
CODEPRAN - CLE - SAGE RANCE
FREMUR
CdC du Pays de Matignon

ETUDE HYDRODYNAMIQUE DANS LES BAIES DE LANCIEUX,
FRESNAYE ET ARGUENON



RAPPORT D'ETUDE
JUN 2002



SOMMAIRE

OBJET DE L'ETUDE	1
SYNTHESE ET CONCLUSIONS.....	3
1. QUALITE DES EAUX DE LA BAIE : BILAN DES FLUX ET APPORTS	4
1.1. CADRE GENERAL	4
1.2. METHODOLOGIE.....	5
1.3. DEBIT	5
1.4. FLUX DE NITRATE.....	6
1.5. FLUX BACTERIOLOGIQUE.....	7
2. CRITERE D'ANALYSE : LE CONTEXTE DES USAGES DU MILIEU MARIN	9
2.1. LES OBJECTIFS DE QUALITE DES EAUX.....	9
2.2. EAUX DE BAINADE	9
2.3. ZONES CONCHYLICOLES	10
2.4. ZONES DE PECHE A PIED.....	11
3. TRANSPORT ET DISPERSION DES APPORTS – GENERALITES.....	13
3.1. INTRODUCTION : LA DISPERSION DES EFFLUENTS EN MER.....	13
3.2. MODELISATION MATHEMATIQUE DES EFFLUENTS : HYPOTHESES ET CONDITIONS UTILISEES	14
3.2.1. CHAMPS DE COURANT	14
3.2.2. DEBITS ET FLUX DES RIVIERES, COURS D'EAU, REJETS	15
3.2.3. FACTEUR DE CONCENTRATION DES BACTERIES PAR LES COQUILLAGES..	15
4. TRANSPORT ET DISPERSION DES NITRATES.....	16
4.1. INTRODUCTION.....	16
4.2. BAIE DE LA FRESNAYE.....	17
4.2.1. REJETS INTERANNUELS (FIGURES 4.2 A 4.5).....	18
4.2.2. REJETS ANNEE 2000 (FIGURES 4.6 A 4.9)	18
4.2.3. SYNTHESE.....	18
4.3. BAIE DE L'ARGUENON	19
4.3.1. REJETS INTERANNUELS (FIGURES 4.11 A 4.14).....	19
4.3.2. REJETS ANNEE 2000 (FIGURES 4.15 A 4.18)	20
4.3.3. SYNTHESE.....	20
4.4. BAIE DE LANCIEUX.....	20
4.4.1. REJETS INTERANNUELS (FIGURES 4.20 A 4.23).....	20
4.4.2. REJETS ANNEE 2000 (FIGURES 4.24 A 4.27)	21
4.4.3. SYNTHESE.....	21

4.5.	ANALYSE COMPARATIVE – ENSEMBLE DES BAIES.....	21
4.5.1.	REJETS INTERANNUELS.....	21
4.5.2.	REJETS DE 2000.....	22
4.6.	SYNTHESE SUR LE PANACHE DES REJETS DE NITRATES.....	22
5.	DISPERSION DES EC.....	23
	INTRODUCTION.....	23
5.2.	EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DANS LES DIFFERENTES BAIES.....	25
5.2.1.	BAIE DE LA FRESNAYE.....	25
5.2.2.	BAIE DE L'ARGUENON.....	26
5.2.3.	BAIE DE LANCIEUX.....	26
5.3.	EXTENSION MAXIMALE DU PANACHE DE COLIFORMES.....	26
5.3.1.	SITUATION INTERANNUELLE.....	26
5.3.2.	SITUATION ANNEE 2000.....	27
5.4.	ANALYSE STATISTIQUES DES PANACHES – CRITERES DE CLASSEMENT DE LA QUALITE DE BAINADE.....	28
5.4.1.	SITUATION INTERANNUELLE.....	28
5.4.2.	SITUATION ANNEE 2000.....	28
5.4.3.	SYNTHESE.....	28
5.5.	ANALYSE STATISTIQUES DES PANACHES – CRITERES DE CLASSEMENT DE LA QUALITE DES ZONES CONCHYLICOLES.....	29
5.5.1.	SITUATION INTERANNUELLE.....	29
5.5.2.	SITUATION ANNEE 2000.....	30
5.5.3.	SYNTHESE.....	30
5.6.	SYNTHESE SUR LE PANACHE DES REJETS DE COLIFORMES/EC.....	31
	REFERENCES.....	32
1.	MODELE HYDRODYNAMIQUE.....	2
1.1.	DESCRIPTION SOMMAIRE DU SYSTEME DE MODELISATION.....	2
1.1.1.	AVANTAGES DU SYSTEME TELEMAR.....	2
1.1.2.	MODULE DE CALCUL HYDRODYNAMIQUE.....	3
1.1.3.	QUALITE DES EAUX - TRANSPORT.....	3
1.2.	MODELE HYDRODYNAMIQUE DES TROIS BAIES.....	3
1.3.	LES CONDITIONS AUX LIMITES.....	4
1.3.1.	CONDITIONS FLUVIALES.....	4
1.4.	LE MAILLAGE.....	4
1.5.	LA BATHYMETRIE.....	4
1.6.	VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE.....	6
1.7.	EXPLOITATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE.....	6
2.	MODELE DE TRANSPORT-DISPERSION.....	7

OBJET DE L'ETUDE

Le SAGE « Rance Frémur Baie de Beaussais » associe deux bassins, la Rance et le Frémur dans son élaboration de scénarios « visant à proposer dans ce périmètre une gestion globale et cohérente des ressources en eaux » et des milieux associés.

Le Frémur, petit fleuve côtier, est classé 1^{ère} catégorie piscicole.

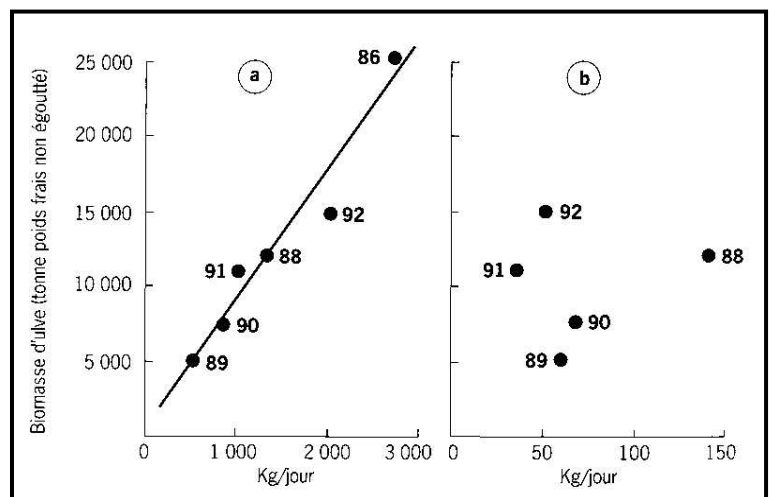
La qualité physico-chimique des eaux du Frémur est médiocre sur l'ensemble de son cours avec en particulier des flux d'azote et de phosphore significatifs. Cette situation semble aller en se dégradant et conduit à une eutrophisation du plan d'eau.

Les proliférations d'ulves sur les plages bretonnes, plus connues sous le noms de *marées vertes*, s'accumulent sur les estrans en périodes printanière et estivale en quantités très importantes. Cette situation devient ainsi critique par rapport aux usages du littoral (baignade, pêche à pieds, ...). La principale méthode de lutte contre ces ulves est le ramassage intensif lors de la saison. Sur le département des Côtes d'Armor, par exemple, le volume total ramassé se situe entre 20 000 et 40 000 m³ par an pour un coût entre 1 et 2 millions de francs (d'après [1], données CEVA).

L'essentiel de la croissance des algues vertes se situe entre mi-avril et mi-juillet. Elle a lieu très localement en suspension dans les premières vagues, sur les estrans. L'apport nutritif véhiculé par les cours d'eau est un élément majeur de la croissance de ces ulves. Aussi, le renouvellement des eaux en fond des baies est certainement un élément majeur dans le développement des marées vertes. Cependant, du fait de la complexité des phénomènes hydrodynamiques (marées, houles, vents, ...), les échouages présentent un caractère aléatoire ne permettant pas de définir avec précision leurs origines.

Dans ce contexte, nous nous intéresserons particulièrement aux apports azotés des cours d'eau. En effet, le rôle moteur de l'azote dans la prolifération des ulves a été démontré notamment sur la baie voisine de Saint Briec [2]. A contrario, aucune corrélation avec les flux de phosphore n'a été observée. La figure suivante montre ces corrélations.

Figure 1 – Relations entre la biomasse annuelle maximale d'ulves et les flux nutritifs en nitrate et phosphore en baie de Saint-Briec (Issues de [2])



L'origine de l'azote, issu des bassins versants, provient des excédents d'origines agricoles, domestiques, piscicoles et industrielles [1]. Dans ce registre, les excédents provenant de l'agriculture sont très nettement majoritaires, jusqu'à 99% en baie de la Fresnaye. L'intensification de l'agriculture bretonne ces dernières années en est la cause principale.

En préambule de toute action visant à réduire ces nuisances, la CLE a jugé indispensable de mettre en œuvre une étude basée sur une modélisation mathématique. Celle-ci est destinée en premier lieu à mieux appréhender les processus naturels pouvant régir la croissance des algues vertes.

En parallèle, la Communauté de Communes du pays de Matignon a souhaité mener le même type de démarche sur la zone de la baie de la Fresnaye, soumise, elle aussi, à des phénomènes d'échouage d'algues vertes.

La présente étude a pour objectif d'examiner les évolutions de l'environnement dans les trois baies de Lancieux, Arguenon et Fresnaye. Cet objectif général se décline de la façon suivante :

- ❑ Définition des impacts respectifs des différents apports de polluants, nitrates et coliformes, sur la qualité des eaux des trois baies et de la zone côtière,
- ❑ Détermination des échanges possibles entre les différents bassins,
- ❑ Enfin, définition des principales mesures permettant une amélioration de la qualité des eaux de la baie et en particulier au niveau du littoral qui présente les enjeux économiques principaux (plages , pêche, ...).

Les analyses ont été fondées sur la modélisation bidimensionnelle des panaches de sels nutritifs dissous dans la colonne d'eau. Le problème du transport et de l'échouage des algues vertes, nécessitant entre autres une connaissance fine de l'hydrodynamique de surface (courants, houle), n'a pas été traité.

Le présent rapport présente les résultats de cette étude, basée sur une modélisation mathématique fine de l'ensemble des baies. La synthèse et les conclusions de l'étude font l'objet du chapitre suivant.

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

L'étude de l'évolution de l'environnement dans les baies de Lancieux, l'Arguenon et la Fresnaye est abordée à l'aide d'un modèle hydrodynamique couplé à un modèle de transport-dispersion des effluents. Cette étude porte sur l'analyse des panaches de nitrates et d'effluents porteurs de germes bactériologiques, principalement les coliformes fécaux, issus des rivières et stations d'épuration.

Le modèle hydrodynamique a été établi à partir d'un modèle mathématique initialement construit et exploité pour l'étude hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Rance et de la zone côtière adjacente (étude réalisée pour le compte de l'association CŒUR).

Les outils et les modèles mis en œuvre sont parmi les plus performants pour ce qui concerne les phénomènes pris en compte et leur précision de représentation. L'élaboration et le calage des modèles font l'objet de l'Annexe 2. Notamment, une bathymétrie très fine des trois baies et des rochers des Ebihens a été intégrée dans ce modèle.

Cette étude s'appuie d'autre part sur une analyse des données et un bilan des flux et apports dans chaque baie réalisés conjointement avec les clients. Cette première partie de l'étude, présentée au chapitre 1, a pour objectif de déterminer les conditions d'entrée que doivent prendre en compte les modélisations. Il ressort de cette analyse quelques points forts :

- L'Arguenon rejète dans sa baie en moyenne 4 fois plus de nitrates que l'ensemble des autres cours d'eau des trois baies réunies. Un chiffre à mémoriser : au printemps 2000, 1,3 tonnes de nitrates par heure sont déversées en mer par l'Arguenon.
- Les apports fluviaux de nitrates à la baie de Lancieux sont nettement moins importants.
- Les apports de coliformes fécaux à la baie de Lancieux sont aussi importants que ceux des deux autres baies réunies. La source principale de pollution est alors le Balay qui inclut les rejets de la station d'épuration de Ploubalay.

En support à l'analyse et la réflexion, nous rappelons au chapitre 2 les usages du milieu marin sur le site d'étude. Le lecteur pourra trouver dans ce chapitre les arrêtés ministériels et décrets régissant les normes de qualité d'eau pour les usages concernés.

Après avoir évoqué quelques généralités sur la dispersion des effluents en mer au chapitre 3, nous abordons au chapitre 4 l'analyse du transport et de la dispersion des panaches de nitrates pour 8 scénarios hydro-météorologiques.

Les principaux résultats sont les suivants :

- Parmi les situations saisonnières examinées, celle correspondant au printemps est clairement la plus défavorable ;
- La situation de l'année exceptionnelle en terme de débit que représente l'année 2000 n'induit pas de phénomène spécifique. Les panaches des baies sont semblables et si les taux de concentrations sont plus importants, ils restent du même ordre de grandeur ;

- Le renouvellement des eaux des baies par le flot est efficace pour l'ensemble des baies sauf pour celle de l'Arguenon. Ceci est essentiellement induit par la quantité de nitrates rejetés en mer dans cette baie plutôt que par un effet hydrodynamique spécifique ;
- Les interactions entre les baies sont faibles. Elles sont essentiellement d'ordre sporadique, d'ouest en est (influence de l'hydrodynamique) et principalement pendant la saison de printemps. Ainsi le panache issu de la baie de la Fresnaye atteint la zone de la baie de l'Arguenon sur le secteur de Saint-Cast et le panache de l'Arguenon induit une pollution diffuse sur l'ensemble de la baie de Lancieux. Par contre, l'extension au nord-ouest du panache issu de la baie de l'Arguenon ne pénètre pas dans la baie de la Fresnaye.

Il ressort de cette analyse que le renouvellement des eaux étant suffisamment efficace pour chacune des baies, le principal facteur qui permettrait une amélioration notable de la qualité des eaux des baies reste essentiellement le contrôle amont des quantités de nitrates rejetés. De plus, pour le cas particulier de la baie de Lancieux, la limitation des quantités rejetées dans la baie ne doit pas être envisagée indépendamment de celle issue de l'Arguenon.

Le chapitre 5 présente l'analyse du transport et de la dispersion des panaches de coliformes (d'*Escherichia Coli* pour 2000) pour les 8 scénarios hydro-météorologiques.

Les principaux résultats sont les suivants

- La situation saisonnière la plus défavorable est la situation de printemps mais dans des proportions moindres que pour les nitrates
- La situation de l'année exceptionnelle en terme de débit que représente l'année 2000 n'induit pas de phénomène spécifique. Les panaches des baies sont semblables voire plus favorables dans certains cas qu'en situation interannuelle, exception faite de la baie de Lancieux qui subit un déclassement dus aux rejets du Balay ;
- Le renouvellement des eaux des baies par le flot est efficace pour l'ensemble des baies même pour celle de l'Arguenon ;
- La baie de Lancieux est celle présentant les concentrations les plus fortes et donc les déclassements les plus importants. La baie de la Fresnaye présente aussi des concentrations assez importantes surtout au printemps ;
- Les interactions entre les baies sont quasi-nulles.

L'importance des flux rejetés en mer est clairement mise en évidence par l'établissement des cartes de zonages de qualité d'eau pour les classements conchylicoles. **Même si cette analyse reste partielle au vu des données disponibles pour l'étude, il ressort que l'ensemble des trois baies peut présenter selon les cas des déclassements potentiels importants (C et interdiction pour la pêche à pied). La situation de la baie de la Fresnaye est un peu meilleure avec un classement des zones conchylicoles partiellement en B.**

Cette situation peut trouver une explication, en particulier pour le Balay, par le fait que les contrats d'affermage de stations d'épuration n'imposent pas un suivi régulier des eaux rejetées.

Il convient d'autre part de signaler qu'une analyse plus fine nécessiterait de disposer de mesures plus importantes des émissions en mer en termes de fréquences et de natures de prélèvements.

1. QUALITE DES EAUX DE LA BAIE : BILAN DES FLUX ET APPORTS

1.1. CADRE GENERAL

La représentativité d'un modèle numérique de qualité des eaux dépend de manière importante des différents paramètres utilisés lors de sa configuration d'une part, mais surtout des données qui lui sont fournies. Il est en particulier nécessaire de connaître aussi bien que possible les différents flux à prendre en compte. Dans le cadre de cette étude, la collecte des données et leur analyse a porté principalement sur trois grandeurs physiques : le débit, la concentration en nitrates et la concentration en coliforme fécaux ou *Escherichia Coli*.

Un important travail de recueil et d'analyse de données a été réalisé en collaboration entre SOGREAH, la C.L.E. et la C.C.P.M.

Dans un premier temps, l'analyse a été effectuée sur des données couvrant une période de plusieurs années. La durée de cette période varie suivant les données mais couvre au moins la période 1995-1999. Il a par ailleurs été décidé de faire une analyse sur la seule année 2000 qui représente une année assez exceptionnelle en terme d'hydrologie et pour laquelle les données sont plus nombreuses et de meilleure qualité (en moyenne au moins une mesure par mois).

L'analyse des différents flux a donc conduit à la détermination des trois paramètres (débit, concentration en nitrates et concentration en coliforme-fécaux ou EC) pour deux périodes différentes (période interannuelle et année 2000).

Les données recueillies proviennent de divers organismes (DDE., CQEL , DDASS , SAUR , DAE-CG22, DIREN ...).

Les principaux cours d'eau ont été pris en compte. Il s'agit de :

- Le Frémur, le Rat, le Clos et le Kermiton pour la baie de la Fresnaye,
- L'Arguenon pour la baie de l'Arguenon,
- Le Balay, le Drouet et le Frémur pour la baie de Lancieux.

Par ailleurs, les données des trois stations d'épuration ayant leurs rejets dans la zone d'étude ont été intégrées. Il s'agit des stations de Saint-Cast, de Saint-Jacut et de Saint-Briac/Saint-Lunaire. La station d'épuration de Ploubalay qui rejette directement dans le Balay est prise en compte indirectement via les flux issus de cette rivière.

Nota :

*A partir de 1999, les données bactériologiques recueillies concernent les *Escherichia Coli* contrairement aux années précédentes qui portent sur les Coliformes Fécaux.*

1.2. METHODOLOGIE

Plusieurs approches peuvent être utilisées lors de l'analyse de données de ce type.

En ce qui concerne les valeurs du débit et de la concentration en nitrates, nous avons eu recours à un calcul sous forme de moyenne arithmétique (pour la période interannuelle d'une part, et pour l'année 2000 d'autre part).

L'analyse des données des stations d'épuration a présenté quelques difficultés supplémentaires. Nous avons en effet été confronté à une faible fiabilité des mesures de concentration en coliformes fécaux, car les contrats d'affermage des sociétés en charge des stations n'imposent par ce type de mesure. En particulier, devant l'absence de données de ce type pour la station de Saint-Jacut, la concentration introduite dans le modèle a été estimée.

Compte tenu des objectifs de cette étude, nous avons été conduits à effectuer une détermination de paramètres pour deux périodes différentes :

- La période de février à mai qui représente la période de début de développement des algues vertes et qui s'apparente à une situation mixte hiver/printemps ;
- La période de juin à septembre qui représente la période de prolifération des algues vertes et qui s'apparente à une situation d'été.

1.3. DEBIT

L'analyse des mesures de débit montre que ceux-ci sont assez variables au cours de l'année, avec des débits plus forts en hiver et plus faibles en été. Le résultat de l'analyse est présenté dans le tableau ci-dessous :

	DÉBITS EN l/s							
	Baie de Lancieux			Baie de l'Arguenon	Baie de la Fresnaye			
	Frémur Lancieux	Drouet	Balay	Arguenon	Frémur Matignon	Rat	Clos	Kermiton
Printemps 2000	556	254	164	6373	646	121	113	23
Eté 2000	120	55	36	1186	133	21	23	7
Printemps interannuel	474	216	140	5134	605	142	101	35
Eté interannuel	96	44	28	866	123	29	21	7

Quelques points peuvent être soulignés :

- Tous les cours d'eau présentent une variation saisonnière importante (débit beaucoup plus forte pour la période de printemps que pour la période estivale).
- Pour la plupart des cours d'eau, les débits sur l'année 2000 sont plus importants que ceux observés sur la période interannuelle.
- Le Frémur représente le principal apport de la baie de la Fresnaye.
- L'Arguenon représente le principal apport sur les trois baies.
- Les débits issus des émissaires des stations d'épurations sont relativement constants tout au long de l'année et sont généralement faibles par rapport à ceux issus des cours d'eau, en particulier pour la période de printemps.

1.4. FLUX DE NITRATE

L'analyse des mesures de concentration en nitrate montre que celles-ci sont également assez variables au cours de l'année, avec des concentrations plus fortes en hiver et plus faibles en été. Le résultat de l'analyse est présenté dans le tableau ci-dessous :

	CONCENTRATIONS en mg/l							
	Baie de Lancieux			Baie de l'Arguenon	Baie de la Fresnaye			
	Frémur Lancieux	Drouet	Balay	Arguenon	Frémur Matignon	Rat	Clos	Kermiton
Printemps 2000	28	30	28	57	63	38	39	46
Été 2000	17	15	25	44	65	40	48	67
Printemps interannuel I	18	25	28	56	56	28	36	30
Été interannuel I	5	6	19	33	36	23	38	38

Quelques points peuvent être soulignés :

- Les différents cours d'eau s'écoulant vers la baie de Lancieux présentent en générale une variation saisonnière significative (concentration plus forte au printemps qu'en été).
- Les différents cours d'eau s'écoulant vers les autres baies présentent par contre des concentrations en nitrate relativement homogènes au cours de l'année.

L'analyse des flux est présentée dans le tableau suivant :

	FLUX EN Tonnes par jour									
	Baie de Lancieux				Baie de l'Arguenon	Baie de la Fresnaye				
	Frémur Lancieux	Drouet	Balay	Total Baie	Arguenon	Frémur Matignon	Rat	Clos	Kermiton	Total Baie
Printemps 2000	1,345	0,658	0,397	2,400	31,386	3,516	0,397	0,381	0,091	4,386
Été 2000	0,176	0,071	0,078	0,325	4,509	0,747	0,073	0,095	0,041	0,955
Printemps interannuel	0,737	0,467	0,339	1,542	24,840	2,927	0,344	0,314	0,091	3,676
Été interannuel	0,041	0,023	0,046	0,110	2,469	0,383	0,058	0,069	0,023	0,532

Il apparaît clairement que sur l'ensemble de la zone d'étude, les apports de nitrate sont essentiellement dus à l'Arguenon. Ainsi, les apports de l'Arguenon représentent sensiblement 4,5 fois les apports des deux autres baies réunies au printemps et 3,5 fois en été. A titre d'exemple, l'apport moyen de ce cours d'eau au cours de la période de printemps de l'année 2000 s'élève à 1,3 tonnes par heure.

Le Frémur Matignon représente le second apport significatif.

Compte tenu des concentrations en nitrates très faibles constatées sur les rejets de stations d'épuration, ceux-ci n'ont pas été pris en compte lors des simulations.

1.5. FLUX BACTERIOLOGIQUE

L'analyse des mesures de concentration en coliformes fécaux montre que celles-ci ne présentent pas de variations saisonnières significatives. Ces concentrations sont par contre très variables au cours des années successives.



Escherichia Coli

Le résultat de l'analyse est présenté dans le tableau ci-dessous :

		NOMBRE DE GERMES POUR 100 ml							
		Baie de Lancieux			Baie de l'Arguenon	Baie de la Fresnaye			
		Frémur Lancieux	Drouet	Balay	Arguenon	Frémur Matignon	Rat	Clos	Kermiton
E. COLI	Printemps 2000	88	2200	43200	591	3571	1837	7024	1558
	Eté 2000	136	2227	32189	997	1100	1497	2200	953
Coliformes fécaux	Printemps interannuel	80	6400	9300	1127	2787	2718	5430	893
	Eté interannuel	474	3711	130000	2168	8844	5760	3355	2338

Quelques points peuvent être soulignés :

- Le frémur Lancieux possède une très bonne qualité bactériologique et représente donc un apport minime sur la zone d'étude.
- Le Balay qui draine les effluents de la station d'épuration de Ploubalay est par contre d'une qualité très médiocre.

L'analyse des flux est présentée dans le tableau suivant :

		FLUX EN MILLIARD DE GERMES PAR JOUR									
		Baie de Lancieux				Baie de l'Arguenon	Baie de la Fresnaye				
		Frémur Lancieux	Drouet	Balay	Total Baie	Arguenon	Frémur Matignon	Rat	Clos	Kermiton	Total Baie
E. COLI	Printemps 2000	42	483	6121	6646	3254	1993	192	686	31	2902
	Eté 2000	14	106	1001	1121	1022	126	27	44	6	203
Coliformes fécaux	Printemps interannuel	33	1194	1125	2352	4999	1457	333	474	27	2291
	Eté interannuel	39	141	3145	3325	1622	940	144	61	14	1159

Ce tableau appelle certains commentaires :

- Le déséquilibre entre les baies n'est pas aussi marqué que pour les nitrates ;
- Excepté au printemps en interannuel, la baie de Lancieux présente les plus grands apports, approximativement la somme des deux autres baie ;
- Le Balay qui draine les effluents de la station d'épuration de Ploubalay constitue en moyenne l'apport le plus important sur la baie de Lancieux malgré le fait que son débit soit relativement faible ;
- En général, les flux issus des stations d'épuration sont là encore relativement modérés.

2. CRITERE D'ANALYSE : LE CONTEXTE DES USAGES DU MILIEU MARIN

Ce chapitre présente un rappel du contexte des usages du milieu marin qui nous servira de support pour l'analyse et la critique des résultats du modèle.

2.1. LES OBJECTIFS DE QUALITE DES EAUX

Les usages des eaux, basés sur des activités à la fois professionnelles et touristiques, sont importants dans l'ensemble des trois baies :

- L'activité baignade est très largement représentée en période estivale, le littoral présentant de nombreuses pointes rocheuses et des plages de sable fin alternées ;
- La conchyliculture est présente dans les baies de la Fresnaye et de l'Arguenon (huîtres, moules, ..) ;
- La pêche à pied sur le littoral se pratique "au bas de l'eau" : coques, palourdes, bigorneaux, couteaux, crabes, etc.

2.2. EAUX DE BAINNADE

Les normes bactériologiques pour les eaux de baignade ont été définies dans le décret du 19 décembre 1991 et la directive européenne du 8 décembre 1975.

Les valeurs de référence sont les suivantes :



Bactéries	Valeur guide	Valeur impérative
Coliformes totaux/100 ml	500	10000
Coliformes fécaux /100 ml	100	2000
Streptocoques fécaux /100 ml	100	-

Les classes de qualité annuelle sont les suivantes :

Classe A – Eaux de bonne qualité pour la baignade

- Au moins 80% des résultats en coliformes totaux et en coliformes fécaux sont inférieurs ou égaux aux valeurs guides ;
- Au moins 95% des résultats en coliformes totaux et en coliformes fécaux sont inférieurs ou égaux aux valeurs impératives ;
- Au moins 90% des résultats en streptocoques fécaux sont inférieurs ou égaux à la valeur guide.

Classe B – Eaux de qualité moyenne pour la baignade

- Au moins 95% des résultats en coliformes totaux et en coliformes fécaux sont inférieurs ou égaux aux valeurs impératives.

Classe C – Eaux pouvant être polluées momentanément

- Lorsque la fréquence de dépassement des valeurs impératives est comprise entre 5% et 33%, l'eau est considérée comme momentanément polluée.

Classe D – Eaux de mauvaise qualité

- Au moins l'une des valeurs impératives est dépassée sur plus de 33.3% des résultats de la saison.

2.3. ZONES CONCHYLICOLES

Les zones de production conchylicole sont classées en quatre catégories en fonction de leur niveau de contamination. Ce classement est défini par :

- La directive CEE n°91/492 du 15 juillet 1991
- Le décret n°94-340 du 28 avril 1994
- L'arrêté du 21 juillet 1995



Parc à huitres – St-Jacut

Les statuts des zones déterminent la destination des coquillages qui y sont récoltés. La contamination est évaluée au nombre de coliformes fécaux dans 100 ml de chair de coquillage ou de liquide inter-valvaire. La classification est la suivante :

		% des échantillons				
Contamination en CF/100 ml	0	300	1000	6000	60000	
ZONE A	90% minimum	10% maximum				
ZONE B	90% minimum			10% maximum		
ZONE C	90% minimum				10% maximum	
ZONE D	< 90%				> 10%	

Une classification équivalente est fournie pour les Escherichia Coli qui comprend un rabais systématique de 23,33% des seuils :

		% des échantillons				
Contamination en EC/100 ml	0	230	767	4600	46000	
ZONE A	90% minimum	10% maximum				
ZONE B	90% minimum			10% maximum		
ZONE C	90% minimum				10% maximum	
ZONE D	< 90%				> 10%	

Ces différentes zones entraînent les contraintes suivantes :

- Zone A : consommation directe
- Zone B : purification ou reparcage court
- Zone C : purification intensive ou reparcage minimum 2 mois
- Zone D : non exploitable

2.4. ZONES DE PECHE A PIED

Actuellement, en l'absence de critère de classement spécifique pour la pêche récréative, l'interprétation des résultats se réfère à l'arrêté ministériel du 2 juillet 1996 fixant les critères sanitaires auxquels doivent satisfaire les coquillages vivants destinés à la consommation humaine immédiate (< 300 coliformes fécaux pour 100 g de chair et liquide inter-valvaire).



Ces critères définissent donc seulement une classification à deux niveaux selon que les coquillages sont propres ou impropres à la consommation. Cependant, le seuil de 1000 coliformes fécaux définissant la Zone B pour les bivalves non fousseurs (voir paragraphe 2.3) est reprise par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique Française qui indique dans ce cas : " il est fortement conseillé de ne consommer les coquillages qu'après une cuisson suffisamment longue, seule garantie d'une diminution significative de la contamination microbiologique ".

Ce risque sanitaire peut être important pour certains sites et la pêche y est déconseillée le cas échéant. Au delà de ce seuil, correspondant aux zones C et D, la consommation de coquillages

provenant de la pêche à pied récréative doit être interdite. Cette classification, reprise par IFREMER dans [3] se résume dans le tableau suivant :

% des échantillons				
Contamination en CF/100 ml	0	300	1000	6000
ZONE A	90% minimum	10% maximum		
ZONE B	90% minimum			10% maximum
ZONE C-D	< 90%			> 10%

Ou bien pour les Escherichia Coli :

% des échantillons				
Contamination en EC/100 ml	0	230	767	4600
ZONE A	90% minimum	10% maximum		
ZONE B	90% minimum			10% maximum
ZONE C-D	< 90%			> 10%

3. TRANSPORT ET DISPERSION DES APPORTS – GENERALITES

3.1. INTRODUCTION : LA DISPERSION DES EFFLUENTS EN MER

Le phénomène de transport/dispersion des effluents en mer fait intervenir de nombreux processus : les phénomènes de convection, de diffusion turbulente et d'auto-épuration pour les polluants non conservatifs seront les principaux responsables du mélange des effluents avec le milieu ambiant.

Les masses d'eau contaminées vont se déplacer sous l'action des courants ambiants. La diffusion turbulente et la dispersion résultent d'une part des phénomènes tourbillonnaires et aléatoires qui prennent naissance dans la plupart des écoulements naturels à fortes irrégularités mais aussi, dans une moindre mesure, de la "convection différentielle". Ce dernier effet résulte des forces intenses de cisaillement qui apparaissent dans les écoulements à gradients de vitesse.

A la diffusion réelle due aux phénomènes hydrodynamiques, qui affecte seuls les polluants conservatifs tels que les nitrates au premier abord, s'ajoute pour les polluants non conservatifs tel que la pollution bactérienne une décroissance apparente due aux phénomènes divers englobés sous le terme d'auto-épuration.

Les mécanismes explicatifs de cette décroissance bactérienne sont assez mal connus. Les paramètres qui auraient le plus d'influence sur le pouvoir auto-épurateur des eaux sont la température et l'intensité lumineuse ainsi que la turbidité des eaux. D'autres facteurs jouent également un rôle direct ou indirect : le pH, les antagonismes entre organismes vivants, la présence de matière organique assimilable et de composés osmoprotecteurs, etc.

Une loi de décroissance des bactéries est souvent caractérisée par un temps désigné par T_{90} qui est le temps nécessaire pour une division par 10 du nombre de bactéries (soit une réduction de 90 %).

La loi de dégradation introduite dans le modèle mathématique est alors de la forme :

$$C = C_0 \exp\left(-2,3 \cdot \frac{t}{T_{90}}\right)$$

avec :

C : concentration à l'instant t (nb E. Coli/100 ml)
C₀ : concentration initiale (nb E. Coli/100 ml)
t : temps (en h)
T₉₀ : temps nécessaire pour une division par 10 du nombre de bactéries (en h)

La valeur du paramètre T_{90} a d'abord été évaluée d'après les expériences effectuées sur ce sujet par l'IFREMER (cf. Réf. [4], [5], [6]) et d'autres études effectuées par SOGREAH sur des

sites comparables notamment : Baie de La Rochelle (cf. Réf. [7]), Estuaire de Lorient (cf. Réf. [8]).

Nous avons retenu pour le cas de la côte d'Emeraude la valeur de 16h en été et de 60h en hiver.

3.2. MODELISATION MATHEMATIQUE DES EFFLUENTS : HYPOTHESES ET CONDITIONS UTILISEES

Le modèle mathématique qui sert de support à l'étude est présenté en annexe 1. Il s'agit d'un ensemble de modèles hydrodynamiques, sédimentologiques et de qualité des eaux qui a été construit et exploité pour l'étude de la baie de la Rance (réalisée pour le compte de l'association C.O.E.U.R.).

Nous proposons au lecteur de se rapporter à l'annexe 1 pour une vue d'ensemble de ce modèle, ses qualités et ses limites. Notamment, les données bathymétriques qui ont été levées dans le cadre de la présente étude sont présentées dans cette annexe.

3.2.1. CHAMPS DE COURANT

Les champs de courant que nous avons pris en compte correspondent à deux cycles de morte-eau/vive-eau. Le premier cycle, dit cycle faible, comprend une variation d'un cycle incluant une moyenne morte-eau et une moyenne vive-eau. Le deuxième, dit cycle fort, comprends une variation d'un cycle incluant une faible morte eau et une forte vive-eau.

Dans le cadre de cette étude, le premier cycle a été choisi sur la période du 10 mars 1999 au 25 mars 1999 pendant laquelle le coefficient de marée a varié de 30 à 112. Le second cycle concerne la période du 1^{er} décembre 1999 au 16 décembre 1999 pendant laquelle la coefficient de marée a évolué entre 49 et 79.

L'influence du vent n'a pas été prise en compte dans notre modèle. En effet, le transport de substances diluées sur la colonne d'eau est, sur la zone d'étude, régi de façon prépondérante par les courants de marée.

3.2.2. DEBITS ET FLUX DES RIVIERES, COURS D'EAU, REJETS

Les calculs ont été effectués pour les débits moyens et les débits de crue des quatre rivières principales et des différents cours d'eau et rejets répartis sur le pourtour de la baie. Les valeurs de ces débits, ainsi que celles des flux correspondants, ont été rappelées au § 1.1 précédent. Toutes les valeurs de débits et de flux sont supposées invariantes dans le temps au cours de chaque calcul.



BRUME SUR LE FREMUR, Huile de Françoise Bousquet

Nota :

Les flux bactériens sont les flux en Coliformes Fécaux. Les données sur les streptocoques fécaux, les coliformes totaux et la part des Escherichia Coli sont inconnues. Seuls ces flux ont donc été pris en compte.

3.2.3. FACTEUR DE CONCENTRATION DES BACTERIES PAR LES COQUILLAGES

Il existe un facteur de concentration entre les bactéries trouvées en eau de mer et celles trouvées dans la chair des coquillages. D'après différentes études de l'IFREMER (cf. Réf. [4]), ce facteur de concentration serait de l'ordre de 20 à 30.

Il est fait mention de la différence entre les coques qui sont enfouies dans le sédiment, d'une part, et les huîtres et les moules, d'autre part, qui bénéficient d'un élevage « surélevé ». Le facteur de concentration devrait donc être différent suivant ces types de coquillages. Il a été pris à 30 pour les coques et 25 pour les huîtres et les moules.

L'arrêté du 21 juillet 1995 considère le taux de contamination dans la chair de coquillage ou le liquide inter-valvaire. Les analyses faites dans l'eau devraient donc tenir compte de ce facteur de concentration. La modélisation permet d'accéder à l'information du nombre de germes par 100ml d'eau. Pour pouvoir effectuer l'analyse des résultats du modèle nous devons de même tenir compte de ce facteur de concentration. Le tableau de classification est donc adapté au besoin de l'analyse.

4. TRANSPORT ET DISPERSION DES NITRATES

4.1. INTRODUCTION

Les nitrates rejetés en mer sont transportés par les écoulements. La modélisation mathématique a pour objectif d'appréhender :

- l'étendue des panaches et leurs concentrations
- les lieux préférentiels d'accumulation des nitrates
- les échanges entre les baies



Epandage en Bretagne

La modélisation permet d'étudier les panaches de nitrates de chaque baie en fonction de différents facteurs : l'hydrodynamique, la période de l'année, la quantité rejetée (moyenne interannuels ou année de référence). En tout, 8 scénarios sont étudiés :

- Deux conditions hydrodynamiques : cycle de faible variation de morte-eau/vive-eau et cycle de forte variation de morte-eau/vive-eau ;
- Deux périodes annuelles : printemps et été ;
- Deux types de rejets : la valeur moyenne interannuelle et la valeur exceptionnelle de l'année 2000 (voir chapitre 1).

Sur chacun de ces scénarios, les panaches des trois baies sont étudiés indépendamment, ainsi que leur cumul sur l'ensemble des baies, soit 32 cas étudiés.

Pour chaque cas étudié, deux graphiques sont présentés pour support à l'analyse :

- Le maximum au cours du cycle hydraulique étudié (15 jours) de la concentration en nitrate mesurée,
- La moyenne au cours du cycle hydraulique étudié (15 jours) de la concentration en nitrate mesurée.

Ce dernier type de figure trouve sa justification dans l'analyse des évolutions temporelles ponctuelles (voir figures 4.1, 4.10 et 4.19). Celles-ci mettent en évidence la difficulté de quantifier l'impact des rejets uniquement par la valeur maximale observable au cours d'une période de 15 jours. En effet, une concentration donnée peut apparaître en un site pendant un temps plus ou moins court et n'être ainsi pas représentative des concentrations observables. Nous présentons donc en complément de l'analyse, la valeur moyenne de la concentration en nitrate sur l'ensemble du cycle hydraulique (auquel nous ôtons les 3 premiers jours pour des raisons de mise en régime des calculs). Ainsi, l'analyse comparative des cartes de

concentrations maximales et des concentrations moyennes permet de distinguer les lieux soumis à une pollution constante des lieux de pollution récurrente mais courte en temps, donc présentant probablement moins de risque de développement des ulves.

Remarque : *Pour certains de ces scénarios, une animation du panache a été réalisée et présentée au cours des réunions de restitution des résultats de l'étude. La dynamique même de l'extension des panaches est un élément de support à l'analyse intégré dans la présente étude.*

L'ensemble des figures est présenté en annexe. Leur analyse est effectuée selon un schéma identique :

1. Tout d'abord une analyse est faite baie par baie, d'ouest en est suivie de l'analyse du panache global,
2. Pour chaque baie, il est présenté en premier lieu l'étude des rejets moyens interannuels puis ceux exceptionnels de 2000,
3. Pour chaque rejet, la situation de printemps est abordée, suivie de celle d'été,
4. Pour chaque saison, nous présentons l'influence de l'hydrodynamique : d'abord le cas de la faible variation du cycle morte-eau/vive-eau, suivi du cas de la forte variation du cycle morte-eau/vive-eau,
5. Enfin, la valeur maximale et la valeur moyenne de la concentration du panache sont présentées comparativement sur la même page.

A ces 32 figures, trois figures spécifiques ont été ajoutées de manière à présenter l'évolution temporelle en quelques points pour chacune des baies sur un cas particulier hydrodynamique : faible variation du cycle morte-eau/vive-eau, période annuelle du printemps, valeur interannuelle des rejets.

4.2. BAIE DE LA FRESNAYE

Les concentrations relevées en continue pendant quinze jours sur cinq points de la baie (Figure 3.1) font nettement apparaître les effets du flot et du jusant de la marée : Au flot le renouvellement des eaux induit une forte diminution des concentrations en nitrates tandis qu'au jusant, les rejets des rivières sont transportés vers le large. Par contre, les effets du cycle morte-eau/vive-eau ne sont pas bien marqués, excepté pour le point situé en mer. A titre indicatif, le niveau de la mer est présenté en référence au point N.

Cette variabilité au cours du cycle de la marée fait apparaître essentiellement deux plages de valeurs. La valeur basse, proche de zéro, au moment du flot et la valeur haute, plutôt stable pendant plusieurs heures sur l'ensemble des jusants démontrant un bon renouvellement des eaux à chaque marée. Une exception cependant pour les rejets du Clos et de Kermiton (point 5) où, en morte-eau, la variation de la concentration au cours du cycle de marée reste faible, la concentration ne s'annulant pas au maximum du flot.

Cette différence trouve sa signification en partie par une tendance à la concentration des flux par la marée du côté est de la baie (figures 4.2 à 4.9).

Ainsi, dans l'ensemble des cas étudiés, le littoral de la Pointe de la Latte jusqu'à la Pointe de Château Serein est protégé des flux de nitrates.

4.2.1. REJETS INTERANNUELS (FIGURES 4.2 A 4.5)

Les différences entre les cycles hydrodynamiques sont peu marquées.

Les différences entre les saisons sont nettes pour les maximums de concentrations observables dans la baie mais peu marquées en ce qui concerne la pollution diffuse représentée par les concentrations en nitrates inférieures à 10 mg/l.

Les valeurs moyennes sont bien évidemment inférieures systématiquement aux valeurs de pics. Néanmoins, nous pouvons observer que le littoral nord-est de la baie, à partir des plages de la Fresnaye (Sud pointe du Chatelet) est peu soumis au flux de nitrate moyen. Seuls des événements épisodiques vont toucher ce secteur. De même, les valeurs moyennes montrent clairement que les flux émis vers la baie de l'Arguenon au niveau de Saint-Cast restent épisodiques.

Par opposition, les valeurs moyennes font apparaître clairement la pollution constante mais importante à laquelle est soumis le fond de baie bien sûr mais aussi le Port de Saint-Jean entre la Pointe de Saint-Efficace et la Plage de la Fosse.

4.2.2. REJETS ANNEE 2000 (FIGURES 4.6 A 4.9)

A l'exception du fait que les concentrations rejetées dans la baie sont nettement plus importantes, certaines analyses du comportement des pollutions par les nitrates dans la baie pour les rejets interannuels restent globalement valables :

- Les différences entre les cycles hydrodynamiques sont peu marquées,
- Les différences entre les saisons sont peu marquées en ce qui concerne la pollution diffuse représentée par les concentrations en nitrates inférieures à 10 mg/l.

D'autres éléments apparaissent cependant :

- Les différences entre les saisons sont faibles même pour les maximums de concentrations,
- L'ensemble du littoral est de la baie est soumis à une pollution plus importante que pour le cas des rejets interannuels. En particulier le nord-est de la baie est à son tour nettement touché jusqu'à la pointe de Saint-Cast en été.

Néanmoins, cette pollution du nord-est de la baie reste épisodique au nord de la Pointe du Chatelet comme le montre la comparaison entre les valeurs moyennes et les pics observables.

4.2.3. SYNTHESE

De cette analyse, nous pouvons conclure les points suivants pour la Baie de la Fresnaye :

- Le fond de la baie et la côte est sont sensiblement soumis au flux de nitrate depuis Port Nieux jusqu'à la pointe du Chatelet,
- Des flux épisodiques mais pouvant être répétitifs, surtout en vive-eau, peuvent toucher le littoral à l'ouest jusqu'à la Pointe de Château Serein et la pointe de Saint-Cast à l'est,
- Le secteur nord-ouest de la baie est protégé depuis la pointe de Château Serein,

- Les secteurs les plus touchés sont le fond de baie et le Port de Saint-Jean entre la Pointe de Saint-Efficace et la Plage de la Fosse,
- Les échanges vers la baie de l'Arguenon, via la pointe de Saint-Cast, restent très limités à des événements sporadiques pour l'année 2000 et quasiment inexistantes en interannuel.

4.3. BAIE DE L'ARGUENON

Si la concentration en nitrates de l'Arguenon n'est pas fortement supérieure à celle des autres cours d'eau, la quantité totale rejetée est nettement plus importante. Par conséquent, la taille du panache est plus importante que dans les autres baies et s'étend donc davantage vers le large.

Une autre conséquence est que le fond de la baie est ainsi soumis constamment au flux de la rivière et les eaux ne sont jamais réellement renouvelées sous l'effet des marées comme le montrent les concentrations relevées en continu pendant quinze jours sur cinq points de la baie (Figure 4.10, points 1 et 2). Ainsi, par opposition à la baie de la Fresnaye, le renouvellement induit par le flot est donc limité et, sur l'ensemble des jusants, les pics de concentrations en nitrates s'établissent pendant une période plus longue.

Les effets du cycle morte-eau/vive-eau ont une influence importante sur le renouvellement des eaux du fond de la baie. Même si le renouvellement n'est jamais total, les conditions de vive-eau améliorent sensiblement la situation (point 1).

4.3.1. REJETS INTERANNUELS (FIGURES 4.11 A 4.14)

La différence principale entre les cycles hydrodynamiques est une extension légèrement plus importante du panache mais aussi des concentrations maximales observables vers la baie de Lancieux.

Les différences entre les saisons sont très nettes pour les maximums de concentrations dans la baie mais aussi en ce qui concerne la pollution diffuse représentée par les concentrations en nitrate inférieures à 10 mg/l.

Les valeurs moyennes sont bien évidemment inférieures systématiquement aux valeurs de pics. Mais le fait le plus important est que les effets de l'hydrodynamique sont gommés. Ainsi on n'observe quasiment pas de modification de l'extension du panache moyen entre les deux cycles de marées étudiés. De plus, les valeurs moyennes montrent que les flux moyens vers les autres baies sont presque nuls. Il s'agit donc d'événements ponctuels comme le démontrent bien les animations.

La plus grande partie de la baie de l'Arguenon est donc touchée par les nitrates depuis la Pointe de Tiqueras jusqu'à la pointe du Chevet en passant par le Guildo (fond de la baie) et par Saint-Jacut. Le secteur de Saint-Cast jusqu'à la pointe du Bay est celui le plus protégé de la baie. La zone située entre la pointe du Bay et la Pointe de Tiqueras est touchée exclusivement au printemps.

Le secteur des Ebihens subit lui aussi le panache de nitrates de l'Arguenon. Les flux ne transitent pas vers l'est par le sud (entre l'île des Ebihens et la pointe du Chevet), mais principalement par le nord des Ebihens, en les contournant pour revenir dans la baie de Lancieux. Le panache peut alors se retrouver loin dans la baie et vers Saint-Briac mais avec des concentrations relativement faibles (inférieures à 10 voir 5 mg/l) et de manière transitoire.

4.3.2. REJETS ANNEE 2000 (FIGURES 4.15 A 4.18)

La situation de 2000 n'apparaît pas fondamentalement différente au printemps par rapport à la situation interannuel. En été par contre l'extension du panache est plus importante, proche de la situation de printemps. La baie de Lancieux est ainsi soumise toute l'année au flux de nitrates en provenance de l'Arguenon.

4.3.3. SYNTHESE

De cette analyse, nous pouvons conclure les points suivants pour la Baie de l'Arguenon :

- La forte pollution en nitrates à laquelle est soumise la baie touche la quasi-totalité de la baie ;
- La marée n'arrive pas à elle seule à jouer totalement son rôle épurateur au cours de son cycle surtout en fond de baie ;
- Seul le secteur de Saint-Cast jusqu'à la pointe du Bay est réellement protégé au cours de l'année ;
- Les Ebihens et, dans une moindre mesure, la baie de Lancieux sont soumis à chaque marée au flux de l'Arguenon, surtout au printemps ou dans la situation exceptionnelle de l'été 2000.

4.4. BAIE DE LANCIEUX

Notre analyse portera dans ce chapitre sur la baie de Lancieux elle-même mais aussi l'embouchure du Frémur/ Saint-Briac.

Les quantités de nitrates rejetées à la fois en baie de Lancieux et par le Frémur sont plus faibles comparativement aux autres baies. Les conséquences s'observent alors directement sur l'extension du panache, mais aussi sur le renouvellement des eaux par la marée (figure 4.19) :

Les plages temporelles de renouvellement de l'eau où la concentration de nitrates est nulle (ou quasi-nulle) sont importantes, même en fond de baie et en morte-eau. En conséquence, les valeurs pics sont atteintes pendant moins longtemps. Ainsi, la différence entre les valeurs pics et les valeurs moyennes est plus nette que dans les autres baies.

4.4.1. REJETS INTERANNUELS (FIGURES 4.20 A 4.23)

La différence entre les cycles hydrodynamiques est quasiment inexistante.

Les différences entre les saisons sont nettes pour les maximums de concentrations dans la baie. La situation estivale présente un panache limité dans ces concentrations moyennes proche de l'embouchure des rivières, excepté sur le secteur de Ploubalay.

D'autre part, la partie maritime (côtes marines inférieures au zéro hydrographique) n'est quasiment pas touchée par les flux de la baie.

L'ensemble du littoral ouest de la baie de Lancieux est protégé. Le littoral ouest entre l'embouchure du Drouet et le terre Corieu (sud de la plage des Briantais) est soumis au flux de

nitrites mais dans des concentrations en moyenne plus faibles que 10 mg/l excepté à l'embouchure du Balay.

Au nord, le secteur de Lancieux est lui aussi protégé.

Le Frémur induit par contre des concentrations en nitrites relativement importantes au printemps à son embouchure, de Saint-Briac jusqu'à l'île du Perron au nord.

4.4.2. REJETS ANNEE 2000 (FIGURES 4.24 A 4.27)

La situation de 2000 présente effectivement des flux de nitrites plus importants et donc une situation plus dégradée qu'en situation interannuelle.

Notamment les panaches s'étendent jusqu'à la mer et le secteur de Saint-Jacut est partiellement touché (plage de la Manchette, ...). Néanmoins, sur ces secteurs, il s'agit plus d'une pollution diffuse et les fortes concentrations sont cantonnées dans les mêmes secteurs qu'en situation interannuelle.

Le panache du Frémur n'est pas sensiblement modifié en emprise mais les concentrations sont effectivement plus importantes autour de Saint-Briac.

4.4.3. SYNTHESE

De cette analyse, nous pouvons conclure les points suivants pour la Baie de Lancieux :

- La baie présente les plus faibles flux de nitrites du secteur ;
- En conséquence, elle présente le meilleur taux de renouvellement de ses eaux au moment du flot, ceci même en fond de baie et même en morte-eau ;
- Le littoral ouest de la baie au niveau de Ploubalay est le seul secteur avec Saint-Briac à être sous l'influence des flux de nitrites de façon sensible.

4.5. ANALYSE COMPARATIVE – ENSEMBLE DES BAIES

L'ensemble des résultats sur les trois baies est réuni afin de quantifier la concentration totale en nitrites sur l'ensemble du secteur d'étude. Cette analyse fait l'objet des figures 4.28 à 4.35.

4.5.1. REJETS INTERANNUELS

Dans l'ensemble des cas étudiés, les panaches de chacune des baies sont suffisamment distincts des autres pour que leurs interactions restent faibles. Les conclusions globales pour chacune des baies restent donc valables. Néanmoins il convient d'apporter un complément d'analyse en ce qui concerne la baie de Lancieux :

Nous avons montré au chapitre 3.3 que certains panaches interagissaient sur les autres baies de manière épisodique et notamment celui de l'Arguenon dans la baie de Lancieux. Ces panaches n'interagissent pas réellement entre eux mais on observe une tendance à l'augmentation de la pollution diffuse dans les baies surtout au printemps :

- Sous l'influence du panache de l'Arguenon, les panaches de la baie de Lancieux et du Frémur sont joints par des concentrations d'environ 5 mg/l qui touchent le secteur de la ville de Lancieux,
- La côte ouest de la baie de Lancieux est globalement soumise à une pollution diffuse d'environ 5 mg/l sous l'influence du panache de l'Arguenon,
- Le secteur de Saint-Cast voit apparaître des concentrations maximales augmentées en cycle de forte variation de morte-eau/vive-eau issues de la jonction des panaches de la baie de l'Arguenon et de la baie de la Fresnaye (concentrations de l'ordre de 5mg/l).

4.5.2. REJETS DE 2000

Les conclusions des rejets interannuels sont directement transposables sur la situation de 2000 mais avec des niveaux de pollutions diffuses légèrement plus importants.

4.6. SYNTHÈSE SUR LE PANACHE DES REJETS DE NITRATES

Cette étude du transport des rejets de nitrates permet d'avancer les conclusions suivantes :

- La baie de l'Arguenon est la baie présentant les concentrations les plus importantes. La baie de la Fresnaye présente aussi des concentrations significatives surtout au printemps ;
- Le renouvellement des eaux par le flot est efficace pour l'ensemble des baies sauf pour celle de l'Arguenon. Ceci est essentiellement induit par la quantité de nitrates rejetés en mer dans cette baie plutôt que par un effet hydrodynamique spécifique ;
- Les interactions entre les baies sont faibles. Elles sont d'ordre sporadique, d'ouest en est et principalement pendant la saison de printemps. Ainsi le panache de la Fresnaye atteint la zone de la baie de l'Arguenon sur le secteur de Saint-Cast et le panache de l'Arguenon induit une pollution diffuse sur l'ensemble de la baie de Lancieux ;
- La situation de l'année exceptionnelle en terme de débit que représente l'année 2000 n'induit pas de phénomène spécifique. Les panaches des baies sont semblables et si les taux de concentrations sont plus importants, ils restent du même ordre de grandeur. La situation estivale est cependant plus proche de la situation printanière interannuelle et certaines côtes non touchées normalement en été sont soumises à un flux constant pendant les deux saisons.

5. DISPERSION DES EC

5.1. INTRODUCTION

Les coliformes fécaux rejetés en mer par les cours d'eaux ou par les stations d'épuration sont transportés par les écoulements mais, comme nous l'avons dit au chapitre 2, les effets d'auto-épuration jouent un rôle modérateur. La modélisation mathématique a pour objectif d'appréhender :

- l'étendue des panaches et leurs concentrations
- les lieux préférentiels d'accumulation des coliformes
- les échanges entre les baies

Comme pour l'analyse du transport des nitrates, la modélisation permet d'étudier les panaches de coliformes de chaque baie en fonction de différents facteurs : l'hydrodynamique, la période de l'année, la quantité rejetée (moyenne interannuelle ou année de référence). Les mêmes scénarios que pour l'étude des nitrates sont étudiés :

- Deux conditions hydrodynamiques : cycle de faible variation de morte-eau/vive-eau et cycle de forte variation de morte-eau/vive-eau ;
- Deux périodes annuelles : printemps et été avec leur taux d'épuration spécifiques;
- Deux types de rejets : la valeur moyenne interannuelle et la valeur exceptionnelle de l'année 2000 (voir chapitre 1).

Sur chacun de ces scénarios, les panaches des trois baies sont étudiés indépendamment, ainsi que leur cumul sur l'ensemble des baies, soit 32 cas étudiés. Pour chaque cas étudié, le maximum au cours du cycle hydrodynamique étudié (15 jours) de la concentration en coliformes mesurée sur l'ensemble des baies est présenté. L'étude baie par baie n'est pas reconduite ici car les panaches sont plus petits que pour les flux de nitrates et n'apporteraient donc pas d'élément complémentaire à l'analyse.

La valeur moyenne de la concentration en coliformes ne représente pas un critère déterminant pour l'analyse. Par contre, l'analyse en critères de qualité d'eau pour la baignades ou pour les zones conchylicoles présentent un intérêt important. Cette analyse est rendue possible par la modélisation mathématique de manière simple : En chaque point du modèle, nous disposons de l'enregistrement sur 15 jours de la concentrations en coliformes. Il est donc possible de déterminer le temps de résidence de chacun des seuils de concentrations mentionnés par la législation (voir chapitre 1). Par exemple, si les nombres impératifs (2000 pour les coliformes fécaux) sont dépassés plus de un tiers du temps, la zone est classée D pour la baignade.



Escherichia Coli

L'analyse des résultats du modèle permet de proposer pour chacun des 8 scénarios étudiés, deux cartes de zonage. La première correspond au classement des eaux de baignades, la seconde correspond au classement des eaux conchylicoles.

Classement eaux de baignade

Couleur dans les graphiques	Equivalence de la classe	Rappel des critères définissant la classe pour les coliformes fécaux
Bleu	A – Eaux de bonne qualité	Au moins 80% du temps, la concentration en coliformes fécaux est inférieure au nombre guide (valeur 100 germes / 100ml) Au moins 95% du temps, la concentration en coliformes fécaux est inférieure au nombre impératif (valeur 2000 germes / 100ml)
vert	B - Eaux de qualité moyenne	95% du temps, la concentration en coliformes fécaux est inférieure au nombre impératif (valeur 2000 germes / 100ml)
jaune	C - Eaux pouvant être momentanément polluées	Pas plus de 33% de dépassement du nombre impératif pour la concentration en coliformes fécaux.
orange	D - Eaus de mauvaise qualité	Dépassement de plus de 33% du nombre impératif pour la concentration en coliformes fécaux.

Classement des eaux conchylicoles

Couleur dans les graphiques	Equivalence de la classe	Critère définissant la classe pour les coliformes fécaux
bleu	Zone A	Au moins 90% du temps, la concentration en coliformes fécaux est inférieure au premier nombre guide (valeur 10 germes / 100ml). Aucun dépassement de la valeur du second nombre guide (valeur 33 germes / 100ml)
vert	Zone B	Au moins 90% du temps, la concentration en coliformes fécaux est inférieure au second nombre guide (valeur 33 germes / 100ml). Aucun dépassement du nombre impératif (valeur 2000 germes / 100ml)
jaune	Zone C	Au moins 90% du temps, la concentration en coliformes fécaux est inférieure au nombre impératif ((valeur 2000 germes / 100ml)
orange	Zone D	Dépassement de plus de 10% du nombre impératifs pour la concentration en coliformes fécaux.

Ces tableaux s'appliquent de même en ce qui concerne les Escherichia Coli avec une réduction des seuils de 23,33%

Le classement des zones de pêche à pied se déduit aisément du classement des zones conchylicoles en unifiant les zones C et D, c'est à dire les couleurs jaune et orange sous la bannière de la couleur orange, ce qui signifie que la pêche est à interdire.

Remarque : il convient de remarquer que ce zonage n'est pas totalement représentatif des zonages qui sont obtenus par prélèvement sur site et ce, pour plusieurs raisons :

- Les classements impliquent d'autres critères qui ne sont pas pris en compte, notamment sur les coliformes totaux et sur les streptocoques fécaux ;
- Les deux situations hydrodynamiques considérées ne couvrent pas entièrement toutes les situations observables au cours de l'année, notamment par rapport à l'influence des vents ;
- Notre analyse ne fait aucune hypothèse sur le moment du prélèvement (par exemple exclusivement à marée haute). Si ceux-ci sont effectués de manière privilégiée à un moment de la marée, les résultats peuvent s'en trouver fortement modifiés.

L'ensemble des figures est présenté en annexe. Elles portent les numéros 5.1 à 5.19.

Remarque : *Pour certains de ces scénarios, une animation du panache a été réalisée et présentée au cours des réunions de restitution des résultats de l'étude. La dynamique même de l'extension des panaches est un élément de support à l'analyse, intégré dans la présente étude.*

5.2. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DANS LES DIFFERENTES BAIES

Les évolutions de la concentration en coliformes en fonction du temps sur les trois baies sont présentées pour le scénario :

- Cycle de faible variation de morte-eau/vive-eau
- Rejets interannuels
- Situation de printemps

5.2.1. BAIE DE LA FRESNAYE

La figure 5.1 présente l'évolution de la concentration en coliformes en fonction du temps sur la baie de la Fresnaye. On observe à l'évidence une grande analogie avec le développement du panache de nitrates (figure 4.1) :

Le renouvellement des eaux de la baie est quasi-total même en morte-eau au moment du flot, excepté pour les rejets du Clos et de Kermiton (point 5) où, en morte-eau, la variation de la concentration au cours du cycle de marée reste faible, la concentration ne s'annulant pas au maximum du flot.

A titre indicatif, le niveau de la mer est présenté en référence au point N.

5.2.2. BAIE DE L'ARGUENON

La figure 5.2 présente l'évolution de la concentration en coliformes en fonction du temps sur la baie de la Fresnaye. Là encore, une bonne analogie est observée avec le développement du panache de nitrates sur cette baie (figure 4.10). Néanmoins certaines différences sont observables :

- Le taux de renouvellement des eaux est sensiblement meilleur en fond de baie. Ainsi le point 2 situé près Saint-Jaguel montre que les eaux sont totalement renouvelées au flot même en morte eau ce qui n'est pas le cas pour les nitrates.
- On remarque d'autre part que le panache s'étend en mer avec moins d'intensité puisqu'au point 5, les concentrations en coliformes sont très faibles.

A titre indicatif, le niveau de la mer est présenté en référence au point 5.

5.2.3. BAIE DE LANCIEUX

La figure 5.3 présente l'évolution de la concentration en coliformes en fonction du temps sur la baie de la Lancieux. Une bonne analogie avec le développement du panache de nitrates sur cette baie est mise en évidence (figure 4.10) :

- Les formes des courbes de relevés des concentrations sont semblables en chaque point,
- L'influence du cycle morte-eau/vive-eau est nettement observable,
- Les pics de concentration en fond de baie sont cependant plus marqués (point 1),

A titre indicatif, le niveau de la mer est présenté en référence au point 5.

5.3. EXTENSION MAXIMALE DU PANACHE DE COLIFORMES

Les cartes d'extension maximale de la concentration en coliformes est présentée pour l'ensemble des 8 scénarios sur les figures 5.4 à 5.11.

5.3.1. SITUATION INTERANNUELLE

La situation des panaches est sensiblement différente de l'analyse des panaches des nitrates, notamment parce que le panache de la baie de Lancieux joue un rôle plus important :

Influence de la saison

A l'inverse des nitrates, la saison estivale présente généralement des concentrations plus importantes en coliformes dans les baies du fait aussi d'un débit des rivières plus faible. Ainsi, au total, la quantité de coliformes rejetée est plus importante au printemps qu'en été et l'extension des panaches est par conséquent plus grande qu'en été, mais les concentrations les plus fortes sont observées dans les baies en été.

L'influence de la saison se fait sentir d'autre part par un effet d'auto-épuration meilleur en été qu'au printemps. Ceci a pour conséquence d'améliorer la situation au large ou en bord de baie mais pas en fond de baie et près des rejets.

La conséquence de la diminution de l'extension des panaches en été est d'autre part que les échanges entre baies sont plus faibles en été qu'au printemps, voir quasi-inexistantes. La situation de printemps présente des échanges semblables à ceux observées pour les panaches des nitrates mais somme toutes plus faibles du fait des effets d'auto-épuration : le temps par exemple que le panache de l'Arguenon rentre dans la baie de Lancieux est tel que les effets d'auto-épuration se font nettement sentir.

Influence des conditions hydrodynamiques

Comme pour l'analyse des panaches de nitrates, le rôle de l'intensité du cycle morte-eau/vive-eau n'apparaît pas fondamental. Il joue essentiellement un rôle sur l'extension de la pollution que nous nommerons *diffuse*, correspondant à de faibles concentrations en coliformes inférieurs à 100 germes / 100ml.

5.3.2. SITUATION ANNEE 2000

Les rejets de l'Arguenon sont plus faibles qu'en situation interannuelle. A contrario, les concentrations rejetées en baie de Lancieux sont beaucoup plus importantes. Le déséquilibre entre les baies est flagrant.

D'autre part, les concentrations en EC sont particulièrement importantes en printemps, plus qu'en été à l'opposition de la situation interannuelle.

Influence de la saison

Au total, la quantité de EC rejetée est nettement plus importante au printemps qu'en été (dans un rapport de plus de 5). L'extension des panaches est par conséquent plus grande au printemps qu'en été, d'autant plus que les effets auto-épurateurs sont moins importants au printemps.

Là encore les échanges entre baies sont plus faibles en été qu'au printemps, voir quasi-inexistants. La situation de printemps présente des échanges semblables à ceux observés en situation interannuelle. Elle concerne exclusivement la pollution diffuse (concentrations inférieures à 100 germes / 100ml). Néanmoins, cette pollution porte beaucoup plus loin le long du littoral.

Influence des conditions hydrodynamiques

Comme pour l'analyse des panaches de nitrates, le rôle de l'intensité du cycle morte-eau/vive-eau n'apparaît pas fondamental. Il joue essentiellement sur l'extension de la pollution diffuse, (concentrations en EC inférieures à 100 germes / 100ml). Au printemps, l'extension de cette pollution diffuse s'étend ainsi encore plus le long du littoral par exemple jusqu'à Saint-Lunaire à l'est.

5.4. ANALYSE STATISTIQUES DES PANACHES – CRITERES DE CLASSEMENT DE LA QUALITE DE BAIGNADE

Le classement de chaque baie selon le critère de qualité des zones de baignades a été réalisé sur le modèle mathématique pour chacun des 8 scénarios. Il est présenté sur les figures 5.12 à 5.15.

5.4.1. SITUATION INTERANNUELLE

Le déséquilibre entre les baies observé au regard des panaches maximaux de coliformes (voir chapitre 4.3.1) est relativisé par la présente analyse. Ainsi la baie de Lancieux présente une situation moins défavorable que ne le laisse supposer la première analyse. Certaines zones apparaissent effectivement en C et D, mais il s'agit directement du panache des rivières, en fond de baie. A l'opposé, la baie de l'Arguenon présente une situation moins contrastée (zonage essentiellement en B) mais l'extension du panache est plus importante et s'approche plus souvent du littoral.

Influence des conditions hydrodynamiques

L'influence de l'hydrodynamique se situe essentiellement au niveau de l'extension des zones et principalement la zone B. En situation estivale cependant, l'accroissement du brassage des eaux en baie de Lancieux a pour conséquence d'augmenter sensiblement la zone C (ainsi que D) induite par le Balay et de la rapprocher de la côte, au niveau de La Mettrie.

Influence de la saison

L'analyse du zonage selon les critères de qualité de baignade conforte l'analyse de l'extension maximale du panache : l'été présente un caractère moins défavorable que le printemps. Cette situation est particulièrement nette en baie de la Fresnaye où une bonne partie du littoral qui serait classé en B au printemps serait classé en A en été.

5.4.2. SITUATION ANNEE 2000

La situation de l'année 2000 ne présente pas un caractère exceptionnel par rapport à la situation interannuelle excepté en baie de Lancieux. En effet, au printemps, les quantités rejetées par le Balay ont induit une classification en zone C ou D d'une grande partie de la baie et particulièrement la côte est. Au contraire, la situation estivale a été privilégiée par rapport à la moyenne interannuelle sur cette saison, même en baie de Lancieux.

5.4.3. SYNTHESE

Il ressort de cette analyse, un certain nombre de points remarquables :

- Le printemps est une saison plus défavorable que l'été,
- L'année 2000 n'a pas présenté un caractère exceptionnel par rapport à la situation interannuelle sauf en baie de Lancieux,
- Les zones qui ne sont pas classées A sont totalement déconnectées entre les baies,

- Les classements C et D concerne le panache direct des rivières, proche de leur embouchure et donc en fond de baie,
- La plus grande partie du littoral est classée en zone A,
- Le littoral qui serait classé en zone B est :
 - Baie de la Fresnaye : En été, le fond de la baie entre Port à la Duc et les Sablons ainsi que le secteur de Port Saint-Jean ; au printemps le littoral sud et est de la baie de la Pointe du Muret jusqu'au Grouin de la Fosse.
 - Baie de l'Arguenon : la côte située entre la Queurie à l'ouest de la baie et Saint-Jaguel est classée en B toute l'année ; au printemps, le classement en zone B peut atteindre le Rocher Plat à l'ouest et concerner la pointe de Tiqueras mais sans que la plage de Quatre Vaux soit concernée.
 - Baie de Lancieux : La côte entre l'embouchure du Drouet et le tertre de Corieu au printemps.

Nota :

Une remarque importante à émettre est que le moment de prélèvement en bord de plage est un critère dominant de l'analyse. En effet, les panaches de coliformes longent les plages plutôt au jusant quand la mer s'est partiellement retirée du littoral. Ainsi, en terme de cartographie, la côte telle que définie par les plus hautes-eaux pourrait être classée en zone A, mais l'eau prélevée au bord de plage quand l'eau se retire soit à 100m (voire moins) du littoral même pourrait être classée en B.

5.5. ANALYSE STATISTIQUES DES PANACHES – CRITERES DE CLASSEMENT DE LA QUALITE DES ZONES CONCHYLICOLES

Le classement de chaque baie selon le critère de qualité des zones conchylicoles a été réalisé sur le modèle mathématique pour chacun des 8 scénarios. Il est présenté sur les figures 5.16 à 5.19.

5.5.1. SITUATION INTERANNUELLE

La situation eue égard aux zones conchylicoles est plus défavorable que pour les zones de baignades. Ceci s'explique en grande partie par le facteur de concentration dans les coquillages qui modifie sensiblement les seuils même d'analyse de la qualité de l'eau.

Influence des conditions hydrodynamiques

L'influence de l'hydrodynamique semble particulièrement faible. Elle augmente légèrement l'extension de la zone B mais de manière non significative.

Influence de la saison

Là encore, l'été présente un caractère moins défavorable que le printemps. Néanmoins cette situation est déjà suffisamment dégradée en été pour que la variation inter-saisonnière semble moins marquée que dans le cas du classement des zones de baignades.

L'influence des saisons se fait essentiellement sentir en baie de la Fresnaye, La zone C touchant le littoral est beaucoup plus importante qu'en été.

5.5.2. SITUATION ANNEE 2000

Là encore, la situation de l'année 2000 présente un caractère globalement aggravé par rapport à la situation interannuelle mais pas de façon exceptionnelle, excepté en baie de Lancieux au printemps. Ainsi, au printemps, les quantités d'EC rejetées par le Balay ont induit une classification en zone D de la côte est de la baie et une extension de la zone C dans toute la baie, touchant même les Ebihens. Au contraire, la situation estivale a été moins contraignante par rapport à la moyenne interannuelle même en baie de Lancieux.

5.5.3. SYNTHESE

Il ressort de cette analyse, un certain nombre de points remarquables :

- La variation saisonnière n'est pas fortement marquée ;
- L'année 2000 n'a pas présenté un caractère exceptionnel par rapport à la situation interannuelle sauf partiellement en baie de Lancieux ;
- Les classements D concerne principalement le panache direct des rivières, proche de leur embouchure et donc en fond de baie sauf en baie de Lancieux ;
- La plus grande partie des trois baies est classée en zone B voir C. L'extension de la zone C est particulièrement intense au printemps ;
- En ce qui concerne les zones conchylicoles mêmes, il convient de noter qu'elles ne sont pas classées uniformément dans la même catégorie :
 - Baie de la Fresnaye : En été, elles sont classées en zone B ; au printemps, les parties centrale et est sont classées en zone C, la partie ouest est classée partiellement en zone B.
 - Baie de l'Arguenon : En toute saison, les parties centrale et est contre la Grande Roche sont classées en zone C. La partie ouest est plus protégée, avec un classement en zone B voir A près de la côte, même au printemps.
 - Baie de Lancieux : la baie de Lancieux est plus concernée par la pêche à pied. Dans ce cadre, l'ensemble est de la baie est classé en zone C, voir D, la partie ouest et sud entre le port du Chatelet et la baie de Beaussais comprise. Le secteur de la ville de Lancieux est particulièrement protégé et reste en zone A même au printemps. Le secteur de Saint-Briac est classé en zone B ou A selon le lieu.

Remarque : le moment du prélèvement n'intervient pas dans la présente analyse. En effet, les mesures sont faites dans les coquillages mêmes et non pas dans l'eau.

5.6. SYNTHÈSE SUR LE PANACHE DES REJETS DE COLIFORMES / EC

Cette étude du transport des rejets de coliformes permet d'avancer certaines conclusions :

- La baie de Lancieux est celle présentant les concentrations les plus fortes et donc les déclassements les plus importants. La baie de la Fresnaye présente aussi des concentrations assez importantes surtout au printemps ;
- Le taux de renouvellement des baies par le flot est efficace pour l'ensemble, même pour celle de l'Arguenon. Ceci confirme l'analyse faite pour les nitrates que ce taux de renouvellement dépend principalement des quantités rejetées en mer dans les différentes baies plutôt que de l'hydrodynamique même ;
- Les interactions entre les baies sont quasi-nulles.
- La situation de l'année exceptionnelle en terme de débit que représente 2000 induit des conséquences partiellement aggravées au printemps mais pas de manière importante. Les panaches des baies sont semblables voire plus favorables dans certains cas, exception faite de la baie de Lancieux qui subit un déclassement dû aux rejets du Balay.

REFERENCES

- [1] M. Merceron, "Marées vertes en Bretagne : état actuel des connaissances" – IFREMER – Actes de colloque – n° 24 – Saint-Brieuc, Ploufragan- 23,24 septembre 1999.
- [2] Ménesguen et J.Y. Piriou, 1995, "Nitrogen loadings and macroalgal mass accumulation in Brittany (France)", *Ophelia*, 42, 227-237.
- [3] Le Mao P., Rougerie M. IFREMER - DEL Saint-Brieuc, Prigent J.L. DDASS 22 - (Service Santé Environnement), "Suivi bactériologique des gisements naturels de coquillages des Côtes d'Armor fréquentés en pêche à pied", Juin 1999.
- [4] IFREMER (Février 2000) : « La Baie des Veys ; Etude hydrosédimentaire et amélioration des conditions de salubrité ; Rapport final sur les résultats des mesures microbiologiques » - Parc naturel régional des Marais du Cotentin et du Bessin.
- [5] M.POMMEPUY, J.F. GUILLAUD, Y. MARTIN, E. DUPRAY, A. DERRIEN, J. L'YAVANC et M. CORMIER (Juin 1990) : « Le devenir des bactéries en zone littorale ». Colloque « la mer et les rejets urbains » - Bendor 13-15 juin 1990 – Actes de colloque IFREMER, Vol. 11, pp. 89-100.
- [6] J.F. GUILLAUD, A. DERRIEN, M. GOURMELON and M. POMMEPUY (1997) : « T90 as a tool for engineers: interest and limits » - *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35 11-12, pp. 277-281.
- [7] Rapport SOGREAH n° 10 0442 (Octobre 1996) : « Etude de l'incidence du rejet de la station d'épuration de Port-Neuf » - Communauté de Villes de L'Agglomération de La Rochelle.
- [8] Rapport SOGREAH n° 51 1445.2 (Mars 1996) : « Etude hydrodynamique de la Rade de Lorient et de l'incidence du rejet de la station » - Ville de Lorient.
- [9] « Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de la Rance » - Association CŒUR – SOGREAH/LNHE – 1998-2001

ANNEXE 1

GRAPHIQUES

ANNEXE 2

MODELES MATHEMATIQUES DES TROIS BAIES

1. MODELE HYDRODYNAMIQUE

1.1. DESCRIPTION SOMMAIRE DU SYSTEME DE MODELISATION

TELEMAC modélise la dynamique des écoulements, bi- ou tridimensionnels, dans les milieux naturels – côtes, estuaires, lacs et rivières – et le transport de substances par ces écoulements : polluants conservatifs ou dégradables, sables, vases, etc. Il modélise également la génération de la houle et la transformation des caractéristiques des vagues dans leur propagation vers la côte, pour des domaines plus ou moins vastes (d'une bordure océanique à un port).

1.1.1. AVANTAGES DU SYSTEME TELEMAC

Les avantages présentés par le système TELEMAC sont nombreux. Ce système de modélisation permet d'apporter des éléments de support à l'expertise dans tous les aspects du problème du devenir des rejets en mer.

Le terrain est représenté par un assemblage de facettes triangulaires de tailles et de formes variables, nommé "maillage". Cette approche procure trois avantages essentiels :

Le maillage épouse avec fidélité les géométries complexes que l'on rencontre dans la nature : les côtes, les îles de la baie, les digues insubmersibles, le chenal creusé dans les sables et les vasières sont ainsi représentés avec précision.

Cette approche autorise de densifier le maillage - et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle - dans les zones d'intérêt.

L'outil de génération de maillage intégré au système TELEMAC adapte la densité du maillage à différents critères comme la profondeur ou la pente des fonds. Il réalise un compromis entre les besoins en précision dans les régions où l'hydraulique est complexe (estrans, berges d'un chenal, etc.) et le nombre total de points.

Tous les modules du système sont basés sur la méthode des éléments finis. Ils partagent la même architecture, les mêmes structures de données et la même chaîne de traitement. Ils présentent donc une grande compatibilité et permet le transfert de données d'un code à l'autre.

Le système TELEMAC n'est pas limité aux codes de calcul scientifique : il s'agit d'un système de modélisation intégré incluant les outils de préparation des modèles et des simulations (outils de saisie graphique et de génération de maillage) et d'analyse des résultats (outils de visualisation et de production de sorties graphiques et imprimées) indispensables à ce type de modélisation.

TELEMAC est développé par le LNHE en respect des procédures d'Assurance de la Qualité des Logiciels Scientifiques et Techniques d'EDF-DRD.

1.1.2. MODULE DE CALCUL HYDRODYNAMIQUE

Le module TELEMAC-2D calcule la dynamique des écoulements en mer, dans la baie et dans les rivières.

Il permet de prendre en compte des digues et épis submersibles et tous les éléments topographiques d'un terrain naturel. Les forces génératrices de l'écoulement peuvent être prises en compte :

- la marée à travers les conditions aux limites maritimes,
- les débits fluviaux sous forme de conditions aux limites ou de sources ponctuelles,
- le vent (non traité ici).

1.1.3. QUALITE DES EAUX - TRANSPORT

Le logiciel de simulation bidimensionnel utilisé pour les calculs de qualité des eaux au sein du système TELEMAC se nomme SUBIEF.

Ce module calcule le transport et la dispersion par les courants de substances dissoutes en suspension dans l'eau. Ces substances peuvent être conservatives ou non. Dans le deuxième cas, on prendra en compte un temps spécifique de dégradation (T90 par exemple).

Ce module est découplé du calcul hydrodynamique. Il permet ainsi de simuler différents scénarios de sources polluantes sans recalculer les courants, d'où un gain de temps important.

1.2. MODELE HYDRODYNAMIQUE DES TROIS BAIES

Dans le cadre de l'étude hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Rance et de la zone côtière adjacente, réalisée pour le compte de l'association CŒUR, un modèle numérique côtier basé sur l'utilisation du système TELEMAC a été réalisé. La limite maritime de ce modèle s'appuie à l'ouest sur le cap Fréhel, puis sur la bouée sud-ouest des Minquiers, la grande île de l'archipel des Chausey et, enfin, la pointe du Roc à Granville. Cette emprise permet en particulier de s'affranchir des problèmes de conditions limites à l'est. En effet, les volumes contenus dans la baie du Mont Saint Michel, qui régissent les flux est-ouest au large de Saint-Malo, sont correctement modélisés.

Le modèle des trois baies que nous avons réalisé pour la présente étude reprend globalement la même emprise que le modèle développé dans la cadre de l'étude hydrosédimentaire de l'estuaire de la Rance [9].

Afin de mieux représenter les écoulements au large du Cap Fréhel, il a été jugé opportun, dans le cadre de cette étude, d'étendre le modèle vers l'ouest et de s'appuyer sur la pointe de Lanruen.

1.3. LES CONDITIONS AUX LIMITES

Vu l'emprise du modèle, nous disposons de plusieurs types de conditions aux limites selon les frontières.

Les conditions aux limites de ce modèle sont fournies par le modèle de la Manche mis au point par le LNHE. Ce modèle est forcé par les quatre principales composantes harmoniques de la marée déterminées par des mesures au large et permet d'obtenir les informations nécessaires en vitesses et en niveaux.

Deux périodes sont modélisées :

- Un cycle lunaire de 15 jours de morte-eau/vive-eau avec forte variation de coefficient de marée
- Un cycle lunaire de 15 jours de morte-eau/vive-eau avec faible variation de coefficient de marée

Ces différentes hydrodynamiques présentent l'avantages d'offrir un panel complet de la dynamique annuelle dans les baies induite par la marée, première force motrice de la dynamique dans cette région.

1.3.1. CONDITIONS FLUVIALES

On impose aux débouchés des rivières en mer les débits moyens selon la situation saisonnière et annuelle considérée (voir chapitre 1, §1.3) :

- En saison estival, le débit d'étiage est considéré
- Pour l'année 2000, nous considérons des débits importants en baie de Lancieux

1.4. LE MAILLAGE

Le maillage non structuré du modèle est présenté sur les figures Figure A1 et A2. Le nombre total de points de calculs est de 10 027, et la taille de maille varie de 10m localement dans les chenaux des rivières jusqu'à 200m dans les baies.

1.5. LA BATHYMETRIE

Les levés ont été effectués au GPS différentiel de précision centimétrique (récepteurs Trimble RS 4400 et RS 4700 et antennes GPS microcentrées L1/L2). Cette technique, qui permet la réalisation de levés topographiques très précis, nécessite la mise en œuvre de deux récepteurs.

Le premier, en station fixe (la base), est implanté de préférence sur un relief surplombant la zone à lever. L'antenne GPS est positionnée précisément (embase à plomb optique montée sur trépied) sur un point dont les coordonnées absolues sont connues en planimétrie et en altimétrie. Les bases ont été implantées en trois sites distincts :

- dans l'enceinte du sémaphore de Saint-Cast, à l'aplomb d'un repère IGN de coordonnées connues dans le système WGS84,
- au lieu-dit "Le Fournel" sur la commune de Pléboulle, à l'aplomb d'une borne géodésique ;
- au lieu-dit "la Ville Manuel", commune de Saint-Jacut-de-la-Mer, également à l'aplomb d'une borne géodésique ;

Le récepteur mobile se déplace sur la zone à couvrir et assure le levé topographique proprement dit. L'étendue des baies a nécessité l'utilisation d'un quad (véhicule tout-terrain motorisé à quatre larges roues) supportant le second récepteur (le mobile), et d'une remorque sur laquelle est fixée une seconde antenne GPS. L'acquisition a, dans ce cas, été réalisée en continu au rythme d'une mesure toutes les six secondes environ. Lorsque le terrain était trop accidenté (rochers des Hébihens) ou trop meuble (en Baie de l'Arguenon notamment) pour être parcouru en quad, les mesures ont été réalisées à pied. L'acquisition, alors discontinuée, a été effectuée sur l'estran au rythme d'un point levé tous les cinquante mètres.

La position absolue de la base et du mobile est définie grâce à un nombre variable de satellites. Le récepteur de la base calcule en permanence l'écart existant entre la position fournie par les satellites et les coordonnées précises livrées par l'IGN. Les corrections à apporter sont communiquées par radio au récepteur mobile, grâce à une antenne UHF hissée sur le site de la base à une hauteur de 12 mètres. La position relative du mobile par rapport à la base est calculée en permanence. Les coordonnées absolues du mobile dans le système de référence peuvent alors être déduites de la position absolue de la base. Les données recueillies sont stockées dans la mémoire d'un "carnet de terrain" (module TSC1 ou Trimble Survey Controller). Elles sont ensuite transférées sur P.C. et traitées par le logiciel Trimble Survey Office (T.S.O.). La précision des coordonnées obtenues est de l'ordre du centimètre à proximité de la base, tant en altimétrie qu'en planimétrie.

Préalablement au levé proprement dit, une recherche des repères de nivellement et des bornes géodésiques de l'IGN a été entreprise à la périphérie des baies et sur l'île des Hébihens, afin de caler avec précision le levé. Cinq points de contrôle fixes ont également été mis en place dans chaque baie, permettant de s'assurer que les levés ultérieurs sont correctement calés. Une fois le repérage effectué, la base D-GPS a été implantée au sémaphore de Saint-Cast, à l'aplomb du repère IGN de coordonnées connues dans le système WGS84. La position absolue de huit bornes géodésiques, de quinze repères de nivellement et des quinze points de contrôle implantés dans les baies ont été levés à l'aide du récepteur mobile. L'opération a été répétée en implantant successivement le récepteur fixe sur deux sites susceptibles d'accueillir la base ("Le Fournel" à Pléboulle et "la Ville Manuel" à Saint-Jacut).

Les levés ont été principalement réalisés aux mois de janvier, février et mars. Les conditions météorologiques nous ont contraints à interrompre des campagnes de mesures en cours. Le tableau suivant résume les dates des interventions et le nombre de points recueillis par baie :

	Baie de La Fresnaye	Baie de l'Arguenon	Baie de Lancieroux	Rochers des Ebihens
10/01/2001				
11/01/2001				
07/02/2001				
08/02/2001				
09/02/2001				
20/02/2001				
21/02/2001				
22/02/2001				
10/03/2001				
11/03/2001				
12/03/2001				
13/03/2001				
Nombre de points cotés recueillis	2 515	2 061	2 587	1 490

8 653 points cotés ont donc été recueillis au cours de ce levé.

Un second récepteur D-GPS mobile a été mis en œuvre dès le mois de février.

Une fois traitées ces données et complétée en mer par les cartes marines, un modèle de terrain a été créé sur la base de cette base de donnée bathymétrique et du maillage du modèle. Ce modèle de terrain est présenté sur la Figure A2.

1.6. VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle a été validé sur deux types de marée (morte-eau et vive-eau) par comparaison avec les données SHOM disponibles. Un aperçu de la qualité du modèle est présenté sur la figure A3.

1.7. EXPLOITATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Nous présentons sur les figures A4 à A9 un exemple d'exploitation du modèle hydrodynamique. Ici sont présentés les champs de courants sur l'ensemble des trois baies pour une marée de forte vive-eau heure par heure. Sur chaque figure, l'instant de la marée prise au niveau de Saint-Cast est fourni.

Le modèle est capable ainsi de décrire certaines dynamiques qui sont décrites dans les instructions nautiques de la marine, notamment les formations tourbillonnaires derrière les caps tels que celui de Fréhel, la pointe du Décollé, l'île des Ebihens, la pointe de Saint-Cast ou encore la pointe de la Latte.

2. MODELE DE TRANSPORT-DISPERSION

Dans le cadre de l'étude hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Rance et de la zone côtière adjacente, réalisée pour le compte de l'association CŒUR, un modèle numérique de qualité d'eau a été également mis au point. Ce modèle utilise le même maillage que le modèle hydrodynamique dont il exploite également les résultats en courants. Ce modèle, qui prend en compte six émissaires de rejet (pour la zone située à l'extérieur de l'estuaire de la Rance), a été validé sur des mesures en nature réalisées sur la façade maritime de la Ville de Dinard.

Ce modèle est repris intégralement avec ses paramètres de calage pour la présente étude.