12		2		2		
18508C											2		2			
18511C											2		2			
BV_Sa		18501E		1			7	6	6		1		3	5	4	
		18502C											7	11	8	
		18503C					12	12	12		2		2			
BV_Fa		14403E	8	9	10	12	12	11	12	4	6	4				
		14404E	8	9	10	12	12	11	12	4	6	4				
		150500	9	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
		18501C					12	12	12		2		2			
		18503E											7	11		
		18510C	8	9	11	12	12	11	14	6	8	6	2	5	1	
NO3		BV_Ta	18502E	6	11	11	12	12	12	12	6	7	6	6	5	5
			18506C	6	9	11	12	12	12	12		2	3	4	5	5
	18508C										2	6	8	11	9	
	18511C										2	6	8	11	9	
	BV_Sa	18501E	6	11	11	12	12	12	12	6	7	7	7	5	5	
		18502C	6	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	
		18503C	6	9	11	12	12	12	12		2	4	5	5	5	
	BV_Fa	14403E	3	8	10	12	12	12	12	4	6	5				
		14404E	7	9	10	12	12	12	12	4	6	4				
		150500	9	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
		18501C	6	9	11	12	12	12	12		2	3	4	5	5	
		18503E											12	11		
		18510C	7	9	11	12	12	12	14	6	8	7	4	6	1	
	PO4	BV_Ta	18502E	6	11	11	12	12	12	12	6	6	6	6	5	5
			18506C	6	9	11	12	12	12	12		2	3	4	5	5
18508C											2	6	10	11	9	
18511C											2	6	10	11	9	
BV_Sa		18501E	6	11	11	12	12	12	12	6	7	8	12	11	10	
		18502C	6	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	
		18503C	6	9	11	12	12	12	12		2	6	10	11	9	
BV_Fa		14403E	8	9	10	12	12	12	12	4	6	5				
		14404E	8	9	10	12	12	12	12	4	6	4				
		150500	9	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12		
		18501C	6	9	11	12	12	12	12		2	3	4	5	5	
		18503E											12	11		
		18510C	8	9	11	12	12	12	14	6	8	7	4	6	1	

NH4 : Ammonium
 NO2 : Nitrite
 NO3 : Nitrate
 PH4 : Phosphate

BV_Ta : Bassin versant de l'étier de la Taillée
 BV_Sa : Bassin versant du grand étier de Sallertaine
 BV_Fa : Bassin versant du Falleron

Source : Observatoire de l'Eau - Analyses LEAV

J. GILLET © LETG Nantes, Géolittomer - UMR 6554 CNRS

Annexe 3 : Métadonnées des données utilisées dans cette étude

Thèmes		Données	Années	Echelles - Résolutions - Echantillonnage	Emprises spatiales	Type de données / Formats	Système de projection	Sources / Origines	Type d'acquisition
Cartographie	Orthophotographies (BD Ortho)	2004	0,05 m	Loire-Atlantique (secteur d'étude)	Raster / .ecw	Lambert 2 Etendu	IGN	Convention	
	Orthophotographies (BD Ortho)	2006	0,05 m	Vendée (secteur d'étude)	Raster / .ecw	Lambert 2 Etendu	IGN	Convention	
	Scan des cartes topographiques (Scan 25)	2002	1 / 25.000	Secteur d'étude	Raster / .tiff	Lambert 2 Etendu	IGN	Fonds Géolittomer	
	Cartes topographiques 7 thèmes, 32 couches (BD Carto)	2000 2001	1 / 50.000	Secteur d'étude	Vecteur / .tab	Lambert 2 Carto	IGN	Fonds Géolittomer	
	Carte marine	1989	1 / 150.000	De la presqu'île de Quiberon aux Sables d'Olonne	Raster	Lambert 2 Carto	SHOM	Fonds Ifremer	
	Carte géologique	1926	1 / 50.000 1 / 80.000	Secteur d'étude	Papier	NID	BRGM	Fonds Igarun	
	Banque du sous-sol (BSS)	ND	ND	Secteur d'étude	Vecteur / .shp Alphanumérique / .txt .xls .html	WGS 84	BRGM	Internet	
	Limites terrestres	Bassin Versant de la Baie de Bourgneuf (BVBB)	ND	ND	Secteur d'étude	Vecteur / .tab	Lambert 2 Etendu	ADBVB8	Convention
		Marais Breton	ND	ND	Secteur d'étude	Vecteur / .tab	Lambert 2 Etendu	ADBVB8	Convention
		Geoifa	ND	1 / 100.000	Région départements communes	Vecteur / .tab	Lambert 2 Carto	IGN	Fonds Géolittomer
Trait de côte		2009	1 / 15 000	France métropolitaine	Vecteur / .shp	Lambert 2 Etendu	SHOM	Internet	
Zéro hydrographique		ND	1 / 50.000	Secteur d'étude	Vecteur / .shp	WGS84	SHOM	Fonds Ifremer	

Thèmes		Années	Echelles - Résolutions - Echantillonnage	Emprises spatiales	Type de données / Formats	Système de projection	Sources / Origines	Type d'acquisition
Données	Qualité de l'eau							
Modèle numérique de terrain (BD Alti)	Qualité des eaux souterraines 1 à 537 paramètres (BD ADES) Qualité des eaux de surface 14 à 198 paramètres (BD ADBVBB) BD OSUR Stations d'épuration 9 paramètres (STEP 44) Stations d'épuration 9 paramètres (STEP 85) BD IREP	2002	1 / 50.000	Secteur d'étude	Raster / .txt	Lambert 93	IGN	Achat
Levés LIDAR		2008	Densité >1 point par 2,5 m ² précision altimétrique <0,15 m	Baie de Bourgneuf + estran	Raster / .txt	Lambert 93	Actimar	Achat
Bathymétrie interpolée		2007	75 m	Baie de Bourgneuf	Vecteur / .shp	WGS 84	Géotraitement des données SHOM	Fonds Ifremer
Profils en travers		2008	<100 m	Partie nord du Marais Breton	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	Hydroconcept / SAH Sud Loire	Convention
		2004 à 2008	Non régulier à mensuel	12 à 23 stations	Alphanumérique / .txt	ND	Portail ADES / ONEMA - BRGM	Internet
		1989 à 2009	Non régulier à mensuel	1 à 23 stations	Vecteur / .tab Alphanumérique / .xls	ND	Observatoire de l'Eau ADBVBB	Convention
		2004-2008	Non régulier à mensuel	1 à 6 stations	Alphanumérique / .csv	ND	AELB	Internet
		2008	Mensuel	Loire-Atlantique (13 stations)	Alphanumérique / .doc	ND	Satese	Convention
		2008	Mensuel	Vendée (20 stations)	Alphanumérique / .pdf	ND	Satese	Convention
	2003 à 2009	Annuel	Loire-Atlantique Vendée	Alphanumérique / .csv	ND	SANDRE	Internet	

Thèmes	Données	Années	Echelles - Résolutions - Echantillonnage	Emprises spatiales	Type de données / Formats	Système de projection	Sources / Origines	Type d'acquisition
Hydrologie	Zones hydrographiques	2005	1 / 50.000	Bassin hydrographique Loire Bretagne	Vecteur / .shp	Lambert 2 Etendu	SANDRE AELB	Internet
	Ouvrages hydrauliques	ND	ND	Secteur d'étude	Vecteur / .mif .mid	WGS 84	ABDBVBB SMGEMB	Convention
	Données météorologiques 2 à 5 thèmes	1980 à 2007	Journalier	4 à 8 stations	Alphanumérique / .txt	ND	Météo France	Achat
	Données météorologiques 2 à 5 thèmes	1997 à 2007	Journalier	3 à 6 stations	Alphanumérique / .xls	ND	Météo France	Fonds Ifremer
	Réseau hydrographique (BD Carthage)	2007	1 / 50.000	Secteur d'étude	Couverture / .lyr	Lambert 2 Etendu	IGN	Internet
	Réseau hydrographique (BD Topo)	2008	1 / 25.000	Secteur d'étude	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	IGN	Achat
	Niveaux d'eau dans les eaux de surface	2006	Journalier	3 stations	Alphanumérique / .xls	ND	CEP - SAH Sud Loire	Convention
	Niveaux d'eau dans les eaux souterraines	2004 à 2009	Journalier	10 stations	Alphanumérique / .txt	ND	Portail ADES / ONEMA - BRGM	Internet
	Débit	1972 à 2007	Journalier	1 à 4 stations	Alphanumérique / .txt	ND	DREAL 44	Internet
	Environnement	Zones humides d'importance prioritaire (ZHIM)	2009 2004	1 / 25.000 1 / 100 000	France métropolitaine	Vecteur / .shp	Lambert 93	MEEDDM CGDD SOeS
ZSC		2006	1 / 25.000	Pays de la Loire	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	DREAL MNHN	Internet
ZPS		2006	1 / 25.000	Pays de la Loire	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	DREAL MNHN	Internet
ZICO		2005	1 / 50.000 1 / 100 000	Pays de la Loire	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	DREAL MNHN	Internet
ZNIEFF 1 et 2		2006	1 / 25.000	Pays de la Loire	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	DREAL MNHN	Internet

Thèmes		Activités et occupation des sols						
Données	Années	Echelles - Résolutions - Echantillonnage	Emprises spatiales	Type de données / Formats	Système de projection	Sources / Origines	Type d'acquisition	
Recensement de la population (RP)	2008	Communal	39 communes	Alphanumérique / .xls	ND	INSEE	Internet	
Recensement agricole (RA)	1988, 2000	Communal	39 communes	Alphanumérique / .xls	ND	INSEE	Internet	
Tourisme	2002 à 2010	Communal	39 communes	Alphanumérique / .xls	ND	INSEE	Internet	
Cadastre conchylicole	2007	1 / 50.000	Baie de Bourgneuf	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	SRC PL	Internet	
Cadastre mycicole	2007	1 / 50.000	Baie de Bourgneuf	Vecteur / .shp	Lambert 2 Carto	SRC PL	Internet	
Inventaire permanent du littoral (IPLU 44)	1977, 1985, 1999	1 / 25.000	Loire-Atlantique (secteur d'étude)	Vecteur / .tab	Lambert 2 Etendu	DDE Loire-Atlantique	Convention	
Inventaire permanent du littoral (IPLU 85)	1977, 1985, 2000	1 / 25.000	Vendée (secteur d'étude)	Vecteur / .tab	Lambert 2 Etendu	DDE Vendée	Convention	
Corine Land Cover (CLC)	1990, 2000, 2006	1 / 25.000	Secteur d'étude	Vecteur / .shp	Lambert 2 Etendu	SOeS	Internet	
Recensement parcellaire graphique de Loire-Atlantique (RPG 44)	2007	Ilot parcellaire	Loire-Atlantique (secteur d'étude)	Vecteur / .mif .mid	Lambert 2 Etendu	DDAF Loire-Atlantique	Convention	
Recensement parcellaire graphique de Vendée (RPG 85)	2007	Ilot parcellaire	Vendée (secteur d'étude)	Vecteur / .mif .mid	Lambert 2 Etendu	DDAF de Vendée	Convention	
Inventaire cartographique des modes d'occupation des sols (MOS 44)	2004	1 / 10.000	Loire-Atlantique (secteur d'étude)	Vecteur / .shp	Lambert 2 Etendu	Conseil Général de Loire-Atlantique	Convention	

Calibration hydrologique du bassin versant du Falleron basée sur une analyse d'incertitude sur les paramètres à l'aide du modèle Swat

Compte-rendu rédigé par Stéphan Gaillard (LETG - Nantes) en juillet 2013

Ce rapport présente les résultats de la calibration hydrologique sur le bassin – versant du Falleron à l'aide du modèle Swat. Les périodes simulées sont 1997 – 2005 pour le calage du modèle et 2006 – 2007 pour la validation.

La démarche retenue pour le processus de calibration est une approche stochastique basée sur une analyse d'incertitude. Ainsi, l'objectif n'est pas ici de produire une simulation unique (approche déterministe), car il existe de fait de nombreuses simulations uniques qui fournissent des solutions proches mais avec des jeux de paramètres très différents en entrée [Abbaspour, 2012]. Dans ce contexte, on ne cherche pas à rendre compte du fonctionnement du système étudié via un signal unique mais sous la forme d'une bande de prédiction de l'incertitude (95PPU) qui intègrent toutes les incertitudes inhérentes à une procédure de calage (incertitudes liées aux données en entrée, incertitudes dans le modèle conceptuel, incertitudes au niveau des paramètres et incertitudes liées aux données mesurées utilisées pour calibrer et valider le modèle). Cette bande de prédiction de l'incertitude représente 95 % des meilleures simulations obtenues à la dernière itération de l'algorithme utilisé (SUFI2). Au final, les différentes sources d'incertitudes, qui ne peuvent être différenciées, sont visualisées comme les plages finales des paramètres calibrés et les plages finales des données simulées en sortie du modèle [Abbaspour, 2012]. Cette prise en compte des différentes sources incertitudes permet de donner plus de robustesse scientifique aux résultats produits.

Par référence à la littérature, les résultats obtenus peuvent être qualifiés de “satisfaisants”. Les 2 critères utilisés pour juger de la performance du modèle : p-factor et r-factor atteignent respectivement 0.63 et 0.69 en calibration et 0.50 et 0.56 en validation. Ils témoignent de l'aptitude du modèle Swat à simuler les flux d'eau et de matière dans les bassins versants. Ils ouvrent également des perspectives prometteuses en termes de gestion et de management des bassins versants contributifs de la Baie de Bourgneuf.

Dans la suite, on décrit le modèle Swat et les différents programmes qui ont été utilisés. La paramétrisation du modèle (implémentation des données d'entrée) et le

paramétrage des 16 paramètres retenus dans le processus de calibration sont ensuite décrits. Enfin, les principaux résultats obtenus sont présentés.

Description du modèle

Le simulateur “*Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT) est un modèle conceptuel, semi - distribué conçu pour simuler les flux d'eau de surface et de subsurface, de sédiments, de nutriments, de pesticides et de bactéries à l'échelle des bassins versants à différents pas de temps (journalier, mensuel, annuel) [Arnold *et al.*, 1998 ; Neitsch *et al.*, 2002]. A l'origine, SWAT a été développé par l'USDA – ARS afin de prédire les impacts des pratiques agricoles sur l'eau, les sédiments et les nutriments ainsi que le devenir des polluants dans des bassins versants de taille moyenne à grande [Arnold *et al.*, 1998 ; Neitsch *et al.*, 2002]. C'est un simulateur qui a démontré sa robustesse pour prédire la réponse hydrologique des bassins versants anthropisés à travers un large éventail de conditions climatiques, topographiques, pédologiques et anthropiques dans le monde [Arnold *et al.*, 1998 ; Borah et Bera, 2003 ; Neitsch *et al.*, 2002 ; Van Liew *et al.*, 2007]. C'est également un outil analytique qui permet d'estimer les bénéfices environnementaux de pratiques de conservation car il permet d'identifier les principales sources de contamination, leurs modalités de transfert et de cheminement ainsi que leur devenir dans le milieu. Il permet également de faire de la prospective en quantifiant les bénéfices environnementaux liés à des pratiques de conservation innovantes [Van Liew *et al.*, 2007].

En France, SWAT a, par exemple, été utilisé pour modéliser les dynamiques des pollutions diffuses dans le bassin versant de la rivière d'Auray [Rollo, 2012]. Il a également été utilisé récemment pour estimer les flux d'eau dans des bassins versants non jaugés méditerranéens [Sellami *et al.*, 2013].

Une description détaillée du modèle est fournie par Arnold *et al.* (1998) et par Neitsch *et al.* (2002).

Les principaux compartiments de SWAT incluent le climat, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la sédimentation, la croissance des plantes, la dynamique des nutriments, des pesticides et des bactéries ainsi que les pratiques agricoles et la gestion de l'eau. SWAT simule l'hydrologie en décrivant les processus d'interception, d'évapotranspiration, de ruissellement, de percolation dans le sol, les flux latéraux et verticaux dans les aquifères et les transferts en rivière. Il prend en compte les hétérogénéités spatiales au travers d'informations d'altitudes, de sols et d'occupation des sols. Le ruissellement est calculé pour chaque bassin à partir de la méthode des SCS curve number [Neitsch *et al.*, 2005] qui prend en compte le couvert végétal, les caractéristiques physiques des sols ainsi que les conditions d'humidité antécédentes. Il est ensuite routé via le réseau hydrographique vers un exutoire.

Swat est un modèle de paramètres distribués qui subdivise les bassins versants en un ensemble de sous – bassins. Chaque sous – bassin est simulé comme une surface

homogène en terme de conditions climatiques mais avec des subdivisions additionnelles à l'intérieur de chaque sous – bassin afin de prendre en compte la variété des types de sols, qui peuvent être subdivisés en plusieurs horizons, et d'utilisation du sol. Ces subdivisions correspondent à une discrétisation du domaine étudié en HRU (*Hydrologic Response Unit*) considérées comme homogènes spatialement en terme de sols et d'occupation des sols (également de topographie et de données climatiques). Les réponses de chaque HRU en terme d'eau, de sédiments, de nutriments, etc... sont déterminées individuellement puis agrégées à l'échelle des sous – bassins. Elles sont ensuite routées vers le tronçon de rivière associé et son exutoire via le réseau hydrographique.

Programmes utilisés

La version de Swat utilisée ici est *ArcSwat 2009*. Elle est couplée à *ArcGIS* (version 9.3) qui permet l'implémentation des données en entrée du modèle et la paramétrisation du modèle. Le couplage de Swat avec un SIG permet d'optimiser le pré – et le post – processing (données spatiales et tabulaires) comme la définition et la segmentation des bassins versants et du réseau hydrographique en utilisant en entrée un MNT. L'interface SIG fournit également des outils et des méthodes pour délimiter les HRU et implémenter l'ensemble des données d'entrée (données climatiques, sols, occupation de sols, pratiques agricoles, rejets, etc...).

ArcSwat incorpore également un module permettant de lancer des *analyses de sensibilité* qui permettent de déterminer les paramètres d'entrée qui exercent la plus grande influence sur les sorties du modèle. Cette information permet d'éliminer du processus de calibration – validation les paramètres insensibles et ainsi d'accroître la précision des sorties du modèle tout en réduisant les incertitudes [Schmalz et Fohrer, 2009]. L'algorithme a été développé par [Van Griensven et Meixner, 2006]. La technique utilisée LH – OAT (*Latin Hypercube One – factor – At – a – Time*) permet d'échantillonner la totalité de l'espace des paramètres et d'attribuer les changements dans les sorties du modèle à un changement spécifique dans les entrées. Plutôt qu'une mesure absolue de la sensibilité de chaque paramètre, cette procédure fournit un classement des paramètres en fonction de leur sensibilité.

Le programme *SwatCup* (version 4.3.3) a parallèlement été utilisé pour la calibration et l'analyse d'incertitude [Abbaspour, 2012]. Ce programme qui est lié à ArcSwat via le package SwatCup prend en charge un grand nombre de paramètres et de données mesurées ; éventuellement pour plusieurs sites simultanément. Il permet d'intégrer dans le processus de calibration – validation et d'optimisation des paramètres toutes les sources d'incertitudes inhérentes aux opérations de calage de modèles (i.e. incertitudes dans les variables de forçage, dans le modèle conceptuel, au niveau des paramètres, des données mesurées, ...) et de quantifier l'incertitude des sorties du modèle [Abbaspour, 2012 ; Schuol *et al.*, 2008].

L'algorithme utilisé ici pour optimiser les sorties du modèle et quantifier les incertitudes est *SUF2* (*Sequential Uncertainty Fitting Version 2*). [Yang *et al.*, 2008] ont montré que SUFI2 nécessitait moins de simulations que d'autres méthodes d'optimisation implémentées en standard dans SwatCup pour produire une bonne solution (avec des coefficients de Nash – Sutcliffe et de détermination r^2 similaires aux autres méthodes) et, donc, qu'il permettrait de quantifier les incertitudes dans de bonnes conditions.

Dans le programme SUFI2, les incertitudes sont appréhendées via les plages des paramètres qui sont calibrées. Le résultat produit en sortie est une bande de prédiction de l'incertitude appelée 95PPU (*95% prediction uncertainty*). 95PPU représente 95 % des meilleures simulations obtenues à la dernière itération de SUFI2. Elle doit capturer le maximum de données observées.

2 critères sont utilisés pour quantifier la qualité de l'ajustement du modèle : p-factor et r factor. Idéalement, 95PPU doit capturer 100 % des données observées soit un p-factor valant 1 ; p-factor variant entre 0 et 1. Dans le même temps, la bande de prédiction doit être la plus étroite possible et r-factor tendre 0 (r-factor variant entre 0 et l'infini). Un plus grand p-factor pouvant être obtenu au dépend d'un plus grand r-factor, un compromis doit être trouvé [Abbaspour, 2012].

Avec SUFI2, la procédure de calibration est la suivante. Dans un premier temps, des plages de paramètres relativement larges, mais physiquement significatives, sont définies par l'utilisateur. SUFI2 décroît ensuite itérativement les incertitudes sur les paramètres. Ainsi, après chaque itération (généralement 3 à 4 comprenant 1000 *runs*), SUFI2 calcule de nouvelles plages de valeurs pour chaque paramètre calibré qu'il convient d'examiner avec attention du fait de possibles valeurs irréalistes (conductivité hydraulique négative par exemple) et/ou du dépassement de seuils de significativité sur les bornes initiales ou finales des paramètres. Ces nouvelles plages sont plus étroites pour les paramètres qui sont les plus sensibles. Au final, p-factor et r-factor sont utilisés comme des critères d'arrêt du processus de calibration.

Secteur d'étude

La figure suivante (fig. 1) se rapporte au secteur étudié. Elle montre l'ensemble des bassins versants contributifs de la baie de Bourgneuf. Le bassin du Falleron pour lequel sont présentés les résultats de la modélisation hydrologique est également représenté.

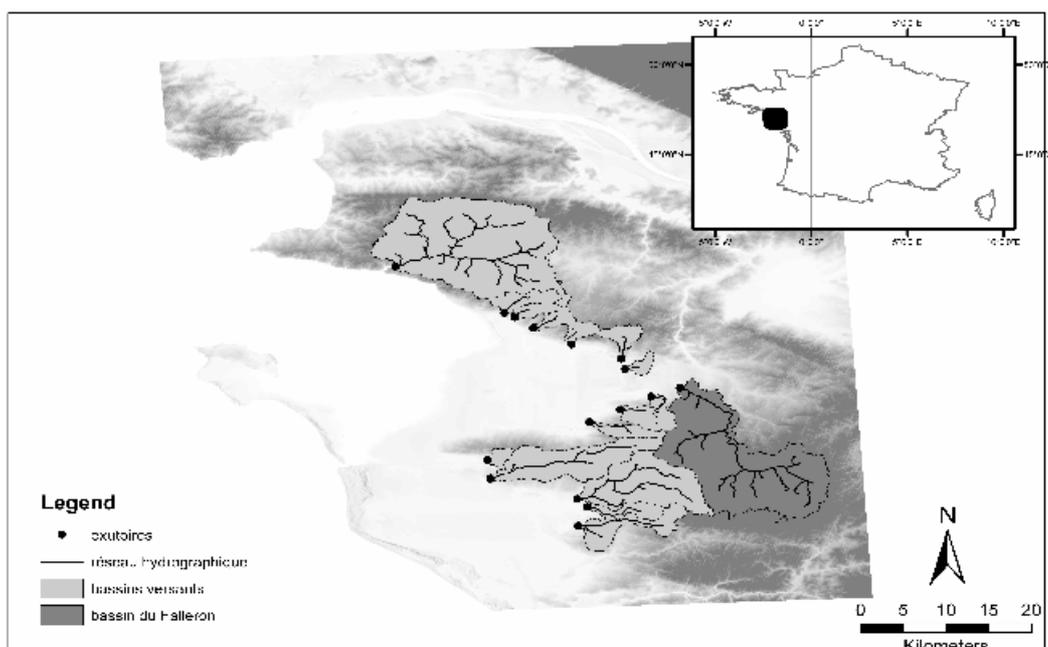


Fig. 1 - Localisation de la zone d'étude

Les données d'entrée

Le modèle Swat nécessite en entrée un nombre restreint mais précis de jeux de données. Nous avons utilisé ici les données suivantes :

- MNT de la BdAlti de l'IGN au pas de 50 m ;
- réseau hydrographique digital de la BD CARTO à l'échelle du 1/50 000^e ; ce réseau a été incrusté dans le MNT afin d'obtenir une bonne cohérence entre le MNT et le réseau hydrographique utilisé en sortie par Swat ;
- données climatiques journalières fournies par Météo – France à 5 stations : Pornic, Nantes, Palluau, La Roche – sur – Yon, Le Perrier ; 5 variables ont été implémentées dans le modèle : hauteur de précipitations quotidiennes (mm) , température moyenne quotidienne sous abris (degré celsius), moyenne des vitesses du vent quotidienne à 10 m (m.s), humidité relative quotidienne moyenne (%) et rayonnement global quotidien (joule.cm²) ; les chroniques utilisées couvrent les périodes suivantes : 1995 – 2005 (calibration) et 2005 – 2007 (validation) ;
- occupation du sol décrite à l'aide de la base de données BD MOS44 produite par le Conseil Général de Loire – Atlantique (Conseil Général 44, 2006) ; les différentes emprises d'occupation des sols ont été identifiées à partir des photographies aériennes de l'IGN datées de 2004 ; l'échelle d'interprétation des données photographiques est le 1/5 000^e ; la caractérisation de chaque classe d'occupation du sol est basée sur la base de données SWAT (*crop.dat*) ; les données n'étant pas disponibles sur le département de Vendée, nous avons produit une base de données similaire au MOS44 en utilisant les mêmes méthodologie et nomenclature ;

- sols et paramètres des sols renseignés à partir de la base de données “Référentiel Régional Pédologique” (RRP) réalisée dans le cadre du programme “Inventaire, Gestion et Conservation des Sols” (IGCS) ; la précision des données spatiales correspond au minimum à celle d'une représentation cartographique au 1/250 000^e ; les données tabulaires décrivant les caractéristiques physico – chimiques des sols (épaisseur, horizons, granulométrie, etc...) ont été implémentées dans la base de données SWAT (*usersoil.dat*) ; certaines d'entre elles ont été renseignées à dire d'expert (C. Ducommun, INRA / AgroCampus Angers) ou obtenues en utilisant des règles de pédotransfert ;
- pratiques agricoles renseignées à dire d'expert par la Chambre d'Agriculture de Loire – Atlantique (A. Airiaud) ; 3 types de rotation à base de maïs / blé / RGI, RGA / maïs / blé, RGI / maïs / blé, avec l'ensemble des itinéraires techniques associés, ont été implémentés ; la gestion des prairies et du bétail est également prise en compte dans le modèle ;
- rejets ponctuels (eau, sédiments, N et P) à 9 stations fournis par les Conseil Général de Loire – Atlantique et de Vendée ; il s'agit de données journalières qui couvrent dans l'ensemble la période d'étude (1997 – 2007) ;
- données de débits journaliers pour la calibration - validation obtenues auprès de la Banque Hydro et concentrations en sédiments et en nutriments (N et P) fournies par l'Association pour le Développement du Bassin Versant de la Baie de Bourgneuf (ADBVB) ; ces données sont disponibles sur l'ensemble de la période de validation – calibration (1997 – 2007) et à plusieurs sites.

Paramétrisation du modèle

La paramétrisation du modèle a été faite à partir de l'interface d'ArcGIS selon les étapes suivantes :

la première étape a été de diviser la zone d'étude en sous bassins en utilisant le MNT de la BDAlti (seuil de 250 ha) ; la paramétrisation géomorphologique des arcs du réseau (après inscrustation du réseau hydrographique de la BD CARTO) et des sous bassins (surface, pente, distribution des altitudes, longueur des lits fluviaux) a été faite automatiquement ; à ce stade, les points – exutoires correspondant à des stations de mesures utilisées pour le calage du modèle (eau, sédiments, N et P) ont été introduits ;

les données climatiques journalières ont ensuite été implantées ;

l'étape suivante a consisté en l'implémentation des sols et du MOS ; les couches bassins – versants, sols et MOS ont ensuite été intersectées afin de générer les HRU ; la génération des HRU a été contrainte par un seuil basé sur l'utilisation du sol et les types de sols couvrant une surface d'au moins 10 et 20% respectivement par sous bassin ; cette contrainte permet de limiter le nombre de fichiers en sortie et de réduire les temps de calcul ;

les pratiques agricoles concernant les 3 types de rotations décrites plus haut ainsi que la gestion des prairies ont ensuite été implémentées ; l'implémentation des rotations a été réalisée après désagrégation du polygone générique “*Agricultural Land – Generic*” (AGLR) de la base de données Swat (*crop.dat*) ;

les rejets des STEP ont également été introduits dans le modèle ;

le calage du modèle a été réalisé sur les périodes suivantes : 1997 – 2005 pour la calibration, 2006 – 2007 pour la validation ; 2 années de *Warm – Up* ont systématiquement été introduites en amont (1995 – 1996 et 2004 – 2005) afin d'initialiser les différents réservoirs.

Analyse de sensibilité et sélection des paramètres

- **Analyse de sensibilité**

Swat propose en standard de très nombreux paramètres qu'il n'est envisageable d'introduire tous dans la procédure de calibration. Pour cette raison, une pré - sélection de 21 paramètres a été faite en fonction de la littérature ; en particulier à partir des études suivantes : [Abbaspour *et al.*, 2007 ; Faramarzi *et al.*, 2009 ; Lenhart *et al.*, 2002 ; Neitsch *et al.*, 2005 ; Schmalz et Fohrer, 2009 ; Schuol *et al.*, 2008 ; Van Griensven et Meixner, 2006 ; Van Liew *et al.*, 2007 ; White et Chaubey, 2005 ; Yang *et al.*, 2008].

En parallèle, une analyse de sensibilité a été conduite sur ces 21 paramètres afin d'identifier les plus sensibles, c'est à dire ceux qui contribuent le plus à “optimiser” les sorties du programme. Le classement obtenu permet de mieux appréhender le fonctionnement de la zone étudiée – en terme de processus – et d'éliminer les paramètres insensibles de la procédure de calibration.

L'algorithme utilisé dans le cadre de l'analyse de sensibilité (SA) est décrit dans [Van Griensven et Meixner, 2006]. La technique LH – OAT (*Latin Hypercube One – factor – At – a – Time*) fournit un classement des paramètres en fonction de leur sensibilité. Le tableau suivant (tab. 1) se rapporte au classement des 21 pré - sélectionnés.

PARAMETER	RANK
Cn2	1
Ch_K2	2
Surlag	3
Alpha_Bf	4
Rchrg_Dp	5
Gwqmn	6
Ch_N2	7
Esco	8
Sol_K	9
Sol_Awc	10
Slsubbsn	11
Gw_Delay	12
Gw_Revap	13
Canmx	14
Epco	15
Revapmn	16
Sftmp	21
Smfmn	21
Smfmx	21
Smtmp	21
Timp	21

Tab. 1- Analyse de sensibilité : classement des 21 paramètres retenus dans l'analyse de sensibilité

Les résultats montrent, en considérant les 11 premiers paramètres du classement, que les variables les plus sensibles sont liés au ruissellement de surface (CN2 et SURLAG). Les autres groupes de paramètres identifiés sont liés dans l'ordre : aux échanges entre le chenal et les eaux souterraines (CH_K2), aux eaux souterraines (ALPHA_BF, RCHRG_DP, GWQMM) puis à la rugosité du lit (CH_N2), aux sols (ESCO, SOL_K, SOL_AWC) et à la géomorphologie (SLSUBBSN).

En raison des conditions climatiques qui prévalent dans le secteur d'étude, on notera ici que, logiquement, les 5 paramètres liés au manteau nival (SFTMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP, TIMP) ressortent comme non – sensibles et ne causent aucun changement dans les sorties du modèle (rang 21). Ces 5 paramètres ont donc été exclus du processus de calibration / validation.

Par référence à l'étude conduite par [Schmalz et Fohrer, 2009] qui ont investigués les réponses du modèle Swat – via des SA – en fonction du contexte hydro – géomorphologique et des structures paysagères, ces résultats montrent que le secteur étudié est principalement dominé par des écoulements de surface mais qu'une composante liée aux échanges nappe – rivière ne doit pas être négligée.

- **Paramètres retenus pour la calibration**

Au final, en fonction des résultats de l'analyse de sensibilité, les 16 premiers paramètres ont été sélectionnés pour le processus de calibration – validation. Il s'agit de paramètres qui décrivent des processus majeurs du fonctionnement hydrologique des hydrosystèmes fluviaux

[Abbaspour *et al.*, 2007 ; Faramarzi *et al.*, 2009 ; Neitsch *et al.*, 2005 ; Schmalz et Fohrer, 2009 ; Schuol *et al.*, 2008 ; Van Griensven et Meixner, 2006 ; Van Liew *et al.*, 2007 ; Yang *et al.*, 2008].

Ces informations pouvant être utiles à d'autres chercheurs travaillant sur la même thématique, les 16 paramètres retenus sont présentés dans le tableau 2 avec leur plage de valeurs maximales autorisées (bornes inférieures et supérieures par défaut) tel qu'elles sont définies dans la littérature [Neitsch *et al.*, 2005 ; Van Griensven et Meixner, 2006]. Les valeurs des paramètres implémentées par défaut dans Swat ainsi que les unités, méthodes et processus auxquels ils se rapportent sont également présentés [Neitsch *et al.*, 2005 ; Van Griensven et Meixner, 2006 ; Van Liew *et al.*, 2007 ; Yang *et al.*, 2008].

6 paramètres contrôlent l'écoulement superficiel : CN2, ESCO, EPCO, SOL_AWC, SOL_K, CANMX. 6 paramètres contrôlent l'écoulement souterrain : GW_REVAP, REVAPMN, GWQMN, GW_DELAY, ALPHA_BF, RCHRG_DP. 4 paramètres contrôlent les transferts à l'échelle des bassins versants : CH_K2, CH_N2, SURLAG, SLSUBBSN.

Code	Parameter	Process	Description	Default range	Default value	Unit	Method *
Parameters governing surface water response							
1	CN2	runoff	SCS runoff curve number II	+/- 50%		none	r
2	ESCO	evaporation	Soil evaporation compensation factor	0.01 – 1	0.95	none	v
3	EPCO	evaporation	Plant evaporation compensation factor	0 - 1	1	none	v
4	SOL_AWC	soil	Available soil water capacity	+/- 50%		mm/mm	r
5	SOL_K	soil	Soil conductivity	+/- 50%		mm/h	r
6	CANMX	runoff	Maximum canopy index	0 - 10	0	mm H ₂ O	v
Parameters governing subsurface and groundwater response							
7	GW_REVAP	groundwater	Groundwater 'revap' coefficient	0.02 - 2	0.02	none	v
8	REVAPMN	groundwater	Threshold depth of water in the shallow aquifer for 'revap' to occur	0 - 500	1	mm	v
9	GWQMN	groundwater	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur	0 - 5000	0	mm	v
10	GW_DELAY	groundwater	Groundwater delay	0 - 50	31	days	v
11	ALPHA_BF	groundwater	Baseflow alpha factor	0 - 1	0.048	days	v
12	RCHRG_DP	groundwater	Groundwater recharge to deep aquifer	0 - 1	0.05	fraction	v
Parameters governing basin response							
13	CH_K2	channel	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01 - 150	0	mm/h	v
14	CH_N2	channel	Manning coefficient for channel	0.01 - 0.5	0.014	none	v
15	SURLAG	runoff	Surface runoff lag coefficient	0 - 10	4	days	v
16	SLSUBBSN	geomorphology	Average slope length	+/- 50%		m	r

Tab. 2 - Description des 16 paramètres retenus dans le processus de calibration / validation hydrologique avec leurs valeurs et plages par défaut et leurs unités

(* v : signifie substitution de la valeur du paramètre par une autre valeur dans la plage définie pour le paramètre ; r : signifie que la valeur du paramètre est multipliée par 1 plus un facteur dans la plage définie pour le paramètre.)

(d'après [Neitsch *et al.*, 2005 ; Van Griensven et Meixner, 2006 ; Yang *et al.*, 2008])

Pour être exhaustif concernant la calibration initiale des plages de valeurs des paramètres, il est important de souligner que les plages fournies dans le tableau 2 ne sont pas automatiquement celles que nous avons retenues dans le processus calibration / validation. En effet, les bornes minimales et maximales retenues dans le processus final doivent être considérées comme acceptables (R. Srinivasan, com. orale), c'est – à – dire physiquement significatives ou définies comme telles dans la littérature [Van Liew *et al.*, 2007]. Ainsi, pour un certain nombre de paramètres, nous avons resserrer les plages de valeurs afin de maintenir des plages calibrées conformes soit à celles proposées dans la littérature, soit à celles attendues en fonction de notre connaissance de l'hydrosystème fluvial modélisé. Les plages retenues sont présentées dans le tableau 3 et sont discutées dans la partie suivante.

Résultats et discussion

Les résultats présentés ci – dessous ne concernent que la modélisation des flux d'eau sur le bassin versant du Falleron à l'exutoire principal situé à Machecoul (fig. 1). La période de calibration s'étend de 1997 à 2005 (9 ans). La période de validation s'étend de 2006 à 2007 (2 ans). Afin d'initialiser les différents réservoirs et de minimiser les effets liés à l'estimation de certaines variables d'état initiales définies par l'utilisateur comme la teneur en eau des sols ou les résidus de surface, 2 années de *Warm – Up* ont été introduites ; soit 1995 – 1996 pour la période de calibration et 2004 – 2005 pour la période de validation. Par ailleurs, l'hypothèse a été faite que, sur la période d'étude, les pratiques agricoles et le calendrier des rotations culturales n'avaient pas évoluées.

- **Calibration des paramètres, ajustements et incertitudes**

Le modèle Swat contient de nombreux paramètres qui sont utilisés pour décrire la dynamique des flux d'eau et leur distribution spatiale dans les bassins versants. Certains de ces paramètres (CN2, SURLAG) ne peuvent être mesurés directement en raison de limitations liées aux mesures et/ou à des problèmes d'échelle et doivent être estimés au travers d'une procédure de calibration.

Le tableau suivant (tab. 3) se rapporte aux 16 paramètres qui ont été ajustés. La colonne 1 fournit la liste des paramètres tel que définis dans le tableau 2. La colonne 2 se rapporte aux plages initialement calibrées à la 1^{er} itération. La colonne 3 se rapporte à celles ajustées avec SUFI2 à la 4^{ème} itération. Chaque itération comprend 1000 *runs*. Les plages finales (colonne 3) fournissent la solution de l'optimisation obtenue en intégrant les incertitudes sur les paramètres.

Listes des paramètres calibrés	Iter1 plages initiales	Iter4 plages finales
v__CH_K2.rte	0.025 – 25.00	26.02 – 39.49
v__CH_N2.rte	0.010 – 0.30	0.03 – 0.09
v__SURLAG.bsn	4.0 – 8.0	3.65 – 6.38
v__ESCO.bsn	0.00 – 0.75	0.23 – 0.56
v__ALPHA_BF.gw	0.1 – 0.5	0.29 – 0.38
r__CN2.mgt	-0.25 – 0.25	-0.25 – -0.14
r__SOL_AWC().sol	-0.25 – 0.25	0.10 – 0.20
r__SOL_K().sol	-0.25 – 0.25	-0.01 – 0.21
v__GWQMN.gw	0.00 – 5000.00	0.00 – 1130.43
v__GW_DELAY.gw	0.00 – 50.00	0.00 – 10.88
v__RCHRG_DP.gw	0.00 – 1.00	0.25 – 0.73
v__EPCO.bsn	0.00 – 1.00	0.27 – 0.46
v__REVAPMN.gw	0.00 – 500.00	283.25 – 427.75
v__GW_REVAP.gw	0.02 – 0.20	0.09 – 0.16
v__CANMX.hru	0.00 – 10.00	4.69 – 7.09
r__SLSUBBSN.hru	-0.25 - 0.25	-0.03 – 0.11

Tab. 3 - Liste des paramètres retenus dans la procédure de calibration avec les plages de valeurs initiales et finales

En ce qui concerne les plages initiales de valeurs des 16 paramètres retenus au lancement de la 1^e itération, il est important de souligner, comme cela a été indiqué dans la partie précédente (tab. 2), que celles relatives à 9 paramètres identifiés parmi les plus sensibles ont été resserrées sur des éventails ayant un sens physique sur la base des recommandations faites par [Neitsch *et al.*, 2005] dans le *Swat Input/Output file documentation* et en fonction de notre connaissance de l'hydrosystème modélisé. Cela permet d'optimiser la recherche de solutions avec en sortie des résultats cohérents au plan physique [Van Liew *et al.*, 2007].

Ces 9 paramètres sont : CH_K2, CH_N2, ESCO, SURLAG, ALPHA_BF, CN2, SOL_AWC, SOL_K et SLSUBBSN.

CH_K2 (*effective hydraulic conductivity in main channel alluvium*) est la conductivité hydraulique du lit fluvial en contexte alluvial. Ce paramètre décrit les relations entre les chenaux alluviaux et les réservoirs souterrains. Dans ce contexte, les chenaux alluviaux peuvent être définis comme des “systèmes pourvoyeurs d'eau” qui alimentent les nappes souterraines, des “systèmes receveurs” (*gaining streams*) qui sont alimentés par les nappes ou des systèmes mixtes. Ces systèmes peuvent être caractérisés en fonction des conditions hydrogéologiques régionales et des caractéristiques des alluvions qui composent les chenaux. Dans la zone d'étude, le Falleron ne draine ni n'est drainé par aucun aquifère de dimension régionale. Il appartient au groupe 4 (complexes de sables et de graviers à forte teneur en argile – limon) ou 5 (forte teneur en argile – limon). Il peut ainsi être caractérisé par des pertes modérées (groupe 4) à faible (groupe 5). La plage de valeurs retenue pour CH_K2 a, dans ces conditions, été fixée dans un premier temps comme suit : 0.025 – 25.00 mm/h [Neitsch *et al.*, 2005].

CH_N2 (*Manning coefficient for channel*) est le coefficient n de rugosité de Manning. Le réseau hydrographique du Falleron étant caractérisé par des chenaux naturels à lit unique plutôt rectilignes et en pente forte en tête de bassin, localement méandriformes dans les sections moyennes et inférieures où se développent des plaines alluviales, nous avons fixé le n de Manning entre 0.01 et 0.3.

ESCO (*soil evaporation compensation factor*) est le facteur de compensation de l'évaporation. Il permet d'ajuster la profondeur dans le sol à partir de laquelle la demande évaporatoire est réalisée par capillarité (capillary action), *crusting* et *cracks*. La valeur par défaut est fixée à 0.95. Plus cette valeur est réduite, plus le modèle est capable de répondre à la demande évaporatoire en puisant dans les horizons inférieurs des sols. Dans ce contexte, la plage initiale de valeurs retenue pour ESCO a été paramétrée entre 0.00 – 0.75.

SURLAG est défini comme le coefficient de retard du ruissellement (*surface runoff lag coefficient*). Pour les grands bassins versants caractérisés par un temps de concentration supérieur à 1 jour, SURLAG peut être paramétré afin qu'une fraction des écoulements de surface soit stockée et délivrée au chenal sur une durée supérieure à un jour. Ainsi, SURLAG contrôle la fraction d'eau superficielle disponible qui est autorisée à entrer dans le chenal en une seule journée. La valeur maximale autorisée

est 10 jours. La valeur par défaut est 4 jours. Pour un temps de concentration donné, plus la valeur de SURLAG est réduite plus la fraction dirigée en stockage est accrue et plus l'hydrogramme est lissé. Ici, la plage initiale de valeurs retenue pour ce paramètre est : 4 – 8.

ALPHA_BF est défini comme la constante de récession (*baseflow alpha factor*). Il caractérise la courbe de récession des eaux souterraines jusqu'au débit de base. Les valeurs de ALPHA_BF varient de 0.1 – 0.3 pour les hydrosystèmes caractérisés par des réponses lentes à la recharge à 0.9 - 1.0 pour des hydrosystèmes à réponse rapide [Neitsch *et al.*, 2005]. Pour paramétrer ALPHA_BF, bien que nous soyons conscients que chaque paramétrage est unique et que la valeur d'un paramètre est dépendante des valeurs des autres paramètres, du contexte régional et de la qualité des données en entrée, nous nous sommes appuyés sur des études réalisées dans des contextes hydrodynamiques relativement proches [Abbaspour *et al.*, 2007 ; Rollo, 2012]. Nous savons également que l'hydrosystème Falleron est principalement dominé par des apports de surface. Dans ces conditions, la plage retenue a été fixée à 0.1 – 0.5.

Les plages de 4 paramètres (CN2, SOL_AWC, SOL_K, SLSUBBSN) auxquels nous avons appliquées un facteur multiplicatif (tab. 2) ont également été resserrées sur des fourchettes comprises entre $\pm 25\%$. Le choix de ces plages est le fruit d'un processus itératif. Toute chose égale par ailleurs concernant les plages de valeurs des 12 autres paramètres, des plages à $\pm 50\%$, $\pm 25\%$, $\pm 10\%$ et $\pm 5\%$ ont été testées. Au final, le choix retenu permet d'optimiser la recherche d'une solution acceptable au plan physique eu égard aux valeurs fournies dans la littérature [Schuol *et al.*, 2008 ; Van Liew *et al.*, 2007 ; Yang *et al.*, 2008].

CN2 est défini comme le *runoff curve number (SCS runoff curve number)*, il permet de simuler le ruissellement en fonction des types de sols, des couverts végétaux et des pratiques agricoles associées et, en fonction, des conditions d'humidité initiales dans les sols. SOL_AWC (*Available soil water capacity*) est le volume d'eau disponible dans le sol pour les plantes à la capacité au champ. SOL_K (*Soil conductivity*) est la conductivité hydraulique du sol. Enfin, SLSUBBSN (*Average slope length*) est la longueur de la pente moyenne sur laquelle se réalisent les écoulements en nappe.

Il convient de préciser que nous n'avons pas autorisé de dérive au niveau des bornes inférieures et supérieures ($\pm 25\%$) de ces 4 paramètres afin de maintenir des plages calibrées cohérentes avec la littérature. A l'inverse, 2 des 3 paramètres les plus sensibles (CH_K2 et SURLAG) ont été autorisés à dériver très légèrement au – delà des plages initialement fixées afin d'optimiser la recherche d'une solution acceptable (tab. 3).

Pour les 7 autres paramètres retenus, les plages maximales de valeurs définies par défaut [Van Griensven et Meixner, 2006] et répertoriées dans le tableau 2 ont été conservées faute d'informations suffisantes. EPCO (*Plant evaporation compensation factor*) est un facteur de compensation qui autorise le modèle, lorsque le volume d'eau disponible dans les horizons supérieurs du sol est insuffisant, à prélever dans les

horizons inférieurs afin de satisfaire la demande transpiratoire des plantes (plage fixée à 0.00 – 1.00). CANMX (*Maximum canopy index*) est la capacité maximale d'interception et de stockage de la canopée. Elle est fonction de la morphologie des espèces végétales et de la densité du couvert végétal. CANMX intervient dans le calcul des *SCS curve number* (plage fixée à 0.00 – 10.00). GW_REVAP (*Groundwater 'revap' coefficient*) est un coefficient qui contrôle le volume d'eau qui peut être transféré de l'aquifère peu profond vers la frange capillaire de la zone non saturée en fonction des conditions d'humidité des sols et de la demande évapotranspiratoire (plage fixée à 0.02 – 0.20). REVAPMN (*Threshold depth of water in the shallow aquifer for 'revap' to occur*) est un seuil à partir duquel sont contrôlés, depuis l'aquifère peu profond, les processus de recharge de la zone non saturée et de l'aquifère profond. Si le volume d'eau dans l'aquifère peu profond est égal ou supérieur à ce seuil, les transferts vers la zone non saturée sont autorisés (plage fixée à 0.00 – 500.00). GWQMN (*Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur*) est défini comme le niveau piézométrique (*i.e.* seuil de profondeur) à partir duquel l'aquifère peu profond peut soutenir le débit des principaux cours d'eau (plage fixée à 0.00 – 5000.00). GW_DELAY (*Groundwater delay*) est le temps de transfert de l'eau qui participe à la recharge de l'aquifère peu profond depuis la zone non saturée (plage fixée à 0.00 – 50.00). RCHRG_DP (*Groundwater recharge to deep aquifer*) est défini comme la fraction d'eau de percolation qui quitte la zone racinaire pour participer à la recharge de l'aquifère profond (plage fixée à 0.00 – 1.00).

- **Qualité de l'ajustement**

Le tableau 4 se rapporte aux résultats obtenus avec l'algorithme SUFI2 pour la calibration puis pour la validation sur les 6 premières itérations (soit 6000 *runs* ; *i.e.* 1000 *runs* par itération avec restriction progressive des plages de valeurs) réalisées sur les 16 paramètres. Comme indiqué plus haut, p-factor donne le % de données mesurées capturées par 95PPU (*95% prediction uncertainty*). r-factor est le rapport entre l'épaisseur moyenne de 95PPU et l'écart type des données observées. Il représente la largeur de l'intervalle d'incertitude et doit être le plus faible possible ; en pratique proche ou plus petit que 1 [Abbaspour, 2012 ; Abbaspour *et al.*, 2007]. Pour information, et en ayant bien à l'esprit que l'approche stochastique retenue ici ne rende pas strictement applicable l'utilisation des coefficients suivants, nous fournissons à titre d'exemple les scores obtenus pour 2 fonctions – objectif qui donnent une mesure de l'écart entre des séries temporelles mesurées et simulées : coefficient de corrélation (r^2) et coefficient de Nash – Sutcliffe (NS).

	Calibration (1997 – 2005)				Validation (2006 - 2007)			
	p-factor	r-factor	r ²	NS	p-factor	r-factor	r ²	NS
Iter1	0.79	0.77	0.40	0.40	--	--	--	--
Iter2	0.68	0.62	0.43	0.43	--	--	--	--
Iter3	0.56	0.66	0.48	0.46	0.75	0.75	0.47	0.56
Iter4	0.63	0.50	0.49	0.49	0.69	0.56	0.52	0.51
Iter5	0.40	0.46	0.52	0.51	--	--	--	--
Iter6	0.36	0.36	0.52	0.51	--	--	--	--

Tab. 4 - Résultats obtenus après 6 itérations pour le processus de calibration / validation hydrologique

Les résultats se dégradant fortement à la 5^e itération en termes de p-factor et de r-factor (tab. 4), ceux obtenus à la 4^e itération ont été retenus pour le calage du modèle hydrologique. A ce stade, les valeurs de p-factor et r-factor sont respectivement de 0.63 et de 0.50 pour le calage et de 0.69 et 0.56 pour la validation. En fonction de ces 2 critères, il a été décidé qu'une réduction plus importante de l'incertitude n'était pas raisonnable (tab. 3).

Considérant qu'il convient d'optimiser ces 2 paramètres en maximisant p-factor (100%) et en minimisant r-factor ($= < 1$), tout en réduisant les incertitudes sur les plages de valeurs de chacun des paramètres retenus (tab. 3), les résultats obtenus – donc le *goodness of fit*, – peuvent être qualifiés de “satisfaisants”. En effet, en calibration, la bande de prédiction de l'incertitude (95PPU), calculée sur 95% des meilleurs runs à la 4^e itération, intercepte près des 2/3 des données observées (63%). En validation, 95PPU capture plus des 2/3 des données observées (69%). Ceci traduit des résultats satisfaisants qui pourraient cependant être améliorés avec des jeux de données en entrée (variables de forçage) et/ou en sortie (données hydrologiques utilisées pour le calage et la validation) de meilleure qualité. En effet, [Abbaspour *et al.*, 2007] considèrent que des jeux de données de haute qualité peuvent produire de très bons résultats avec des valeurs de p-factor compris entre 0.8 et 1. On notera enfin, dans les 2 cas (validation et calibration), que l'épaisseur moyenne de la bande de prédiction est nettement inférieure à l'écart type des données observées (r-factor $= < 1$ avec 0 correspondant à un score parfait). Ceci traduit également des résultats satisfaisants caractérisés par une réduction correcte de l'incertitude sur les plages des 16 paramètres retenus (tab. 3).

A titre informatif, et bien que cela n'ait que peu de sens eu égard à la procédure retenue car il existe de fait de nombreuses simulations uniques qui possèdent des scores identiques mais avec des jeux de paramètres différents, on notera que les scores de la fonction – objectif NS sont respectivement de 0.49 en calibration et de 0.51 en validation. Là encore, les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants dans la mesure où il est admis dans la littérature [Motovilov *et al.*, 1999 ; Servat et Dezeter, 1991] qu'un coefficient de Nash – Sutcliffe (NS) compris entre 0.36 et 0.75

peut être considéré comme satisfaisant ; un coefficient supérieur ou égal à 0.75 étant considéré comme bon. En calibration comme en validation, les r^2 sont très proches ou supérieurs à 0.5 (respectivement 0.49 et 0.52).

- **Débits simulés vs débits observés**

Les 2 figures suivantes (fig. 2 et fig. 3) se rapportent aux débits simulés (95PPU) et observés à l'exutoire de Machecoul pour les périodes 1997 – 2005 (calibration) et 2006 – 2007 (validation). La comparaison des données observées et de celles simulées dans la bande de prédiction de l'incertitude (95PPU) permet de juger – au plan qualitatif – de la qualité de l'ajustement.

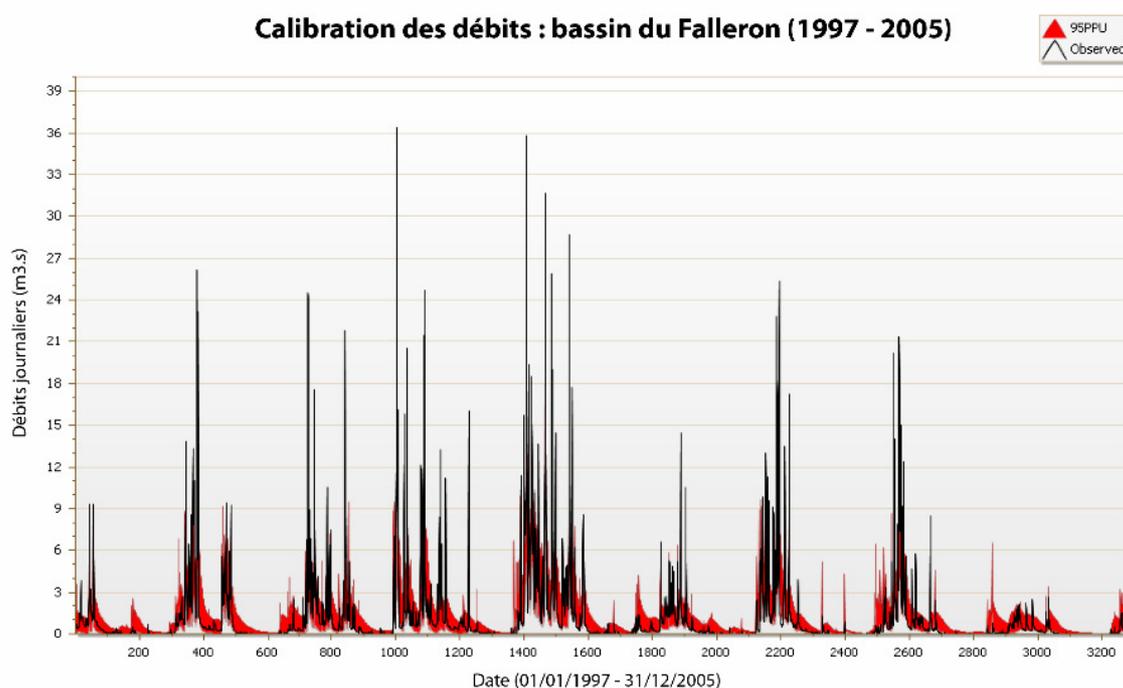


Fig. 2 - Calibration : débits simulés et observés à l'exutoire de Machecoul pour la période 1997 – 2005

(p-factor = 0.63, r-factor = 0.50) ; la courbe noire représente les débits observés ; la bande rouge représente l'intervalle de prédiction de l'incertitude (95PPU)

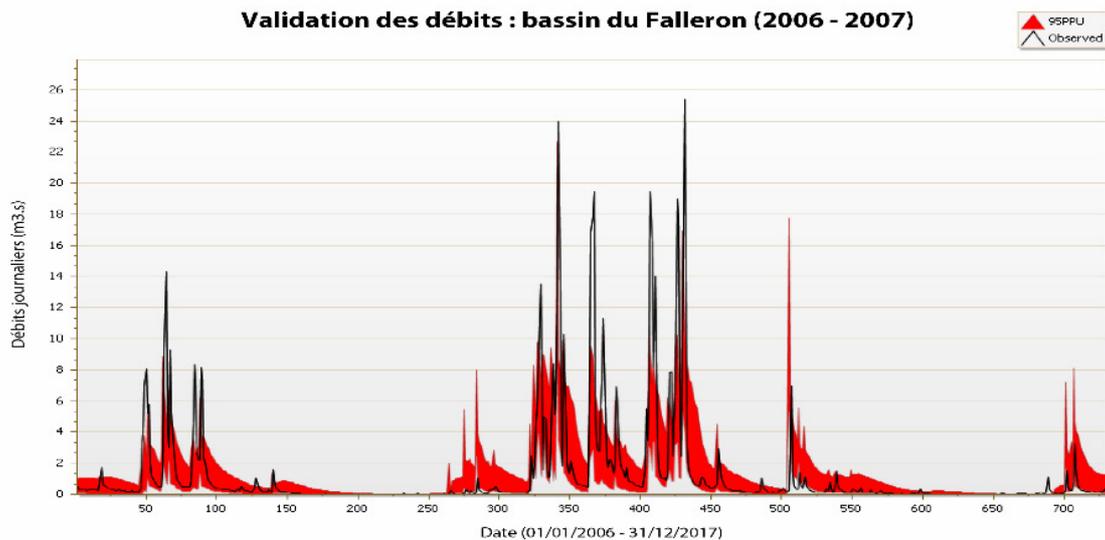


Fig. 3 - Validation : débits simulés et observés à l'exutoire de Machecoul pour la période 2006 – 2007

(p-factor = 0.69, r-factor = 0.56) ; la courbe noire représente les débits observés ; la bande rouge représente l'intervalle de prédiction de l'incertitude (95PPU)

On notera que la durée de la chronique utilisée pour la calibration hydrologique du modèle (1997 – 2007) permet de couvrir une large gamme de débits avec des années sèches, des années humides et des années moyennes ; ce qui permet d'accroître la robustesse des sorties du modèle.

Lorsque l'on examine en particulier le timing et la magnitude des flux, les résultats sont dans l'ensemble bons avec des variations intra et inter – annuelles qui sont bien prises en compte par le modèle et un timing qui est correct. On note que les intervalles sur certains pics, en particulier durant les périodes de basses eaux, peuvent être parfois assez larges ce qui traduit une sur – estimation sur certains épisodes hydrologiques peu fréquents. Cela exprimé, pour les débits moyens, la bande de prédiction de l'incertitude encadre de façon très satisfaisante les données observées et les plages de valeurs des données simulées en sortie sont suffisamment resserrées ce qui traduit une diminution correcte de l'incertitude de prédiction (cf. également tab. 3). Ainsi, les tendances sont bonnes même si il peut y avoir une sur – estimation sur épisodes hydrologiques rares.

En conclusion, les résultats obtenus montrent la bonne performance du modèle Swat qui est capable de reproduire de façon correcte le fonctionnement d'ensemble de l'hydrogramme des débits observés dans le bassin versant du Falleron. Cela ouvre des perspectives prometteuses en termes de gestion et de management des bassins versants contributifs de la Baie de Bourgneuf.

Bibliographie

- 1 - **Abbaspour K.C. (2012)**: "User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs", Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf (Switzerland), 103p.
- 2 - **Abbaspour K.C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., Zobrist J., Srinivasan R. (2007)**: "Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT", *Journal of Hydrology*, 333, pp.413-430
- 3 - **Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. (1998)**: "Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development", *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), pp.73-89
- 4 - **Borah D.K., Bera M. (2003)**: "Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 46(6), pp.1553-1566
- 5 - **Faramarzi M., Abbaspour K.C., Schulin R., Yang H. (2009)**: "Modeling blue and green water availability in Iran", *Hydrol. Proc.*, 23(3), pp.486-501
- 6 - **Lenhart T., Eckhardt N., Fohrer N., Frede H.-G. (2002)**: "Comparison of two different approaches of sensitivity analysis", *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, pp.645-654
- 7 - **Motovilov Y.G., Gottschalk L., England K., Rodhe. A. (1999)**: "Validation of distributed hydrological model against spatial observations", *Agric. Forest Meteorology*, 98-99, pp.257-277
- 8 - **Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R. (2005)**: "Soil and Water Assessment Tool - Input / Output file", Documentation, 541p.
- 9 - **Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., King K.W. (2002)**: "Soil and Water Assessment Tool", Theoretical documentation, 506p.
- 10 - **Rollo N. (2012)**: "Modélisation des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière d'Auray - Quantification, caractérisation et gestion des apports nutritifs terrigènes", Thèse de Doctorat, Université de Nantes (44), 394p.
- 11 - **Schmalz B., Fohrer N. (2009)**: "Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model", *Adv. Geosci.*, 21, pp.91-98
- 12 - **Schuol J., Abbaspour K.C., Srinivasan R., Yang H. (2008)**: "Estimation of freshwater availability in the west African subcontinent using the SWAT hydrologic model", *J. Hydrol.*, 352(1-2), pp.30-49
- 13 - **Sellami H., La Jeunesse I., Benabdallah S., Baghdadi N., Vanclooster M. (2013)**: "Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France)", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, pp.4951-5011
- 14 - **Servat E., Dezetter A. (1991)**: "Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese Savannah area", *Hydrological Sciences Journal*, 36(4),

- 15 - **Van Griensven A., Meixner T. (2006)**: "Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models", *Water Science and Technology*, 53(1), pp.51-59
- 16 - **Van Liew M.W., Green C.H., Starks P.J. (2007)**: "Unit source area data: Can it make a difference in calibrating the hydrologic response for watershed-scale modeling ?" *J. Soil Water Cons.*, 62(3), pp.162-170
- 17 - **White K.L., Chaubey I. (2005)**: "Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model", *J. American Water Resour. Assoc.*, 41(5), pp.1077-1089
- 18 - **Yang J., Abbaspour K.C., Reichert P., Yang H. (2008)**: "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. In review", *Journal of Hydrology*, 358(1-2), pp.1-23

Thèse de Doctorat

Julian Gille

Suivi et modélisation des flux dans un marais maritime :
essais et tentative d'application sur la partie nord du Marais Breton

Résumé

Le Marais Breton est un marais littoral situé au sud de l'estuaire de la Loire. Son rôle bénéfique sur la qualité de l'eau est souvent mis en avant, mais jamais quantifié. Les habitats côtiers fournissent des services écosystémiques essentiels aux personnes et à l'environnement, notamment pour la qualité de l'eau. L'estimation du pouvoir épurateur de tels milieux est la plupart du temps basée sur un bilan des entrées et des sorties. La présente étude cherche à aller plus loin en tentant de tenir compte des processus de dégradation mis en jeu au cours du transit des masses d'eau dans le marais. La méthodologie proposée est basée sur la modélisation des flux d'eau et d'un pesticide (glyphosate) dans les principaux chenaux à l'aide d'un modèle hydraulique monodimensionnel (1D).

Les simulations réalisées prouvent qu'il est possible de calculer des temps de concentration, de résidence et de transfert dans le marais, fonction des usages, des conditions hydro-météorologiques et des manœuvres d'ouverture / fermeture des ouvrages hydrauliques. Ces simulations révèlent également la possibilité de différencier les processus de dégradation et de dilution, et de les spatialiser. L'intégration de ce modèle dans une chaîne de modèles sur le continuum terre-mer s'avère possible et démontre l'intérêt de cet outil dans l'aide à la décision pour la gestion de ces milieux.

Mots clés

Zone humide, gestion hydraulique, qualité de l'eau, modélisation, Marais Breton

Abstract

The Marais Breton is a coastal wetland located south of the Loire estuary. Its beneficial effect on coastal water quality is often emphasized, but never quantified. Coastal habitats provide ecosystem services essential to people and the environment especially through water quality: wetlands filter chemicals and sediment out of water before it is discharged into the ocean. Assessing the purifying power of such an ecosystem is mostly based on a balance of water quality inputs and outputs. This study aims at going further by attempting to account for water quality degradation through its way across wetland. The proposed methodology is based upon the modelling of water flow and pesticide (glyphosate) in the main channels with the use of a monodimensional hydraulic model (1D).

The simulations show that it is possible to compute the time of concentration, residence and transfer through the marsh, according to water use and land use, hydro-meteorological conditions and opening / closure of floodgates. These simulations allow the possibility to differentiate the processes of degradation and dilution, and the spatialization of the processes. The integration of this model in a set of land-sea continuum modelling is possible. It demonstrates the interest of this tool for decision making when need of management of this environment occur.

Key Words

Wetland, management hydraulics, water quality, modelling, Breton marsh