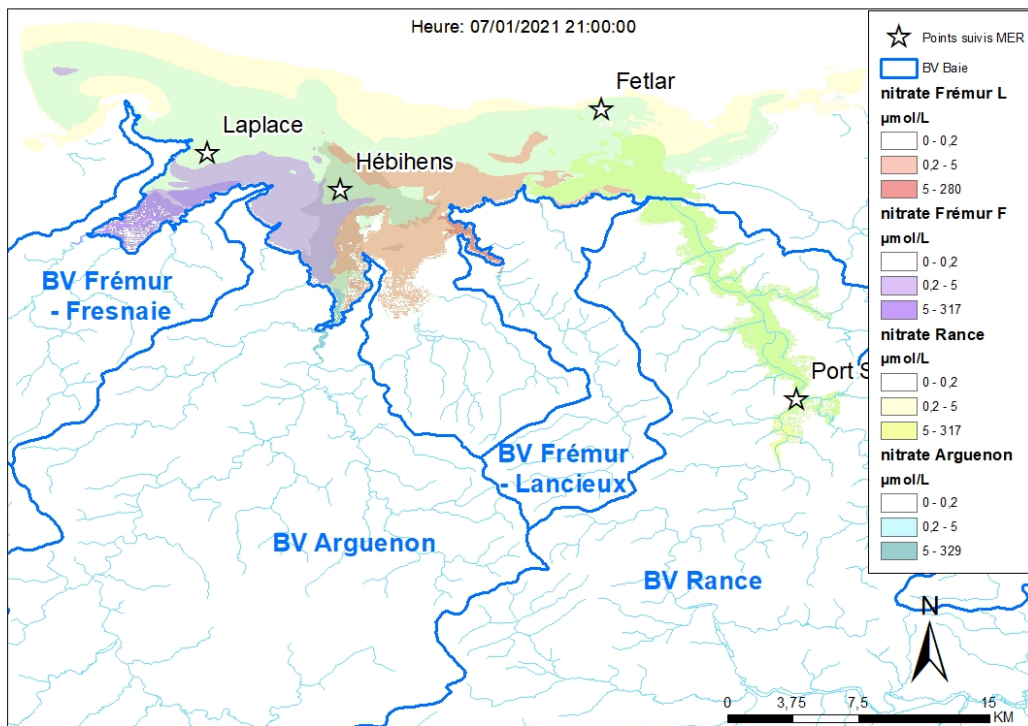
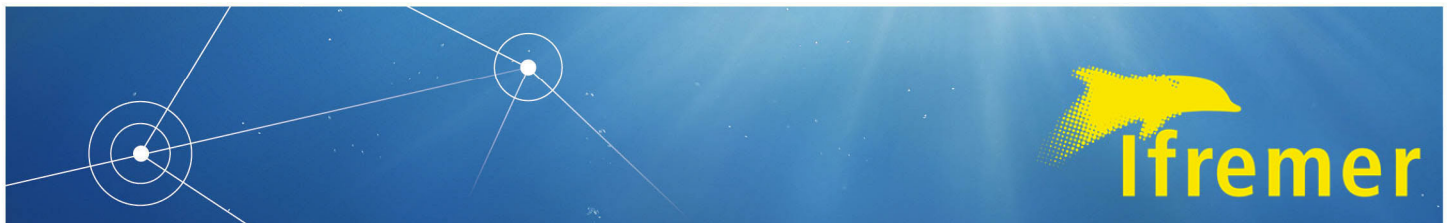


CORAIL - INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LA CROISSANCE ET LA SURVIE DES COQUILLES SAINT-JACQUES SUR LA COTE D'EMERAUDE ET DE LA RANCE MARITIME



Rapport technique Ifremer : modélisation
hydrodynamique et nutriments en côte d'Emeraude



Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN-23-002 CORAIL Ifremer - Rapport technique : modélisation hydrodynamique et nutriments en côte d'Emeraude
Chevé J., Dagault F.
31/08/2023

CORAIL - INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LA CROISSANCE ET LA SURVIE DES COQUILLES SAINT-JACQUES SUR LA COTE D'EMERAUDE ET DE LA RANCE MARITIME

Rapport technique Ifremer : modélisation hydrodynamique et nutriments en côte d'Emeraude



Fiche documentaire

Titre du rapport : CORAIL Ifremer- Rapport technique : modélisation hydrodynamique et nutriment en côte d'Emeraude

Référence interne :
Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN-023-003

Date de publication : 31/08/ 2023
Version : 1.0.0

Diffusion :

libre (internet)

restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ

interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ

Référence de l’illustration de couverture
LERBN – Chevé – sortie MARS 3D

Langue(s) :
Français

Résumé/ Abstract :

Ce rapport technique est dédié au volet de la modélisation hydrodynamique porté par l’Ifremer dans le cadre du projet CORAIL. Il présente une analyse des évolutions des flux de nutriments provenant des bassins versants et illustre la dispersion de leur panache en mer et la contribution relative de chacun des fleuves principaux de la côte d’Emeraude.

Contexte hydrologique :

La hausse de température de l’eau au large de la côte d’Emeraude, en lien avec le réchauffement global, est de 0,77  C tous les dix ans.

Les concentrations en nutriment suivent une variation saisonnière avec un maximum hivernal et un minimum estival. Les concentrations en phosphate sont de l’ordre de 80 fois inférieures aux nitrates. Ces concentrations sont surtout dépendantes des débits dans les exutoires des fleuves, expliquant les variations intra-annuelles. Les données disponibles sur l’exutoire du Frémur en baie de la Fresnaie montrent une diminution importante interannuelle : en 20 ans les concentrations en nitrates ont été divisées par deux (passant d’une moyenne de 60 mg/l à une moyenne de 30 mg/l).

L’année 2021 est plutôt représentative des cinq dernières années en matière d’hydrologie (débits, concentrations des nutriments). Les observations de CORAIL peuvent être comparées aux études précédentes pour évaluer l’évolution des flux de nutriments (SOGREAH 2002). Les flux hivernaux ont ainsi été divisés par deux à trois en 20 ans sur les trois fleuves : Arguenon et les deux Frémur.

Le tonnage total de nutriment apporté à la mer est lié à la surface totale de chaque bassin versant. Sur 2021, le bassin le plus producteur est celui de la Rance avec plus de 4000 T de nitrate par an, contre 150 T pour celui du Frémur de Lancieux. Quant aux flux spécifiques, le bassin du Frémur de la Fresnaie est le plus producteur au kilomètre carré (5.2 T/km² par an). Ce tonnage est à mettre en lien avec les activités, dont l’agriculture notamment.

Hydrodynamisme :

Les courants résiduels vont d’amont en aval dans les baies et les estuaires (y compris celui de la Rance avec la traversée du barrage) puis sont repris au large dans le sens Ouest-Est. La dynamique de particules provenant de chaque baie est détaillée.

La taille et la concentration des panaches de nutriment en mer sont proportionnelles aux quantités de flux annuels de chaque fleuve avec, par ordre décroissant : la Rance, l’Arguenon, le Frémur de la Fresnaie et le Frémur de Lancieux.

En moyenne, l’ensemble du secteur côtier rencontre des concentrations en nitrate de l’ordre de 5  mol/l. Il faut aller au-delà des 10 km au large pour que la présence des nutriments soit très

faible en moyenne. Les concentrations maximales correspondent aux flux hivernaux. Les fonds de baie et les estuaires ont des concentrations maximales en nitrate supérieures à 40 $\mu\text{mol/l}$.

Les courants et les flux présents sur la côte d'Emeraude impliquent un mélange de plusieurs sources de nutriment sur de nombreux secteurs. L'influence des fleuves porte essentiellement sur leur baie respective, sauf pour l'Arguenon qui peut atteindre, avec une contribution supérieure à 5 $\mu\text{mol/l}$ de nitrate, la baie de Lancieux. Une plus faible influence (inférieure à 5 $\mu\text{mol/l}$ de nitrate) de l'Arguenon et de la Rance est présente sur tout le domaine. Les deux Frémur peuvent avoir une faible influence en bordure de leur baie, notamment sur la partie Nord de la baie de l'Arguenon. Les contributions relatives en nutriment des différents fleuves sont détaillées pour chaque point de suivi en mer.

Limites :

L'étude CORAIL n'a suivi que les principaux fleuves : la Rance, l'Arguenon et les deux Frémur. Ces fleuves représentent 84 % du linéaire total des cours d'eau des bassins versants de la côte d'Emeraude.

Le modèle hydrodynamique a uniquement considéré la physique pour calculer la dispersion des nutriments. Il n'a pas considéré les phénomènes 1-biologiques (production primaire - reminéralisation), 2-physiques (décantation) et 3-des hypothèses sur les flux entrants (constants sur un mois).

Pour les nutriments, l'erreur entre les données du modèle et les données réelles est en moyenne d'un facteur deux. Les résultats du modèle fournissent toutefois des informations sur l'ordre de grandeur des nutriments ainsi que sur leur tendance et permettent de réaliser des comparaisons relatives entre les baies.

Perspectives :

Il serait intéressant de pouvoir mener une étude complète intégrant les processus de production primaire (production du phytoplancton, des macro-algues) et de la consommation primaire (croissance des bivalves), afin de pouvoir mieux connaître les équilibres trophiques en côte d'Emeraude. Une telle étude permettrait de confronter des scénarios de variation d'apport des bassins versants liés aux changements climatiques ou aux usages (prélèvement d'eau douce, espèce invasive, changement de pratique conchylicole, de pêche...).

La base d'une telle étude repose sur l'acquisition de données les plus fiables possibles sur les débits et les concentrations des fleuves. Il existe différentes méthodes d'extrapolation de ces données mais qui engendrent potentiellement de grandes incertitudes sur leur représentativité. Il faut dans la mesure du possible viser une acquisition haute fréquence *in-situ* et au plus proche des exutoires.

Mots-clés/ Key words : Côte Emeraude, hydrodynamisme, flux, nutriment, modélisation hydrodynamique.

Comment citer ce document : CORAIL Ifremer – Rapport technique : modélisation hydrodynamique et nutriments en côte d'Emeraude - Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN-023-003

Disponibilité des données de la recherche : /

Commanditaire du rapport : Direction Générale de l'Alimentation (DGAL)	
Nom / référence du contrat : <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
Chevé Julien	Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN
Dagault Françoise	Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN
Collaborateur(s)	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
Legendre Aurélie	Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN
Lejolvivet Aurore	Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN
Le Gall Patrik	Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN
Montagne Guillaume	Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN
Giraud Mélanie	MNHN Dinard
Richard Julien	MNHN Dinard
Destinataire : Cécile Devins - GALPA « Côte d'Emeraude Rance et Baie du Mont-Saint-Michel	
Validé par :	
Julien Chevé - Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN	

Table des matières

Introduction.....	7
1 Contexte.....	8
1.1 Présentation de la côte d’Emeraude.....	8
1.1.1 Contexte hydrographique	8
1.1.2 Contexte hydrologique	9
1.1.3 Contexte hydrodynamique	12
1.2 Présentation du modèle hydrodynamique.....	13
1.2.1 Code et emprise du modèle.....	13
1.2.2 Validation physique	14
1.2.3 Hydrodynamique générale	17
2 Evolutions et dispersion en mer des nutriments des bassins versants de la côte d’Emeraude	20
2.1 Origine et limites des données : CORAIL et données complémentaires	20
2.1.1 Origine des données	20
2.1.2 Limites des données	21
2.2 Observation des séries de données (concentrations, débits et flux des nutriments).....	22
2.2.1 Concentrations des nitrates et des phosphates en baie de la Fresnaie depuis 1997 ..	22
2.2.2 Contexte hydrologique de l’année 2021 et débits du Frémur	23
2.2.2.1 Pluviométrie et débit.....	23
2.2.2.2 Concentration et flux de nitrates sur le Frémur de la baie de la Fresnaie	25
2.2.2.1 Concentration et flux de phosphates sur le Frémur de la baie de la Fresnaie	26
2.2.2.2 Comparaison des flux de nutriment entre les bassins versants de la côte d’Emeraude.....	27
2.2.2.3 Comparaison avec l’étude SOGREAH 2002.....	28
2.3 Modélisation des flux de nutriments.....	30
2.3.1 Comparaison des résultats du modèle avec les suivis en mer pour les nutriments....	30
2.3.2 Observations sur les résultats de simulation des panaches de nutriments en 2021...32	32
2.3.3 Observations instantanées sur la dynamique du panache des nitrates + nitrites sur 15 jours (annexe numérique : vidéo NO2 NO3 6 au 15 janv. SURF)	34
2.3.4 Contribution relative des bassins versants en apport de nitrates+nitrites sur 15 jours (annexe numérique : vidéo NO2 NO3 6 au 7 janv. CONTRIB)	35
2.3.5 Comparaison des simulations de CORAIL 2021 et de l’étude SOGREAH 2002	37
Synthèse	39
Bibliographie	41
Annexes numériques	42
Annexe 2 : Contribution relative des bassins-versants en apport de nitrates+nitrites sur 15 jours (vidéo NO2 NO3 6 au 7 janv CONTRIB)	42

Table des illustrations

Figure 1 : Bassins versants de la côte d'Emeraude	8
Figure 2 : Dimension des bassins-versants de la côte d'Emeraude et linéaire du réseau hydrographique	9
Figure 3 : Température sur les neuf points de suivi REPHY sur les départements du 22 et du 35 en 2021	9
Figure 4 : Températures moyennes au point « Les Hébihens » depuis 2008	10
Figure 5 : Evolution de la concentration en nutriments et de la turbidité au point « les Hébihens » entre juin 2018 et décembre 2021	11
Figure 6 : Nitrate + nitrite en 2021 au point « Les Hébihens »	11
Figure 7 : Circulation générale des courants en Manche - courant résiduel lagrangien	12
Figure 8 : Carte du maillage du modèle et de la bathymétrie littorale immédiate	14
Figure 9 : Points de suivi en mer - CORAIL	15
Figure 10 : Statistiques descriptives des écarts entre les mesures in-situ et les sorties du modèle	16
Figure 11 : Cartes des courants instantanés au flot (gauche) et au jusant (droite) en côte d'Emeraude	17
Figure 12 : Carte de synthèse avec les courants intégrés à 72h (filtre Démerliac)	17
Figure 13 : Carte des courants résiduels et valeurs des courants MAX en fond de carte	18
Figure 14 : Carte des points de prélèvements CORAIL : points en mer et points fluviaux (concentrations et débits) avec les bassins versants associés	20
Figure 15 : Données disponibles débit et nutriment des fleuves principaux de la côte d'Emeraude (Frémur Fresnaie, Arguenon, Frémur Lancieux et Rance)	21
Figure 16 : Tableau des données surfaciques des bassins versants et des points de mesures du débit	22
Figure 17 : Courbes d'évolution des concentrations du nitrate (mg/l) depuis 1997 sur le Frémur de la Fresnaie et régression linéaire - données CD 22	23
Figure 18 : Pluviométrie annuelle à la station de Pleurtuit depuis 1986	23
Figure 19 : Débit moyen mensuel (l/s) 2021 du Frémur de la Fresnaie et écart à la moyenne depuis 2011... ..	24
Figure 20 : Volume annuel en m3 (calendaire et hydrologique (d'août à juillet n+1)) sur le Frémur de la Fresnaie depuis 2011	24
Figure 21 : Evolution 2021 des concentrations en nitrates dans le Frémur de la Fresnaie - données CD 22 ..	25
Figure 22 : Flux 2021 mensuels moyens de nitrate (T/m) du Frémur de la Fresnaie et écart à la moyenne depuis 2011 - données CD 22	25
Figure 23 : Quantité annuelle de nitrate (T) (calendaire et hydrologique (d'août à juillet n+1)) sur le Frémur de la Fresnaie depuis 2011 - données CD 22	26
Figure 24: Flux 2021 mensuels moyens de phosphate (T/m) du Frémur de la Fresnaie et écart à la moyenne depuis 2011 - données CD 22	26
Figure 25 : Quantité annuelle de phosphate (T) (calendaire et hydrologique (d'août à juillet n+1)) sur le Frémur de la Fresnaie depuis 2011 - données CD 22	27
Figure 26 : Flux de nitrate et de phosphate aux exutoires des fleuves (de déc. 2020 à fév. 2022)	28
Figure 27 : Flux spécifiques de nitrate en 2021 des quatre bassins versants suivis dans CORAIL	28
Figure 28 : Comparaison des flux nitrate entre 2021 (CORAIL) et 2002 (SOGREAH)	29
Figure 29 : Courbes d'évolution des concentrations en nitrate+nitrite (µmol/l) au point « Les Hébihens » (bleu 2D, rouge 3D surface) et mesure ponctuelle <i>in-situ</i> (points verts)	30
Figure 30 : Courbes d'évolution des concentrations en nitrate+nitrite (µmol/l) au point « Les Hébihens » (3D surface) et mesure ponctuelle <i>in-situ</i> (points verts) - Zoom sur février/ mars	31
Figure 31 : Courbes d'évolution des concentrations en nitrate+nitrite au point « Les Hébihens » (bleu 2D, rouge 3D surface) et mesure ponctuelle <i>in-situ</i> (points verts)	31
Figure 32 : Relation nutriment/salinité au point REPHY "Les Hébihens » - à gauche les résultats du modèle $\text{nitrate} = f(\text{salinité})$, à droite les données réelles $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 = f(\text{salinité})$	32
Figure 33 : Panaches moyens sur l'année 2021 en $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ et en PO_4	32
Figure 34 : Panaches maximums sur toute l'année 2021 en $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ et en PO_4	33
Figure 35 : Panaches moyens saisonniers sur l'année 2021 en $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$	33
Figure 36 : Coefficient de marée du mois de janvier 2021 (source : maree.info)	34
Figure 37 : Carte des panaches instantanés maximum de $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ du 8 janvier 2021 en sub-surface	34
Figure 38 : Carte des panaches instantanés maximum de $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ du 7 janvier 2021 en sub-surface - panaches entre les quatre fleuves de l'étude CORAIL et contributions relatives aux points de suivi en mer .	35
Figure 39 : Comparaison des résultats nitrates+nitrites CORAIL (2021) et nitrate SOGREAH (1995-2000) - situation de printemps	37
Figure 40 : Figure 39 : Comparaison des résultats nitrates+nitrites CORAIL (2021) et nitrate SOGREAH (1995-2000) - situation en été	38

Introduction

Le projet CORAIL (Influence des conditions environnementales sur la croissance et la survie des coquilles Saint-Jacques de la côte d'Émeraude et de la Rance Maritime) est porté par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) en partenariat avec l'Ifremer (Laboratoire Environnement Ressources Bretagne Nord - Station Ifremer de Dinard) et en collaboration avec le Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Elevages Marins (CDPMEM) d'Ille-et-Vilaine. Il a bénéficié d'une subvention européenne DLAL FEAMP (mesure 62.1.b du FEAMP) entre 2021 et 2022.

Le projet vise à caractériser la variabilité de la croissance et la survie des coquilles Saint-Jacques sur les différents gisements de la Côte d'Émeraude et de la Rance Maritime. Il a exploré les effets des conditions environnementales, de la disponibilité et de l'abondance des ressources nutritives sur la croissance et la survie des coquilles Saint-Jacques.

Le projet se décompose en trois parties complémentaires :

- La première vise à comparer les croissances et structures en taille des coquilles dans les différentes baies et sites exploités de la Côte d'Émeraude et en Rance Maritime. Pour cela, des naissains de coquilles issus d'écloserie ont été immergés en septembre 2021 et un suivi est initié pour deux ans. En parallèle, des campagnes de prospection seront réalisées pour évaluer la structure en taille et en âge des gisements de coquilles sur les différents sites.
- La seconde partie a pour objectif d'identifier et d'évaluer la contribution des différentes sources nutritives au régime alimentaire des coquilles Saint-Jacques. Les régimes alimentaires des coquilles des naissains d'écloseries et des différents gisements (mer et bassin maritime de la Rance) seront comparés et mis en parallèle des croissances et structures en taille afin d'évaluer une potentielle influence du régime alimentaire des coquilles.
- La troisième partie a pour objectif de suivre la qualité de l'eau et les sources de nourriture des coquilles Saint-Jacques présentes dans les différents gisements étudiés. Pour cela, l'étude s'appuie sur les stations du Réseau SOMLIT (Système d'Observation des Milieux Littoraux) suivies par le MNHN et du réseau REPHY (REseau de surveillance du PHYtoplancton et des PHYcotoxines) suivies par l'Ifremer le long de la côte d'Émeraude et dans le bassin maritime de la Rance.

Ces suivis ont été réalisés le long de la côte d'Émeraude en incluant d'Ouest en Est : la baie de la Fresnaie, les baies de l'Arguenon et de Lancieux, la baie de Saint-Malo et la Rance Maritime.

Ce rapport technique est dédié au volet de la modélisation hydrodynamique porté par l'Ifremer dans le cadre du troisième objectif du projet CORAIL. Il présente une analyse des évolutions des flux de nutriments provenant des bassins versants et illustre la dispersion de leur panache en mer et la contribution relative de chacun des fleuves principaux de la côte d'Émeraude.

1 Contexte

1.1 Présentation de la côte d'Emeraude

1.1.1 Contexte hydrographique

La côte d'Emeraude se situe en Bretagne Nord entre la pointe du Grouin (Cancale) à l'Est et le cap Fréhel (Plévenon) à l'Ouest. Elle s'étend sur un linéaire de 218 km (données SHOM au 50 000ème). Ce littoral est très découpé, entaillé d'Est en Ouest [1] par une succession de petits bassins littoraux (figure 1) : les côtiers de Saint-Coulomb, le Routhouan (Saint-Malo), l'estuaire de la Rance, les bassins versants du Frémur de Lancieux, des côtiers de Lancieux, de l'Arguenon et du Frémur de la Fresnaie. Il est à noter que les fleuves principaux des baies de Lancieux et de la Fresnaie ont le même nom : le Frémur. Ce rapport distingue ainsi le Frémur de la Fresnaie (noté FF) du Frémur de Lancieux (noté FL).

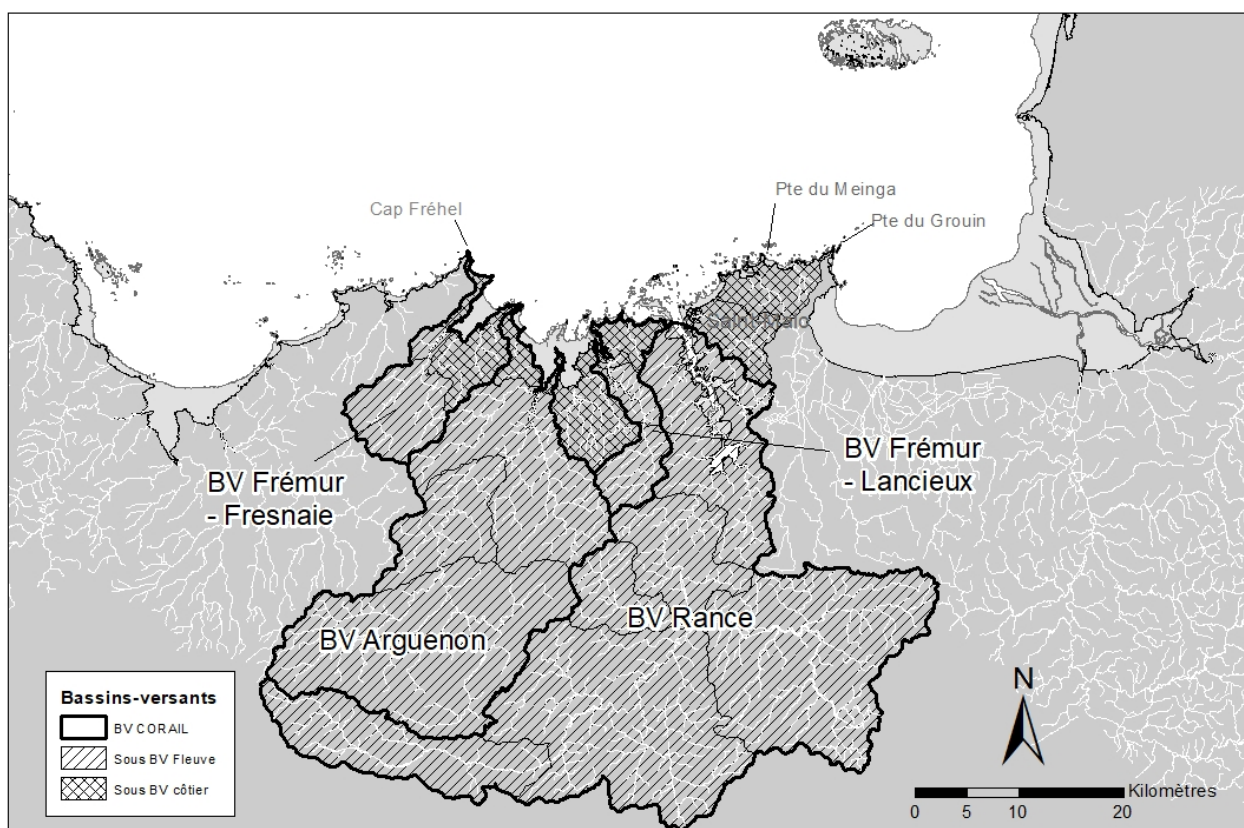


Figure 1 : Bassins versants de la côte d'Emeraude

La surface totale de ces bassins versants représente 1800 km² (figure 2) et est majoritairement composée des bassins de la Rance (937 km²) et de l'Arguenon (586 km²). Ces deux bassins représentent 85 % de la surface totale.

	Surface BV km ²	Linéaire réseau hydrographique (km)	Linéaire fleuve principal (km)
Arguenon	585,87	385,7	380,5
Frémur Fresnaie	77,12	72,0	50,4
Frémur Lancieux	59,65	65,3	58,7
Rance	937,08	981,7	854,4
Côtier - Baie de Lancieux	54,74	46,5	
Le Routhouan	38,62	18,8	
Côtiers Nord-Est	38,80	17,9	
BV Total	1791,88	1587,9	1344,0

Figure 2 : Dimension des bassins-versants de la côte d'Emeraude et linéaire du réseau hydrographique

Par la suite, les flux pris en compte dans l'étude CORAIL pour estimer les apports terrestres principaux des bassins versants vers le littoral sont ceux des principaux fleuves : la Rance, l'Arguenon et les deux Frémur. Ces fleuves représentent 84 % du linéaire total des cours d'eau des bassins versants de la côte d'Emeraude.

1.1.2 Contexte hydrologique

Les paramètres physico-chimiques dans l'eau (température, salinité, turbidité, oxygène dissous, chlorophylle *a*, nutriments) subissent de grandes variations suivant un gradient côte-large et suivant les variations saisonnières. Ils sont notamment suivis par le réseau d'observation REPHY mené par l'Ifremer [2], où neuf points sont échantillonnés tous les 15 jours. L'objectif est de suivre à long terme les changements de faible amplitude (comme le réchauffement climatique) ou les effets de forçage liés à l'activité humaine (comme l'eutrophisation ou la dynamique des populations de phytoplancton).

La figure suivante montre les variations de températures mesurées dans l'espace (entre les différents points de suivi) et dans le temps (variation saisonnière en 2021). Les points de suivi soulignés sont les points situés dans des estuaires. Ils ont une influence plus continentale que les autres points situés plus au large.

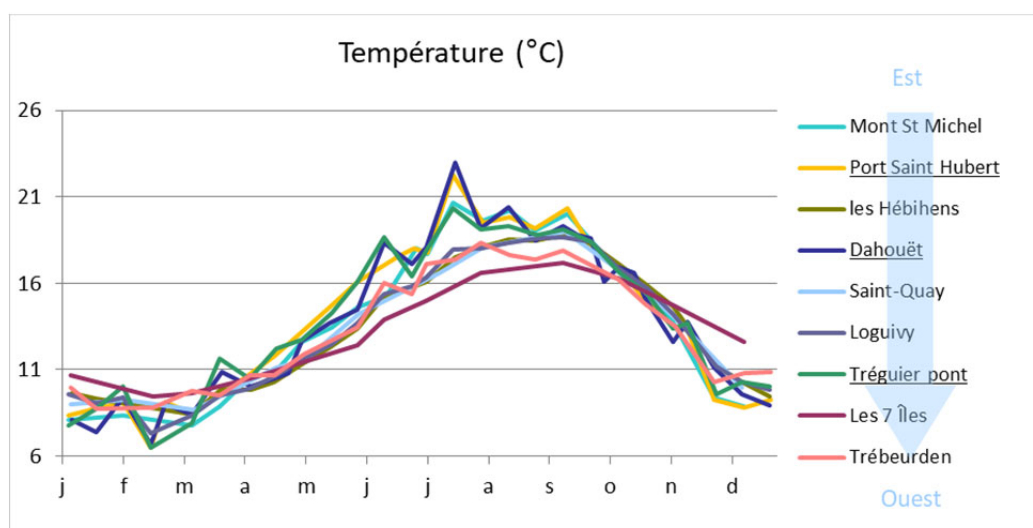


Figure 3 : Température mesurée sur les neuf points de suivi REPHY sur les départements du 22 et du 35 en 2021

L'amplitude des températures entre l'été et l'hiver atteint près de 16°C dans les estuaires, et 10°C plus au large. Les températures maximales sont de l'ordre de 22°C et les températures minimales de 6°C.

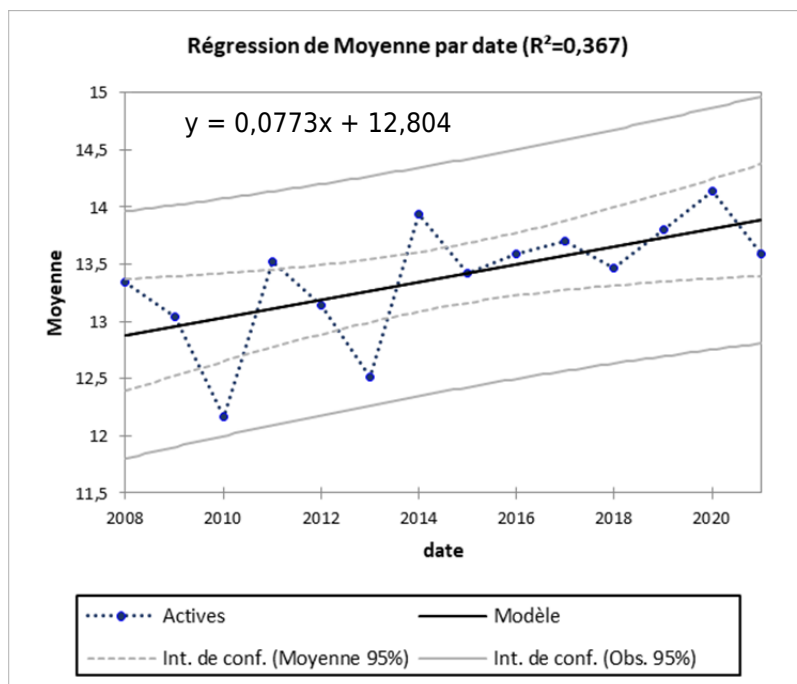


Figure 4 : Températures moyennes au point « Les Hébihens » depuis 2008

Cette figure présente l'évolution des températures moyennes au point « Les Hébihens » (cf. figure N°9) entre 2008 et 2021. Elle montre une augmentation de la température sur la période. Le coefficient directeur de la courbe indique que la hausse de température est de 0,77°C tous les dix ans. Cette observation est cohérente avec les valeurs avancées depuis les années 2010 qui étaient alors de 0,6°C tous les 10 ans en Manche [3].

La salinité représente la quantité de sels dissous dans les eaux. Ces sels sont principalement composés de chlorure de sodium en mer. Dans la Manche, la salinité est voisine de 35 [4] alors que celle des eaux douces est nulle. Dans les estuaires, zone de mélange des eaux continentales et marines, on est en présence d'un gradient de salinité s'étendant de 0 à 35. En Bretagne Nord, les points estuariens subissent des variations de salinité plus importantes en fonction des apports fluviaux. On peut y mesurer des dessalures (jusqu'à une valeur de 12 mesurée dans l'estuaire du Jaudy) en lien avec la pluviométrie.

Les nutriments désignent l'ensemble des composés nécessaires à la nutrition du phytoplancton dont les principaux sont le nitrate, le nitrite, l'ammonium, le phosphate et le silicate. Les nutriments sont naturellement présents dans le milieu (lessivage des sols, dégradation de la matière organique). Des concentrations excessives peuvent avoir pour origine les rejets urbains (stations d'épurations), industriels (industrie agro-alimentaire, laveries...), domestiques (lessives) ou agricoles (engrais). Si les nutriments ne sont pas directement toxiques pour le milieu marin, l'augmentation des flux déversés en zone côtière peut être considérée comme une pression à l'origine de nuisances indirectes (augmentation de la biomasse chlorophyllienne, changement des espèces phytoplanctoniques dominantes, développement massif de macroalgues...) pouvant conduire au phénomène d'eutrophisation. La figure suivante présente les évolutions des nutriments mesurés au point « Les Hébihens » sur quatre ans.

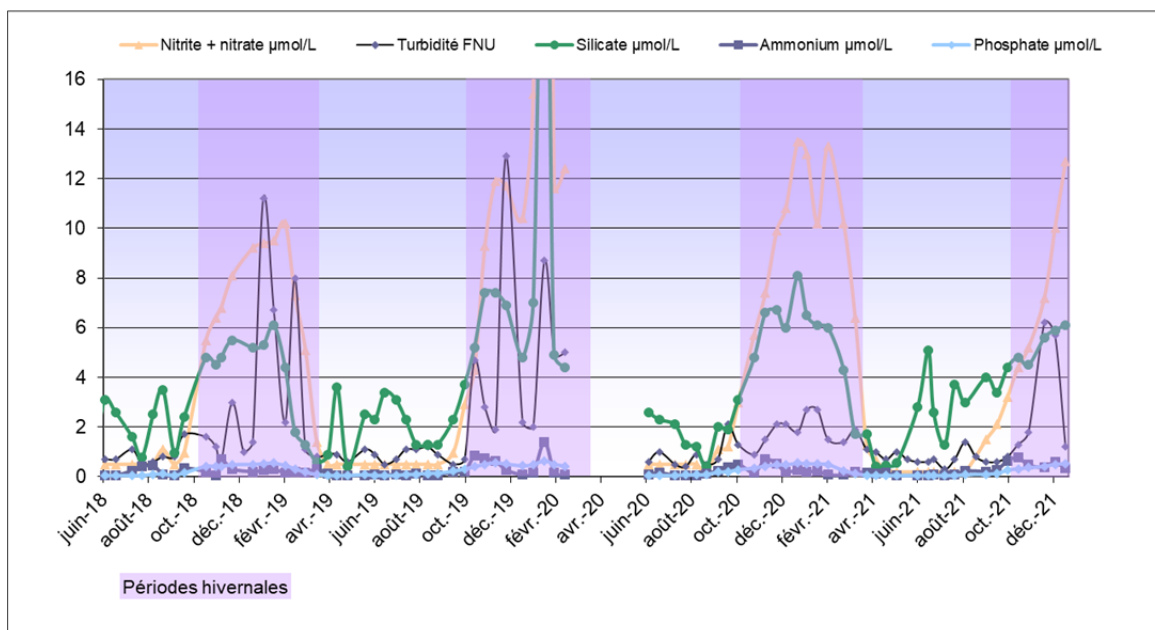


Figure 5 : Evolution de la concentration en nutriments et de la turbidité au point « les Hébihens » entre juin 2018 et décembre 2021

L'azote (correspond aux nitrites + nitrate et à l'ammonium) et le phosphore sont les éléments nutritifs indispensables à la nutrition du phytoplancton. Le silicate est indispensable pour le développement des diatomées pour leur squelette de silice. On observe une saisonnalité des concentrations de nutriments avec un maximum hivernal et un minimum estival. L'évolution de la concentration en nitrite + nitrate est la plus marquante : elle est de 13,5 $\mu\text{mol/L}$ en janvier et en février puis chute en avril et mai à des concentrations inférieures au seuil analytique de détection (0,5 $\mu\text{mol/L}$). Cette chute correspond aux efflorescences phytoplanctoniques du printemps.

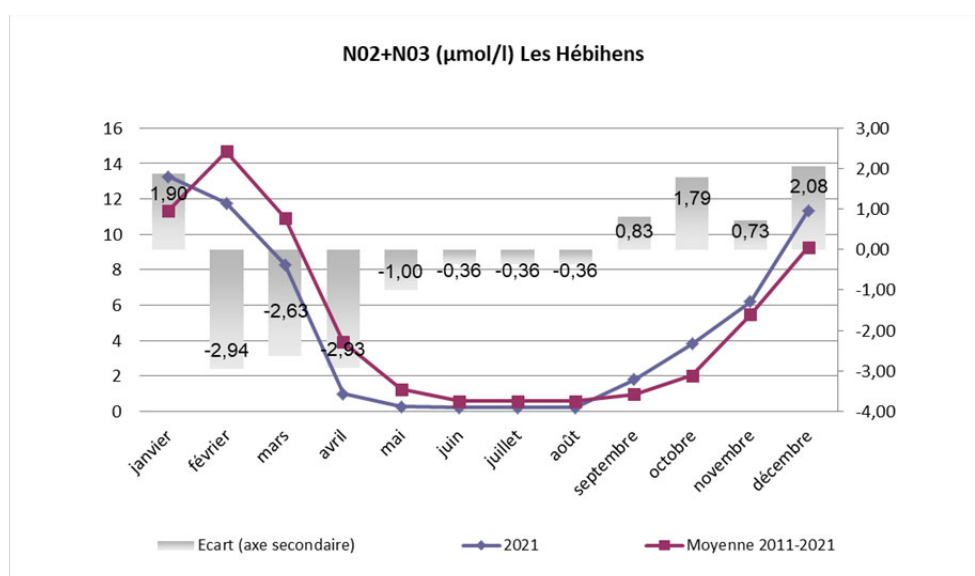


Figure 6 : Nitrate + nitrite en 2021 au point « Les Hébihens »

En 2021, en lien avec les apports pluviométriques, les concentrations en nitrate + nitrite sont inférieures en moyenne de 2,83 $\mu\text{mol/L}$ l'hiver par rapport à la moyenne des dix dernières années, tandis qu'en automne elles sont supérieures de 1,36 $\mu\text{mol/L}$.

1.1.3 Contexte hydrodynamique

Comme dans le reste de la Manche, la circulation générale dans le golfe Normano-Breton est principalement gouvernée par les courants de marée [5]. C'est particulièrement vrai dans le golfe en raison des marnages qui y sont maximum à l'Ouest du Cotentin. Le marnage peut atteindre 14 mètres à Saint-Malo pour un coefficient de 120 (SHOM 2017). Ces niveaux sont à l'origine d'une particularité notable du secteur, le barrage marémoteur de la Rance. Ces marnages associés aux faibles pentes des baies permettent de découvrir une surface de près de 63 km² d'estran.

Les principaux courants du flot se dirigent vers les fonds de baie et vers l'Est au large. Ils sont inverses au jusant. Des courants giratoires apparaissent autour des principaux caps, c'est notamment le cas au cap Fréhel. Ce sont aussi des secteurs ayant les vitesses de courant les plus importantes bien que les courants maximums soient calculés au niveau du barrage de la Rance. Les vitesses obtenues lors des vannages peuvent atteindre 5,67 m/s [6] (pour un coefficient de 111).

Les courants résiduels (figure suivante), qui traduisent la résultante du déplacement des eaux au-delà des cycles de marée, sont opposés de part et d'autre du cap Fréhel. Ils se dirigent vers l'Ouest à l'Ouest du cap et réciproquement à l'Est, pour *in fine* rejoindre le mouvement global des eaux de la Manche qui se dirige vers le Nord-Est au-delà du golfe Normano-Breton [7].

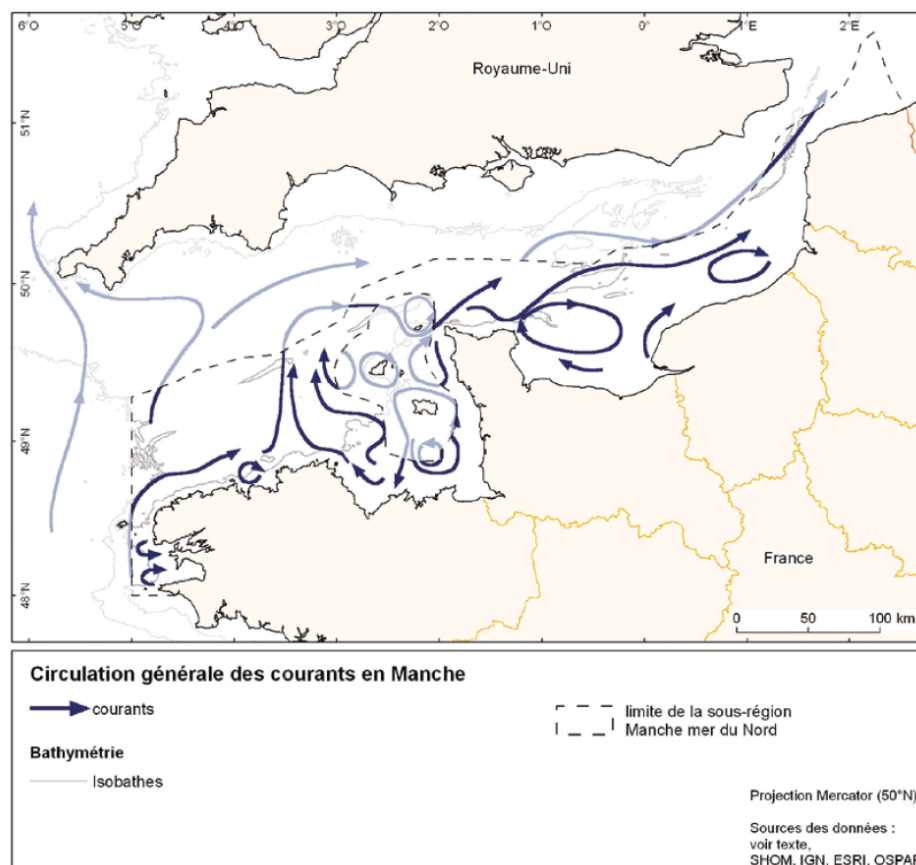


Figure 7 : Circulation générale des courants en Manche – courant résiduel lagrangien – Lazure P., et al. 2012

Le premier objet des observations du modèle hydrodynamique de cette étude est de détailler le contexte hydrodynamique de la côte d'Emeraude (cf. paragraphe 1.2.3).

1.2 Présentation du modèle hydrodynamique

1.2.1 Code et emprise du modèle

Le modèle a été développé sur le code hydrodynamique MARS (Model for Applications at Regional Scales) qui est un modèle communautaire développé et diffusé par l'équipe DYNECO/DHYSED de l'Ifremer Brest et l'UMR LOPS (<http://www.umd-lops.fr/>). Ce code est dédié à la modélisation océanographique côtière des échelles régionales jusqu'aux échelles littorales (quelques centaines voire dizaines de mètres) et intègre une forte composante environnementale (sédimentologie et biogéochimie). Les éléments théoriques et la description du formalisme numérique sont présentés dans Lazure et Dumas (2008) [8].

Il s'agit d'un algorithme de calcul des courants marins, des hauteurs d'eau et des concentrations des substances dissoutes (ou en suspension temporaire) advectées. Le schéma de résolution des équations de Navier-Stokes repose sur la méthode des différences finies sur un maillage régulier, en deux ou trois dimensions, pour une plus grande souplesse d'utilisation et de réduction de temps de calcul. La bathymétrie est prise en compte par un découpage vertical en niveaux sigmas épousant le profil du fond.

L'algorithme du code repose sur les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, résolus selon une expression semi-implicite de la surface libre. Dans sa version tridimensionnelle, MARS 3D procure également la distribution du courant sur la verticale, la température de la mer, la salinité et la hauteur d'eau.

MARS permet de modéliser sous forme de calculs instantanés ou de synthèses (valeurs moyennes, maxi, mini...) les grandeurs suivantes :

- le courant (composantes U et V) et les résiduelles eulériennes,
- la hauteur du plan d'eau, les niveaux moyens et les composantes harmoniques de marée,
- la salinité, la température,
- des constituants provenant de rejets (par exemple les germes fécaux).

MARS utilise une technique d'emboîtement de modèles sous forme gigogne. Par cette technique, un modèle de grande emprise et de basse résolution horizontale (grande maille) contient lui-même un ou plusieurs sous-modèles (loupes). Ces derniers reçoivent les conditions aux limites des modèles qui les précèdent. Au plan spatial, les modèles intermédiaires possèdent une maille environ 4 fois plus petite que celle du modèle précédent. Le modèle de grande emprise s'étend jusqu'au plateau continental et trouve ses conditions aux limites dans la valeur des ondes générant la marée au large.

Il est possible d'introduire dans le modèle, parmi les variables de forçage, des flux issus de bassins versants ou de rejets en mer et de simuler le transport et la diffusion de ses substances dissoutes et/ou particulières dans la masse d'eau. La capacité de suivre des trajectoires ou bien des concentrations trouve des applications pour la surveillance des contaminations, d'origine microbiologique ou chimique, chronique ou accidentelle, les études d'impact, les simulations d'options d'aménagement côtier.

La modélisation hydrodynamique est réalisée avec le code Ifremer MARS 3D V11.3 BZHN. Le modèle couvre le littoral de la côte d'Emeraude depuis le cap Fréhel jusqu'à la pointe du Meinga avec une résolution de 50m (figure suivante).

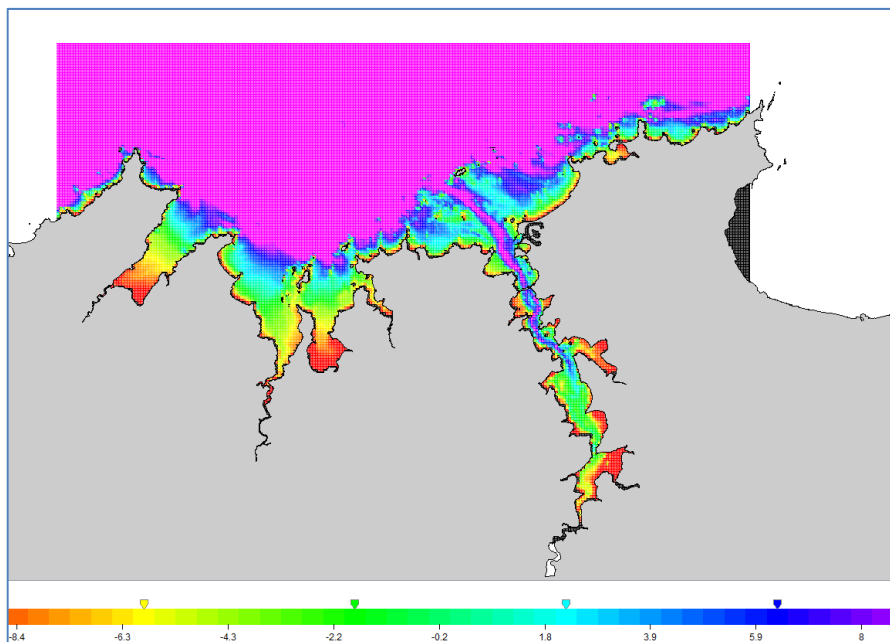


Figure 8 : Carte du maillage du modèle et de la bathymétrie littorale immédiate

Les données des niveaux d'eau aux limites du modèle sont calculées à partir des données du SHOM (CST France 2004). Les conditions météorologiques sont issues du modèle de prévision AROME à 2km de résolution de Météo France. Les conditions initiales et aux limites de la température et de la salinité sont issues du modèle Ifremer MANGA de résolution 3500 m (MANGA2500). Ces conditions sont celles de l'année 2021.

1.2.2 Validation physique

La mise en place du modèle hydrodynamique et la validation physique de l'outil ont été soustraitées à la société ACRI-HE (ex-HOCER). La validation physique a été réalisée :

- Sur les hauteurs d'eau en utilisant les hauteurs mesurées par le marégraphe du port du Crouesty, en prenant en compte les conditions météorologiques.
- En moyenne de température par saison.

Une validation complémentaire par le LERBN a été menée en température et en salinité sur la base des données de suivi du REPHY. Les résultats du modèle ont été comparés aux données ponctuelles des points de suivi réalisé tous les 15 jours.

La comparaison des données du modèle avec les données réelles de CORAIL a été réalisée pour les quatre points (figure 9) de suivi sur un an (déc. 20 - nov. 21) soit 8 à 27 résultats. Les comparaisons ont été effectuées sur différentes sorties du modèle (3D en surface, en sub-surface, en moyenne diurne, en 2D-intégrative sur la colonne d'eau et en moyenne diurne). La meilleure corrélation correspond à la mesure 3D en sub-surface, puis à la 2D (figure 10).

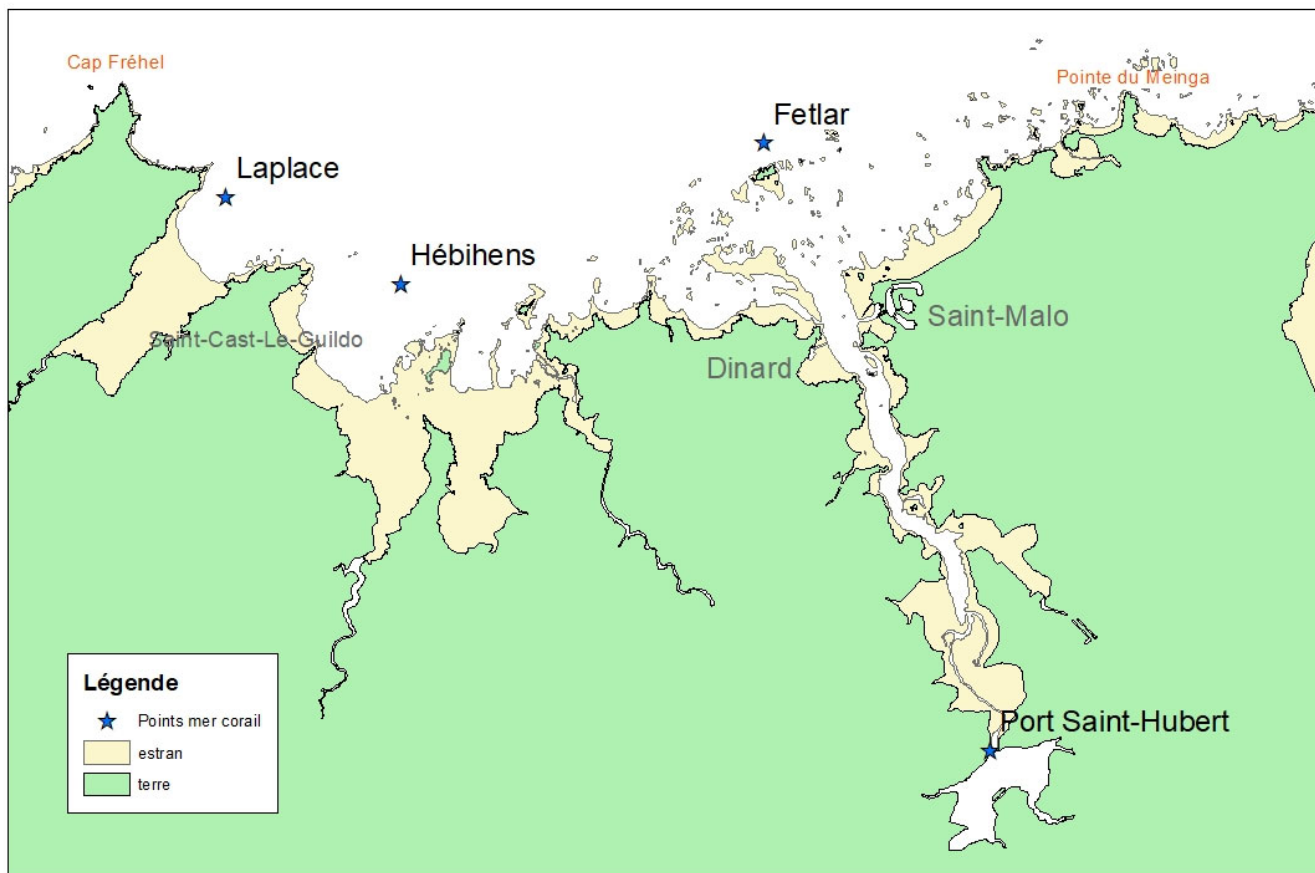


Figure 9 : Points de suivi en mer – CORAIL

Statistique	Salinité				Température			
	Les Hébihens	Port Saint-Hubert	Laplace	Fetlar	Les Hébihens	Port Saint-Hubert	Laplace	Fetlar
Nb. d'observations	23	27	8	10	23	27	8	10
Minimum	0,010	0,090	0,200	0,100	0,080	0,610	0,070	0,000
Maximum	1,490	7,690	0,640	0,790	1,770	6,260	0,880	3,030
1er Quartile	0,175	0,420	0,250	0,160	0,505	1,105	0,168	0,650
Médiane	0,310	1,070	0,315	0,205	0,830	1,680	0,395	1,035
3ème Quartile	0,470	2,205	0,328	0,295	1,145	2,640	0,622	1,303
Moyenne	0,393	1,765	0,328	0,272	0,842	2,053	0,432	1,077
Variance (n-1)	0,126	3,753	0,019	0,041	0,231	1,748	0,098	0,670
Ecart-type (n-1)	0,356	1,937	0,137	0,203	0,481	1,322	0,314	0,819
Moyenne échantillon	34,909	32,087	34,985	34,872	13,358	12,802	13,621	12,947
% erreur moyen	1,1%	5,5%	0,9%	0,8%	6,3%	16,0%	3,2%	8,3%

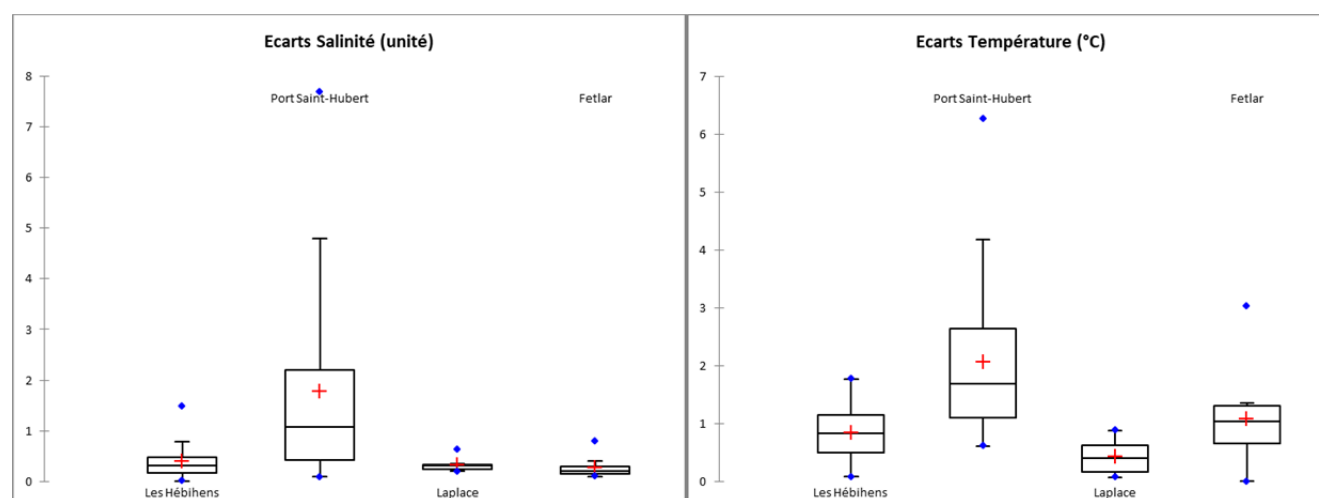


Figure 10 : Statistiques descriptives et boxplots des écarts entre les mesures in-situ et les sorties du modèle

Plus les points sont au large, plus les écarts diminuent. Les points présentant les résultats du modèle les plus fiables sont « Laplace » (n=8), « Fetlar » (n=10) puis « Les Hébihens » (n=23). Le point le moins fiable est « Port Saint-Hubert (PSH) » (n=27) présent en fond d'estuaire de la Rance maritime.

En salinité, les points du large présentent une erreur absolue en salinité de moins de 1%, tandis que PSH montre une erreur moyenne de 5,5%. Le modèle est validé pour ce paramètre.

En température les résultats sont moins concordants, avec des erreurs moyennes de 8% à Fetlar, 3% à Laplace, 16% à PSH, et 6% aux Hébihens. Ces écarts sont liés aux hypothèses sur les flux entrants du modèle (représentation des apports des fleuves).

Par exemple dans le cas de PSH en Rance :

- Seul 60 à 80% du débit total des eaux douces arrivant en Rance est pris en compte et il est considéré constant sur un mois.
- Le fonctionnement du barrage n'est pas pris en compte, bien qu'en théorie ses effets soient peu impactants en termes d'échanges moyens.
- Le point REPHY est soumis à des effets de bord (échange avec la cale en eau douce et influence température) qui ne sont pas pris en compte par le modèle.

1.2.3 Hydrodynamique générale

La figure ci-dessous illustre le fonctionnement global du système au flot et au jusant. Les courants sont d'Ouest en Est au large au moment du flot, et sont inverses au moment du jusant. Les courants maximums du système se trouvent au cap Fréhel et au niveau du barrage, ils sont de l'ordre de 5 m/s (pour rappel, le fonctionnement du barrage n'est pas pris en compte dans le modèle). Ces observations confirment localement les éléments du paragraphe 1.1.3.

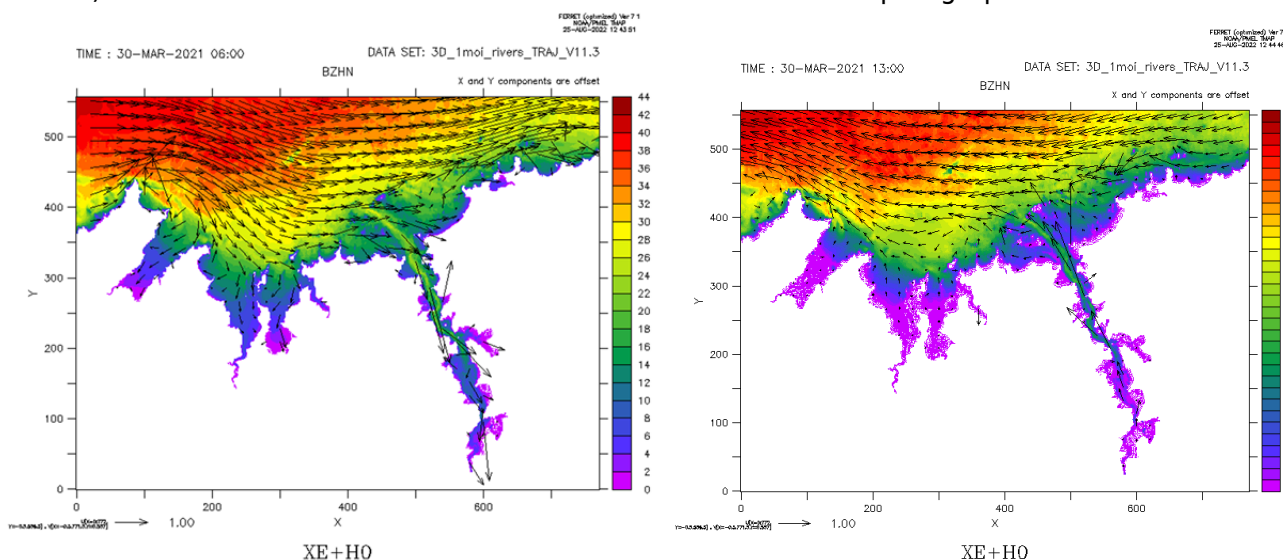


Figure 11 : Cartes des courants instantanés au flot (gauche) et au jusant (droite) en côte d'Emeraude

Les courants résiduels montrent les mouvements des masses d'eau au-delà des cycles de marée (figures suivantes).

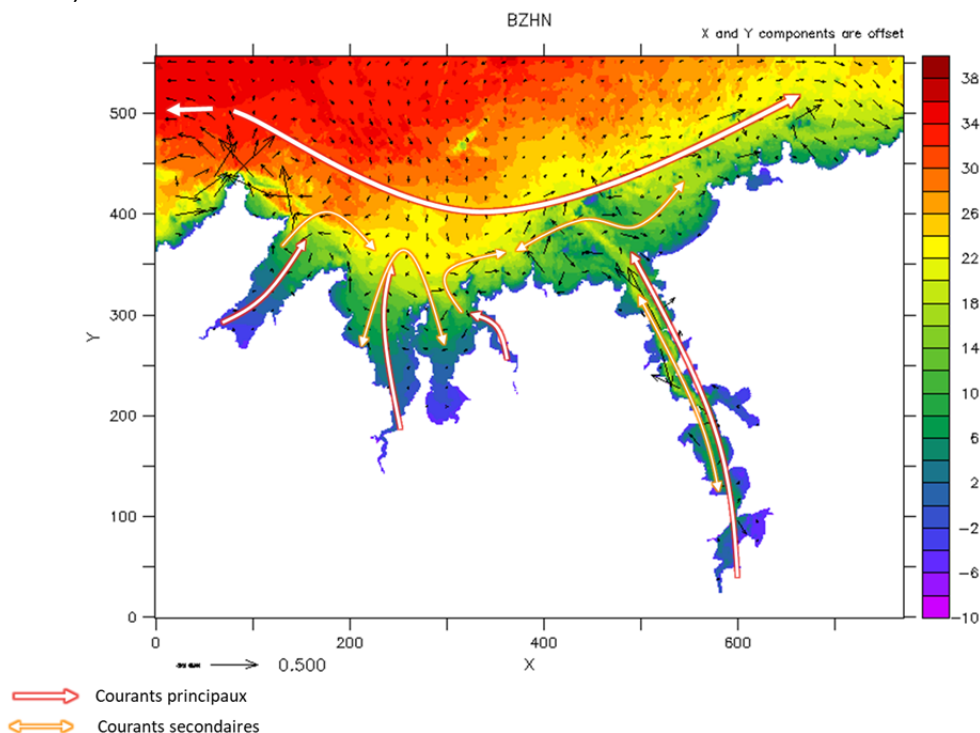


Figure 12 : Carte de synthèse avec les courants intégrés à 72h (filtre Démerliac)

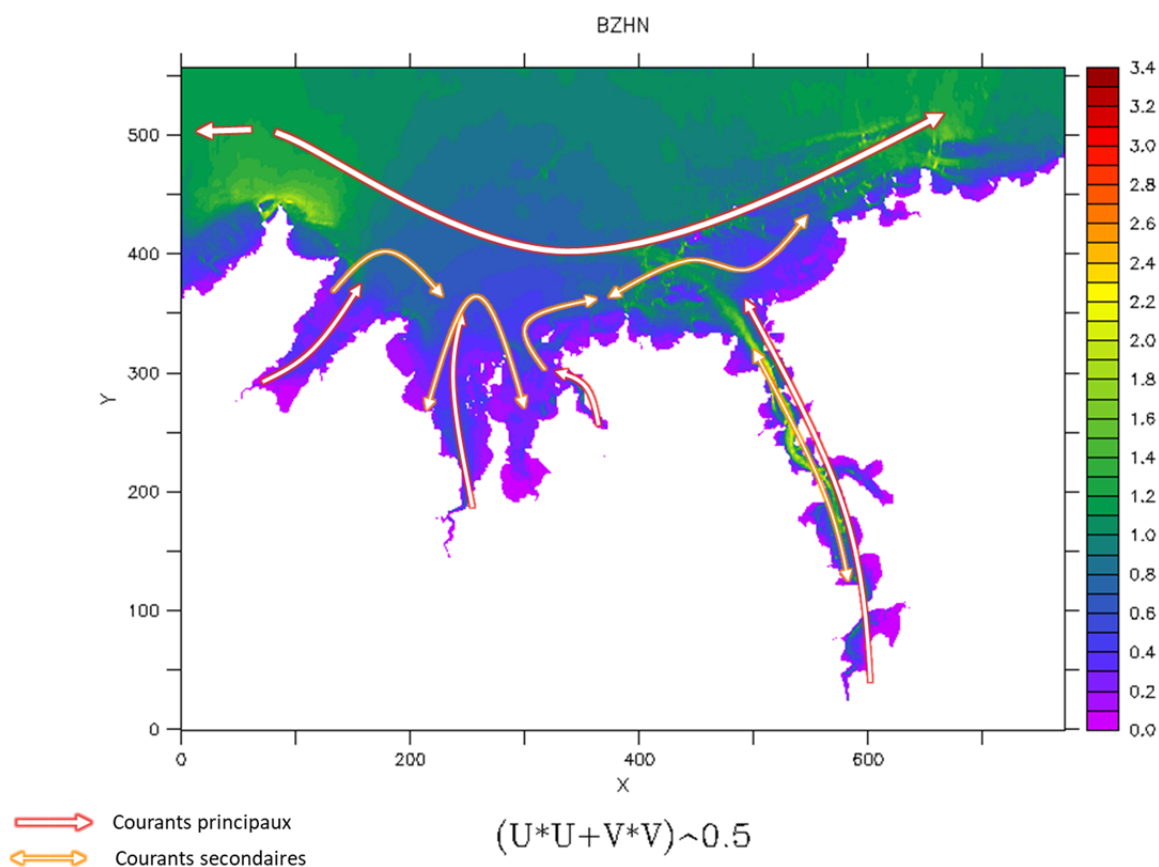


Figure 13 : Carte des courants résiduels et valeurs des courants MAX en fond de carte

De façon générale les courants résiduels vont d'amont en aval dans les baies et les estuaires (y compris celui de la Rance avec la traversée du barrage) puis sont repris au large dans le sens Ouest-Est.

Mais il existe des courants secondaires de reflux et d'échanges entre les baies. Des tests de simulation de particules conservatives ont été réalisés par très fort coefficient pour illustrer ces courants résiduels :

- Particules venant de la baie de la Fresnaie : sortie rapide de la baie (1^{er} jour), couverture littorale avec pénétration dans la baie de l'Arguenon (2^{ème} jour), dispersion au large dès le 3^{ème} jour, sortie totale du système en 4 à 5 jours.
- Particules venant de la baie de l'Arguenon : sortie en 1 jour de la baie, échange avec la baie de Lancieux dès 1,5 jour. Pas d'échange avec la Fresnaie, les particules restent au large en basse mer et avec un mouvement vers l'Est en pleine mer. Elles restent 2 à 4 jours sur le secteur côtier. Quelques incursions en Rance à partir du 2^{ème} jour, sortie du système en 4 à 5 jours.
- Particules venant de l'estuaire du Frémur de Lancieux : observation similaire à l'Arguenon, c'est-à-dire une sortie rapide de l'estuaire puis les particules vont rester au large à basse mer (pas d'échange avec les baies à l'Ouest) et vont longer la côte à pleine mer avec incursion en Rance au-delà du premier jour, sortie du système en 3 à 5 jours.
- Particules au large des Hébihens : elles se dirigent très rapidement vers la baie de Lancieux et suivent le même comportement si elles sont lâchées au flot. Elles restent au large avec dispersion rapide si le lâché a lieu au jusant.

- Particules venant de la Rance (données VIBranch [6]) : les particules lâchées au niveau de l'écluse du Chatelier mettront 2 jours pour atteindre Port Saint-Hubert et 7 jours pour atteindre le barrage.
- Particules venant de la baie de Saint-Malo : les particules lâchées en aval du barrage seront plus rapidement dispersées vers le large et auront peu d'impact sur la partie amont du barrage sauf pour le secteur immédiat entre Saint-Malo et Dinard où l'influence peut se sentir jusqu'au niveau de la pointe de Saint-Suliac. Les particules sortent du système en 2 à 3 jours.
- Particules venant du Havre de Rothéneuf : sortie rapide du système, en 1 à 2 jours par l'Est.

2 Evolutions et dispersion en mer des nutriments des bassins versants de la côte d'Emeraude

Après une présentation de l'origine des données, cette partie comporte une analyse des séries temporelles et les interprétations de la modélisation hydrodynamique de leurs panaches en mer.

2.1 Origine et limites des données : CORAIL et données complémentaires

2.1.1 Origine des données

Les données hydrologiques acquises dans le cadre de CORAIL sont de deux types (figure suivante) :

- Les données en mer : sur quatre points, suivis tous les 15 jours des paramètres physico-chimiques (salinité, température, pH, oxygène dissous, turbidité, sels nutritifs et Matière Organique Particulaire). Ces données sont en partie associées aux programmes REPHY¹ de l'Ifremer et du SOMLIT² du MNHN.
- Les données fluviales : il s'agit de mesurer le plus justement possible les flux d'éléments nutritifs provenant des bassins versant. Ce sont ces flux qui seront pris comme données d'entrée du modèle hydrodynamique. Les concentrations en nutriment et matières organiques sont mesurées tous les mois aux points 1, 2, 3 et 7, les débits sont mesurés aux mêmes points sauf pour la Rance (somme des points 4 à 6).

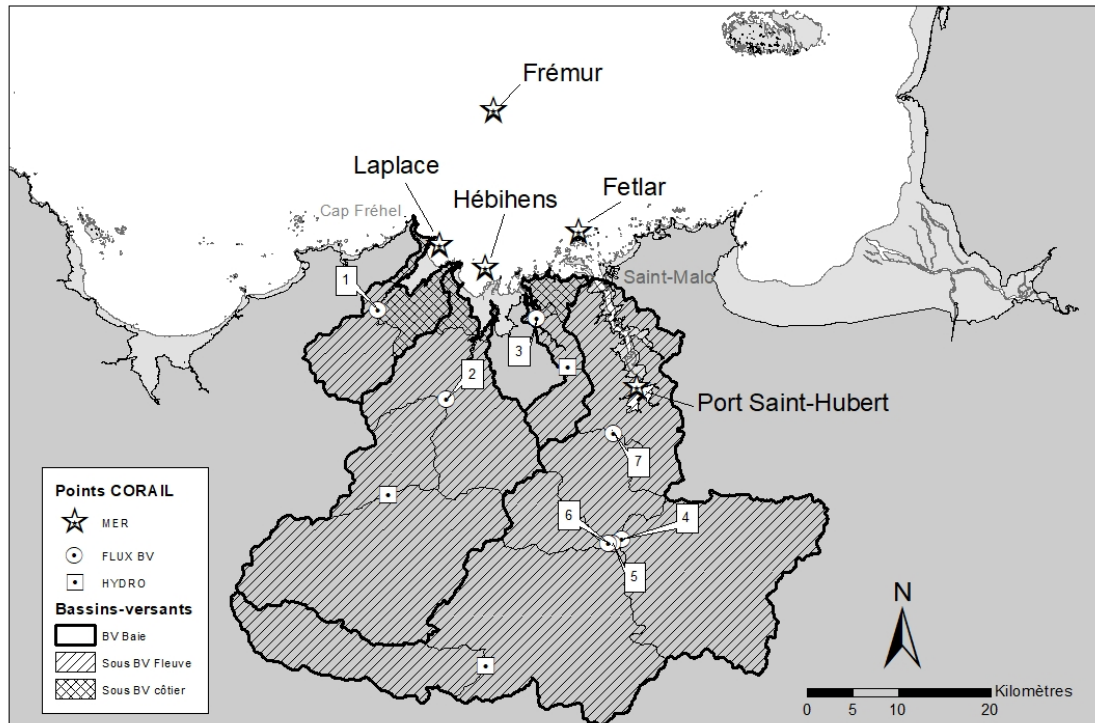


Figure 14 : Carte des points de prélèvements CORAIL : points en mer et points fluviaux (concentrations et débits) avec les bassins versants associés

¹ <https://envlit.ifremer.fr/Surveillance-du-littoral/Phytoplancton-et-phycotoxines>

² <https://www.somlit.fr/>

Les autres sources de données sont :

- le Conseil Départemental du 22 pour les concentrations 2021 en nutriment sur certains fleuves,
- la Banque HYDRO en ligne pour les débits quotidiens 2021 de points de références,
- les études SOGREAH 2002 [9] et NOVELTYS 2012 [10] pour mener des comparaisons entre les flux estimés à l'époque et ceux de CORAIL.

La figure suivante présente la synthèse des données disponibles de débit et de nutriments sur la côte d'Emeraude.

Données disponibles Flux (concentration et débit)	Frémur Fresnaie	Arguenon	Frémur Lancieux	Rance
CORAIL	Débit instantané + concentration mensuelle			
Plage de temps	déc. 20 - janv. 22	déc. 20 - janv. 22	déc. 20 - janv. 22	déc. 20 - janv. 22
Conseil Départemental 22 (CD 22) + banque HYDRO	Débit mensuel moyen (QmM) + concentration bimensuelle			
Plage de temps	mars 2010 -oct. 22	janv. 18 - oct. 22, très en amont (au niveau de Plancoët)	janv. 2020 - oct. 2022 (depuis 2017 mais pas de données en 2019)	concentration sporadique
SOGREAH 2002	Flux 95-2000 calculé sur périodes : Printemps (Fév.- Mai) et été (Juin-Sept.) - Hors Rance – basé sur données CD			
NOVELTYS 2012	Flux 2010, année hydrologique - uniquement sur Arguenon – Lancieux – concentrations calculées à partir des débits			

Figure 15 : Données disponibles débit et nutriment des fleuves principaux de la côte d'Emeraude (Frémur Fresnaie, Arguenon, Frémur Lancieux et Rance)

2.1.2 Limites des données

Le premier parti pris par CORAIL est de ne retenir que les principaux fleuves de la côte d'Emeraude. Mais ces quatre fleuves représentent 85 % de la surface totale drainée des bassins versants du secteur d'étude.

Les flux de nutriments sont le produit des concentrations en nutriment des débits à l'exutoire ultime de chaque fleuve. Les contraintes de mesures de ces paramètres induisent de nombreuses approximations :

- Concentration : les concentrations mesurées ne sont que mensuelles et ne prennent pas en compte leur variabilité quotidienne, voire horaire, induite par les pratiques, le lessivage des sols et la variation des débits. On utilise les données de concentration du CD 22 pour discuter des évolutions du Frémur de la Fresnaie, on utilise les données de concentration de CORAIL pour faire les comparaisons entre les baies. Il y a environ 20% d'erreur entre l'utilisation des données de concentrations bimensuelle du CD22 et les concentrations mensuelles de CORAIL.
- Débit : Les débits du Conseil Départemental 22, ou de la banque HYDRO, sont souvent très éloignés des exutoires (jusqu'à seulement 15% de représentativité en surface : cf. figure 14

- point HYDRO et 15) de l'exutoire. La méthode d'extrapolation par les rapports des surfaces intègre des erreurs (elle ne prend pas en compte l'hétérogénéité des sols et sous-sols, des activités et des passages des intempéries). En revanche, les débits instantanés mesurés lors des passages de CORAIL sont peu représentatifs des débits mensuels (évolution intramensuelle et influence des ouvrages hydrauliques). Une comparaison de l'utilisation des différentes données de débits disponibles sur le bassin versant du Frémur de la Fresnaie a montré que l'extrapolation d'un débit mensuel moyen (QmM) à partir d'une unique mesure en instantané par mois induisait une erreur de 40%. Tandis que l'extrapolation d'un débit à l'exutoire à partir d'un débit mesuré très en amont pouvait induire une erreur de 10 à 20%. Les débits utilisés dans CORAIL se basent sur les QmM de la banque HYDRO en complétant les données manquantes par les mesures instantanées au cas par cas.

	Surface BV km ²	Surface sBV point mesure CORAIL	%	coef	Surface point HYDRO km ²	%	coef
Arguenon	585,87	399,51	68	1,47	314,81	54	1,86
Frémur Fresnaie	77,12	68,25	88	1,13	68,25	88	1,13
Frémur Lancieux	59,65	56,97	96	1,05	36,93	62	1,62
Rance	937,08	839,22	90	1,12	144,34	15	6,49

Figure 16 : Tableau des données surfaciques des bassins versants et des points de mesures du débit

2.2 Observation des séries de données (concentrations, débits et flux des nutriments)

Les données disponibles sur le Frémur de la Fresnaie constituent le jeu le plus complet de la côte d'Emeraude. Le CD22 dispose d'une série de concentration mensuelle en nutriment depuis 1997 et de valeur de débit journalier depuis 2010.

2.2.1 Concentrations des nitrates et des phosphates en baie de la Fresnaie depuis 1997

Les nitrates représentent l'élément majoritaire des nutriments. Les concentrations en nitrates sont de l'ordre de 75 fois supérieures aux phosphates. La figure suivante présente les concentrations en nitrate sur plus de 20 ans.

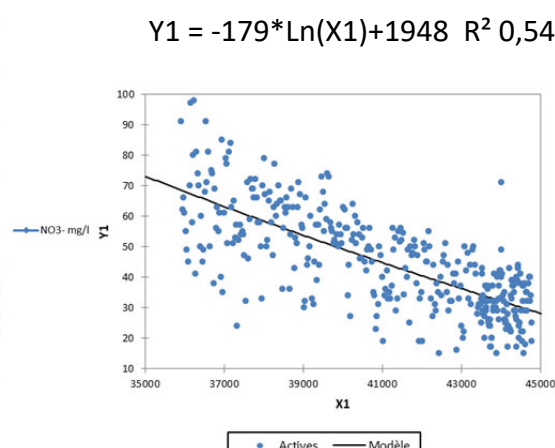
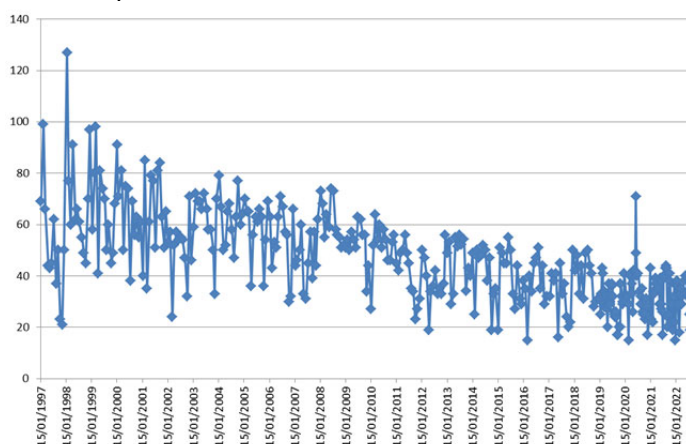


Figure 17 : Courbes d'évolution des concentrations du nitrate (mg/l) depuis 1997 sur le Frémur de la Fresnaie et régression linéaire – données CD 22

Il y a une décroissance nette au cours du temps des concentrations en nitrates dans le bassin versant de la baie de la Fresnaie, à mettre en lien avec les efforts menés dans le cadre du plan algues vertes depuis 2010. Elles ont été divisées par deux depuis 1997. Les concentrations montrent une baisse depuis 1998 (intervalle de 40 à 100 mg/l) jusqu'à 2020 (intervalle de 20 à 40 mg/l).

Cette tendance ne se retrouve pas dans le suivi des phosphates. Ceux-ci oscillent autour d'une valeur moyenne de 0,44 mg/L. Les concentrations semblent stables dans le temps et plutôt dépendantes de la fluctuation des débits, ce qui explique une légère évolution interannuelle.

2.2.2 Contexte hydrologique de l'année 2021 et débits du Frémur

2.2.2.1 Pluviométrie et débit

La figure suivante présente le cumul annuel pluviométrique à la station de Pleurtuit depuis 1986. L'année 2021 (674 mm) est légèrement déficitaire par rapport aux trente dernières années (- 73 mm), avec des mois plus secs sur les périodes hivernales.

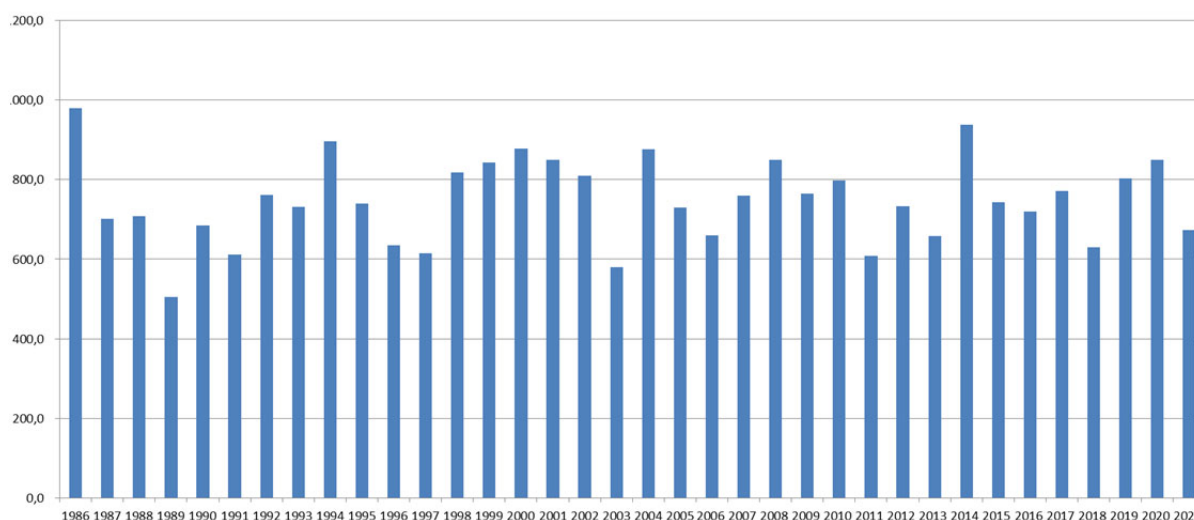


Figure 18 : Pluviométrie annuelle à la station de Pleurtuit depuis 1986

On retrouve ce déficit pluviométrique dans la faiblesse du débit moyen mensuel du mois de janvier par rapport aux dix dernières années (figure suivante), mais pas sur le reste de l'année.

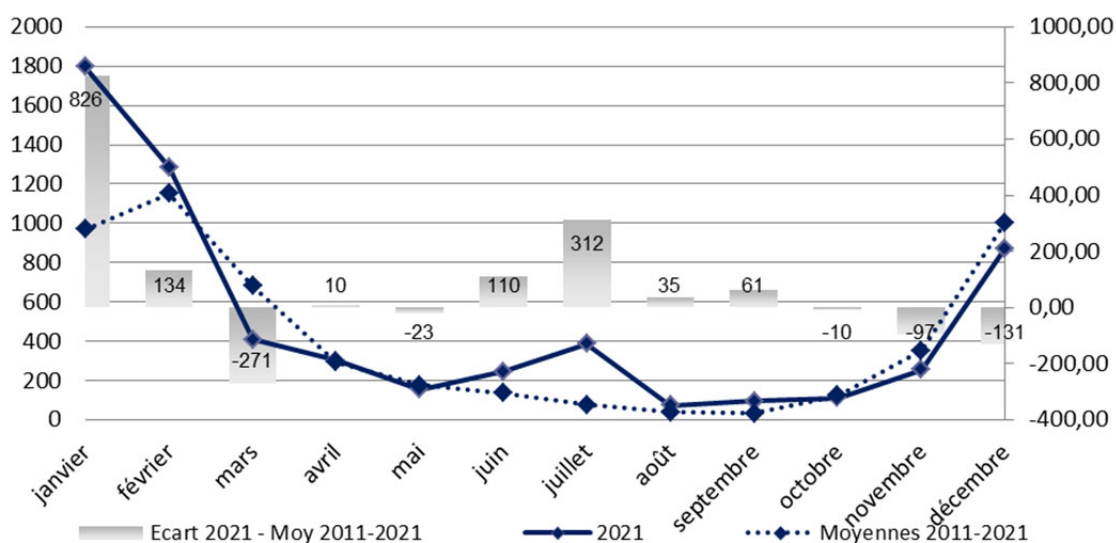


Figure 19 : Débit moyen mensuel (l/s) 2021 du Frémur de la Fresnaie et écart à la moyenne depuis 2011

En matière de volume d'eau total (figure suivante), l'année 2021 montre un bilan plutôt positif (15 Mm³, +19%). Du point de vue de l'année hydrologique (août 2020 - juillet 2021), 2021 présente un déficit de -25 %. Ces valeurs font de 2021 une année plutôt représentative des dix dernières années.

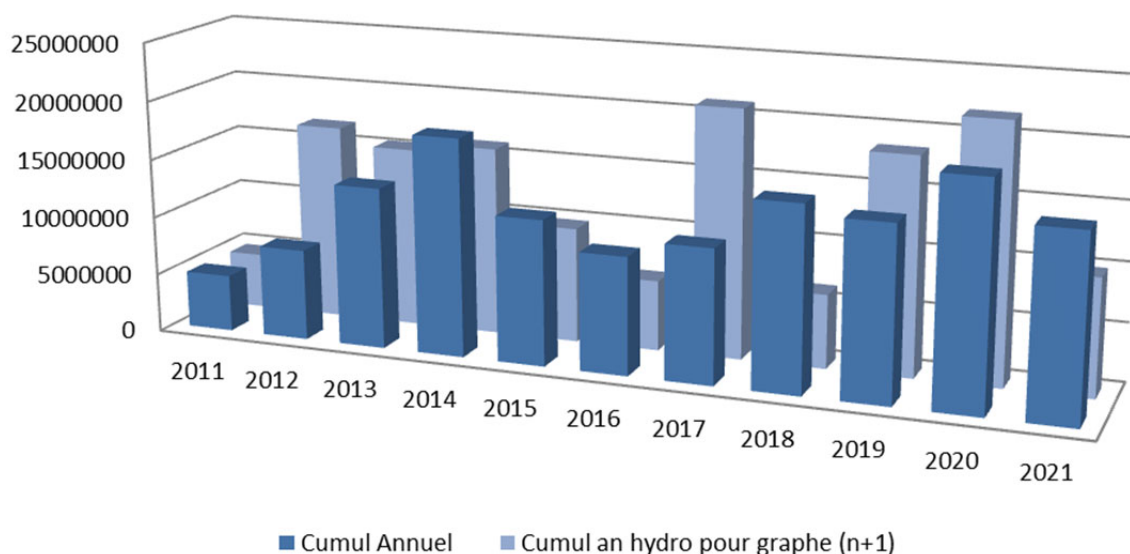


Figure 20 : Volume annuel en m³ (calendaire et hydrologique (d'août à juillet n+1)) sur le Frémur de la Fresnaie depuis 2011

2.2.2.2 Concentration et flux de nitrates sur le Frémur de la baie de la Fresnaie

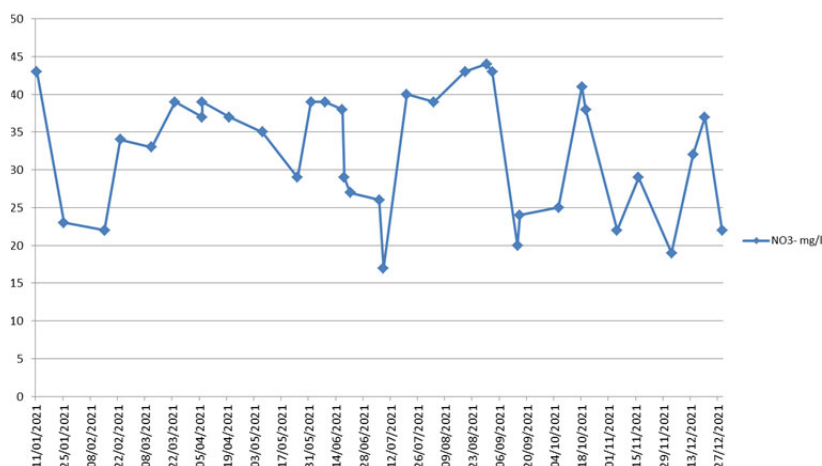


Figure 21 : Evolution 2021 des concentrations en nitrates dans le Frémur de la Fresnaie - données CD 22

Les concentrations en nitrate oscillent autour d'une valeur moyenne de 32,17 mg/L toute l'année, avec un écart type de 8,2 mg/L. Elles ne sont pas dépendantes de la saisonnalité.

La figure suivante présente les flux des nitrates en tonnes par mois. La fluctuation des quantités de nitrate à l'embouchure du Frémur de la Fresnaie est surtout dépendante de la variation des débits. 2021 montre des variations en nitrates proches de la moyenne des 10 dernières années hormis pour le mois de juillet.

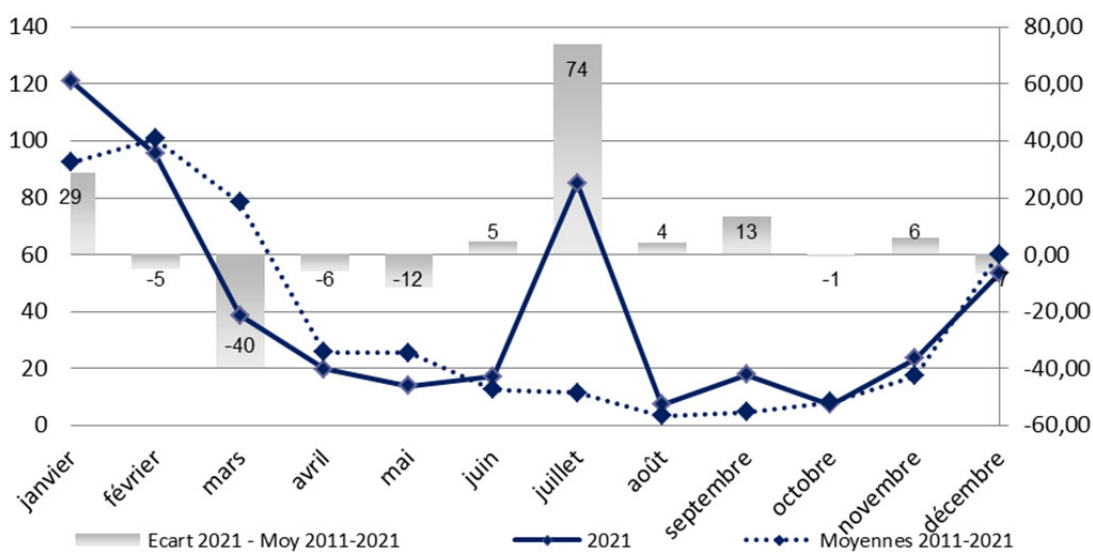


Figure 22 : Flux 2021 mensuels moyens de nitrate (T/m) du Frémur de la Fresnaie et écart à la moyenne depuis 2011 - données CD 22

En matière de quantité de nitrate totale (figure suivante), l'année 2021 montre un bilan équivalent aux dix dernières années (501 T, + 13%). Du point de vue de l'année hydrologique (août 2020 - juillet 2021), 2021 présente un déficit de -11 %. Ces valeurs font de 2021 une année plutôt représentative des dix dernières années.

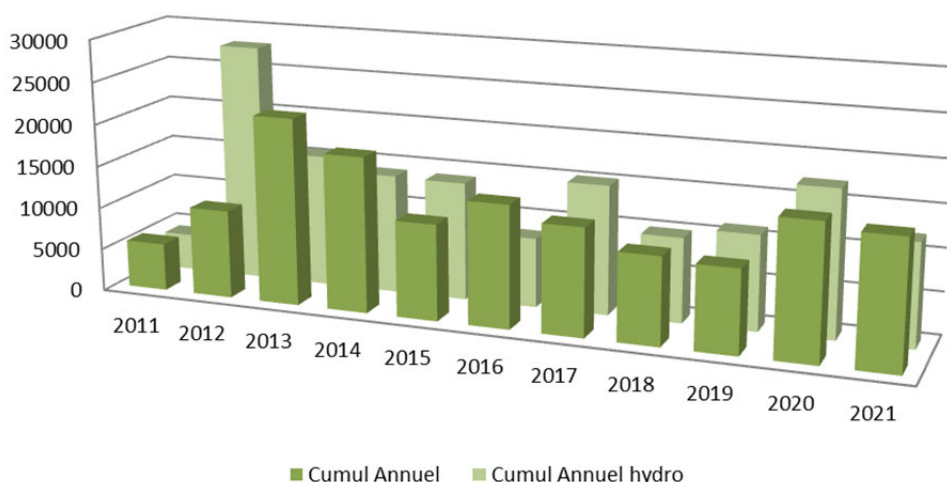


Figure 23 : Quantité annuelle de nitrate (T) (calendaire et hydrologique (d'août à juillet n+1)) sur le Frémur de la Fresnaie depuis 2011 - données CD 22

2.2.2.1 Concentration et flux de phosphates sur le Frémur de la baie de la Fresnaie

Les deux figures suivantes présentent respectivement les flux moyens mensuels en phosphate et la quantité totale annuelle dans le Frémur de la baie de la Fresnaie.

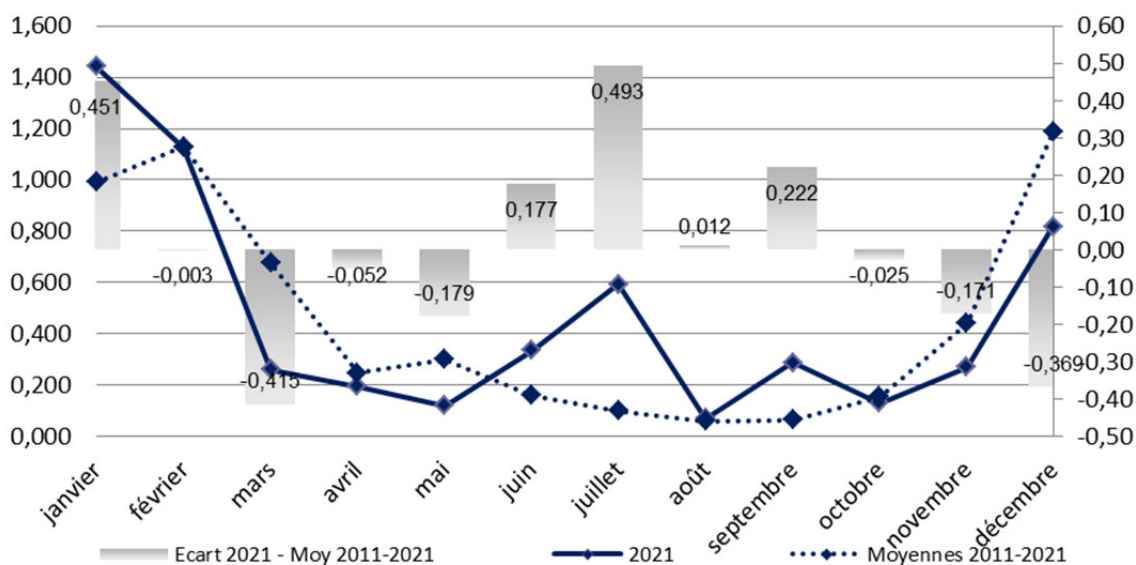


Figure 24: Flux 2021 mensuels moyens de phosphate (T/m) du Frémur de la Fresnaie et écart à la moyenne depuis 2011 - données CD 22

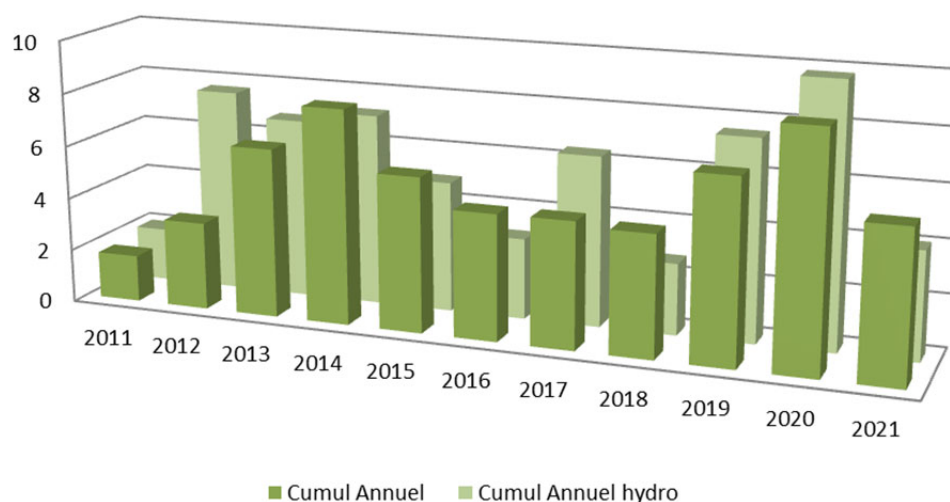


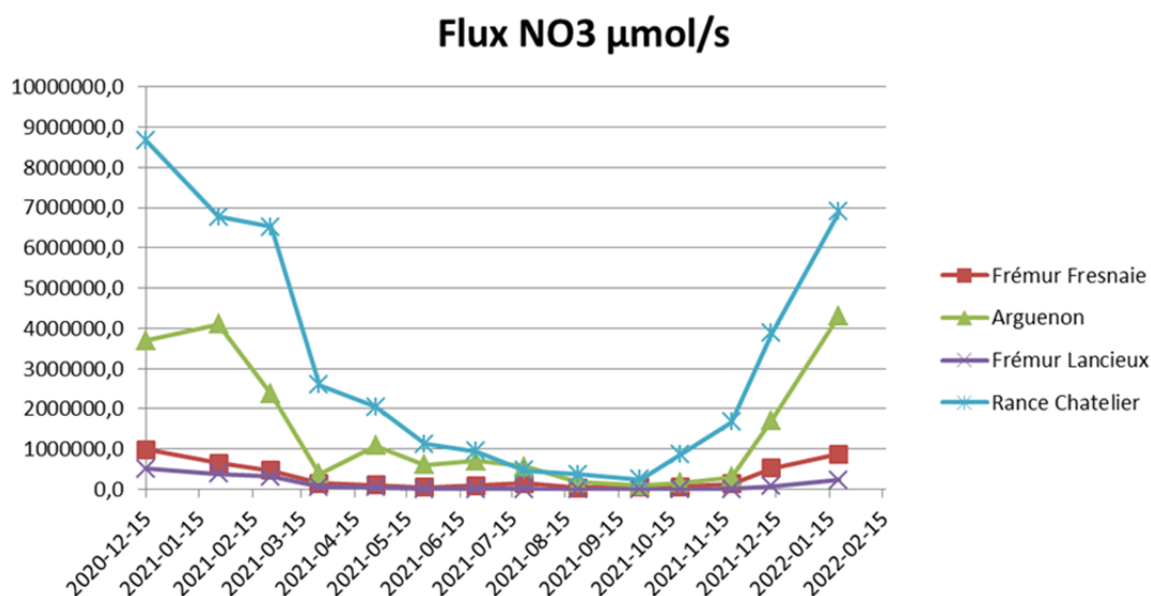
Figure 25 : Quantité annuelle de phosphate (T) (calendaire et hydrologique (d'août à juillet n+1)) sur le Frémur de la Fresnaie depuis 2011 - données CD 22

On retrouve les mêmes observations que pour le nitrate sur le caractère représentatif des valeurs de 2021 par rapport aux cinq à dix dernières années.

Les quantités de phosphates sont environ 80 fois moindres que les nitrates sur 2021, mais ils suivent les mêmes tendances et les mêmes comparaisons avec la moyenne des dix dernières années. L'année 2021 montre un flux dans la moyenne des dix dernières années (6 T, + 2,5%). En revanche on est à -28% en matière d'année hydrologique (août 2021- juillet 2022), en raison d'une pluviométrie plus faible sur l'hiver 2022.

2.2.2.2 Comparaison des flux de nutriment entre les bassins versants de la côte d'Emeraude

La figure suivante présente les variations des flux de nitrate et de phosphate aux quatre exutoires suivis dans CORAIL.



Flux PO4 $\mu\text{mol/s}$

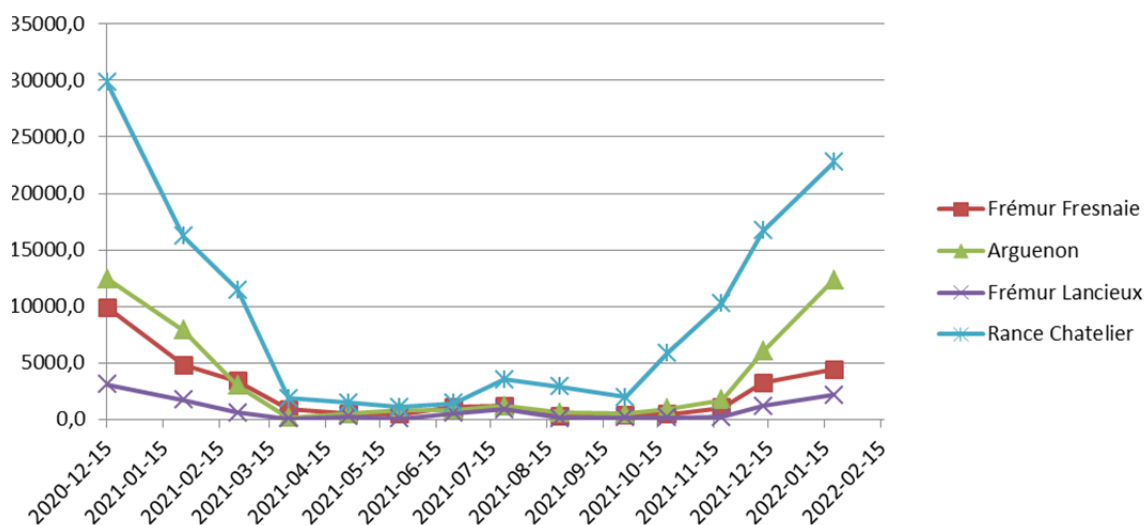


Figure 26 : Flux de nitrate et de phosphate aux exutoires des fleuves suivis dans CORAIL (de déc. 2020 à fév. 2022)

L'évolution des nutriments suit une tendance saisonnière classique avec un maximum en hiver et un léger rebond vers la fin de l'été.

Le tonnage total de nutriment apporté à la mer est lié à la surface totale de chaque bassin versant. Le bassin le plus producteur est celui de la Rance avec plus de 4000 T de nitrate par an, contre 150 T pour celui du Frémur de Lancieux (figure suivante). Le rapport maximal de production de nitrate en tonnes/an est ainsi de 13 entre les quatre fleuves.

	Quantité NO3- T 2021	Flux spécifique annuel T/an/Km ²
Arguenon	1973	3,4
Frémur Fresnaie	401	5,2
Frémur Lancieux	149	2,5
Rance	4421	4,7

Figure 27 : Flux spécifiques de nitrate en 2021 des quatre bassins versants suivis dans CORAIL

Le calcul du flux spécifique permet de hiérarchiser les bassins versants par rapport à leur production par unité de surface. Le bassin du Frémur de la Fresnaie est le plus producteur au kilomètre carré (5.2 km²) avec un rapport de 2 par rapport au bassin le moins producteur (toujours le Frémur de Lancieux). Ce chiffre est à mettre en lien avec la configuration des bassins versants et leur activité. Le Frémur de la Fresnaie est ainsi le bassin versant présentant la plus grande densité d'élevage.

2.2.2.3 Comparaison avec l'étude SOGREAH 2002

Les tonnages mesurés lors de CORAIL en 2021 ont été rapportés aux mêmes périodes que pour l'étude SOGRAH de 2002 [12] (figure suivante). Cela permet de comparer les évolutions entre la période d'étude de SOGREAH (1995-2000) avec l'année 2021 considérée comme représentative de ces 5 dernières années (cf. § 2.2.1).

		Frémur F			Arguenon*			Frémur L		
		[NO3]		Flux NO3	[NO3]		Flux NO3	[NO3]		Flux NO3
		Q l/s	mg/l	T/j	Q l/s	mg/l	T/j	Q l/s	mg/l	T/j
SOGREAH - Agrocampus 2002	Printemps 95- 2000	612	57	3	5340	56	26	488	20	0,8
	Été 95-2000	125	41	0,4	920	35	3	100	7	0,1
CORAIL	Printemps 2021	607	20	1	5966	20	10	482	11	0,5
	Été 2021	226	27	0,5	1547	14	2	185	1,6	0,0
Calcul printemps	% printemps	35			40			55		
	Facteur	2,9			2,5			1,8		
Calcul été	% été	139			75			63		
	Facteur	0,7			1,3			1,6		

Figure 28 : Comparaison des flux nitrate entre 2021 (CORAIL) et 2002 (SOGREAH)

Sur cette comparaison, les flux hivernaux (« période printemps » qui correspond ici à février-mai) ont été divisés par 2 à 3 en 20 ans sur les trois fleuves. La comparaison est la plus pertinente sur cette période. Les comparaisons estivales (ici sur la période de juin à septembre) sont plus contrastées et moins significatives (0,7 à 1,6).

Un exercice similaire a été mené à partir des données de l'étude NOVELYS [13]. Mais les résultats sont moins robustes car n'avons pas disposé de suffisamment de données pour juger du caractère représentatif de 2010, année analysée dans l'étude NOVELTYS. De plus, elle n'a porté que sur deux bassins versants. Les résultats ont montré une diminution par 2,3 du flux spécifique annuel de nitrate pour l'Arguenon et de 1,1 pour le Frémur de Lancieux.

2.3 Modélisation des flux de nutriments

2.3.1 Comparaison des résultats du modèle avec les suivis en mer pour les nutriments

La comparaison stricte entre les sorties du modèle et les données *in-situ* sont plus délicates à réaliser pour les nutriments que pour les paramètres physiques, du fait des phénomènes 1-biologiques (production primaire - reminéralisation), 2-physiques (décantation) et 3-des hypothèses sur les flux entrants (constants sur un mois) qui ne sont pas pris en compte par les calculs. Ce paragraphe permet de commenter les erreurs induites par ces choix.

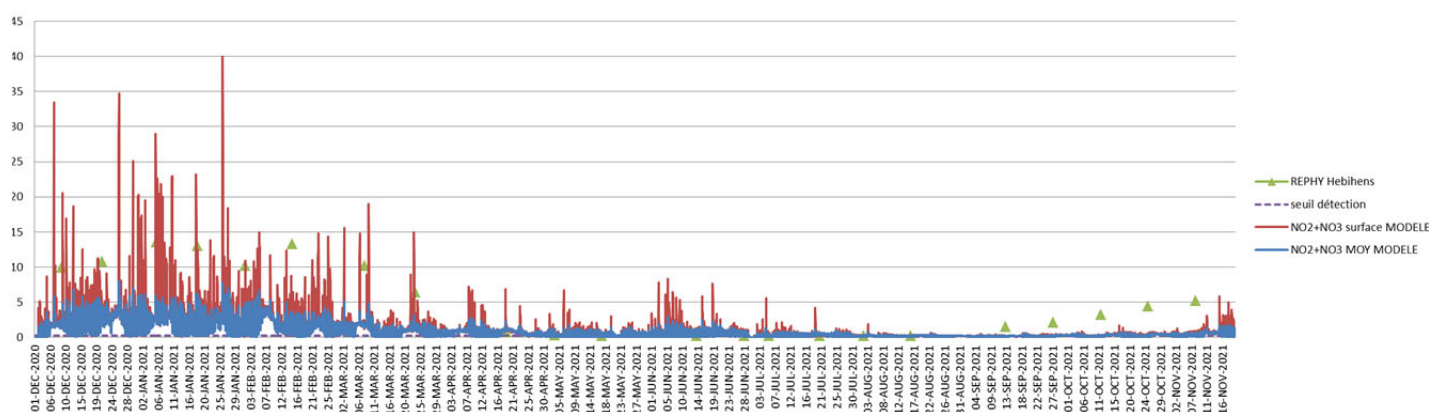


Figure 29 : Courbes d'évolution des concentrations en nitrate+nitrite ($\mu\text{mol/l}$) au point « Les Hébihens » (bleu 2D, rouge 3D surface) et mesure ponctuelle *in-situ* (points verts)

La figure précédente montre que les données moyennées (2D en bleu) sont systématiquement en dessous des données réelles (point vert). Les données de surface (3D sub surface - courbe rouge) sont plus proches des données *in-situ* acquises justement en sub-surface.

L'erreur entre les données du modèle en surface est en moyenne de 89% (soit un rapport d'environ de 2). On peut conclure que les résultats du modèle fournissent des informations sur l'ordre de grandeur des nutriments ainsi que sur leur tendance et permettent de réaliser des comparaisons relatives entre les baies.

Un zoom sur le mois de mars (figure suivante) permet de montrer que les concentrations sont généralement corrélées avec les cycles de marée. Elles sont maximales avec la basse mer et peuvent présenter des pics de concentration à l'étape. On observe un décrochage entre les marées et les concentrations au moment des mortes eaux où le bruit de fond moyen est le plus fort.

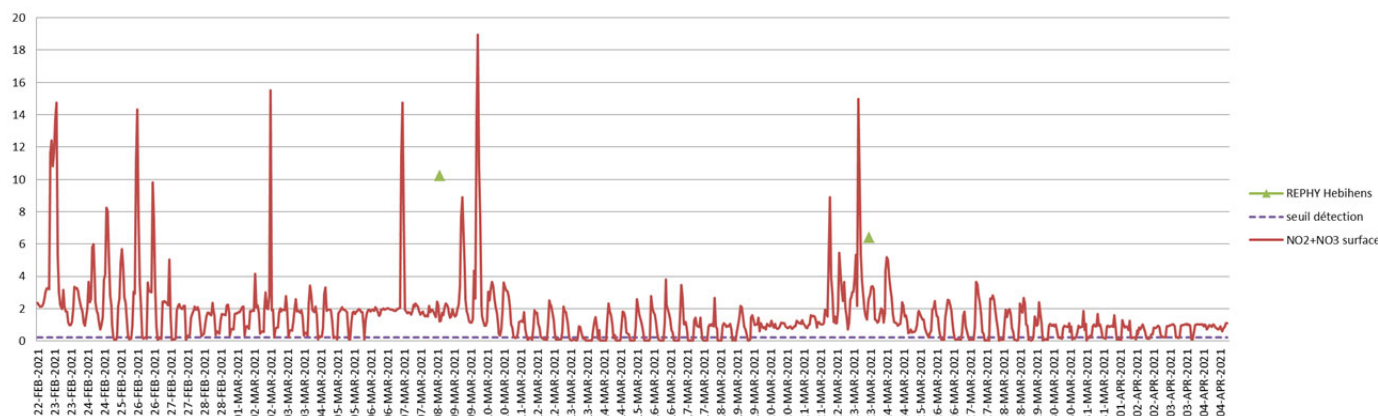


Figure 30 : Courbes d'évolution des concentrations en nitrate+nitrite ($\mu\text{mol/l}$) au point « Les Hébihens » (3D surface) et mesure ponctuelle *in-situ* (points verts) – Zoom sur février/ mars

La figure suivante présente les mêmes comparaisons au point estuarien « Port Saint-Hubert ».

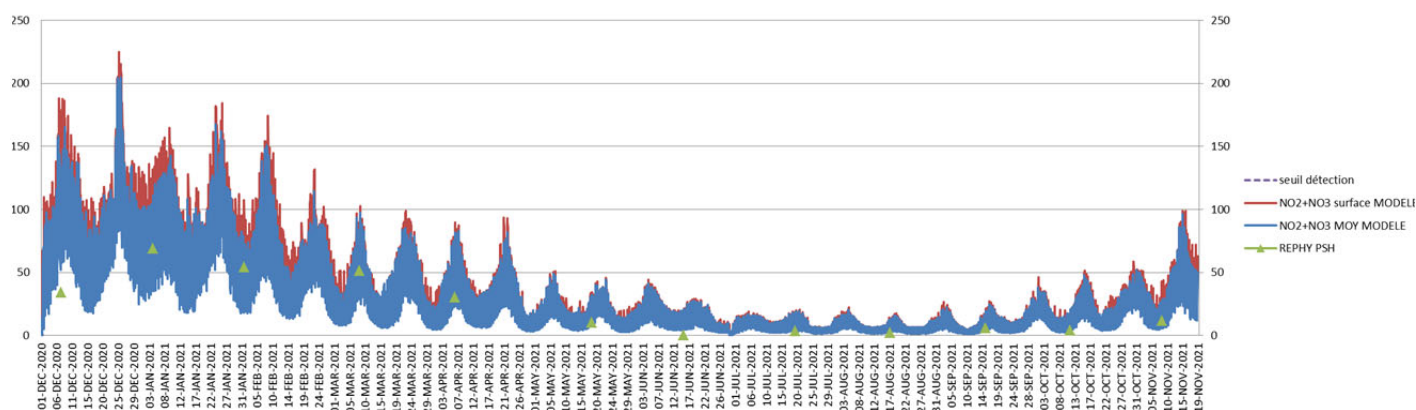


Figure 31 : Courbes d'évolution des concentrations en nitrate+nitrite au point « Les Hébihens » (bleu 2D, rouge 3D surface) et mesure ponctuelle *in-situ* (points verts)

A Port Saint-Hubert, les résultats 2D et 3D surface sont davantage comparables, avec une légère augmentation en surface. Le point Port Saint-Hubert est situé en estuaire au niveau d'un resserrement et représente une zone de fort courant et de brassage.

L'erreur entre les données du modèle en surface est en moyenne de 114% (soit un rapport d'environ de 2). C'est équivalent aux observations au point « Les Hébihens ». On note cependant que les résultats 3D et 2D sont très proches du fait que ce point est très brassé et peu profond.

Une autre illustration de la non prise en compte des processus biologiques par le modèle est celui des relations salinité-nutriment.

Au point « Les Hébihens », le modèle présente une très forte relation entre les deux paramètres car elle ne repose que sur les équations physiques (partie de gauche de la figure suivante – $R^2=0,906$). Tandis que dans la réalité (partie de droite – $R^2=0,14$), cette relation est bien plus faible. On note cependant que les deux relations proposées sont assez similaires (pente et ordonnée à l'origine), ce qui permet d'indiquer que le modèle propose des tendances acceptables.

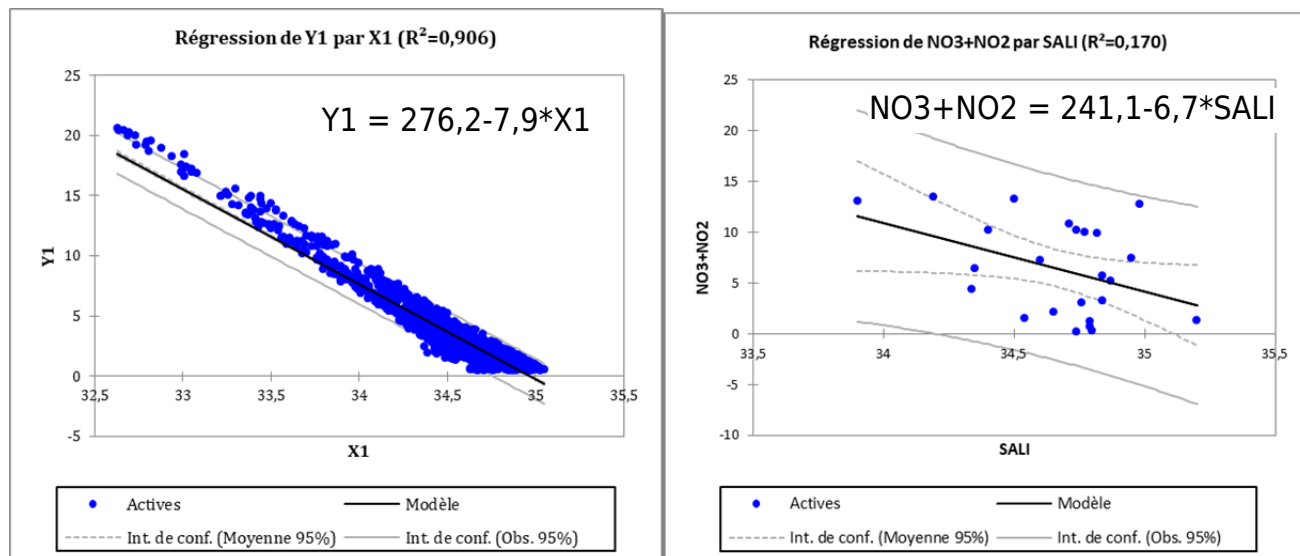


Figure 32 : Relation nutriment/salinité au point REPHY "Les Hébihens" - à gauche les résultats du modèle nitrate=f(salinité), à droite les données réelles NO2+NO3=f(salinité)

2.3.2 Observations sur les résultats de simulation des panaches de nutriments en 2021

Ce paragraphe présente les panaches de dispersion des nutriments (NO2+NO3 et PO4) en valeur moyenne et maximale annuelle et par saison

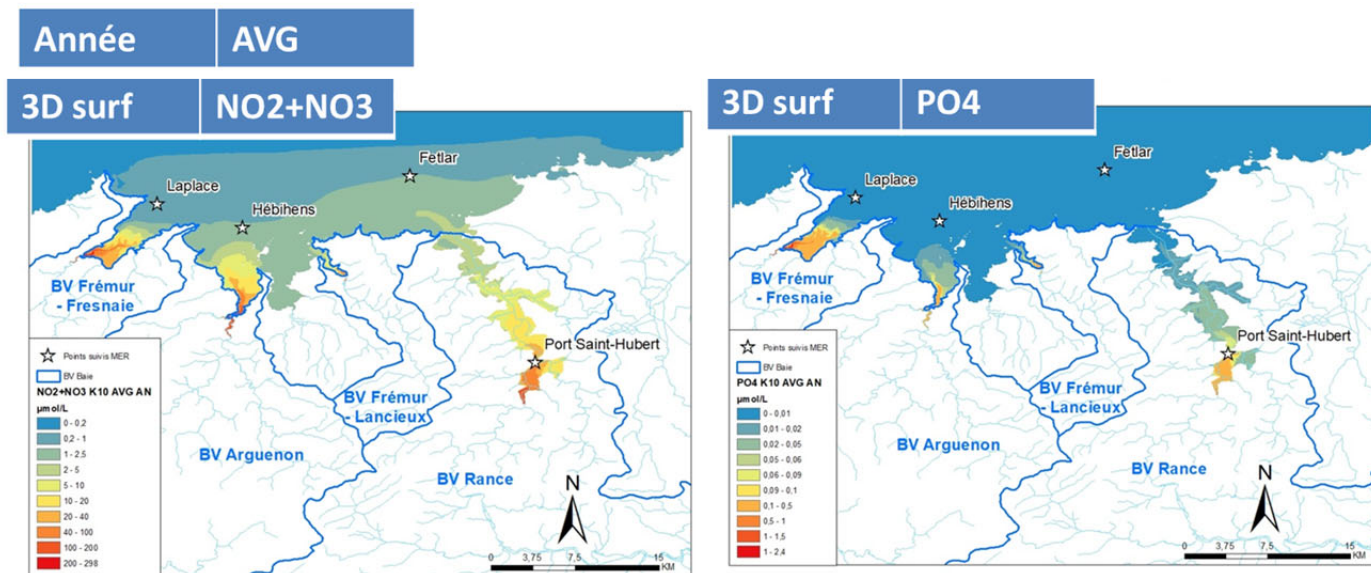


Figure 33 : Panaches moyens sur l'année 2021 en NO2+NO3 et en PO4

Les panaches moyens sur l'année reflètent les observations faites sur les flux d'entrée. La taille et la concentration des panaches sont proportionnelles aux quantités de flux annuels de chaque fleuve avec dans l'ordre d'importance décroissant : la Rance, l'Arguenon, le Frémur de la Fresnaie et le Frémur de Lancieux. Ce dernier est peu visible.

En moyenne, l'ensemble du secteur côtier rencontre des concentrations en nitrate de l'ordre de 5 µmol/l. Il faut aller au-delà des 10 km au large pour que la présence des nutriments soit très faible en moyenne.

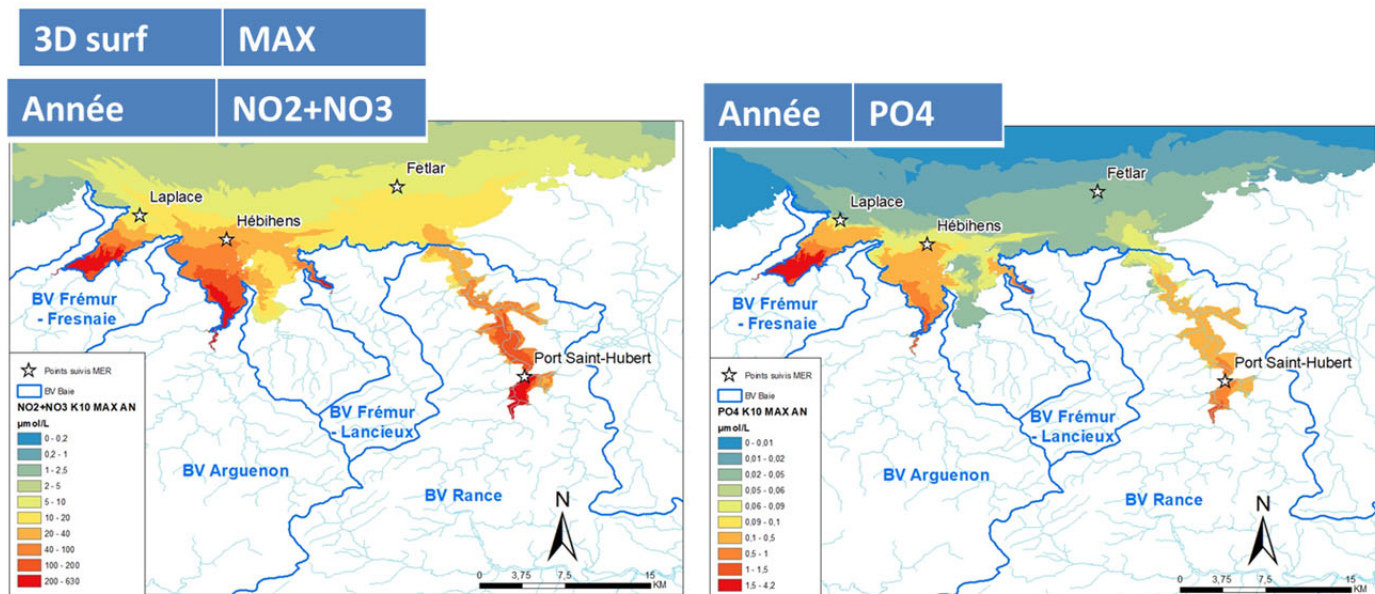


Figure 34 : Panaches maximums sur toute l'année 2021 en NO₂+NO₃ et en PO₄

Les concentrations maximales correspondent aux flux hivernaux. Les fonds de baie et les estuaires ont des concentrations maximales en nitrate supérieures à 40 µmol/l. On distingue mieux sur ces cartes, les zones d'échanges entre les baies d'après les extensions maximales des panaches.

La carte suivante présente les moyennes en nitrate mais par saison.

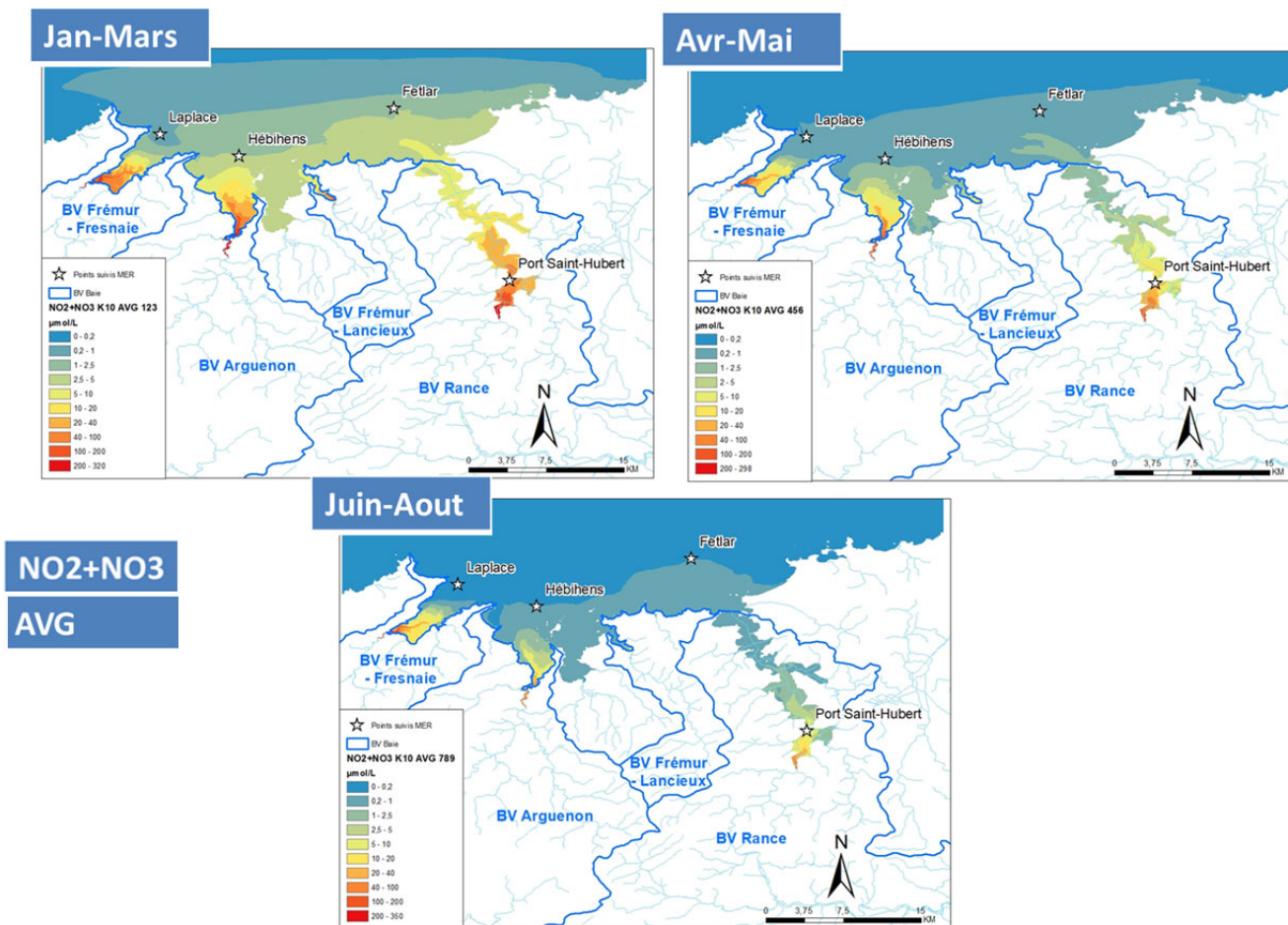


Figure 35 : Panaches moyens saisonniers sur l'année 2021 en NO₂+NO₃

L'évolution dans le temps des moyennes en nitrate montre une décroissance des panaches en lien avec la pluviométrie des saisons. On retrouve que la saison des concentrations maximales est l'hiver. Les observations sont similaires avec les moyennes saisonnières du phosphate.

2.3.3 Observations instantanées sur la dynamique du panache des nitrates + nitrites sur 15 jours (annexe numérique : vidéo NO2 NO3 6 au 15 janv. SURF)

Le modèle permet de suivre dynamiquement l'évolution des panaches de nutriment heure par heure par le format vidéo. Une annexe numérique a été extraite sur un cycle de marée de vives-eaux (du 6 au 15 janvier, coefficient 56 à 92) et avec des flux maximums pour les NO2+NO3 en sub-surface.

◀ Décembre 2020		Janvier 2021					Février 2021 ▶	
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche		
28	29	30	31	1	2	3		
65 69	71 74	76 78	79 80	81 80	80 79	77 75		
4	5	6	7	8	9	10		
72 69	66 63	60	58 56	56 57	59 62	66 71		
11	12	13	14	15	16	17		
75 80	84 87	89 91	92 92	92 90	87 84	80 75		
18	19	20	21	22	23	24		
71 65	60 55	49 44	40	37 35	34 35	37 41		
25	26	27	28	29	30	31		
46 51	56 61	66 71	76 80	84 87	90 92	93 93		

Figure 36 : Coefficient de marée du mois de janvier 2021 (source : maree.info)

La figure suivante est un extrait de la vidéo au moment de l'extension maximale des panaches.

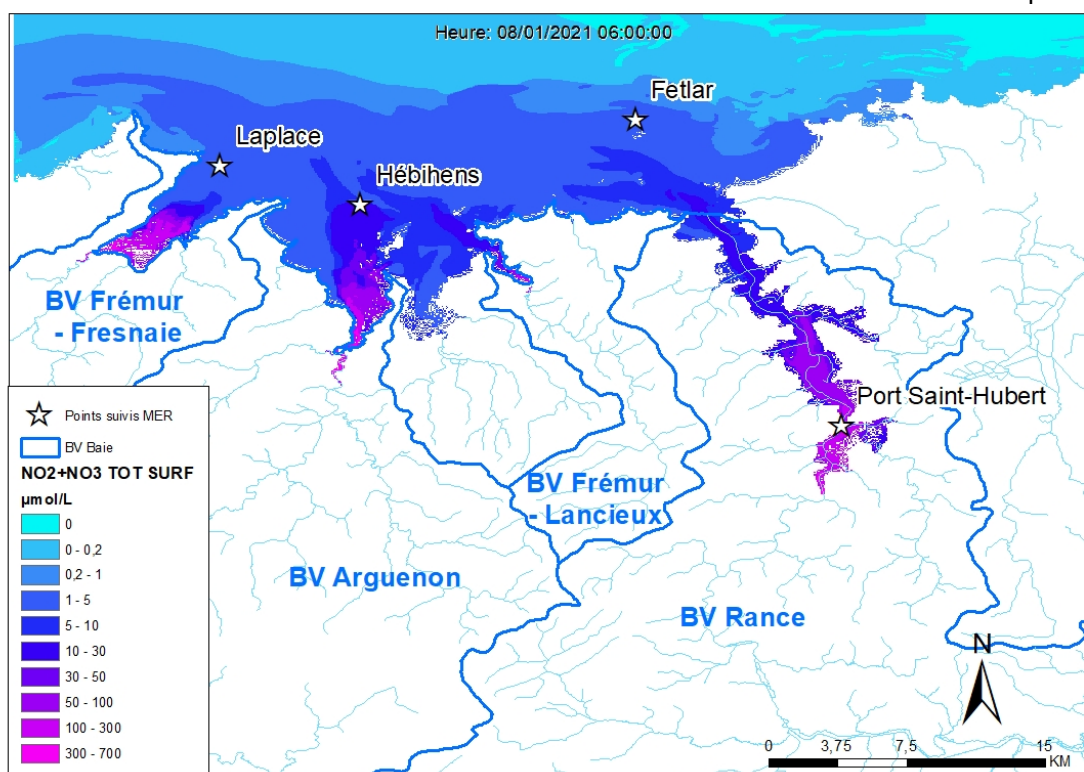


Figure 37 : Carte des panaches instantanés maximum de NO2+NO3 du 8 janvier 2021 en sub-surface

En sub-surface, les panaches supérieurs à 5 µmol/L restent dans les périmètres des baies respectives, sauf pour l'Arguenon, où les apports de l'Arguenon couvrent la baie de Lancieux et l'embouchure de la baie de la Fresnaie. Les apports de la Rance s'étendent entre la pointe de la Varde et du Meinga. L'influence des panaches est plus éloignée et plus diluée lors des vives eaux, et réciproquement moins éloignée et plus concentrée par mortes eaux.

Les panaches inférieurs à 5 µmol/L : l'ensemble du périmètre du modèle est concerné par des concentrations inférieures à 5 µmol/L dont l'origine se partage essentiellement entre l'Arguenon et la Rance.

Au fond, les panaches sont beaucoup moins dispersifs. Les échanges entre les baies pour des concentrations supérieures à 5 µmol/L ne s'observent plus qu'à partir de l'Arguenon et pour des forts coefficients.

2.3.4 Contribution relative des bassins versants en apport de nitrates+nitrites sur 15 jours (annexe numérique : vidéo NO2 NO3 6 au 7 janv. CONTRIB)

Le modèle permet de suivre les panaches propres à chaque source indépendamment des autres. Cela renseigne plus précisément sur leur aire d'influence et leur contribution relative en chaque point du modèle. Une annexe numérique a été extraite sur un cycle de marée de vives-eaux (du 6 au 15 janvier, coefficient 56 à 92) et avec des flux maximums pour les NO2+NO3 en sub-surface.

La figure suivante est un extrait de la vidéo au moment de l'extension maximale des panaches.

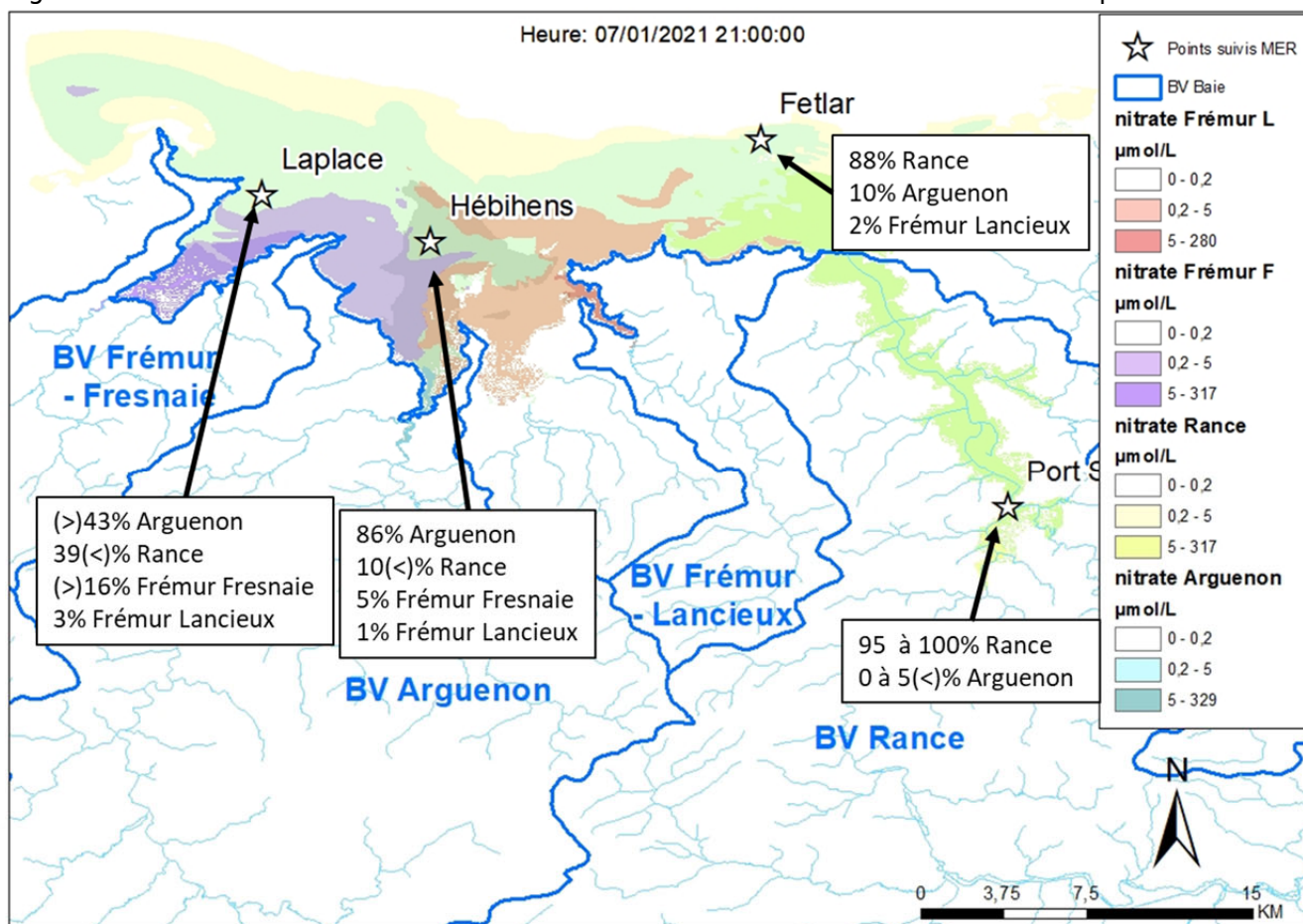


Figure 38 : Carte des panaches instantanés maximum de NO2+NO3 du 7 janvier 2021 en sub-surface – panaches distincts entre les quatre fleuves de l'étude CORAIL et contributions relatives aux points de suivi en mer

La figure présente l'étendue des panaches respectifs des quatre fleuves suivis dans CORAIL. Pour chacun d'eux, deux gammes de concentration sont représentées, de 0,2 à 5 $\mu\text{mol/l}$ =faible influence, et supérieure à 5 $\mu\text{mol/L}$ =forte contribution.

Pour rappel, en l'absence de la prise en compte du fonctionnement du barrage, l'extension minimale et maximale du panache de la Rance est surestimée. Les concentrations réelles de nutriments venant de la Rance sont supérieures au modèle dans l'estuaire Rance en amont du barrage, et inférieures sur le reste du littoral.

Les courants et les flux présents sur la côte d'Emeraude impliquent un mélange de plusieurs sources de nutriment sur de nombreux secteurs. L'influence des fleuves portent essentiellement sur leur baie respective, sauf pour l'Arguenon qui peut atteindre, avec une contribution supérieure à 5 $\mu\text{mol/l}$, la baie de Lancieux. Une plus faible influence (inférieure à 5 $\mu\text{mol/l}$) de l'Arguenon et de la Rance est présente sur tout le domaine. Les deux Frémur peuvent avoir une faible influence en bordure de leur baie, notamment sur la partie Nord de la baie de l'Arguenon.

Il est possible de calculer le pourcentage de contribution de chaque fleuve sur les points de suivi de l'étude. On ne retiendra dans cette analyse que les contributions relatives significatives. On observe que :

- Situé en fond d'estuaire de la Rance, le point « Port Saint-Hubert » est le plus concentré. Les nutriments sont entre 95 et 100% originaires de la Rance, tous coefficients confondus. L'influence de l'Arguenon y oscille entre 0 et 5%, elle est maximum en vives eaux. Elle est moindre dans la réalité en prenant en compte le fonctionnement du barrage.
- Fetlar se situe dans la baie de Saint-Malo, en embouchure de la Rance. Il est toujours majoritairement influencé par la Rance (influence légèrement surestimée ici en l'absence de la modélisation du fonctionnement réel du barrage), mais la contribution de l'Arguenon devient plus importante qu'à Port Saint-Hubert. Le Frémur de Lancieux est visible avec une contribution constante autour de 3%.
 - En mortes eaux (concentration totale maximale), les nutriments ont pour origine : 88 % la Rance, 10% l'Arguenon et 2 % le Frémur de Lancieux
 - En vives eaux (concentration totale minimale), les nutriments ont pour origine : 78 % la Rance, 19% l'Arguenon et 3 % le Frémur de Lancieux
- « Les Hébihens » est le point de suivi le plus central par rapport aux fleuves suivis. On y retrouve une contribution de chacun mais avec une nette domination de l'Arguenon pour les concentrations totales les plus fortes. Ces concentrations se rencontrent à basse mer, tandis qu'à pleine mer les panaches de la Rance ou du Frémur de la Fresnaie peuvent être dominants mais pour des concentrations très faibles, en fonction des coefficients et de la météo. Ainsi, en basse-mer (concentration totale maximale), on a en moyenne 86 % l'Arguenon, 10% la Rance (avec une légère surestimation), 5% le Frémur de la Fresnaie et 1 % le Frémur de Lancieux.
- Le point « Laplace » est éloigné des deux fleuves principaux. C'est le point qui présente les plus faibles concentrations en nutriment. Il peut être touché par le panache du Frémur de la Fresnaie mais à des concentrations plutôt faibles. En conséquence, les contributions relatives sont très variables sur ce point car un apport en faible concentration peut quand même représenter une part non négligeable du total.

Lorsque les concentrations sont un minimum significatives (> 1 $\mu\text{mol/L}$), les origines des nutriments sont à 43% l'Arguenon, 39% la Rance, 16% le Frémur de la Fresnaie et 3% le Frémur de Lancieux. La part de la Rance est certainement surestimée ici aussi.

2.3.5 Comparaison des simulations de CORAIL 2021 et de l'étude SOGREAH 2002

Une comparaison entre les sorties de modèle de l'étude SOGREAH de 2002 et de CORAIL 2021 peut être réalisée. Il s'agit de comparer les concentrations et les emprises des panaches simulés avec les données des flux moyens et maximums entre 1995-2000 d'une part et ceux de 2021 d'autre part. Les flux utilisés sont les flux entre février et mai pour la situation printanière et entre juin et septembre pour la situation estivale.

Les simulations sont en 2D et la même échelle de concentration est conservée pour les deux études. Il faut cependant noter que les simulations de CORAIL ne prennent pas en compte les flux venant de Matignon et de Lancieux et qu'il s'agit du cumul $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ pour CORAIL contre seulement le NO_3 pour SOGREAH. Ce dernier point peut être considéré comme peu significatif du fait que les nitrates (NO_3) sont très majoritaires par rapport aux nitrites (NO_2). Les concentrations en nitrites représentent 0,1 à 2% des concentrations en nitrates.

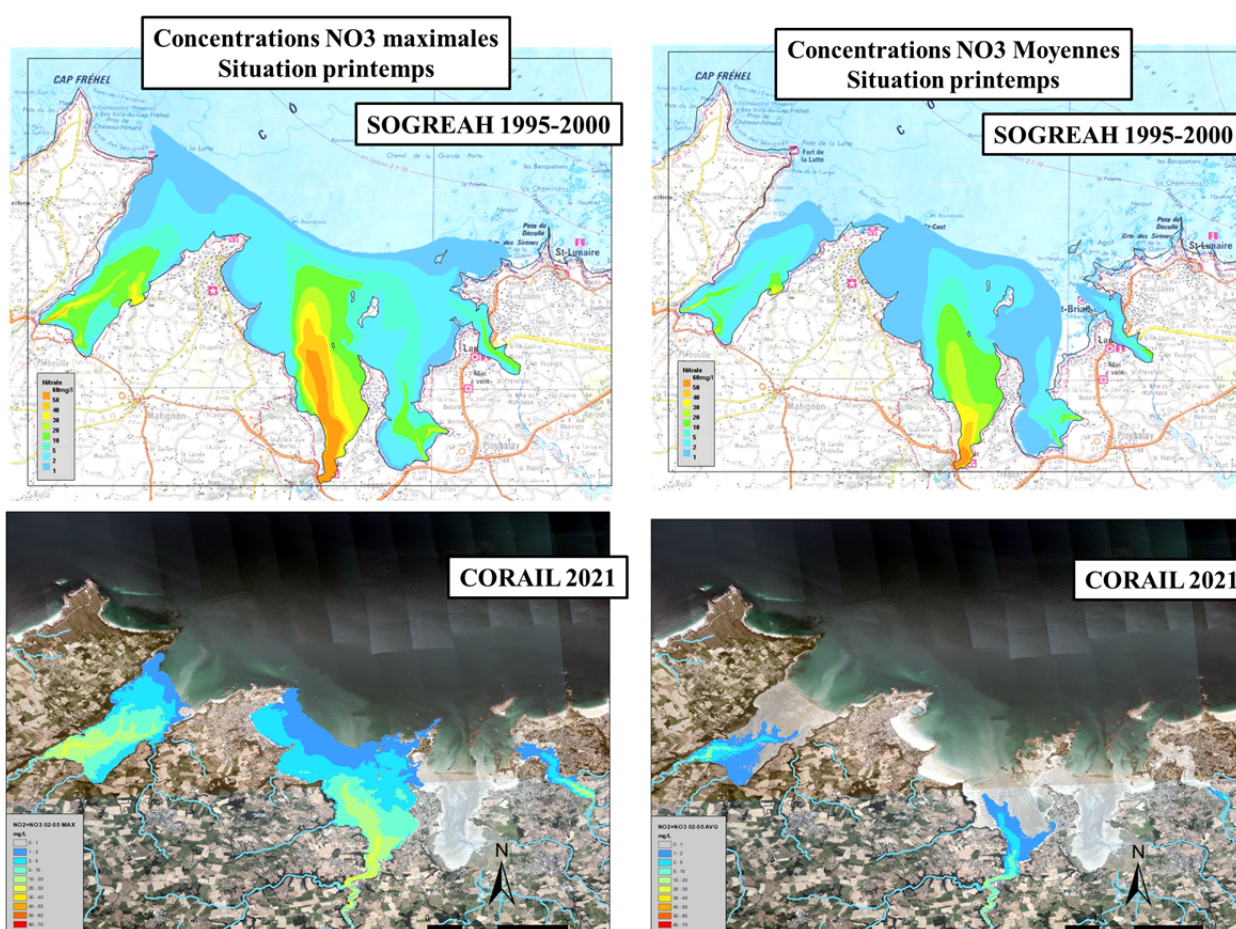


Figure 39 : Comparaison des résultats nitrates+nitrites CORAIL (2021) et nitrate SOGREAH (1995-2000) – situation de printemps

La figure précédente montre un recul général de l'emprise des panaches ainsi qu'une diminution des concentrations sur les simulations 2021. C'est la conséquence d'une diminution estimée par 2 à 3 des flux des trois fleuves entre les années 2000 et la fin des années 2020 (cf. § 2.2.2.3).

Sur les panaches maximums, la différence s'observe surtout sur les concentrations, tandis que le recul de l'emprise des panaches est plus impressionnant sur les flux moyens. Mais cela est en partie dû à un choix de légende qui ne permet pas de montrer les concentrations moyennes en dessous de 1mg/L (soit $16\ \mu\text{mol/L}$), alors que les concentrations relevées en mer de nos jours se situent plutôt entre 0 et $15\ \mu\text{mol/L}$. Autrement dit, l'absence d'une coloration des cartes dans ces

conditions de représentation ne veut pas du tout dire qu'il n'y ait pas régulièrement la présence de nutriment en quantité suffisante pour assurer un rôle écologique.

On peut formuler les mêmes observations sur la situation estivale (figure suivante).

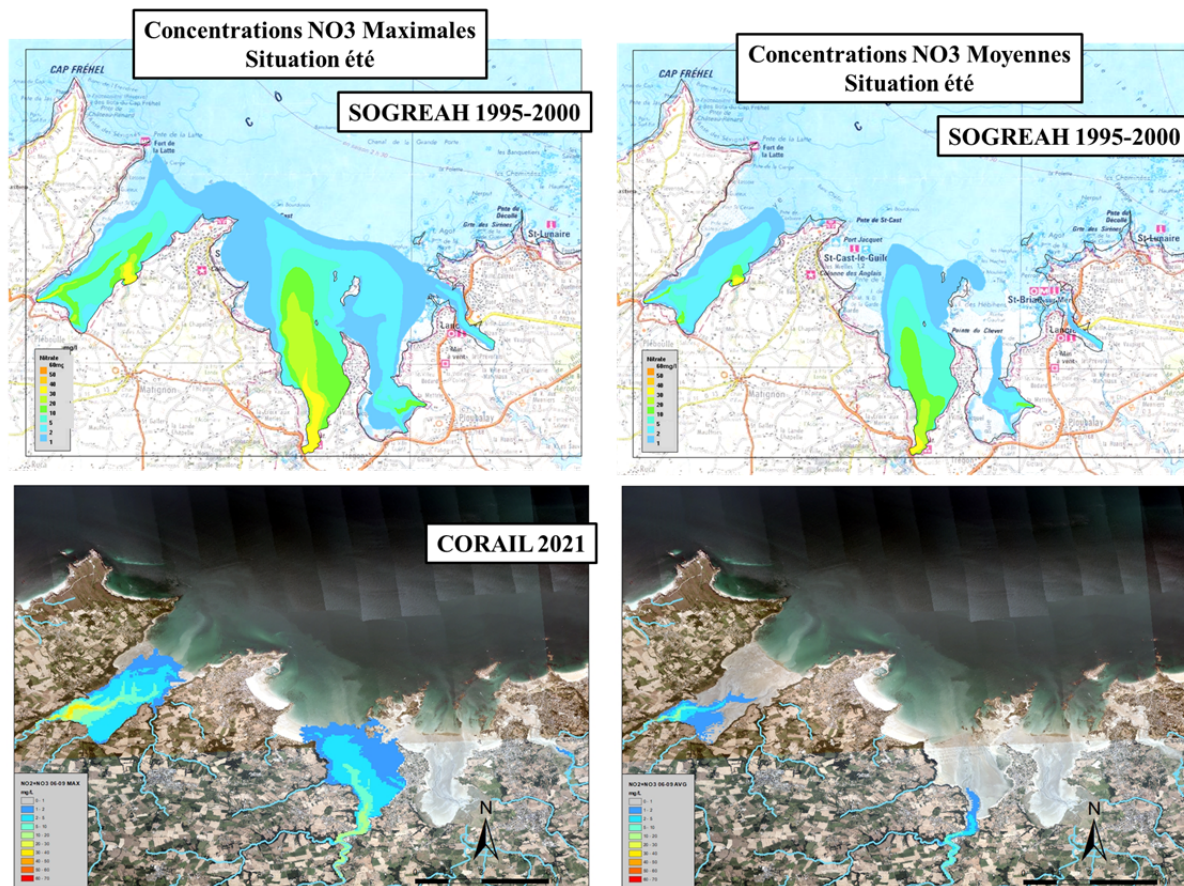


Figure 40 : Figure 39 : Comparaison des résultats nitrates+nitrites CORAIL (2021) et nitrate SOGREAH (1995-2000) – situation en été

Synthèse

Ce rapport technique est dédié au volet de la modélisation hydrodynamique porté par l’Ifremer dans le cadre du projet CORAIL. Il présente une analyse des évolutions des flux de nutriments provenant des bassins versants et illustre la dispersion de leur panache en mer et la contribution relative de chacun des fleuves principaux de la côte d’Emeraude.

Contexte hydrologique :

La hausse de température de l’eau au large de la côte d’Emeraude, en lien avec le réchauffement global, est de 0,77°C tous les dix ans.

Les concentrations en nutriment suivent une variation saisonnière avec un maximum hivernal et un minimum estival. Les concentrations en phosphate sont de l’ordre de 80 fois inférieures aux nitrates. Ces concentrations sont surtout dépendantes des débits dans les exutoires des fleuves, expliquant les variations intra-annuelles. Les données disponibles sur l’exutoire du Frémur en baie de la Fresnaie montrent une diminution importante interannuelle : en 20 ans, les concentrations en nitrates ont été divisées par deux (passant d’une moyenne de 60 mg/l à une moyenne de 30 mg/l).

L’année 2021 est plutôt représentative des cinq dernières années en matière d’hydrologie (débits, concentrations des nutriments). Les observations de CORAIL peuvent être comparées aux études précédentes pour évaluer l’évolution des flux de nutriments (SOGREAH 2002). Les flux hivernaux ont ainsi été divisés par deux à trois en 20 ans sur les trois fleuves : Arguenon et les deux Frémur.

Le tonnage total de nutriment apporté à la mer est lié à la surface totale de chaque bassin versant. Sur 2021, le bassin le plus producteur est celui de la Rance avec plus de 4000 T de nitrate par an, contre 150 T pour celui du Frémur de Lancieux. Quant aux flux spécifiques, le bassin du Frémur de la Fresnaie est le plus producteur au kilomètre carré (5.2 T/km² par an). Ce tonnage est à mettre en lien avec les activités, dont l’agriculture notamment.

Hydrodynamisme :

Les courants résiduels vont d’amont en aval dans les baies et les estuaires (y compris celui de la Rance avec la traversée du barrage) puis sont repris au large dans le sens Ouest-Est. La dynamique de particule provenant de chaque baie est détaillée. Par exemple, des particules venant de la baie de la Fresnaie en sortent rapidement dès le premier jour, une partie pénètre dans la baie voisine de l’Arguenon dès le second jour et l’ensemble se disperse au large au troisième jour. L’essentiel des particules n’est plus présent sur la côte d’Emeraude en quatre à cinq jours.

La taille et la concentration des panaches de nutriment en mer sont proportionnelles aux quantités de flux annuels de chaque fleuve avec par ordre décroissant : la Rance, l’Arguenon, le Frémur de la Fresnaie et le Frémur de Lancieux.

En moyenne, l’ensemble du secteur côtier rencontre des concentrations en nitrate de l’ordre de 5 µmol/l. Il faut aller au-delà des 10 km au large pour que la présence des nutriments soit très faible en moyenne. Les concentrations maximales correspondent aux flux hivernaux. Les fonds de baie et les estuaires ont des concentrations maximales en nitrate supérieures à 40 µmol/l.

Les courants et les flux présents sur la côte d’Emeraude impliquent un mélange de plusieurs sources de nutriment sur de nombreux secteurs. L’influence des fleuves porte essentiellement sur leur baie respective, sauf pour l’Arguenon qui peut atteindre, avec une contribution supérieure à 5 µmol/l de nitrate, la baie de Lancieux. Une plus faible influence (inférieure à 5 µmol/l de nitrate) de l’Arguenon et de la Rance est présente sur tout le domaine. Les deux Frémur peuvent avoir une faible influence en bordure de leur baie, notamment sur la partie Nord de la baie de l’Arguenon. Les contributions relatives en nutriment des différents fleuves sont détaillées pour chaque point de suivi en mer.

Limites :

L'étude CORAIL n'a suivi que les principaux fleuves : la Rance, l'Arguenon et les deux Frémur. Ces fleuves représentent 84 % du linéaire total des cours d'eau des bassins versants de la côte d'Emeraude.

Le modèle hydrodynamique a uniquement considéré la physique pour calculer la dispersion des nutriments. Il n'a pas considéré les phénomènes 1-biologiques (production primaire - reminéralisation), 2-physiques (décantation) et 3-des hypothèses sur les flux entrants (constants sur un mois).

Pour les nutriments, l'erreur entre les données du modèle et les données réelles est en moyenne d'un facteur deux. Les résultats du modèle fournissent toutefois des informations sur l'ordre de grandeur des nutriments ainsi que sur leur tendance et permettent de réaliser des comparaisons relatives entre les baies.

Perspectives :

Il serait intéressant de pouvoir mener une étude complète intégrant les processus de production primaire (production du phytoplancton, des macro-algues) et de la consommation primaire (croissance des bivalves), afin de pouvoir mieux connaître les équilibres trophiques de la côte d'Emeraude. Une telle étude permettrait de confronter des scénarios de variation d'apport des bassins versants liés aux changements climatiques ou aux usages (prélèvement d'eau douce, espèce invasive, changement de pratique conchylicole, de pêche...).

La base d'une telle étude repose sur l'acquisition de données les plus fiables possibles sur les débits et les concentrations des fleuves. Il existe différentes méthodes d'extrapolation de ces données mais qui engendrent potentiellement de grandes incertitudes sur leur représentativité. Il faut dans la mesure du possible viser une acquisition haute fréquence *in-situ* et au plus proche des exutoires.

Bibliographie

- [1] Bonnot-Courtois C., Augris, C., Blanchard M. & Houlgatte, E. 2002. Répartition des formations superficielles du domaine marin côtier entre le Cap Fréhel et Saint-Malo. Géologie de la France,3, 31-42.
- [2] Chevé J., Dagault F., Le Gall P., Legendre A., Lejolivet A., Rollet C. (2022). Bulletin de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral. Départements d'Ille-et-Vilaine et des Côtes d'Armor. ODE/LITTORAL/LER BN/22-005. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00812/92390/>
- [3] Smyth, T.J., Fishwick, J.R., Al-Moosawi, L., Cummings, D.G., Harris, C., Kitidis, V., Rees, A., Martinez-Vincente, V., Woodward, E.M.S., 2010. A broad spatio-temporal view of the western English Channel observatory. Journal of Plankton Research 32, 585-601.
- [4] Aminot A., Kérouel R., 2004 Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Edition Ifremer, 336p
- [5] Le Mao P., Godet L., Fournier J., Desroy N., Gentil F., Thiébault E., Pourinet L. (2019). Atlas de la faune marine invertébrée du golfe Normano-Breton. Volume 1. Présentation. Éditions de la Station biologique de Roscoff. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00612/72370/>
- [6] Cheve J., Le Noc S. (2018). VIBRance : évaluation des Impacts Bactériologiques dans l'Estuaire de la Rance. Hiérarchisation des flux de contamination microbiologique dans le cadre de l'élaboration du profil de vulnérabilité conchylicole du secteur Rance et baie de Saint-Malo. Ifremer/ODE/LITTORAL/LERBN-018-005. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00442/55363/>
- [7] Lazure P., Desmare S. Juin 2012 Caractéristique et état écologique - Manche - Mer du Nord, Etat physique et chimique - caractéristiques physiques - Courantologie.
- [8] Lazure P., Dumas F. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances in Water Resources 2008 (31) 233-250.
- [9] SOGREAH Juin 2002. Etude Hydrodynamique dans les baies de Lancieux, Fresnaye et Arguenon.
- [10] NOVELTIS Juillet 2012. Détermination des flux d'azote (NO₃, NH₄) contributeurs aux marées vertes pour les cours d'eau alimentant les baies de Lancieux et de l'Arguenon

Annexes numériques

Annexe 1 : Observations sur la dynamique des panaches de nitrates + nitrites sur 15 jours (vidéo NO2 NO3 6 au 15 janv SURF)

Annexe 2 : Contribution relative des bassins-versants en apport de nitrates+nitrites sur 15 jours (vidéo NO2 NO3 6 au 7 janv CONTRIB)