

Expertise du phénomène de prolifération algale sur les côtes vendéennes : origine des algues et des nutriments

Phase 1 : Etat des lieux et origine des algues



Rapport intermédiaire pour le Conseil Général de Vendée
(marché n°20100020100204)

Expertise du phénomène de prolifération algale sur les côtes vendéennes : origine des algues et des nutriments

Phase 1 : Etat des lieux et origine des algues

1 INTRODUCTION

Le développement d'algues vertes est constaté depuis plusieurs années sur différents secteurs du littoral vendéen. La quantité d'algues échouées durant la saison estivale semble de plus en plus importante au fil des années et pose de plus en plus de questions sur leur origine et leurs moyens de traitement.

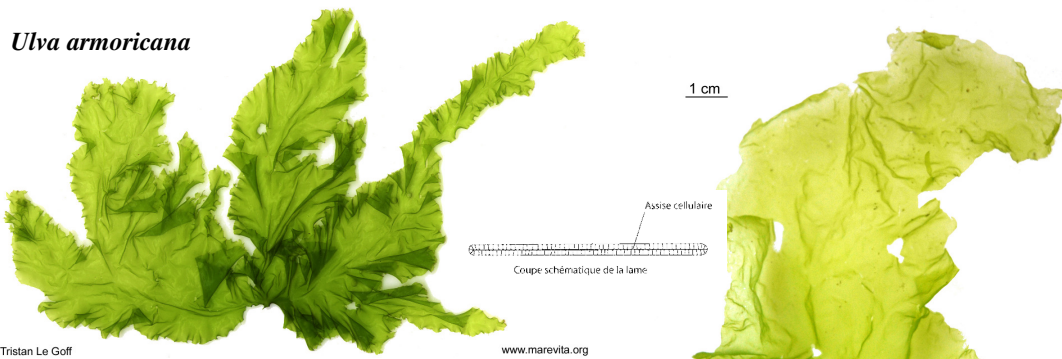
L'objet de la présente étude est de faire le point sur l'étendue de ce phénomène, sur ses origines possibles et les sources d'alimentation en azote des marées vertes en Vendée.

La phase 1 de l'étude concerne un état des lieux sur le phénomène d'échouage d'algues vertes sur les côtes vendéennes et une recherche de l'origine géographique des algues constituant ces échouages.

2. Rappels sur le mécanisme de « marées vertes » :

Les algues marines, largement présentes sur les côtes rocheuses de l'Atlantique, dominent naturellement, par leur masse, la biocénose des substrats littoraux et en contrôlent largement sa biodiversité. Par leur position dans le proche littoral, les macroalgues marines se situent aussi en première ligne face aux pollutions d'origines continentales, en même temps qu'elles sont reconnues comme biologiquement très réactives aux évolutions de la qualité des eaux côtières. Elles peuvent répondre à ces évolutions par des régressions de ceintures de grandes algues (Fuciales, Laminariales), comme par des phénomènes de blooms macroalgaux qui sont des proliférations algales généralement en lien avec l'eutrophisation des eaux côtières et qui impliquent de petites espèces opportunistes. Parmi ces blooms macroalgaux, les blooms d'algues vertes sont les plus caractéristiques, et plus particulièrement ceux constitués d'espèces du genre *Ulva*. Ce genre présente, selon l'espèce, l'une ou l'autre de deux morphologies typiques, une forme en lame, qui reste communément appelée « ulve » au sens strict, et une forme tubulaire plus ou moins ramifiée, aplatie ou filamenteuse, communément appelée « entéromorphe » (Fig. 1).

Fig. 1 : Illustration des différentes morphologies du genre *Ulva*

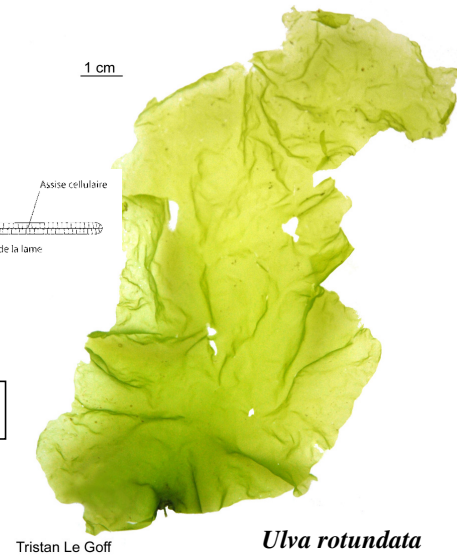
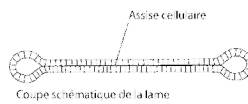


Ulves en lames

www.marevita.org



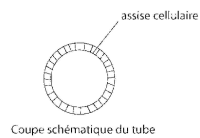
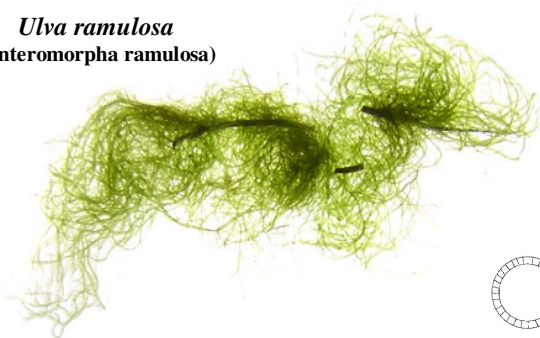
André Rio



Ulva rotundata

Ulves en tubes rubanés à filamenteux

Ulva ramulosa
(*Enteromorpha ramulosa*)



Ulva compressa
(*Enteromorpha compressa*)



2.1. Marées vertes classiques à « à ulves »

Les blooms d'algues vertes sont particulièrement connus en Bretagne dont ils affectent le littoral depuis plusieurs décennies, sous forme de proliférations d'**algues vertes de type ulve**, (rarement de type entéromorphe), en lien direct avec l'eutrophisation des eaux côtières. Ces blooms sont appelés « marées vertes », dès l'origine de leur apparition sur la côte nord, fin des années 60, début des années 70, probablement en souvenir de la « marée noire » du Torrey Canon survenue un peu plus tôt en 1967 dans le même secteur. Ces marées vertes se développent au printemps et en été, par **croissance et multiplication végétative d'algues dérivantes**. Celles-ci sont maintenues en suspension dans la colonne d'eau agitée et peu profonde du très proche littoral, **au niveau de baies sableuses** à pente douce où une partie de la biomasse forme à tout moment de la marée un rideau flottant de bas de plage. Le phénomène conduit localement à des échouages importants d'algues vertes, couvrant des estrans entiers et pouvant être définitivement rejetés en haut de plage où leur dégradation constitue une nuisance olfactive et visuelle. Des quantités plus ou moins importantes sont aussi, selon les sites, stockées plus au large avec des possibilités irrégulières de colonisation des estrans. Aujourd'hui une centaine de secteurs de plage sont, à des degrés divers, touchés par le phénomène de marée verte en Bretagne, contraignant les collectivités littorales à une activité de ramassage et d'élimination de ces algues qui peut atteindre 80 000 m³ par an. Ces quantités vont probablement augmenter avec la mise en place du plan Algues Vertes.

D'une manière générale, ces marées vertes se produisent dans des secteurs enclavés du linéaire côtier où tend à régner une conjoncture **d'apports excessifs en sels nutritifs** (zones d'exutoires des rivières), de **faibles profondeurs** (favorables à la croissance des algues par les conditions de lumière et de température qui y règnent) et de **conditions d'hydrodynamisme favorables** à la rétention de ces sels nutritifs et/ou des algues produites (renouvellement lent de la masse d'eau côtière, courants de marée et houle accumulant les algues sous faibles profondeurs).

Dans les sites à marées vertes bretons **le phosphore est toujours en excès par rapport aux besoins de la croissance des ulves**, ce qui n'est pas le cas de **l'azote** qui est encore **limitant dans la plupart des sites**. La **capacité particulière du phosphore à se stocker** de manière importante dans les sédiments sableux littoraux est probablement à l'origine de sa disponibilité particulière pour les ulves, en même temps qu'elle place cet élément en situation défavorable comme **facteur de maîtrise** par rapport à l'azote (encore limitant pour la croissance et sans stockage).

L'évolution des **apports azotés** dans les eaux littorales contrôle ainsi l'extension actuelle du phénomène de marées vertes. La **contribution de l'agriculture** étant en Bretagne largement dominante au niveau de ces apports, la profession agricole détient, de fait, le **levier de contrôle le plus efficace** pour limiter de manière préventive le phénomène de marées vertes sur les côtes bretonnes.

2.2. *Autres types de marées vertes*

Les caractéristiques d'une marée verte à ulves classiques sont donc de :

- se dérouler au niveau de baies sableuses en eaux côtières,
- présenter un cycle annuel de sa biomasse ainsi que de fortes productions de biomasse sous forme dérivante,
- présenter des échouages monospécifiques, constitués quasi exclusivement de l'algue verte responsable du bloom qui est généralement une ulve.

Deux grands types de marées vertes semblent aujourd'hui se distinguer des marées vertes classiques par leur fonctionnement biologique :

- Les **marées vertes de vasières**, se situant en mode abrité, généralement en eaux de transition. La biomasse d'algues vertes est peu mobile, avec des effets de colmatage plus durable du sédiment, se recycle probablement par des formes hivernales persistantes fixées / envasées. Beaucoup d'algues vertes filamenteuses (dont les entéromorphes) participent au bloom saisonnier.
- Les **marées vertes d'« arrachage »** dont le cycle de développement est aujourd'hui le moins bien connu, car apparu plus tardivement sur les côtes Manche - Atlantique. Ce cycle semble passer par une étape de recolonisation annuelle de la zone estran / petits fonds, sous forme de populations d'algues vertes fixées en mélanges plus ou moins hétérogènes avec les grandes algues de ceinture. Ces algues vertes sont plutôt des ulves dans les bas niveaux, de même que dans les retenues d'eau et chenaux de l'estran, et ce sont des entéromorphes dans les parties moyennes et hautes de l'estran. Une fois arrachées à partir d'une certaine taille et en fonction des conditions hydrodynamiques, ces populations d'algues vertes s'échouent en se mélangeant avec des quantités plus ou moins importantes de goémon d'épave. La proportion d'ulves dans l'échouage semble pouvoir être augmentée par une phase de transport (sélective) du matériel dérivant et/ou dans certains cas par reprise de croissance de ces ulves dans l'eau (avec phase plus ou moins longue de production de biomasse supplémentaire) avant échouage.

Les marées vertes d'arrachage semblent aujourd'hui prépondérantes sur les côtes normandes et de Sud Loire (incluant celles de la Vendée). Elles ne se produiraient pas sans un fond d'eutrophisation favorable à l'accroissement de biomasse des populations d'algues vertes fixées, mais on considère qu'interviennent aussi d'autres facteurs de contrôle, ceux notamment qui régulent les interactions complexes de compétition entre organismes végétaux et animaux pour la colonisation des substrats (autres pollutions, perturbation de substrats ou dérives de facteurs climatiques favorisant les espèces pionnières – ou opportunistes - de type ulve et entéromorphe, au détriment des grandes algues de ceintures).

3. Etat des lieux sur le phénomène d'échouages d'algues vertes sur les côtes vendéennes

Les données d'évaluation des échouages sur les côtes vendéennes proviennent du réseau de surveillance DCE (sous MO Ifremer), étendu depuis 2007 au secteur sud Loire, de l'agence de l'eau Loire Bretagne.

3.1. Caractérisation des échouages et procédure de classement des sites à ulves :

Les échouages d'algues susceptibles de contenir des fractions plus ou moins importantes d'algues vertes ne concernent sur le littoral vendéen que des eaux côtières (au sens DCE). Dans ce type de masse d'eau, seuls les sites d'échouages à ulves sont classés comme site à marées vertes. Sur les côtes vendéennes particulièrement, les ulves peuvent être associées à d'autres algues vertes (généralement des entéromorphes) et surtout se retrouver en mélange avec du goémon brun et rouge. Le classement d'un site comme « site à marée verte », ainsi que les calculs de surfaces couvertes en ulves ne sont engagés que quand l'échouage est composé visuellement de plus de 30% d'ulves. On estime alors, par une procédure spéciale, un taux de couverture qu'auraient seules les ulves dans le polygone d'échouage.

3.2. Données des survols aériens avec vérités terrain :

Le classement des sites à marées vertes, leur dénombrement et leur évaluation quantitative se font à la suite de campagnes de photographies aériennes réalisées 3 fois au cours de la saison estivale dans le cadre du réseau de contrôle de surveillance de la DCE, complétée de vérités terrain destinées à identifier les espèces présentes au niveau des dépôts d'estran et dans les échouages de haut de plage.

La carte de sectorisation des sites pour la Vendée est présentée Fig. 2. Les secteurs ou sites correspondent à des zones d'échouages, limitées plus ou moins arbitrairement en fonction de critères géomorphologiques du littoral et d'unités apparentes de zones de dépôts (Figs. 3 et 4)

Les cartes présentées en Figs. 5, 7 et 9 présentent les inventaires de sites ayant été classés comme étant le siège d'une marée verte à ulves au cours de la période 2007-2008-2009.

Les cartes présentées en Figs. 6, 8 et 10 donnent pour ces mêmes années une représentation par tailles des sites classés, directement proportionnelles à leurs surfaces d'estran couvertes par les ulves. Ces surfaces sont données en équivalents 100% de couverture, extraits des polygones d'échouages pouvant présenter des taux variables de couverture. Les données sources seront transmises dans le rapport final.

La carte Fig. 11 présente une évaluation provisoire par secteur (à consolider dans le rapport final) des surfaces d'échouage en ulves en 2010.

La Fig. 12 synthétise l'évolution pluriannuelle des surfaces totales d'échouage en ulves de 2007 à 2010.

3.3. Données complémentaires provenant des enquêtes de ramassage auprès des communes

Les cartes commentées présentées Figs 13, 14 et 15 récapitulent les données de ramassage transmises par les communes de 2007 à 2009, avec estimation des fractions algues vertes. Un tableau des données de ramassage par commune, avec extraction de la partie algues vertes (toutes algues vertes) et récapitulation des données de coûts de ramassage transmises par les communes, sera joint au rapport final.

3.4. Synthèse :

- Une douzaine de secteurs d'échouages d'algues vertes de type ulve ont été recensés au moins une fois depuis 2007 sur les côtes vendéennes. Ces ulves sont plus ou moins en mélange avec du goémon d'épave, participant à un verdissement plus ou moins prononcé d'échouages naturels.
- Les surfaces cumulées d'ulves sur les trois observations annuelles du littoral vendéen culminent à 200 ha d'équivalent 100 % de couverture en 2008 et 2009. Ces surfaces connaissent une diminution importante (à 70 ha) en 2010, diminution par ailleurs constatée sur l'ensemble des côtes bretonnes.
- L'essentiel des dépôts d'ulves observés sur les côtes vendéennes se retrouve dans les sites d'échouages du pourtour de l'île de Noirmoutier et secondairement dans celui de St Jean de Mont. Dans ces sites, la proportion d'ulves dans les échouages est très souvent importante (plus de 80%), en particulier sur la face interne (côté baie de Bourgneuf) de l'île de Noirmoutier (c.f. document ppt présenté à L'Epine le 8/07/2010).
- Les couvertures en ulves des plus grands sites d'échouage (ceux de l'île de Noirmoutier) sont déjà comparables à celles de sites bretons de dimension moyenne. De telles quantités d'ulves en échouages (valeurs brutes et proportions dans les échouages) doivent être considérées comme un indicateur d'eutrophisation locale d'eaux côtières dont la note de qualité risquera d'être affectée.

➤ **FIG. 2 : DELIMITATION DES « SITES D'ECHOUAGES »**

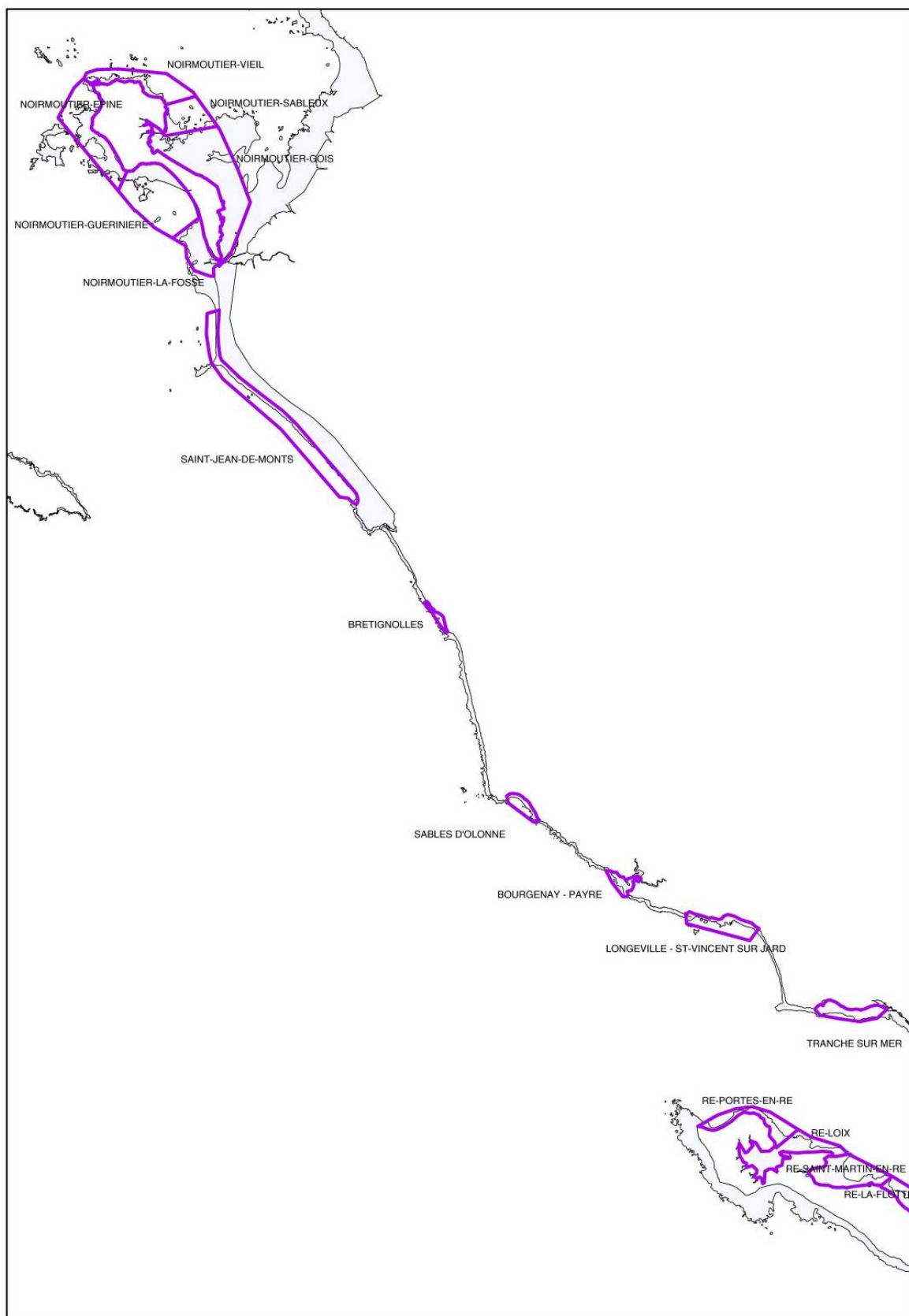


FIG. 3 : CUMULS SURFACIQUES (EN ROUGE) DES DEPOTS D'ULVES TRACES LORS DES 3 INVENTAIRES ANNUELS DES ANNEES 2007 A 2009 SUR LES SECTEURS D'ECHOUAGES DE NOIRMOUTIER ET SAINT JEAN DE MONTS

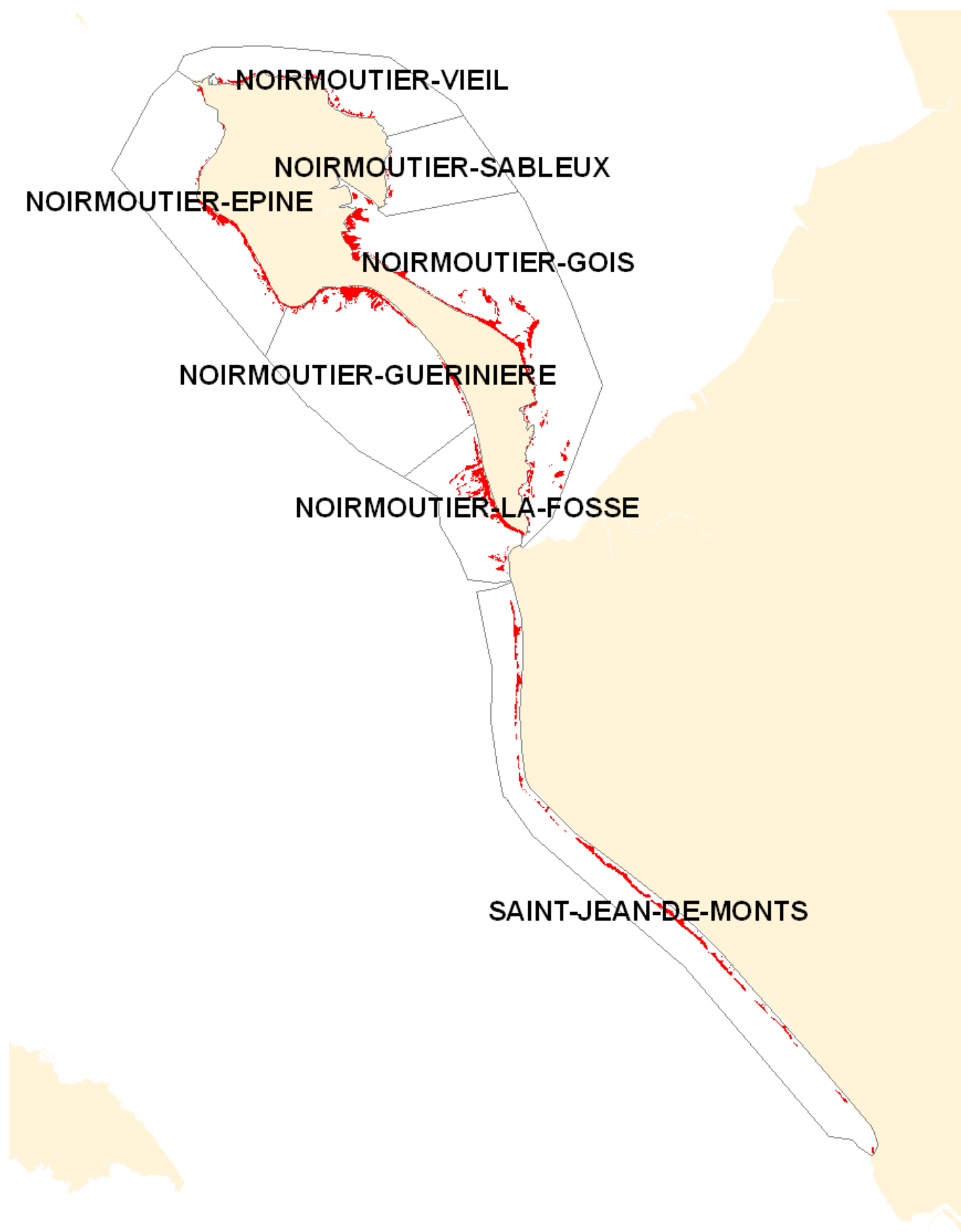


FIG. 4 : CUMULS SURFACIQUES (EN ROUGE) DES DEPOTS D'ULVES TRACES LORS DES 3 INVENTAIRES ANNUELS DES ANNEES 2007 A 2009 SUR LES SECTEURS D'ECHOUAGES DE LONGEVILLE-ST VINCENT SUR JARD/ TRANCHE SUR MER

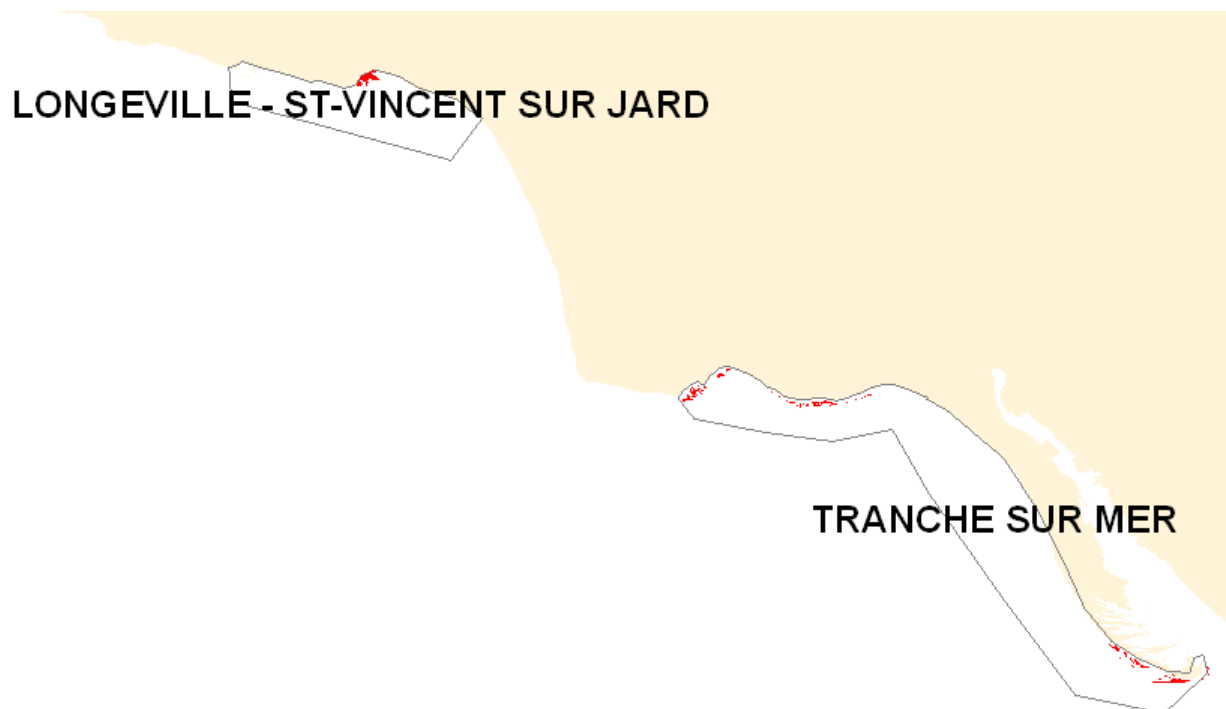


FIG.5 : SITES TOUCHES PAR DES ECHOUAGES D'ULVES LORS DES 3 INVENTAIRES REALISES EN 2007

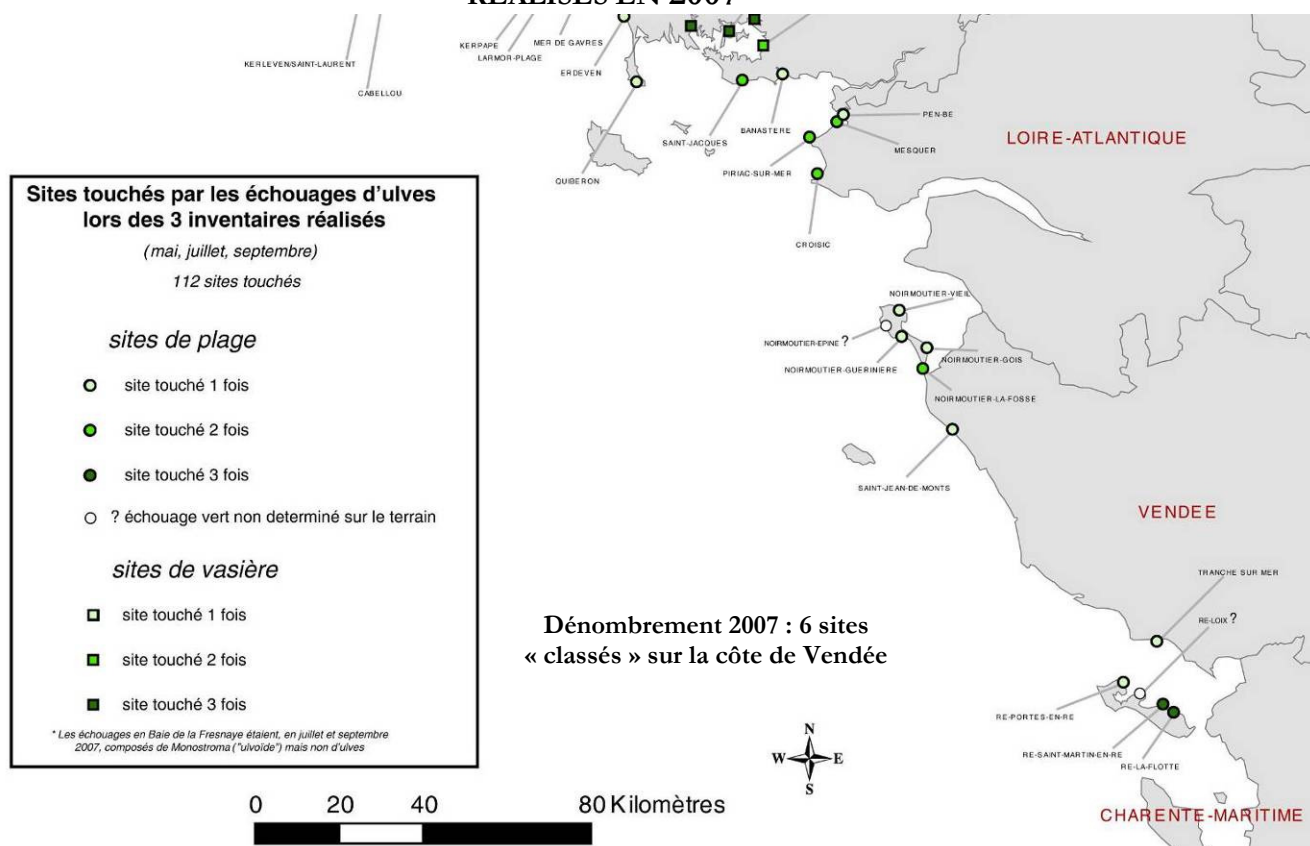


FIG. 6 : CUMUL DES SURFACES COUVERTES PAR LES ULVES SUR LES 3 INVENTAIRES REALISES EN 2007

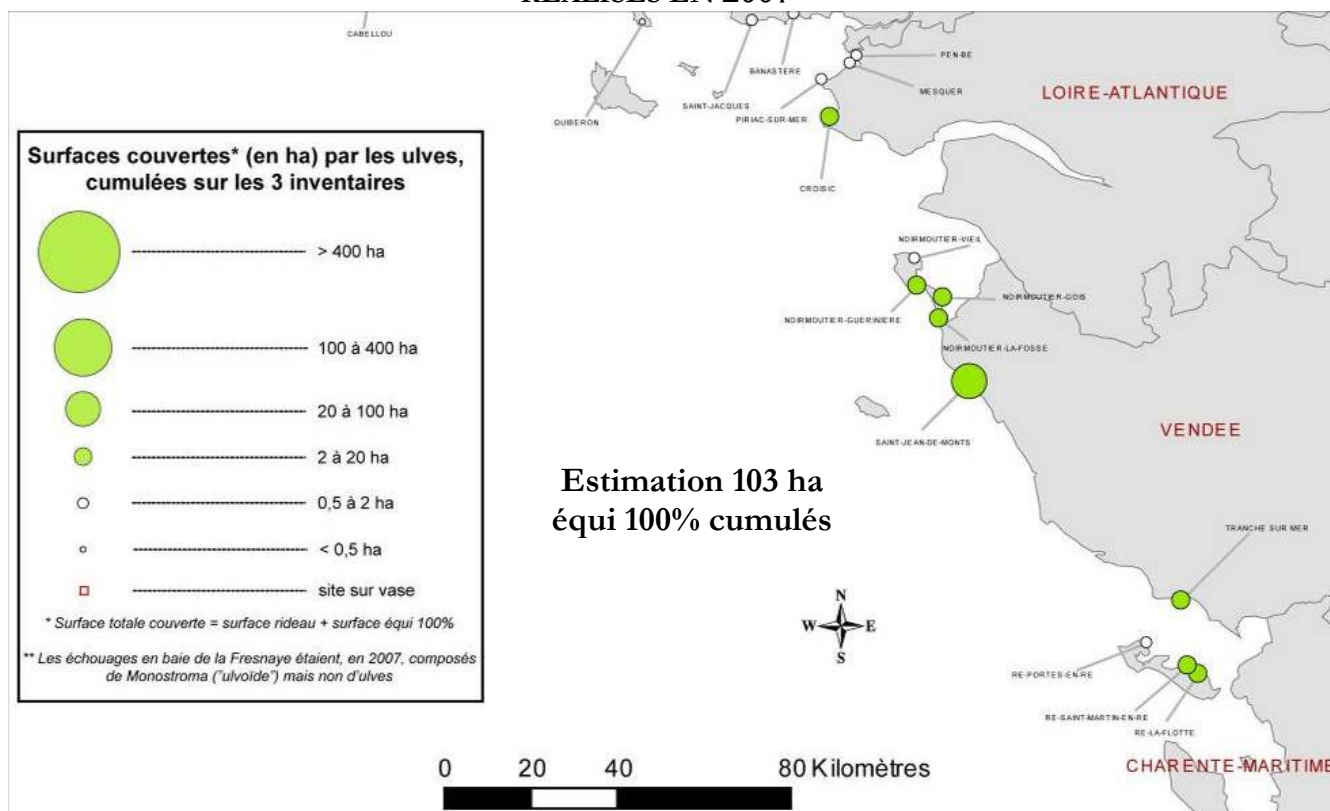


FIG. 7 : SITES TOUCHES PAR DES ECHOUAGES D'ULVES LORS LES 3 INVENTAIRES REALISES EN 2008

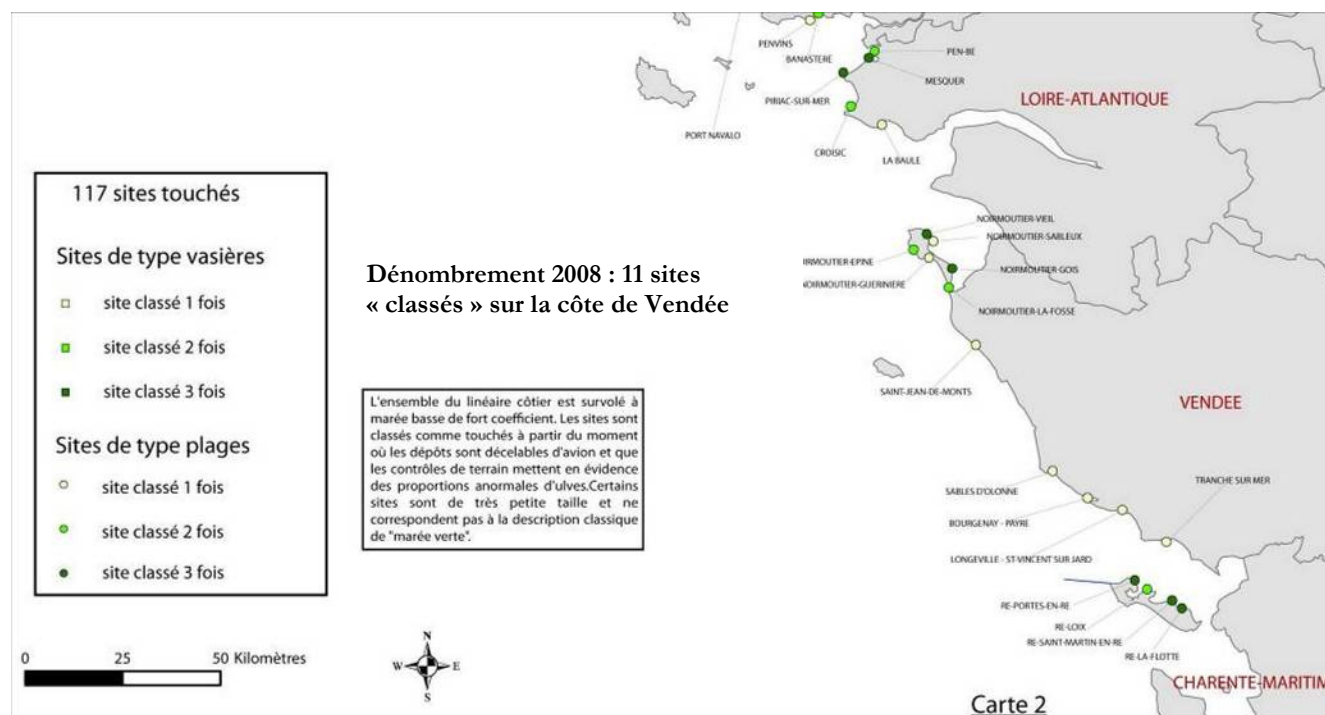


FIG. 8 : CUMUL DES SURFACES COUVERTES PAR LES ULVES SUR LES 3 INVENTAIRES REALISES EN 2008

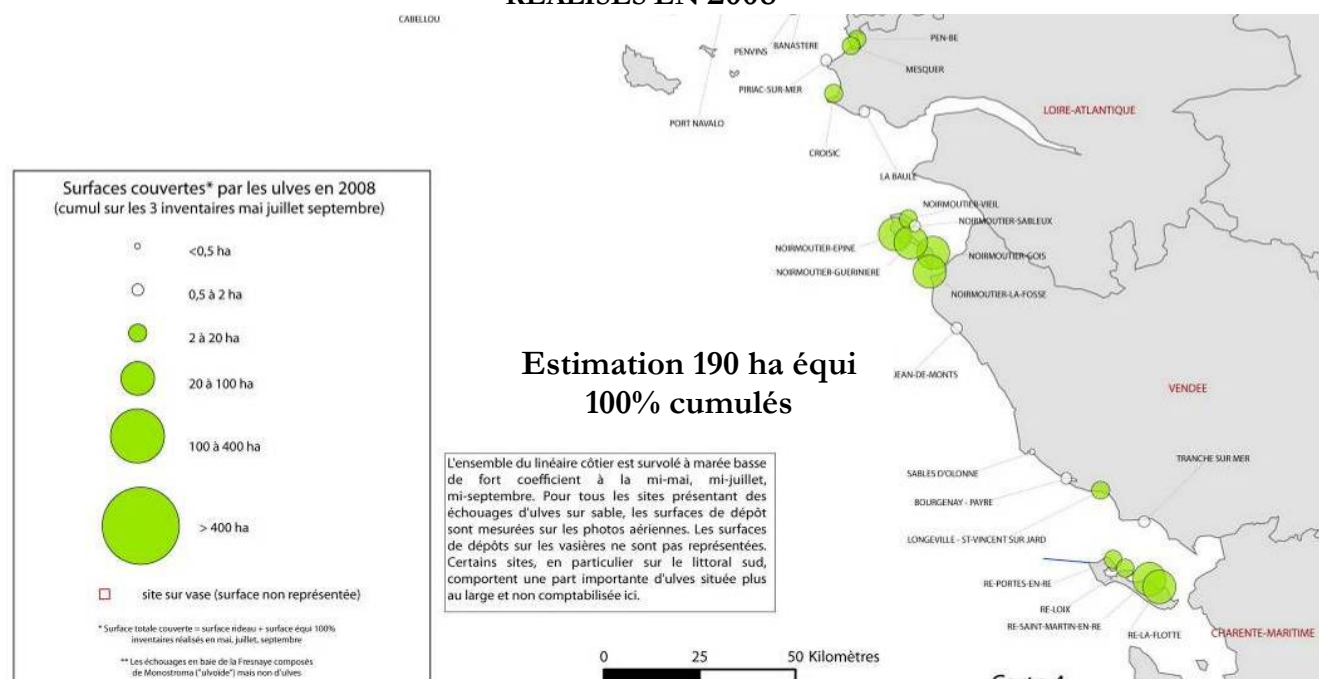


FIG. 9 : SITES TOUCHES PAR DES ECHOUAGES D'ULVES LORS DES 3 INVENTAIRES REALISES EN 2009

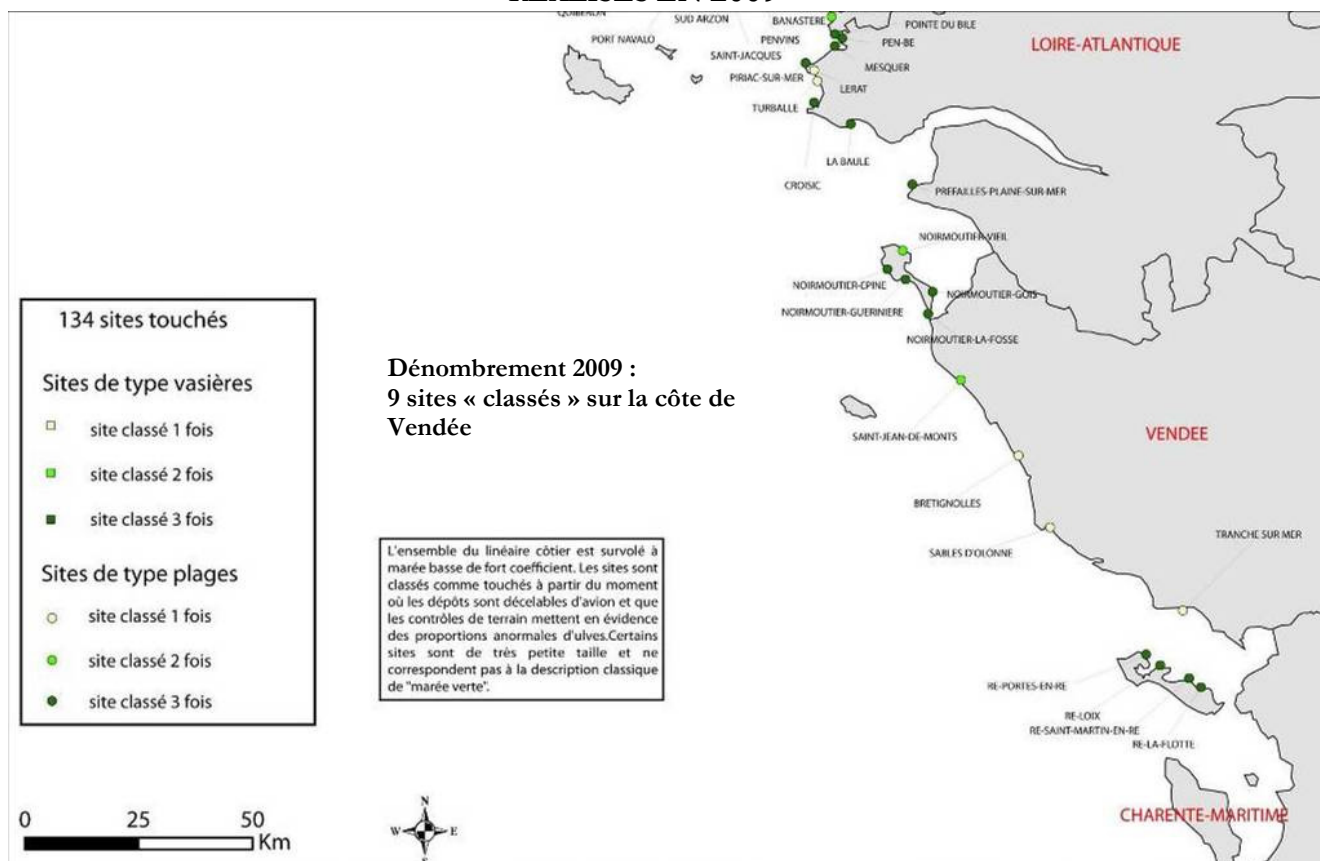
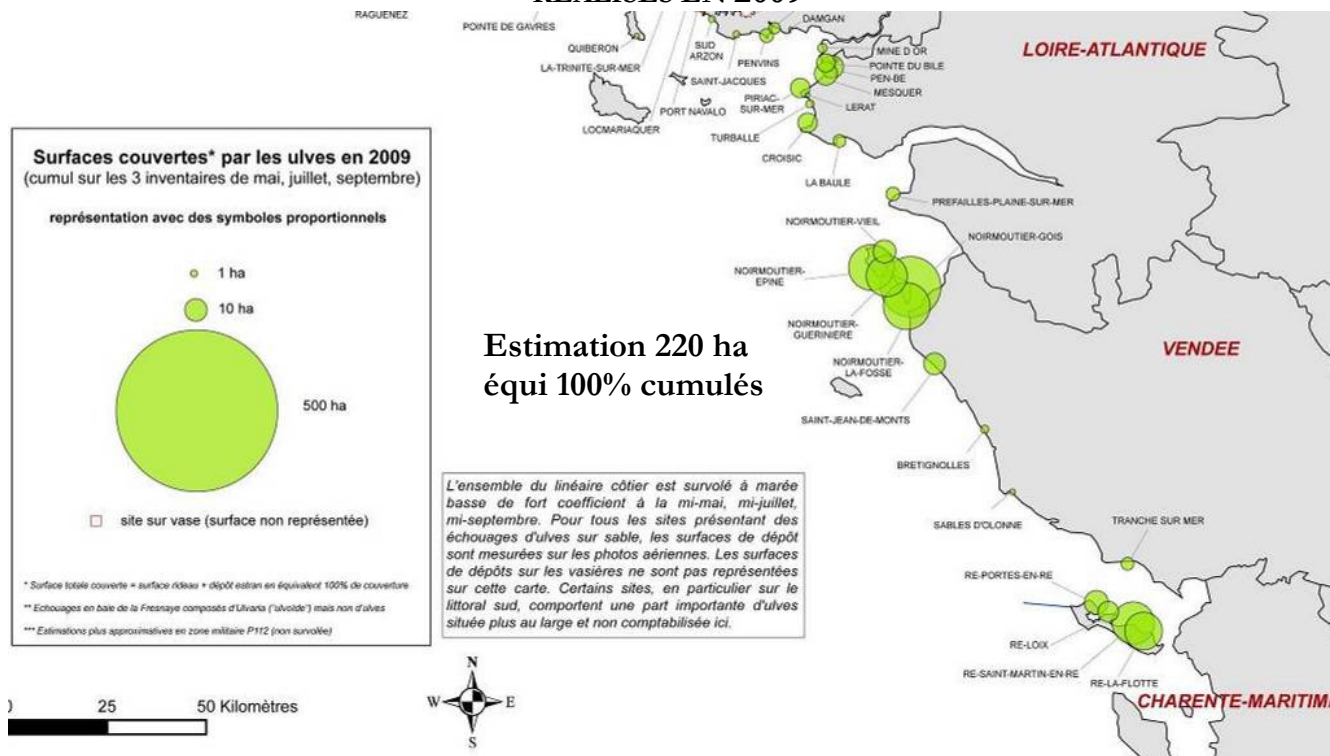
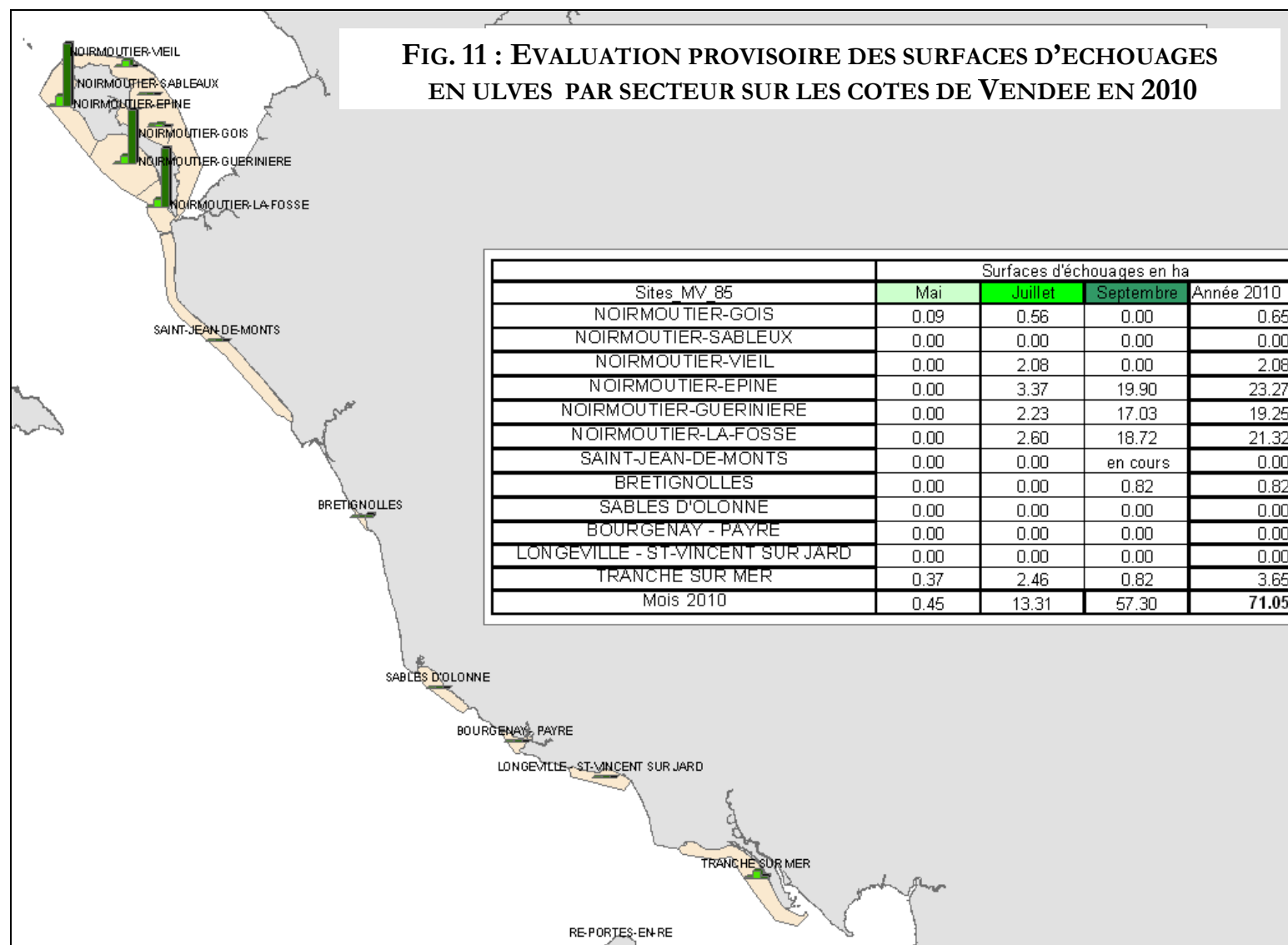
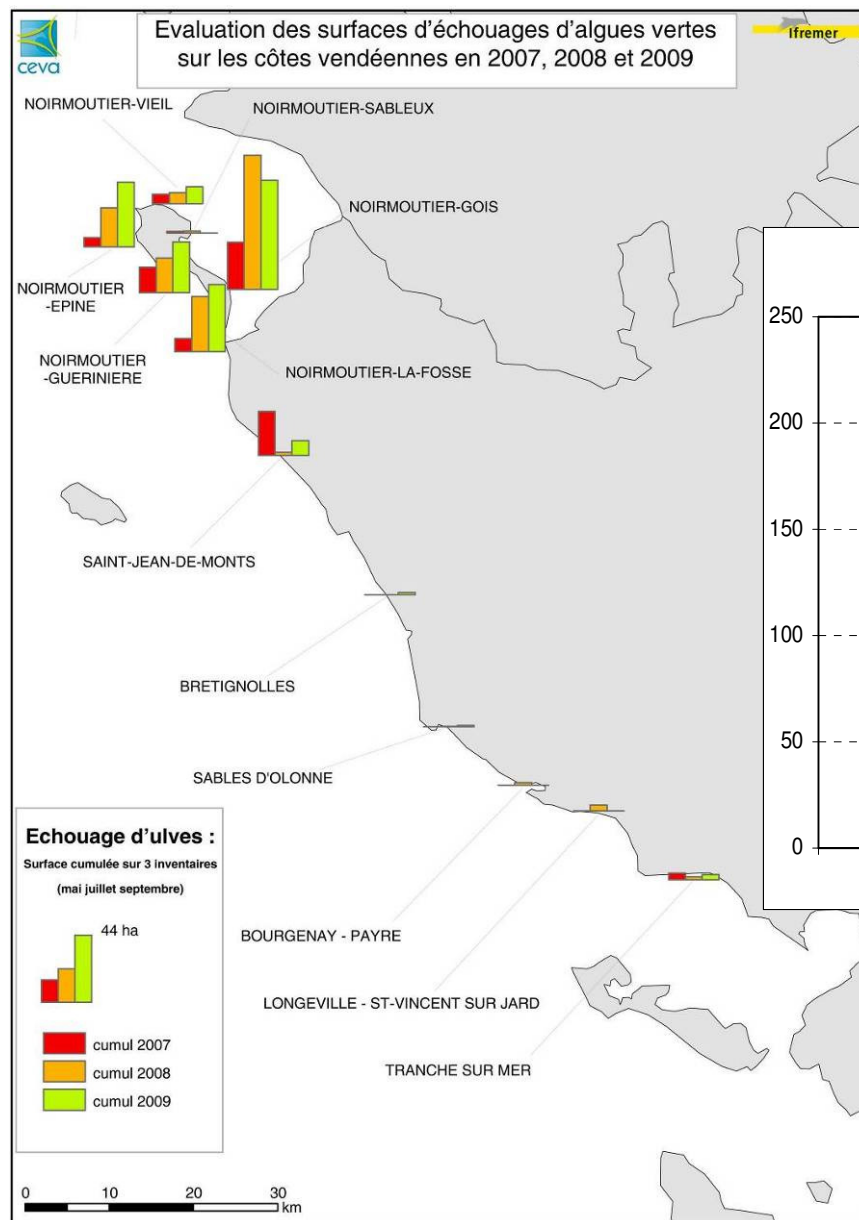


FIG. 10 : CUMUL DES SURFACES COUVERTES PAR LES ULVES SUR LES 3 INVENTAIRES REALISES EN 2009







**FIG. 12 : EVOLUTION PLURIANNUELLE
DES CUMULS (SUR TROIS VOLS ANNUELS) DE SURFACES
D'ECHOUAGES EN ULVES**

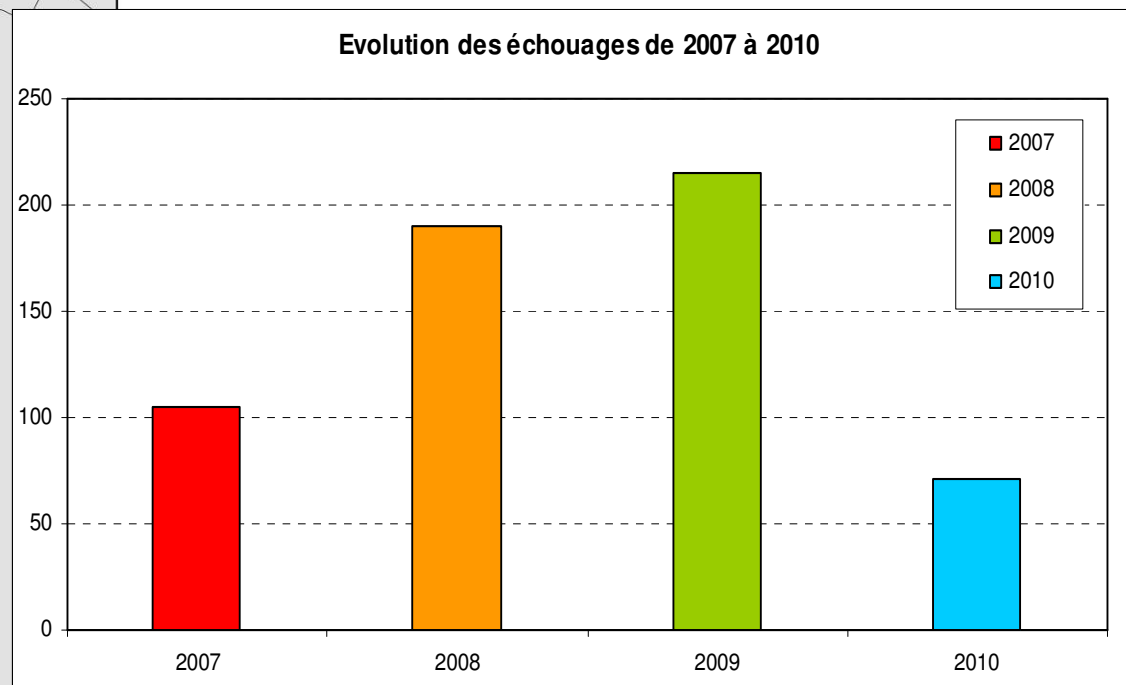


FIG. 13 : VOLUME D'ALGUES VERTES RAMASSEES EN 2007

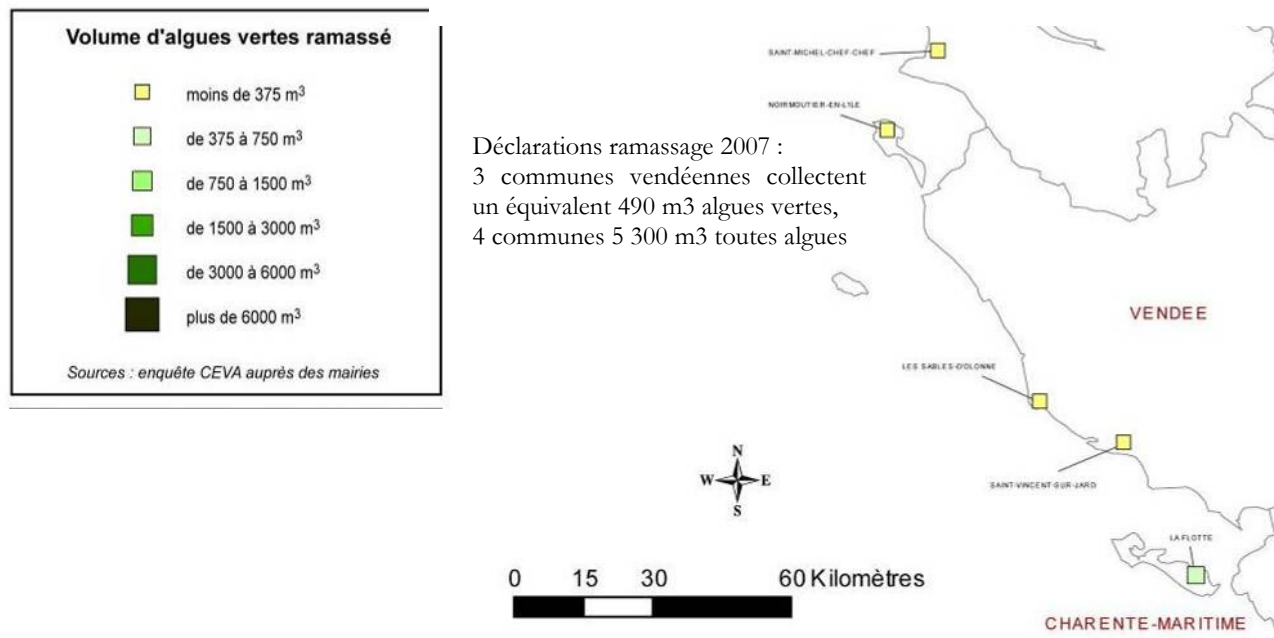


FIG. 14 : VOLUME D'ALGUES VERTES RAMASSEES EN 2008

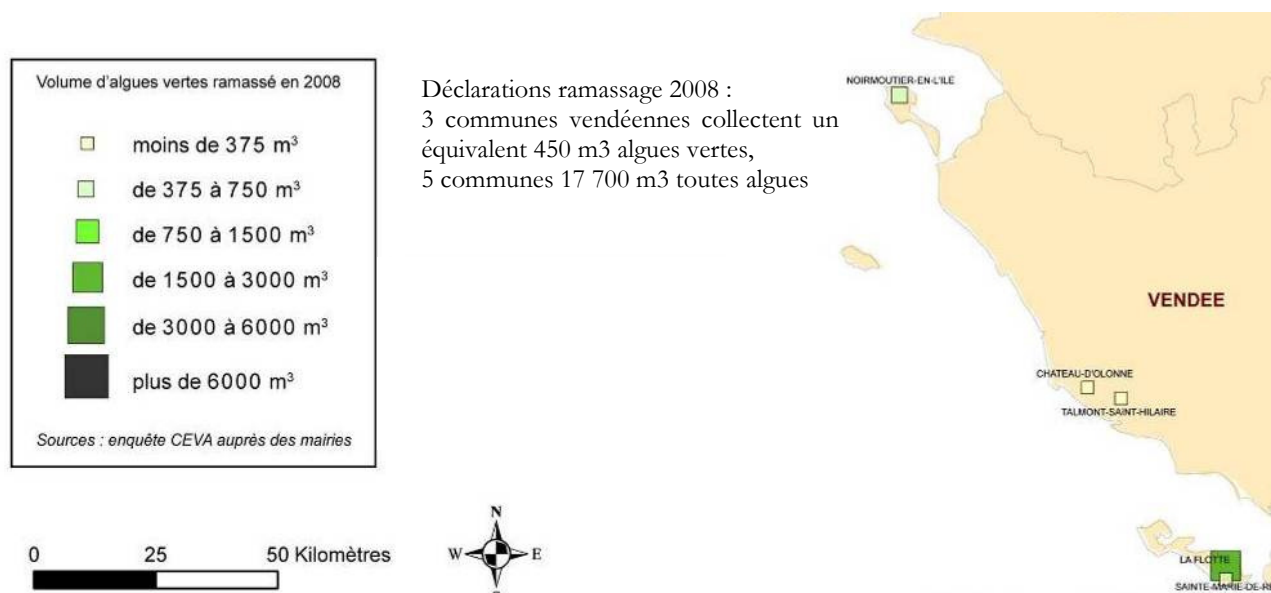
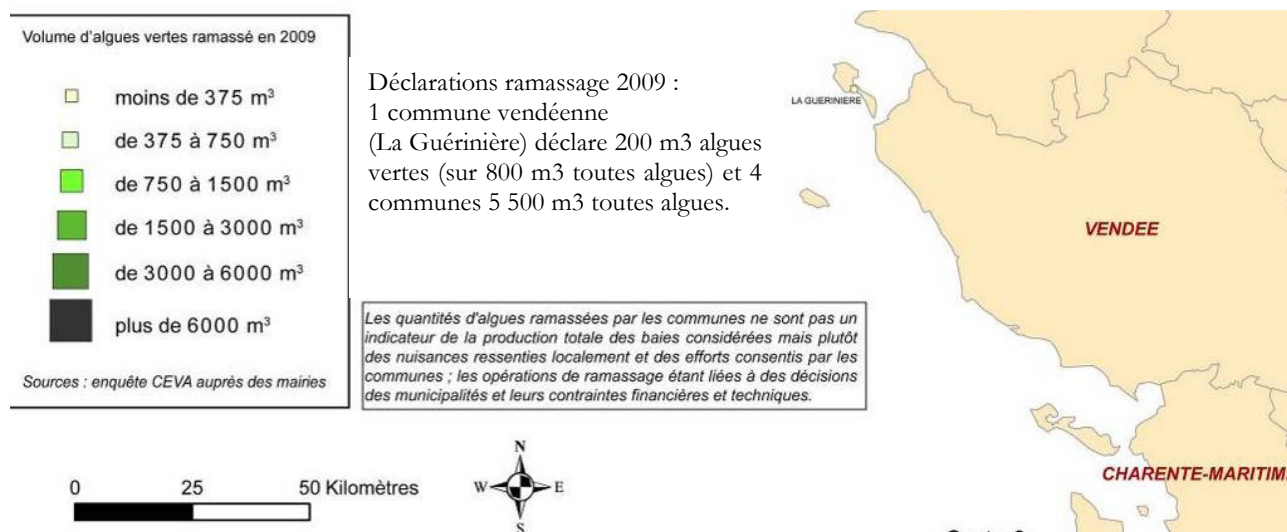


FIG. 15 : VOLUME D'ALGUES VERTES RAMASSEES EN 2009



4. Recherche de l'origine géographique des algues vertes échouées

4.1. Méthodologie :

La recherche des zones sources potentielles pour les masses d'algues vertes régulièrement retrouvées en échouage dans les différents sites a été ciblée sur le secteur de Noirmoutier, dont on a vu plus haut qu'il était largement le plus touché.

Une inspection des zones d'échouages et des différents types substrats que l'on peut rencontrer sur les différents platiers cernant l'île a été engagée sur deux grandes marées estivales (des 15-16 juin et 14-15 juillet 2010). Les zones de substrats favorables aux colonisations ont été repérées sur ortho photographie 2000 prise à marée basse de forts coefficients. Les points d'observation au sol font l'objet d'un repérage GPS et prises de photos. Les algues vertes sont échantillonnées pour identification d'espèces.

4.2. Résultats :

Les cartes de synthèse des prospections sont présentées Figs 16 et 17. Le détail des observations terrains correspondants aux points de prospection sont fournis en annexe 1.

Si l'on résume les observations en cumulant les résultats de prospection de ces deux marées estivales, on constate l'existence d'échouages à forte composition en ulves dans les secteurs de l'Herbaudière, l'Epine, Guérinière et la Fosse, pour la face exposée de l'île, de Noirmoutier-en-Ile au sud à la pointe de La Fosse sur pour la face abritée - côté baie de Bourgneuf- de l'île. Aux périodes d'observation, les ulves sont toujours mélangées avec plus ou moins d'entéromorphes, de goémons bruns et rouges. Les ulves paraissent être aussi des algues d'arrachage (avec leurs bases de fixation) plutôt que des algues résultant d'une reprise de croissance avec multiplication végétative d'algues dérivantes. Ces observations sont conformes sur un plan qualitatif à celles de années précédentes, mais avec, pour la période juin-juillet d'observation, des échouages moins importants et des proportions d'ulves moins accentuées qu'en 2009 (c.f. Figs 12, 13 et illustrations ppt des échouages 2009 présentées à L'Epine le 8/07/2010).

L'inspection des platiers de la face exposée de l'île (Pointes de l'Herbaudière et du Devin, roches de la Loire) révèle deux types possibles de colonisations d'algues vertes. La plus importante est une colonisation de la ceinture de fucales, des massifs d'hermelles et des moulières par des populations très denses d'entéromorphes (planche A, photos 3 à 5). La moins importante, car généralement peu dense et limitée dans les bas niveau de marée (sous la ceinture de fucales), concerne des populations d'ulves fixées (planche A, photos 1 et 2).

L'inspection des platiers de la face abritée de l'île indique l'existence de populations fixées d'ulves de grande taille, notamment dans les secteurs de parcs à huîtres situés entre Noirmoutier-en-Ile et Le Gois, et même probablement sur le platier rocheux de la Vendette s'étendant plus au large et qui n'a pu être visité à pied pendant le temps de marée. Ces populations fixées d'ulves se situent particulièrement dans les secteurs de platier où l'eau est plus ou moins retenue à marée descendante (photos planche B).

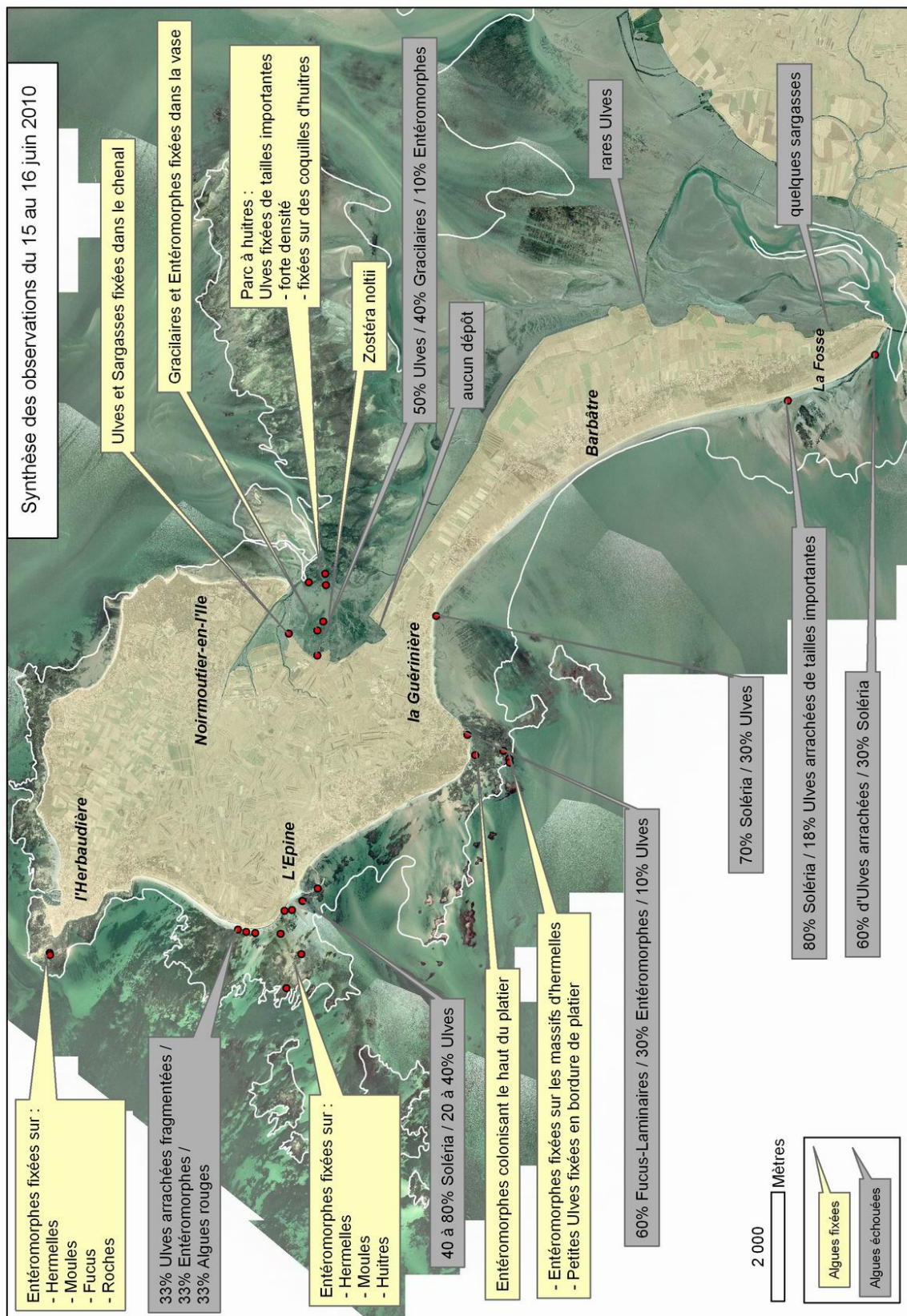


Fig. 16 : synthèse des observations d'estran des 15 et 16 juin 2010

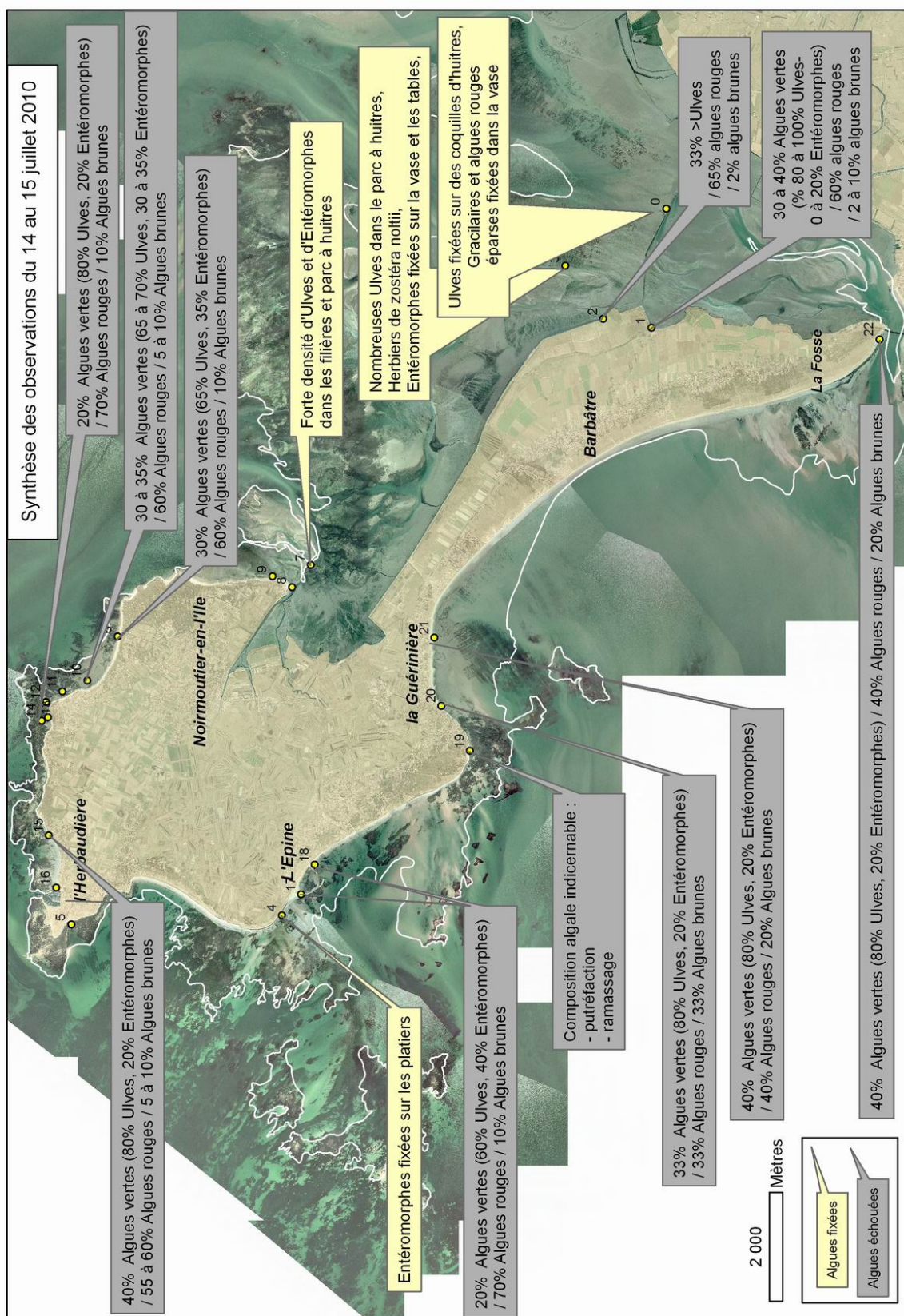


Fig. 17 : synthèse des observations d'estran des 14 et 15 juillet 2010

Planche A : photographies de populations fixées d'algues vertes sur les estrans rocheux de la face exposée de l'île de Noirmoutier.

- photo 1 : Colonisations d'ulves dans les bas niveaux (secteur Guérinière/roches de la Loire)
- photo 2 : idem dans les petits fonds
- photo 3 : Colonisation dense d'entéromorphes filamenteuses au niveau de massifs d'hermelles (pointe du Devin).
- Photos 4 et 5 : Différents degrés de colonisation d'entéromorphes dans la ceinture de fucales et de moulières.

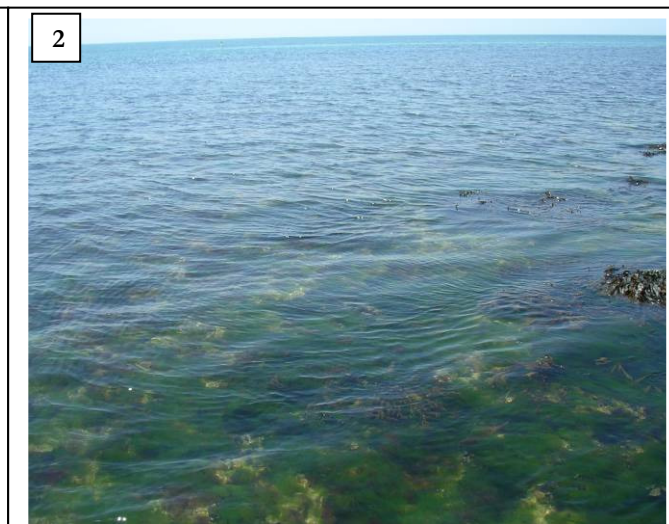


Planche B : Photographies de populations de grandes ulves fixées dans les retenues d'eau des estrans de la face abritée de l'île de Noirmoutier (zone des parcs à huîtres)

Haut : vue générale d'une population partiellement émergée à marée basse.
Bas : vue rapprochée des ulves dans une cuvette de retenue d'eau.

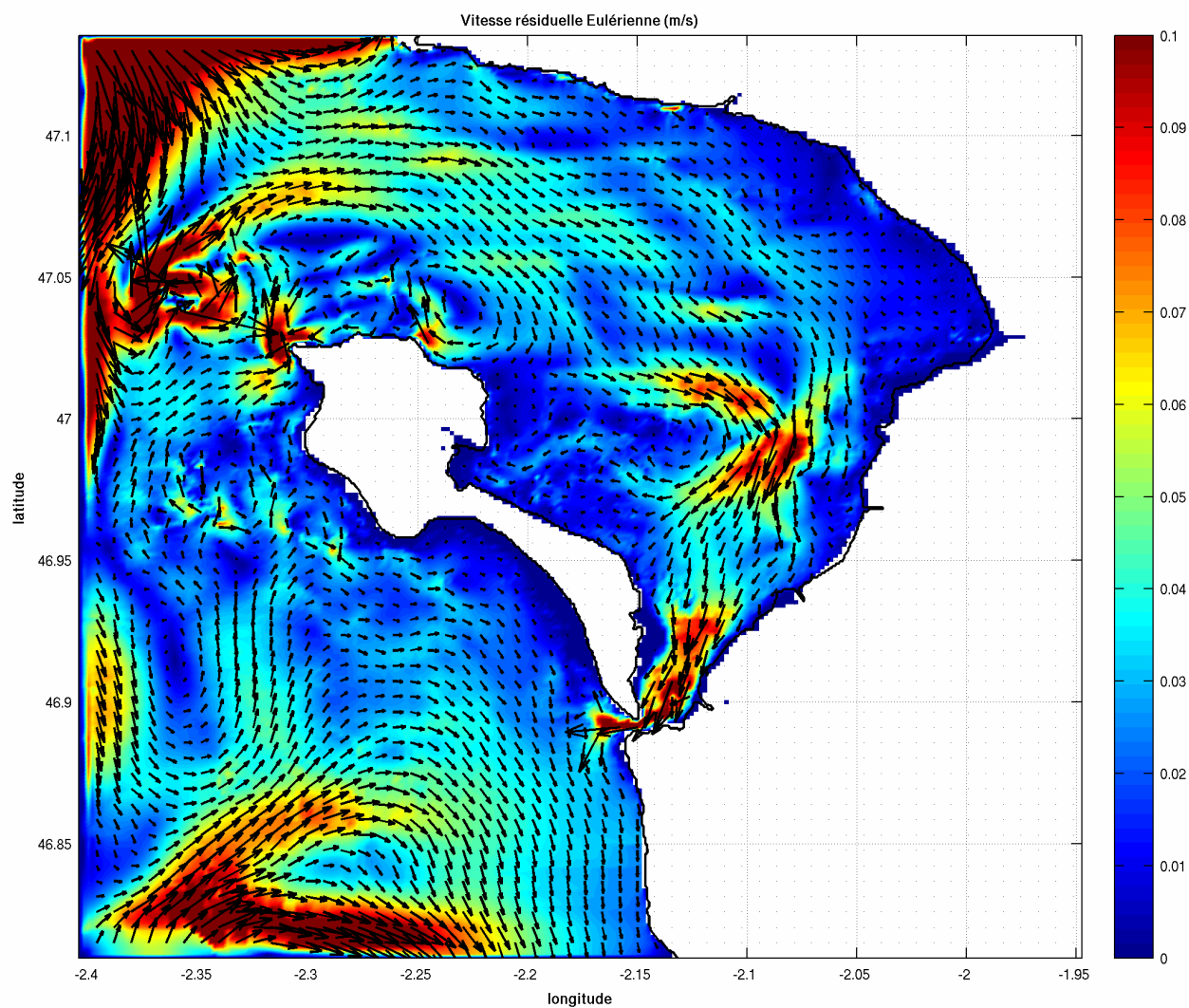


4.3. Discussion et conclusions :

- Les échouages d'ulves recensés sur les faces nord et ouest exposées de l'île (sites d'échouages de Noirmoutier-Veil, Noirmoutier l'Epine et Noirmoutier Guérinière, voir Fig.3) proviennent en toute vraisemblance de populations sources locales d'ulves fixées en limites basses de platiers rocheux situés dans la partie nord de l'île, entre la Guérinière et le Grand Veil.
 - La prospection de ces platiers, même incomplète, a indiqué de fortes colonisations d'entéromorphes que l'on ne retrouve pas en proportion dans les échouages, par rapport notamment aux ulves qui semblent former des populations plus clairsemées et limitées en bas l'estran. Une hypothèse explicative pourrait être que les ulves se détachent plus facilement des substrats que les entéromorphes ou/et qu'elles se transportent et s'échouent plus facilement. Une autre hypothèse pourrait être que d'importants secteurs de colonisation d'ulves aient pu échapper à la prospection, notamment au niveau des petits fonds du proche littoral qui pourraient abriter des populations d'ulves difficilement observables à marée basse. L'hypothèse d'une reprise de croissance dans l'eau avec production de biomasse avant échouages n'est pas validée par les observations morphologiques des ulves échouées. La dynamique saisonnière des échouages d'ulves, très tardive cette année (Fig. 11) n'a pas permis non plus d'analyser le plein développement de leurs populations fixées.
- Les échouages importants d'ulves qui sont recensés dans le grand site abrité de Noirmoutier-Gois (Fig.3) proviennent en toute vraisemblance de populations fixées sur les vastes surfaces de platiers rocheux plus ou moins couverts de sédimentation fine de cette zone. Cette zone de platiers est parsemée de retenues d'eau favorables aux colonisations d'ulves, notamment au niveau des zones de parc à huîtres du secteur de Noirmoutier-en-Ile. On ne peut exclure que la production d'ulves d'arrachage à partir de ces gisements soit renforcée par la contribution d'algues provenant de limites de platiers s'étendant encore plus au large (secteur de Vendette).
- L'abondance de populations fixées d'entéromorphes sur certains secteurs d'estran, notamment sur les platiers nord et ouest de l'île, doit être, au même titre que celle de populations ulves, considérée comme un indicateur de niveau élevé de sels nutritifs dans la masse d'eau côtière, même si d'autres facteurs que nutritionnels peuvent contrôler le développement de ces algues opportunistes sur les estrans rocheux (cf. § 2.2). On considère aujourd'hui qu'un dérèglement de ces facteurs de contrôle peut favoriser la colonisation ou le maintien hivernal de ces algues opportunistes, et faire apparaître des phénomènes de marées vertes dans des masses d'eau qui n'ont pas connus d'élévation récente sensibles de leurs niveaux de sels nutritifs (mais à condition bien sûr que ces niveaux soit déjà élevés).
- L'observation des courants résiduels de marée (Fig. 18) laisse à penser que du matériel dérivant pourrait être expulsé de cette zone par le goulet de la pointe de la Fosse et se retrouver, selon les vents, sur les sites d'échouages de Noirmoutier-la-Fosse et même de Saint-Jean-de-Monts (Fig.3). En soutien de cette hypothèse, on

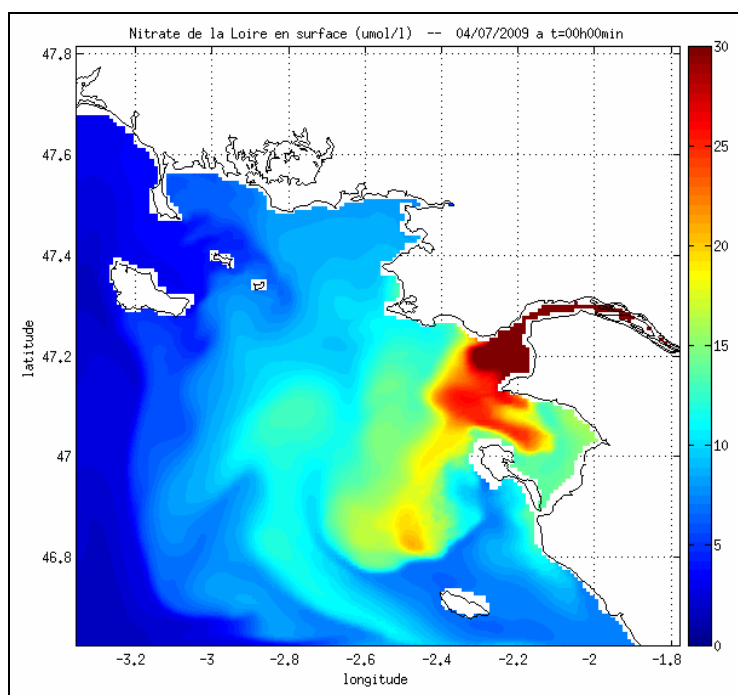
se réfèrera à des observations de terrain qui ont parfois permis des rapprochements entre les morphologies d'ulves provenant de ces deux sites et du site de Noirmoutier-Gois. Ces observations restent toutefois à consolider par des analyses d'espèces et de populations plus détaillées.

Fig. 18 : Ccartographie des champs de courants résiduels de marées autour de l'Ile de Noirmoutier



Expertise du phénomène de prolifération algale sur les côtes vendéennes : origine des algues et des nutriments

Phase 2 : origine des nutriments alimentant le phénomène de marée verte



Rapport intermédiaire pour le Conseil Général de Vendée
(marché n°20100020100204)

SOMMAIRE

1	<i>INTRODUCTION.....</i>	5
1.1	Rappels des objectifs	5
2	<i>Description des modèles hydrodynamiques 3D et validation du modèle intermédiaire de rang 1 et du modèle de détail de rang 2 centré sur la baie de Bourgneuf.....</i>	6
2.1	Brève description du modèle MARS	6
2.2	Définition des modèles emboîtés	6
2.3	Evaluation de la qualité des modèles de rang 1 et 2 et validation.....	7
3	<i>Analyse des courants maximum et des courants résiduels Eulériens</i>	9
4	<i>Données nécessaires au forçage des modèles hydrodynamiques 3D.....</i>	11
4.1	Données météorologiques de données de flux des rivières.....	11
5	<i>Exploitation des modèles hydrodynamiques 3D.....</i>	14
5.1	Résultat de la dispersion de l'azote dissous dans l'hypothèse d'un écoulement au fil de l'eau pour les apports en azote dissous provenant du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain, du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles	14
5.1.1	Modèle de rang 1.....	14
5.1.2	Modèle de rang 0.....	19
5.2	Résultat de la dispersion de l'azote dissous dans l'hypothèse d'un débit nul pour les apports en azote dissous provenant du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain, du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles	23
6	<i>CONCLUSION</i>	24

FIGURES

Figure 1 : Emprise des modèles de rang 0, 1 et 2 (figure de gauche) et bathymétrie du rang 2 (figure de droite) ...	7
Figure 2 : Localisation des points des points de validation des modèles de rang 1 et 2	7
Figure 3 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenus pour un point fixe situé au sud ouest de l'Ile de Noirmoutier (2.915° W, 47.099° N) entre la solution du modèle de rang 1 et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois de mars 2009)	8
Figure 4 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenus pour un point fixe situé au sud ouest de l'Ile de Noirmoutier (2.310° W, 46.901° N) entre la solution du modèle de rang 2 et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois de mars 2009)	8
Figure 5 : Carte des courants maximum de marée (m/s) pour un coefficient de marée de 70	9
Figure 6 : Carte des courants résiduels Eulériens (m/s) pour un coefficient de marée de 70 sans vent calculée au moyen du modèle de détail de rang 2.....	10
Figure 7 : Evolution pluriannuelle du débit moyen de la Loire entre avril et septembre de 2002 à 2010	11
S'agissant des grands fleuves, les données de débits ont été collectées au moyen de la base de données Ifremer. Les données en NO3 reposent sur la base du travail de (Guillaud JF., 2008) qui ont mis en évidence des relations liant le débit à la concentration en nutriments (nitrate, ammonium, silicate, phosphate...). La Figure 8 illustre la localisation géographique des 15 sources d'azote retenues pour cette étude et le Tableau 1 propose une synthèse de ces apports en termes de débit moyen estimé de mai à septembre 2009.....	
Figure 8 illustre la localisation géographique des 15 sources d'azote retenues pour cette étude et le Tableau 1 propose une synthèse de ces apports en termes de débit moyen estimé de mai à septembre 2009.....	12
Figure 9 : Localisation des 15 sources d'apport en azote dissous considérés dans l'étude.....	12
Sur la période s'étendant d'avril à septembre 2009 et dans la dispersion de l'azote dissous, le pourcentage moyen de l'azote dissous considéré en tant que traceur passif et conservatif en 18 points fixes est de l'ordre de 83 % pour la Loire, 16 % pour la Vilaine et moins de 0.1 % pour les huit autres sources d'azote (cf. Figure 10). Les valeurs moyennes en azote dissous sont de l'ordre de 11 µM pour la Loire, 2 µM pour la Vilaine et entre 10 ⁻⁴ et 10 ⁻⁶ µM pour les autres sources d'azote. L'écart des ordres de grandeurs entre les deux principaux contributeurs et le reste des apports a conduit pour les Figures 11 à 12 à utiliser une représentation en échelle logarithmique en base 10 dont la palette varie de -6 à 2. Dans ce système d'unité, entre les valeurs 2 et 1 correspond une dilution du traceur par 10 et une dilution par 100 entre les valeurs 2 et 0.....	
Figure 13: Pourcentage moyen sur la période d'avril à septembre de l'azote dissous calculé au moyen du modèle de rang 1.....	15
Figure 14 : Localisation des dix points fixes utilisés pour le suivi de l'azote dissous au moyen.....	16
Figure 15 : Evolution de l'azote dissous au point 1 (représentation en échelle log).....	16
Figure 16 : Evolution de l'azote dissous au point 2 (représentation en échelle log).....	16
Figure 17 : Evolution de l'azote dissous au point 3 (représentation en échelle log).....	17
Figure 18 : Evolution de l'azote dissous au point 4 (représentation en échelle log).....	17
Figure 19 : Evolution de l'azote dissous au point 5 (représentation en échelle log).....	17
Figure 20 : Evolution de l'azote dissous au point 6 (représentation en échelle log).....	17
Figure 21 : Evolution de l'azote dissous au point 7 (représentation en échelle log).....	18
Figure 22 : Evolution de l'azote dissous au point 8 (représentation en échelle log).....	18
Figure 23 : Evolution de l'azote dissous au point 9 (représentation en échelle log).....	18
Figure 24 : Evolution de l'azote dissous au point 10 (représentation en échelle log)	18
La Figure 25 illustre en 5 points fixes le pourcentage d'azote dissous moyenné entre avril et septembre 2009 provenant des différentes sources d'azote. Les résultats de ce modèle sont volontairement restreints à la partie sud du littoral Vendéen qui correspond globalement à la partie manquante du modèle de rang 1 dont l'emprise géographique ne permet pas de couvrir la zone s'étendant de Bretignolles-sur-Mer à La Tranche-sur-Mer (limite sud du modèle de rang 1 au niveau de Bretignolles-sur-Mer).	
En termes de concentrations en azote dissous, la teneur moyenne de la Loire est de 4.4 µM ; 0.8 µM pour la Vilaine, 0.4 pour Garonne, la Sèvre Niortaise et la Charente et inférieur à 0.2 µM pour la Dordogne et le Lay (cf. figures 26 à 27).....	19
Figure 28 : Pourcentage moyen sur la période d'avril à septembre de l'azote dissous calculé au moyen du modèle de rang 0.....	20
Figure 29 : Localisation des dix points fixes utilisés pour le suivi de l'azote dissous	21
Figure 30 : Evolution de l'azote dissous au point 1 (représentation en échelle log).....	21
Figure 31 : Evolution de l'azote dissous au point 2 (représentation en échelle log).....	21
Figure 32 : Evolution de l'azote dissous au point 3 (représentation en échelle log).....	22
Figure 33 : Evolution de l'azote dissous au point 4 (représentation en échelle log).....	22
Figure 34 : Evolution de l'azote dissous au point 5 (représentation en échelle log).....	22

Expertise du phénomène de prolifération algale sur les côtes Vendéennes : origine des algues et des nutriments

1 INTRODUCTION

1.1 Rappels des objectifs

Le développement d'algues vertes est constaté depuis plusieurs années sur différents secteurs du littoral vendéen. La quantité d'algues échouées durant la saison estivale semble de plus en plus importante au fil des années et pose de plus en plus de questions sur leur traitement et devenir.

L'objet de la présente étude est de faire le point sur l'étendue de ce phénomène, ses origines et les sources d'alimentation en azote des marées vertes en Vendée.

Cette expertise doit permettre, dans les secteurs géographiques de développement des algues vertes, de distinguer l'importance relative des grands fleuves (Loire, Vilaine, Charente, Garonne, Dordogne ...) et d'éventuels apports locaux (rivières et stations d'épuration) dans la nutrition de ces algues, produites en principe dans le très proche littoral.

Après avoir identifié les secteurs côtiers touchés ces 5 dernières années, pour chaque site, il sera procédé à :

- un état des lieux du phénomène de développement des algues vertes,
- une analyse de l'origine de ces algues, du ou des lieux de croissance et des conditions de transport,
- la détermination de l'origine des sources d'alimentation en azote pour ces algues,
- des propositions d'actions concrètes et quantifiées.

Pour ce qui est spécifiquement du volet modélisation, ce projet nécessitera l'élaboration de plusieurs modèles hydrodynamiques d'emprises géographiques et de résolutions spatiales différentes afin d'estimer la contribution des différentes sources d'azote (rivières + STEP) à l'alimentation en azote dissous des marées vertes présentes sur le secteur côtier de Noirmoutier. Les caractéristiques physiques de la zone d'étude (stratification thermique et haline importante) imposeront le recours à des modèles tridimensionnels si l'on veut représenter correctement les processus physiques de dispersion des sels nutritifs principalement présents sous la forme nitrate. Pour ce faire, le Ceva propose d'utiliser le modèle MARS3D développé par Ifremer afin d'étudier la courantologie et la dispersion de l'azote dissous considéré en tant que traceur passif et conservateur (pas de consommation possible par les micro-organismes). Le Ceva a par ailleurs sollicité la collaboration d'Ifremer pour mener au mieux cette étude en raison de la complexité de la zone d'étude et des besoins de calcul (utilisation du calculateur Caparmor d'Ifremer en raison de temps de calcul trop importants sur des PC).

2 Description des modèles hydrodynamiques 3D et validation du modèle intermédiaire de rang 1 et du modèle de détail de rang 2 centré sur la baie de Bourgneuf

2.1 Brève description du modèle MARS

L'outil de modélisation est le modèle MARS3D (3D hydrodynamical Model for Application at Regional Scale) développé par Ifremer (Lazure P. et Dumas F., 2008). Le modèle MARS est un modèle en différences finies et est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes à trois dimensions d'espace. Il repose sur la séparation des modes barotrope et barocline et utilise le principe des emprises emboîtées sous forme gigogne. En 2D, ces équations, moyennées sur la verticale, fournissent le système d'équations dit de Saint-Venant. Un forçage météorologique tenant compte de la température de l'air, du vent, de la pression atmosphérique, de la couverture nuageuse et de l'humidité relative peut être pris en compte sur toute la surface du modèle et ses éventuelles loupes successives.

On précise que le Ceva a reçu l'assistance du laboratoire Dyneco/Physed d'Ifremer concernant le choix de la stratégie de modélisation, la mise en place opérationnelle des modèles élaborés et l'utilisation du calculateur Caparmor pour faire tourner le modèle de grande emprise.

2.2 Définition des modèles emboîtés

La prise en compte des apports des grands fleuves (Vilaine, Loire, Charente, Dordogne et Garonne) nécessite le recours à un modèle de grande emprise englobant l'ensemble de la façade atlantique. Le modèle MANGA développé par Ifremer et utilisé dans le cadre du projet Previmer (<http://www.previmer.org>) a été retenu. Ce premier modèle (appelé rang 0) englobe le Golfe de Gascogne et une partie de la Manche et dispose d'une résolution spatiale de 5 km (extension en latitude du nord de l'Espagne jusqu'au Pays-Bas). En revanche, ce modèle ne permet pas de représenter finement le transport des substances dissoutes à des échelles géographiques plus locales telles que celle de la baie de Bourgneuf.

Pour ce faire, un second modèle (appelé rang 1) possédant une résolution de 800 m et s'étendant en latitude du sud de l'île d'Yeu jusqu'aux environs de Lorient a été élaboré. Ce dernier reçoit ses conditions aux limites (en hauteur d'eau, vitesses horizontale et verticale, salinité, température, substances dissoutes) au moyen du précédent modèle de rang 0. Le modèle de rang 1 permet une modélisation plus fine des panaches de dispersion provenant de bassins versants de surfaces plus limitées que ceux du rang 0. Un troisième et dernier modèle (appelé rang 2) permettant la prise en compte de rejets très locaux (Step, etiers) a été développé sur le secteur de la baie de Bourgneuf. Ce modèle dispose d'une résolution de 150 m et son emprise géographique s'étend en latitude de Notre-Dame-de-Monts jusqu'à la Pointe St Gildas. Comme pour le modèle intermédiaire de rang 1, le modèle de rang 2 est forcé au niveau de ses frontières ouvertes par le modèle rang 1.

Les bathymétries des rangs 1 et 2 ont été élaborées au moyen des données catalogues disponibles à l'Ifremer et en utilisant l'outil BMG Tools pour la création, la modification et la validation des fichiers de bathymétrie. Les trois modèles développés pour cette étude sont tridimensionnels et sont discrétisés à hauteur de 30 niveaux sur la verticale pour les modèles de rang 0 et 1 et 15 niveaux pour le modèle de détail de rang 2 centré sur la baie de Bourgneuf.

La Figure 1 illustre l'emprise géographique des différents modèles ainsi que la bathymétrie du modèle de détail en baie de Bourgneuf.

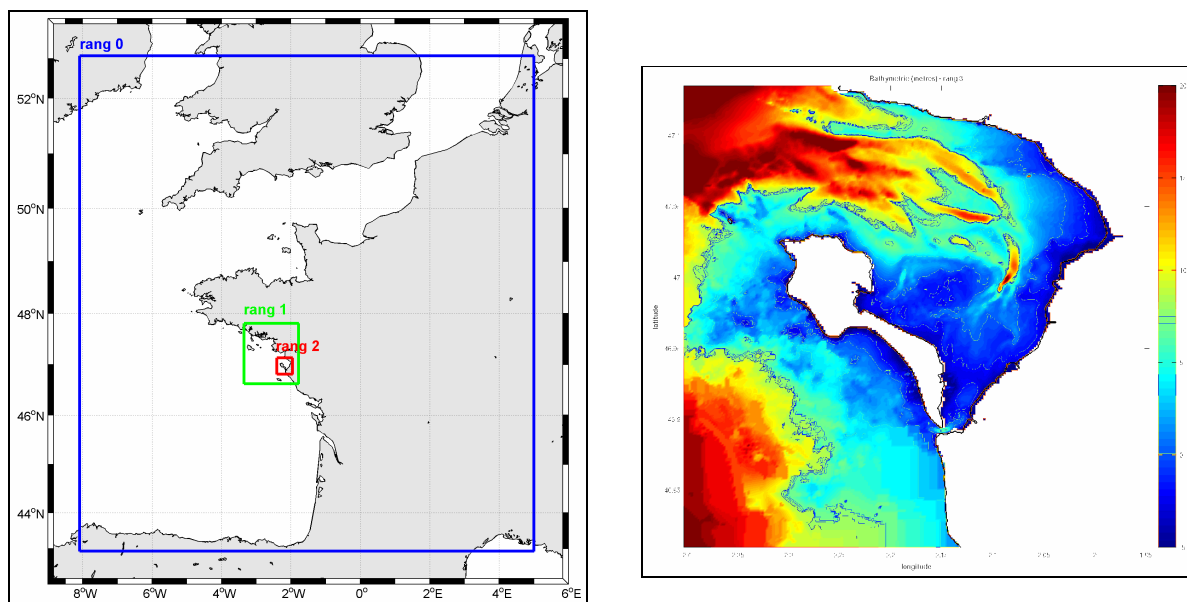


Figure 1 : Emprise des modèles de rang 0, 1 et 2 (figure de gauche) et bathymétrie du rang 2 (figure de droite)

2.3 Evaluation de la qualité des modèles de rang 1 et 2 et validation

L'évaluation de la qualité des modèles hydrodynamiques de rang 1 et 2 pour la reproduction des niveaux d'eau a consisté en la comparaison en un point fixe, traduite en décalage temporel et en différence de marnage par rapport au marnage moyen, des hauteurs d'eau calculées par le modèle avec celles prédites par les données du fichier CST_France du SHOM (Le Roy *et al.*, 2003). Ce dernier fournit les amplitudes et les phases des 115 premiers constituants du signal de marée et mêle les résultats de simulations 2D (au moyen du modèle TELEMAC 2D) avec des résultats de mesures in-situ réalisées en Manche et sur le plateau continental du Golfe de Gascogne via des marégraphes. Les résultats des simulations de validation présentés dans ce rapport ont été obtenus en l'absence de vent et sans prise en compte des effets de la pression atmosphérique. Les comparaisons réalisées sur les hauteurs d'eau reposent sur la prédiction du mois de mars 2009. Les figures 3 et 4 présentent le résultat de l'évolution du déphasage moyen et de la différence de marnage moyenne évalué en un point fixe pour les rangs 1 et 2.

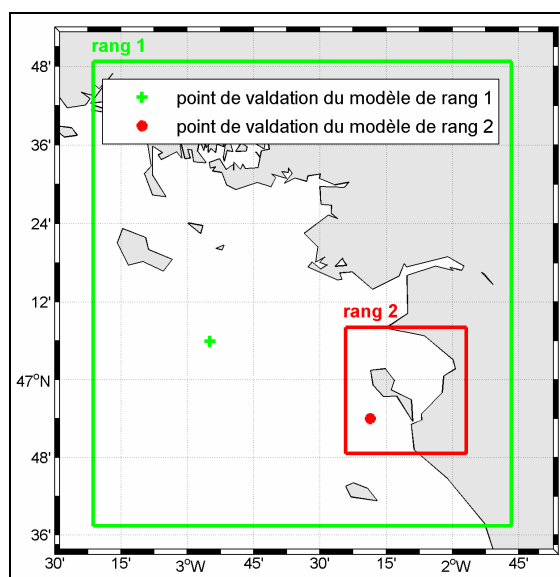


Figure 2 : Localisation des points des points de validation des modèles de rang 1 et 2

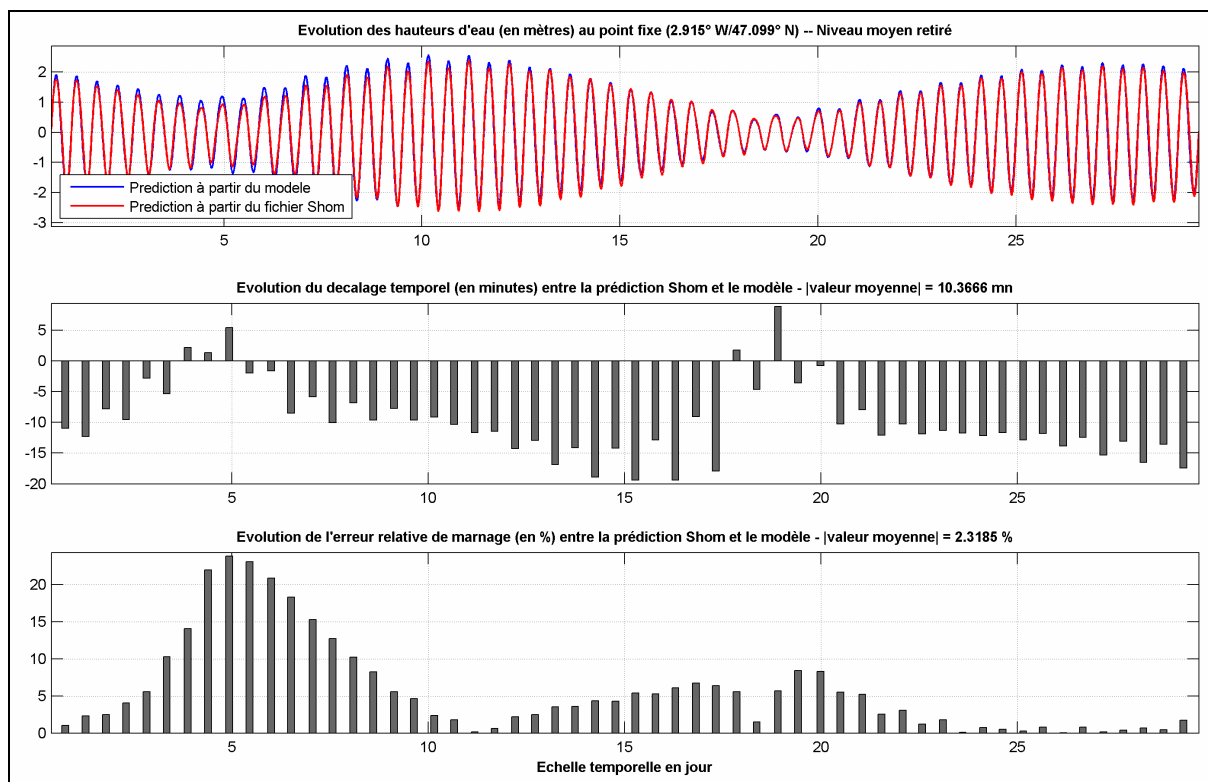


Figure 3 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenus pour un point fixe situé au sud ouest de l'île de Noirmoutier (2.915° W, 47.099° N) entre la solution du modèle de **rang 1** et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois de mars 2009)

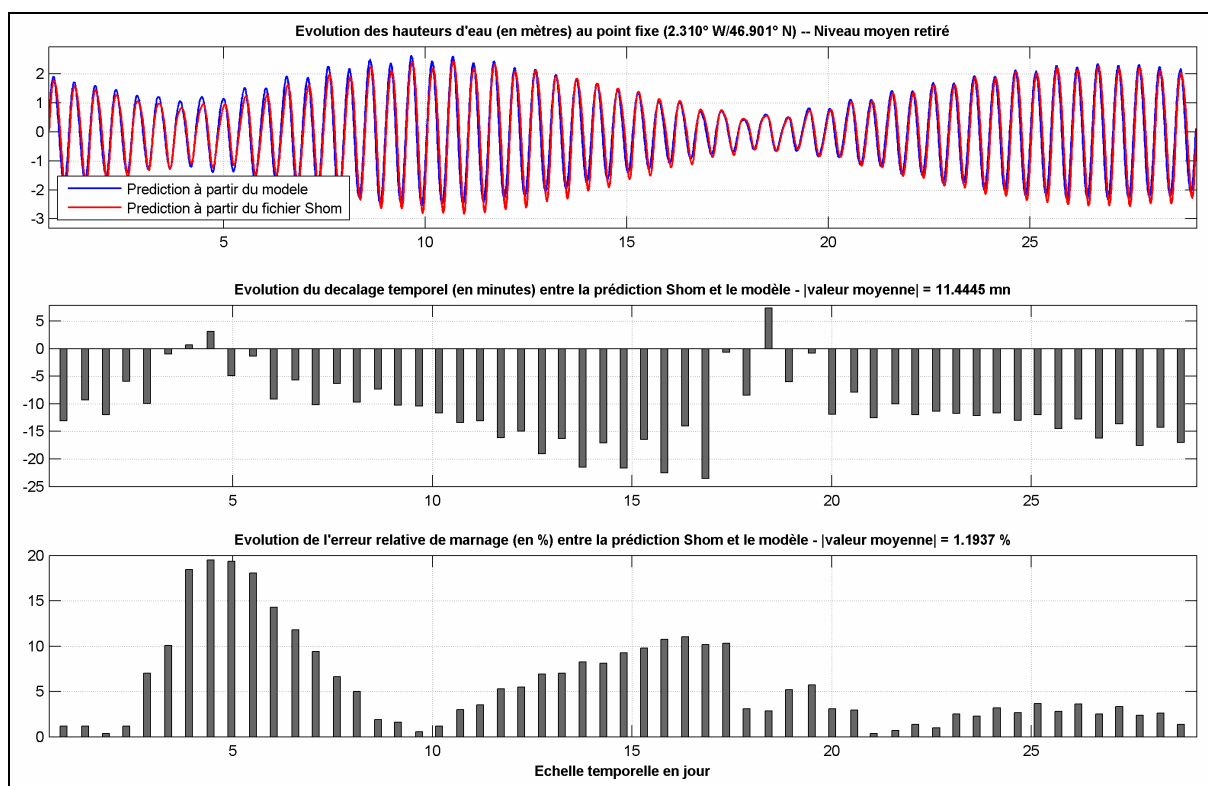


Figure 4 : Evolution du déphasage moyen et de l'erreur relative moyenne sur la différence de marnage obtenus pour un point fixe situé au sud ouest de l'île de Noirmoutier (2.310° W, 46.901° N) entre la solution du modèle de **rang 2** et la solution estimée à partir des constantes harmoniques du fichier CST_France (moyenne réalisée sur la prédiction du mois de mars 2009)

On observe une tendance assez marquée à l'augmentation (respectivement à la diminution) du déphasage et de la différence de marnage par rapport au marnage moyen en période de morte-eau (respectivement en période de vive-eau). L'erreur relative moyenne de marnage sur l'ensemble du mois de mars 2009 entre la prédiction Shom et le modèle est de 1.2 % pour le rang 2 (2.3 % pour le rang 1) tandis que le décalage temporel moyen est inférieur à 12 minutes (10,3 minutes pour le rang 1).

La validation des courants de marée barotrope calculés par le modèle de rang 2 a consisté à comparer visuellement sur un cycle de marée la direction et l'intensité des champs de courants fournis dans l'étude (Lazure P, 1992) avec ceux du modèle. Globalement, on observe que les champs de courants calculés par le modèle sont cohérents en direction et intensité avec ceux disponibles dans (Lazure P, 1992). Toutefois, le manque de données disponibles pour la validation des champs de courants (pas de données pour le rang 1), la méthode de comparaison qui repose sur une observation visuelle et les différences de résolution spatiale entre les sources de données à comparer rendent délicat la validation des courants de marée barotrope. Néanmoins, ces comparaisons indiquent un bon fonctionnement des modèles de rang 1 et 2 qui autorisent leur exploitation.

3 Analyse des courants maximum et des courants résiduels Eulériens

La carte de l'intensité des courants maximum, présentée en Figure 5 au moyen de la version 2D du modèle de rang 2 dans le cas d'une marée moyenne de coefficient 70 se reproduisant identiquement à elle-même et en l'absence de vent, fournit une vision synoptique de certaines particularités hydrodynamiques. C'est au nord immédiat de l'île de Noirmoutier que les courants maximum sont les plus importants (> 70 cm/s). On observe logiquement en baie de Bourgneuf un renforcement du courant maximum au niveau du chenal du Fain (présence de hauts fonds), dans le passage du Gois et au niveau de la Pointe de la Fosse. La partie sud de l'île de Noirmoutier est le siège de faibles courants maximum avec la présence assez marquée d'un gradient de courant entre le large et la côte (typiquement de plus de 60 cm/s au large à moins de 10 cm/s à la côte).

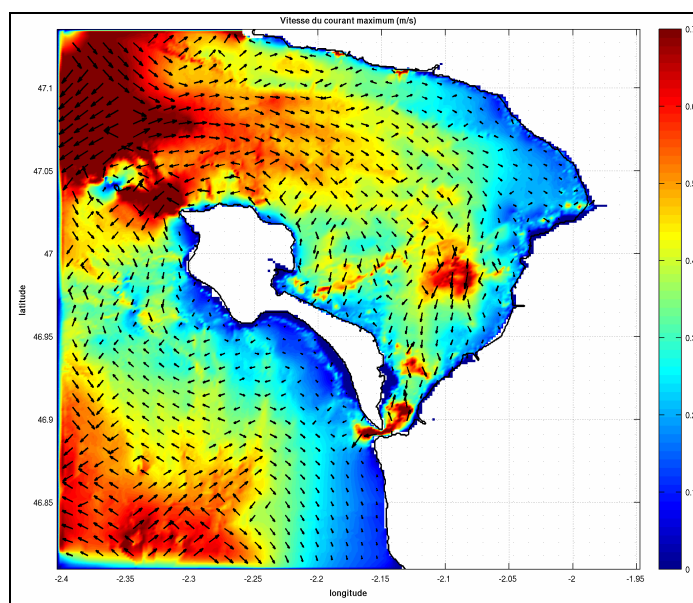


Figure 5 : Carte des courants maximum de marée (m/s) pour un coefficient de marée de 70

Les courants résiduels renseignent sur le déplacement à long terme des particules d'eau et donc de toutes substances dissoutes sous l'effet de l'advection (dispersion de polluants en mer : azote, phosphore, coliformes fécaux...) ou transportées par les courants (algues...). Il existe plusieurs définitions du courant résiduel. Notre choix s'est porté sur la notion de courants résiduels Eulériens dont le calcul consiste à effectuer en chaque point du maillage la moyenne des courants sur un cycle de marée. On obtient donc une « circulation moyenne » d'où la notion de marée a disparu. La Figure 6 fournit une représentation des courants résiduels Eulériens de marée dans l'hypothèse d'une marée moyenne et par situation de vent nul.

D'une manière générale, on observe que le mouvement résiduel est faible à l'échelle de la baie de Bourgneuf avec, comme pour les courants maximum, la présence de maxima locaux au niveau du chenal du Fain et de la Pointe de la Fosse. A l'échelle du modèle rang 2, on note la présence de nombreuses structures tourbillonnaires : présence d'un tourbillon cyclonique et anticyclonique à l'ouest de Noirmoutier, au niveau du Banc de la Chaise et du chenal du Fain dont le tourbillon a pour effet de faire bifurquer une partie des eaux entrantes vers la côte nord de l'île de Noirmoutier avant que celles-ci ne soient à nouveau reprises par le flux entrant.

On retiendra qu'en baie de Bourgneuf, le mouvement général de la masse d'eau est dirigé vers le sud en direction de la Pointe de la Fosse avec des vitesses de transport importantes au niveau du passage du Gois. On peut donc supposer que les algues vertes produites au niveau des amas rocheux de la Préoire dans le proche infralittoral auront tendance après arrachage, à être transportées à moyen terme en direction du goulet de Fromentine et occasionner des échouages plus ou moins importants sur les secteurs de plage du sud de l'île de Noirmoutier en raison des très faibles courants résiduels sur l'ensemble de ce secteur de côte. Cette hypothèse apparaît cohérente avec les observations réalisées par le Ceva en 2009 et 2010 sur le linéaire côtier de Noirmoutier.

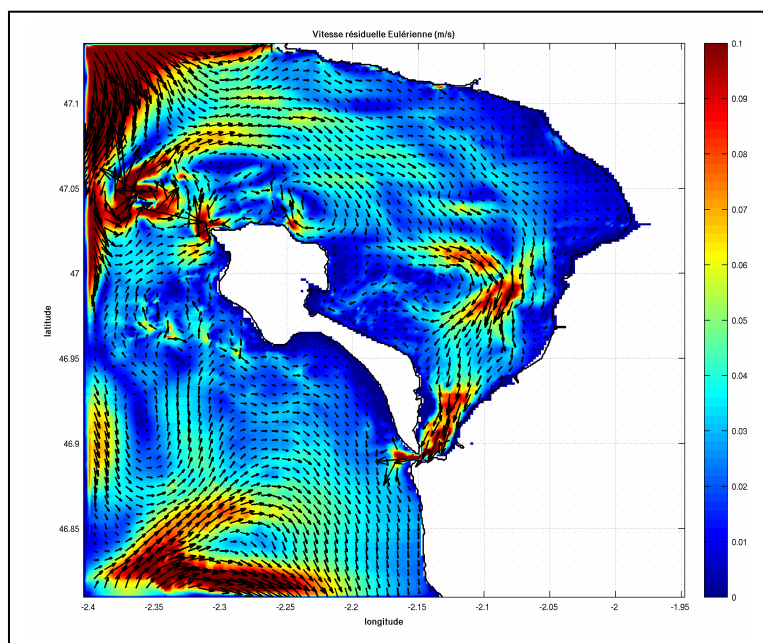


Figure 6 : Carte des courants résiduels Eulériens (m/s) pour un coefficient de marée de 70 sans vent calculée au moyen du modèle de détail de rang 2

4 Données nécessaires au forçage des modèles hydrodynamiques 3D

4.1 Données météorologiques de données de flux des rivières

L'année 2009, année hydrologique que l'on peut qualifier d'année moyenne si l'on se réfère à l'évolution pluri-annuelle des débits de la Loire (cf. Figure 7), a été choisie pour les simulations. Ce choix a été contraint par les données disponibles de flux et d'observation de la marée verte acquises récemment par le Ceva sur le secteur de Noirmoutier.

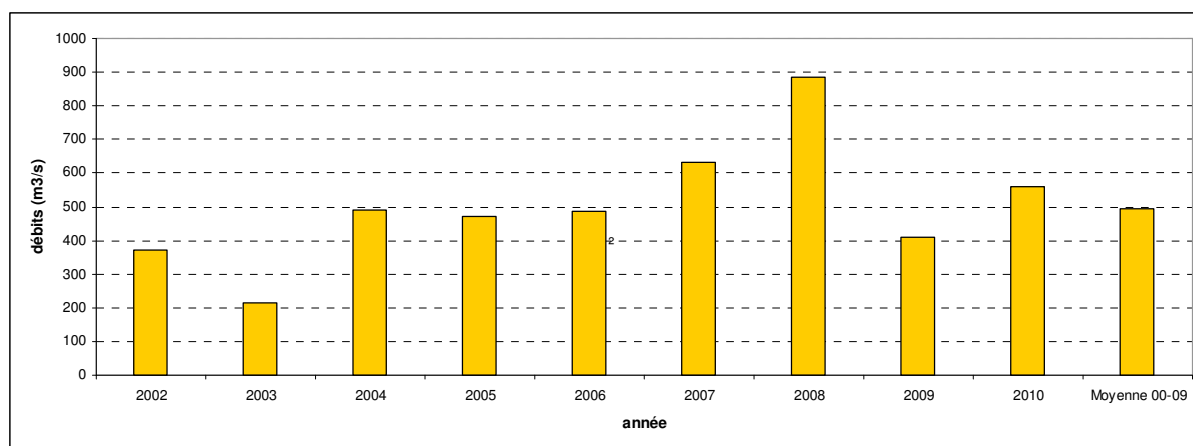


Figure 7 : Evolution pluriannuelle du débit moyen de la Loire entre avril et septembre de 2002 à 2010

S'agissant des données de forçages météorologiques (température de l'air, vent, pression atmosphérique, couverture nuageuse et l'humidité relative), le modèle utilise les données réelles de l'année 2009 collectées auprès de Météo France.

Pour ce qui est des données de flux des sources locales (débits et concentrations en NO_3 des rivières à l'exception des Step où l'on considère également l'azote sous la forme ammonium), ces derniers ont été fournis pour le secteur de Noirmoutier par le département Service de l'Eau du Conseil Général de la Vendée. La complexité hydrologique de la zone d'étude par la présence de marais sur pratiquement l'ensemble du littoral Vendéen et l'absence de mesures de débits aux exutoires des nombreux étiers n'a pas permis de se doter de séries réelles pour ces apports. Cependant, l'absence de données de débits mesurés aux exutoires des principaux cours d'eau du secteur de Noirmoutier (Lay, Sèvre Niortaise, Vie, Jaunay, étiers de Sallertaine, du Dain et du Collet) n'introduit pas de biais significatif à l'étude de dispersion de l'azote dissous dans la mesure où d'une part, les débits de ces cours d'eau sont nuls sur la période printemps-été (communication du Service de l'Eau du Conseil Général de la Vendée) et d'autre part que la marée verte se développe en période printanière-estivale. Toutefois, la période de simulation s'étendant d'avril à septembre, on pourra observer une limitation dans la validité des résultats en tout début de saison principalement sur le mois d'avril où les débits peuvent être encore relativement soutenus.

Afin d'encadrer au mieux les résultats, nous avons opté pour deux hypothèses de simulations : une première avec des débits nuls sur les cours cités précédemment et une seconde où l'on considère un écoulement de ces derniers au fil de l'eau ce qui revient donc à supposer l'absence des marais et/ou des retenues d'eau et à surestimer leurs apports. On précise que pour les étiers du Collet et du Dain, l'estimation du débit (dans l'hypothèse où ces cours d'eau s'écoulent au fil de l'eau) a consisté à prendre pour chacun de ces étiers la moitié du débit Falleron à Machecoul. Pour ce qui est du débit à l'exutoire de l'étier de Sallertaine, toujours dans l'hypothèse d'un écoulement au fil de l'eau, le débit mesuré au niveau de Pont-Habert à Challans a été utilisé.

S'agissant des grands fleuves, les données de débits ont été collectées au moyen de la base de données Ifremer. Les données en NO₃ reposent sur la base du travail de (Guillaud JF., 2008) qui ont mis en évidence des relations liant le débit à la concentration en nutriments (nitrate, ammonium, silicate, phosphate...). La Figure 8 illustre la localisation géographique des 15 sources d'azote retenues pour cette étude et le Tableau 1 propose une synthèse de ces apports en termes de débit moyen estimé de mai à septembre 2009.

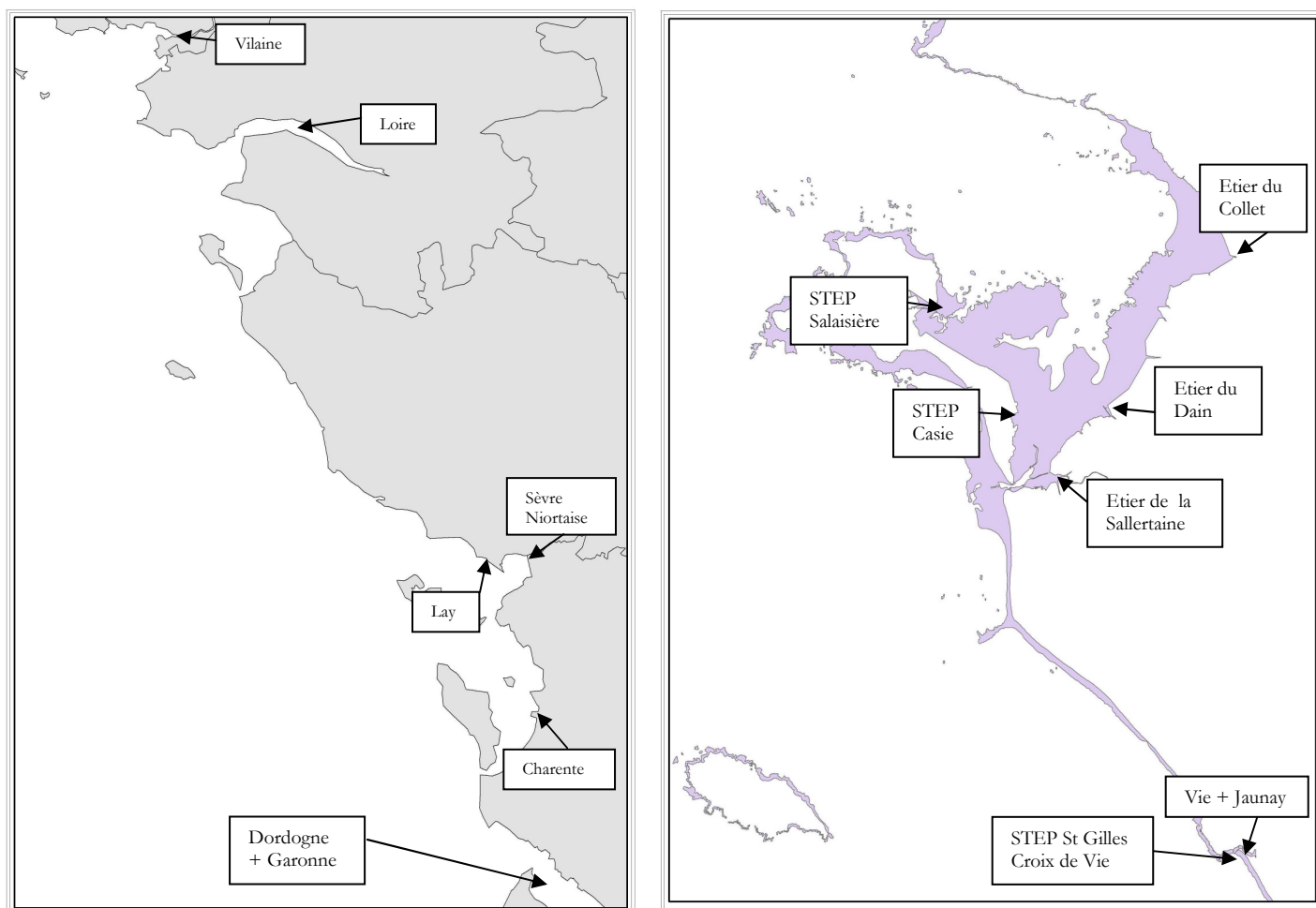


Figure 9 : Localisation des 15 sources d'apport en azote dissous considérées dans l'étude

Numéro	Cours d'eau	Source de la donnée	Débits moyens d'avril à septembre 2009 (m3/s)	Remarques	Modèle utilisé pour le forçage en débit et concentration en azote dissous à l'exutoire
1	Vilaine	Ifremer/Sismer	29		Rang 0 et 1
2	Loire	Ifremer/sismer	410		Rang 0 et 1
3	Charente	Ifremer/sismer	29		Rang 0
4	Dordogne	Ifremer/Sismer	171		Rang 0
5	Garonne	Ifremer/Sismer	476		Rang 0
6	Le Lay	Service de l'eau/ CG 85	2.15		Rang 0
7	La Sèvre Niortaise	Service de l'eau/ CG 85	4.05		Rang 0
8	La Vie	Service de l'eau/ CG 85	0.297	Moyenne 2006-2009 pour le débit	Rang 1
9	Le Jaunay	Service de l'eau/ CG 85	0.130	Moyenne 2006-2009 pour le débit	Rang 1
10	Etier du Collet	Service de l'eau/ CG 85	0.116	Moyenne 2000-2007 pour le NO3	Rang 2
11	Etier du Dain	Service de l'eau/ CG 85	0.116	Moyenne 1995-2009 pour le NO3	Rang 2
12	Etier de La Sallertaine	Service de l'eau/ CG 85	0.087	Moyenne 1995-2009 pour le NO3	Rang 2
13	Step de La Salaisière	Service de l'eau/ CG 85	0.0383	Moyenne 2005-2009 pour NH4 et NO3	Rang 2
14	Step de La Casie	Service de l'eau/ CG 85	0.010	Moyenne 2005-2009 pour NH4 et NO3	Rang 2
15	Step de St Gilles	Service de l'eau/ CG 85	0.0653		Rang 1 et 2

Tableau 1 : Synthèse du débit moyen d'avril à septembre 2009 des apports retenus pour l'étude de dispersion de l'azote dissous. Les apports numérotés de 6 à 15 ont théoriquement un débit nul à leur exutoire en période estivale.

5 Exploitation des modèles hydrodynamiques 3D

Pour les raisons évoquées au point précédent, deux hypothèses de simulations ont été réalisées sur la période de simulation s'étalant d'avril à septembre 2009 et en utilisant les données réelles de marée et de météorologie :

- **Hypothèse 1 :** ensemble des apports (cf. Tableau 1) avec un débit majoré pour les cours d'eau du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain et du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles puisqu'on considère pour ces sources d'azote un écoulement au fil de l'eau
- **Hypothèse 2 :** apport nul pour les cours d'eau du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain et du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles. Seuls

Pour ces deux types de simulation, la seconde hypothèse est à considérer comme étant la plus vraisemblable du point de vue de la représentativité des apports en azote dissous.

5.1 Résultat de la dispersion de l'azote dissous dans l'hypothèse d'un écoulement au fil de l'eau pour les apports en azote dissous provenant du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain, du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles

5.1.1 *Modèle de rang 1*

Dans le modèle de rang 1, dix sources d'azote ont été considérées : Vilaine, Loire, Charente, Dordogne, Garonne, Lay, Sèvre Niortaise, Vie, Jaunay et STEP de St Gilles Croix de Vie. Malgré l'utilisation d'un débit majoré pour les apports provenant du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay et de la Step St Gilles Croix de Vie, il ressort de façon très net que la Loire et dans une moindre mesure de la Vilaine apparaissent comme les deux principaux contributeurs à l'enrichissement en azote dissous du littoral Vendéen.

Sur la période s'étendant d'avril à septembre 2009 et dans la dispersion de l'azote dissous, le pourcentage moyen de l'azote dissous considéré en tant que traceur passif et conservatif en 18 points fixes est de l'ordre de 83 % pour la Loire, 16 % pour la Vilaine et moins de 0.1 % pour les huit autres sources d'azote (cf. Figure 10). Les valeurs moyennes en azote dissous sont de l'ordre de 11 μM pour la Loire, 2 μM pour la Vilaine et entre 10^{-4} et 10^{-6} μM pour les autres sources d'azote. L'écart des ordres de grandeurs entre les deux principaux contributeurs et le reste des apports a conduit pour les Figures 11 à 12 à utiliser une représentation en échelle logarithmique en base 10 dont la palette varie de -6 à 2. Dans ce système d'unité, entre les valeurs 2 et 1 correspond une dilution du traceur par 10 et une dilution par 100 entre les valeurs 2 et 0.

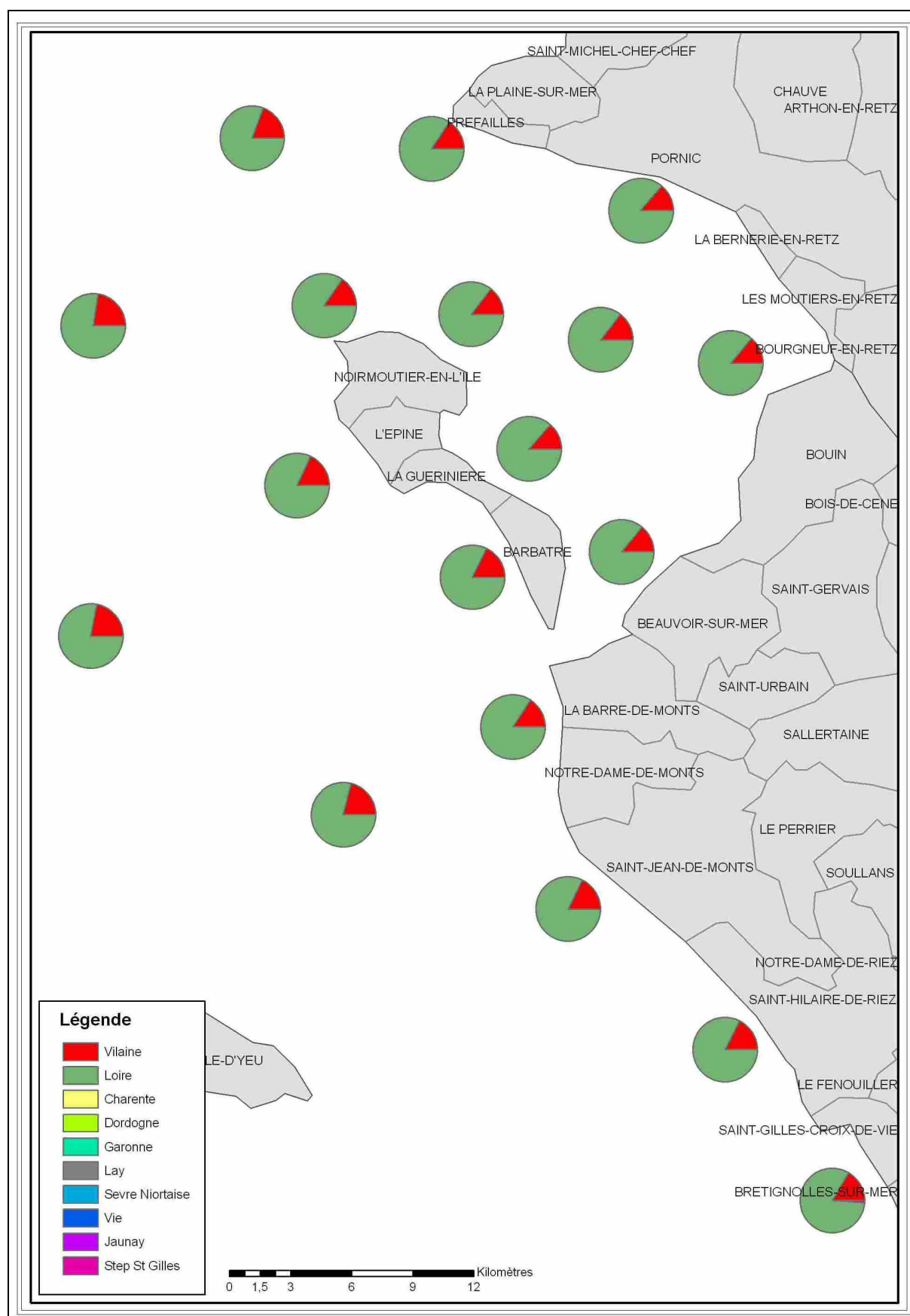


Figure 13: Pourcentage moyen sur la période d'avril à septembre de l'azote dissous calculé au moyen du modèle de rang 1

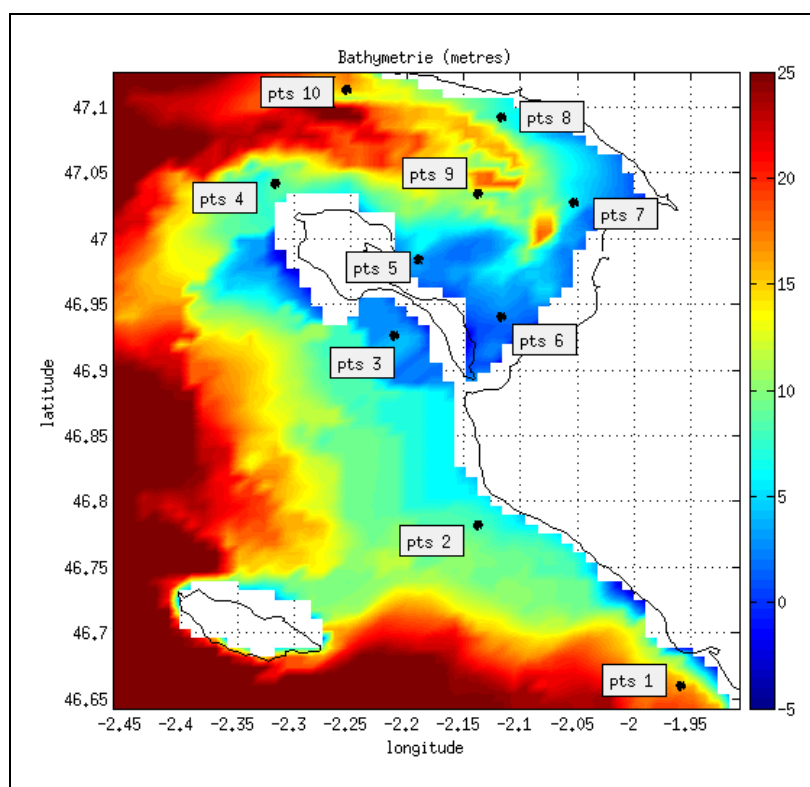


Figure 14 : Localisation des dix points fixes utilisés pour le suivi de l'azote dissous au moyen du modèle de rang 1

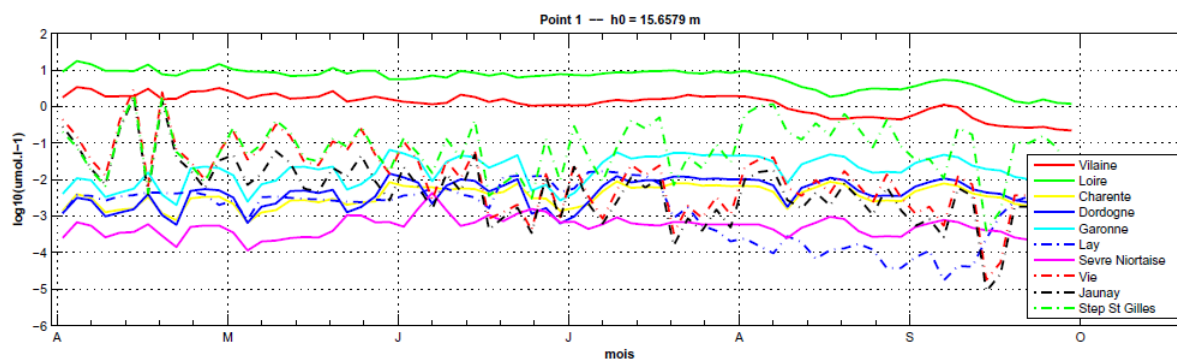


Figure 15 : Evolution de l'azote dissous au point 1 (représentation en échelle log)

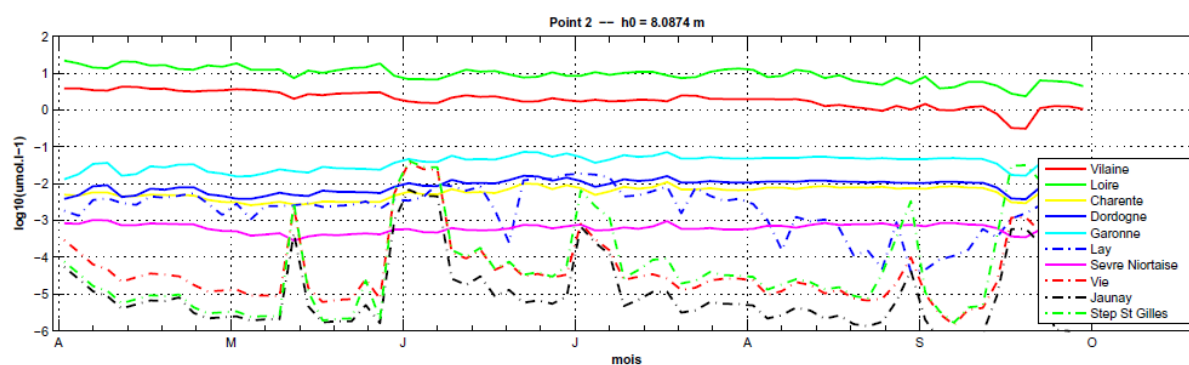


Figure 16 : Evolution de l'azote dissous au point 2 (représentation en échelle log)

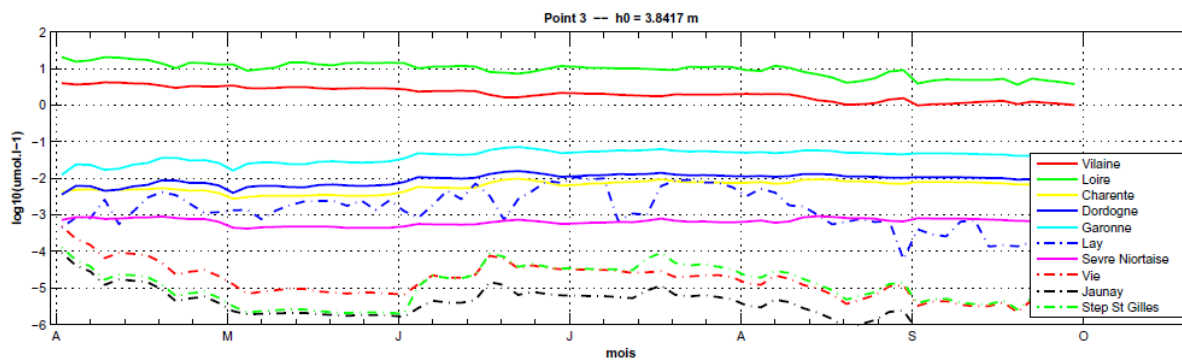


Figure 17 : Evolution de l'azote dissous au point 3 (représentation en échelle log)

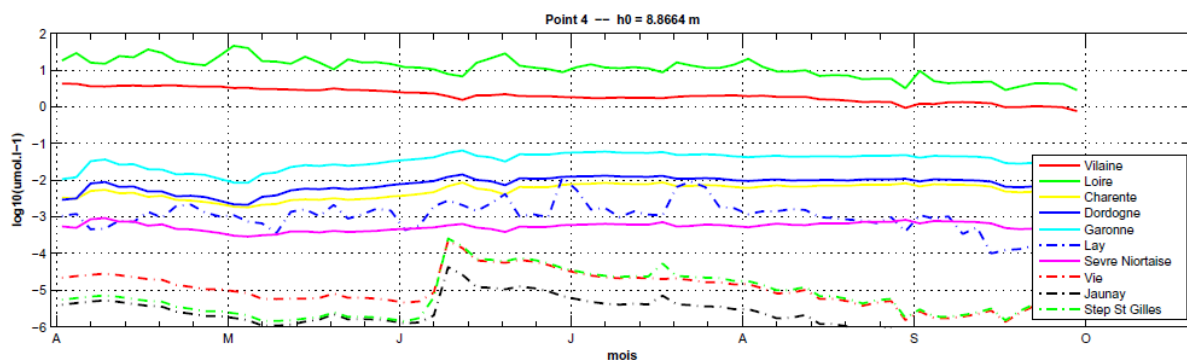


Figure 18 : Evolution de l'azote dissous au point 4 (représentation en échelle log)

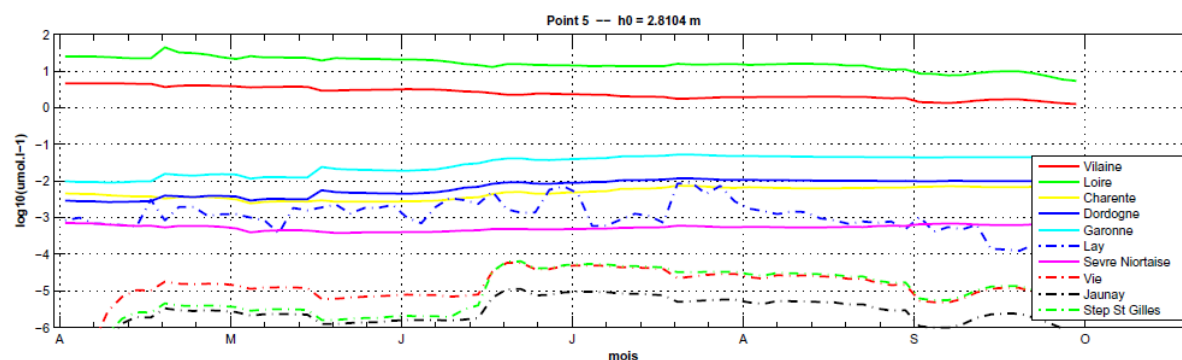


Figure 19 : Evolution de l'azote dissous au point 5 (représentation en échelle log)

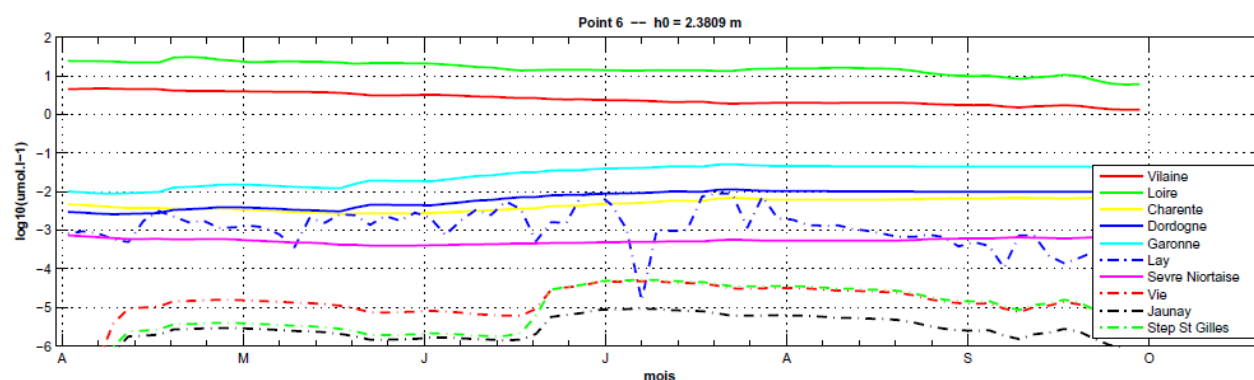


Figure 20 : Evolution de l'azote dissous au point 6 (représentation en échelle log)

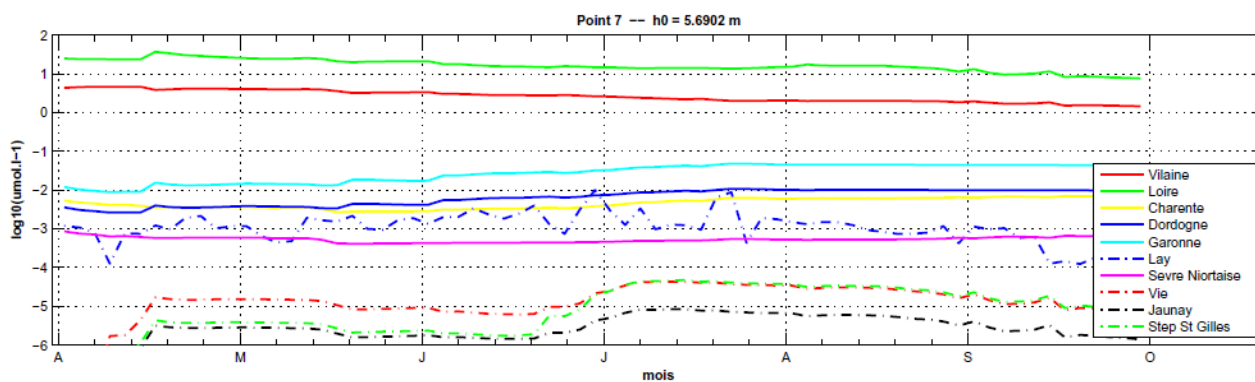


Figure 21 : Evolution de l'azote dissous au point 7 (représentation en échelle log)

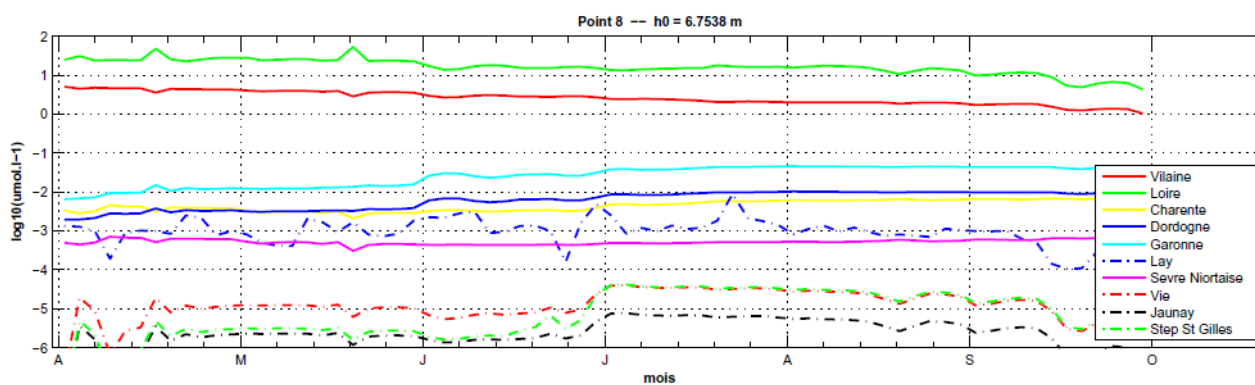


Figure 22 : Evolution de l'azote dissous au point 8 (représentation en échelle log)

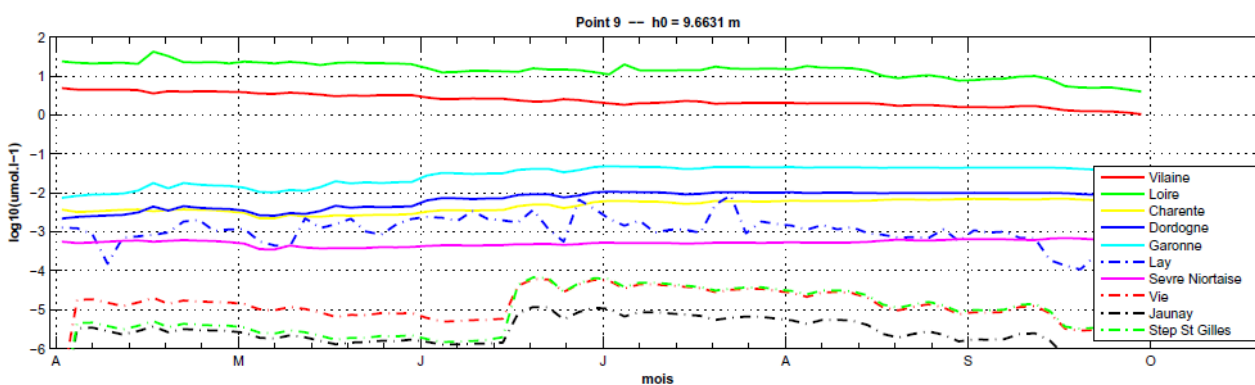


Figure 23 : Evolution de l'azote dissous au point 9 (représentation en échelle log)

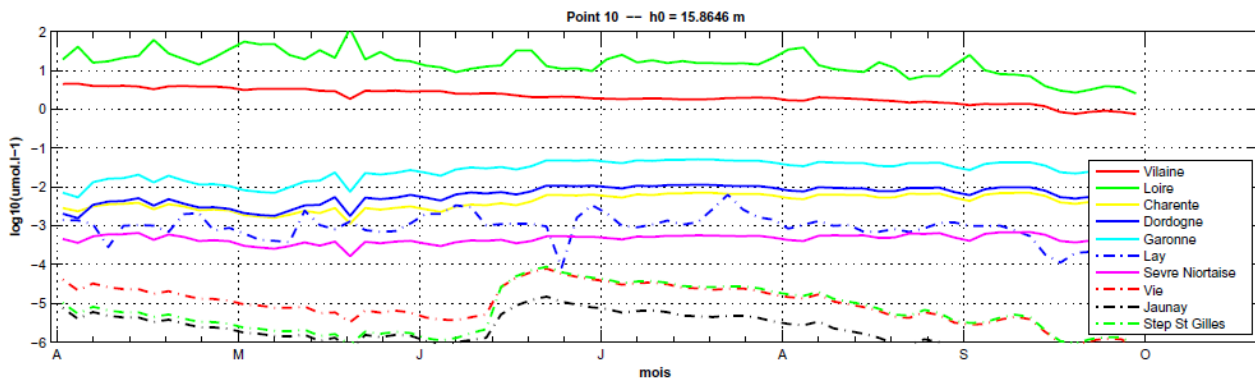


Figure 24 : Evolution de l'azote dissous au point 10 (représentation en échelle log)

5.1.2 Modèle de rang 0

Le modèle de grande emprise de rang 0 permet d'étudier la dispersion de l'azote provenant des grands apports (Loire, Vilaine, Charente, Dordogne, Garonne). En raison de l'emprise géographique du modèle de 1 qui n'autorise pas la prise en compte des apports du Lay et de la Sèvre Niortaise, ces derniers ont été intégrés au modèle MANGA de rang 0. Cependant, au vu de la taille de la maille de ce modèle, les résultats de simulation des panaches de dispersion des apports du Lay et de la Sèvre Niortaise sont à prendre avec précaution. Il est également à noter que la résolution spatiale du modèle de rang 0 ne permet de travailler en très proche littoral.

La Figure 25 illustre en 5 points fixes le pourcentage d'azote dissous moyenné entre avril et septembre 2009 provenant des différentes sources d'azote. Les résultats de ce modèle sont volontairement restreints à la partie sud du littoral Vendéen qui correspond globalement à la partie manquante du modèle de rang 1 dont l'emprise géographique ne permet pas de couvrir la zone s'étendant de Bretignolles-sur-Mer à La Tranche-sur-Mer (limite sud du modèle de rang 1 au niveau de Bretignolles-sur-Mer).

Sur le secteur côtier s'étendant de Bretignolles-sur-Mer à La Tranche-sur-Mer, on observe logiquement au niveau du Pertuis Breton un recul notable de l'influence de la Loire et de la Vilaine au profit de la Garonne, de la Sèvre Niortaise et de la Charente. La part de la Loire aux 5 points de suivi de l'azote dissous est de 69 %, 12 % pour la Vilaine, supérieur à 5 % pour la Garonne, la Sèvre Niortaise et la Charente et de l'ordre de 1 à 2 % pour la Dordogne et le Lay.

En termes de concentrations en azote dissous, la teneur moyenne de la Loire est de 4.4 μM ; 0.8 μM pour la Vilaine, 0.4 pour Garonne, la Sèvre Niortaise et la Charente et inférieur à 0.2 μM pour la Dordogne et le Lay (cf. figures 26 à 27).

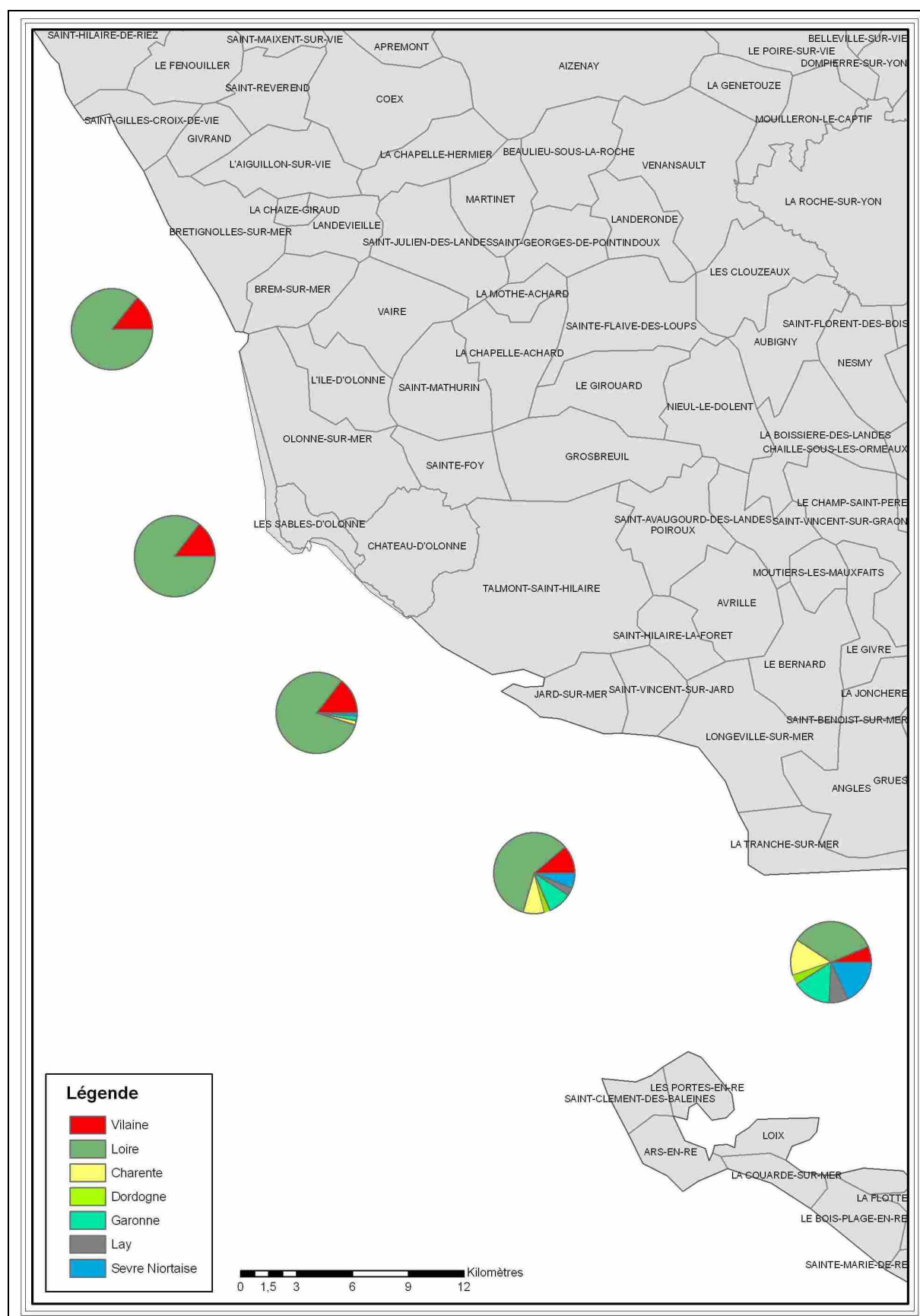


Figure 28 : Pourcentage moyen sur la période d'avril à septembre de l'azote dissous calculé au moyen du modèle de rang 0

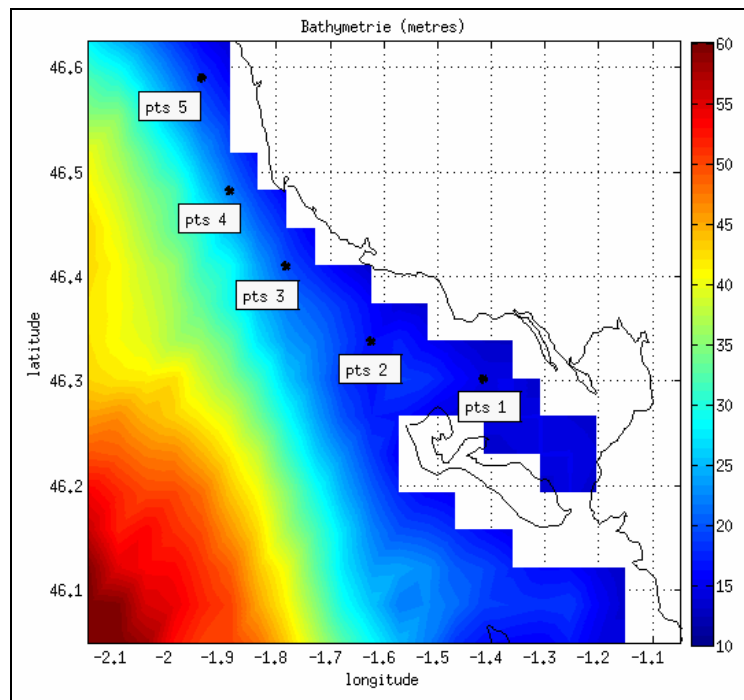


Figure 29 : Localisation des dix points fixes utilisés pour le suivi de l'azote dissous au moyen du modèle de rang 0

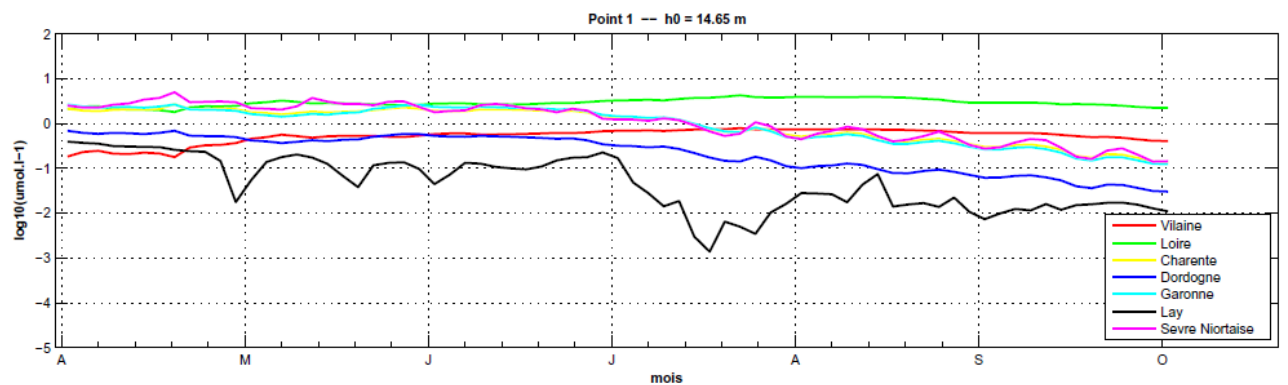


Figure 30 : Evolution de l'azote dissous au point 1 (représentation en échelle log)

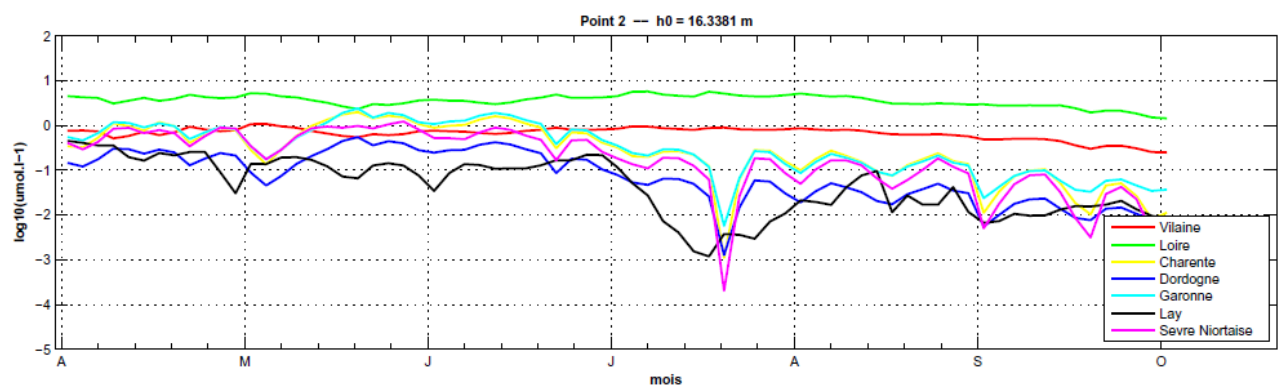


Figure 31 : Evolution de l'azote dissous au point 2 (représentation en échelle log)

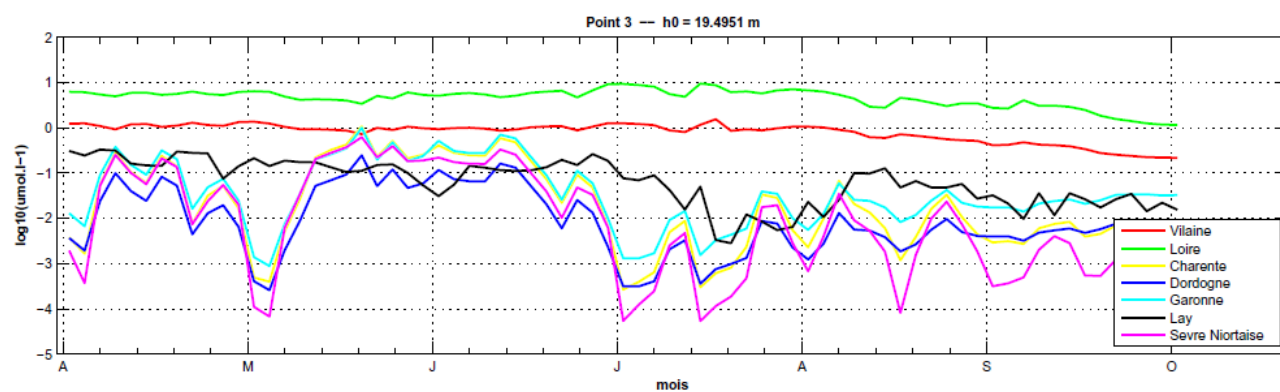


Figure 32 : Evolution de l'azote dissous au point 3 (représentation en échelle log)

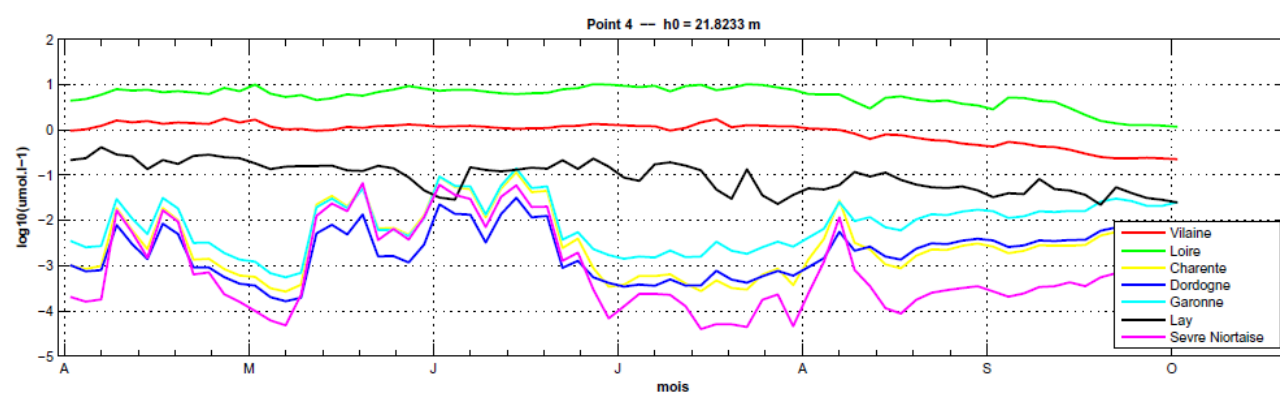


Figure 33 : Evolution de l'azote dissous au point 4 (représentation en échelle log)

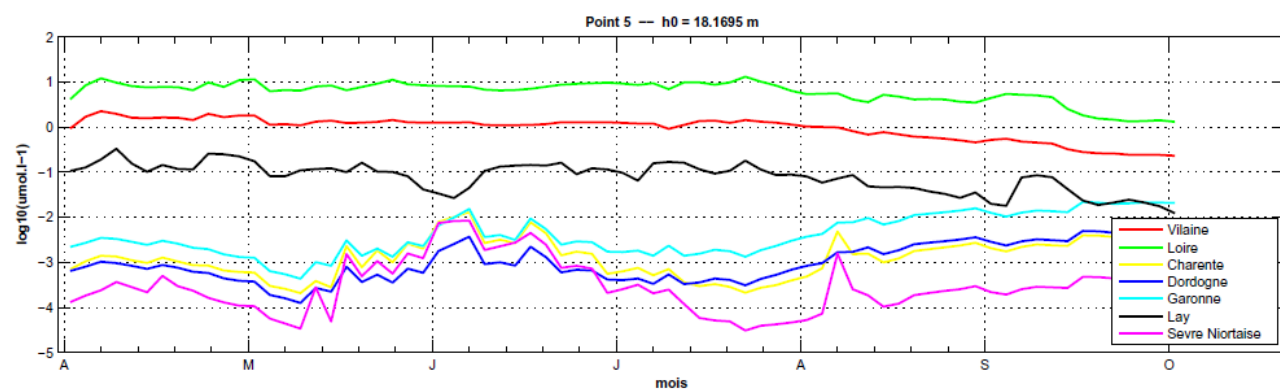


Figure 34 : Evolution de l'azote dissous au point 5 (représentation en échelle log)

5.2 Résultat de la dispersion de l'azote dissous dans l'hypothèse d'un débit nul pour les apports en azote dissous provenant du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain, du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles

Au vu des résultats obtenus au point précédent, l'analyse de l'azote dissous sans prise en compte des apports locaux du littoral Vendéen (prise en considération uniquement des apports de la Loire, de la Vilaine, de la Charente, de la Garonne et de la Dordogne) s'est avérée inutile et n'a finalement pas été engagée. Les résultats amèneraient à un léger relèvement du pourcentage de la Loire et de la Vilaine de 1 à 2 points dans l'alimentation en azote dissous du littoral Vendéen.

6 CONCLUSION

Trois modèles hydrodynamiques 3D d'emprises et de résolutions spatiales différentes ont été élaborés afin d'estimer la contribution des différentes sources d'azote (rivières + STEPs) à l'alimentation en azote dissous des marées vertes présentes sur le secteur côtier de Noirmoutier. Le recours à des modèles emboîtés a permis d'intégrer dans cette étude les grands fleuves ainsi que les sources locales d'azote (étiers et STEP). On rappelle que pour cette étude l'azote est considéré en tant que traceur passif et conservatif ce qui tend à surestimer les teneurs en azote dissous estimées par le modèle pour chacun des apports (pas de consommation possible de l'azote dissous par les micro-organismes).

Sur la base de l'année hydrologique 2009 et au moyen du modèle 3D de rang 1 où 10 sources d'azote sont considérés (Vilaine, Loire, Charente, Dordogne, Garonne, Lay, Sèvre Niortaise, Vie, Jaunay et STEP de St Gilles Croix de Vie), l'étude de la responsabilité des différentes sources d'azote à l'alimentation en azote dissous du littoral Vendéen met clairement en évidence le rôle prépondérant joué par la Loire (plus de 80 %) sur la période de production des ulves d'avril à septembre. La seconde source dissous est constituée par la Vilaine dont la contribution est de l'ordre de 16 %. Les huit autres sources considérées dans le modèle de rang 1 (Charente, Dordogne, Garonne, Lay, Sèvre Niortaise, Vie, Jaunay, Step de St Gilles Croix de Vie) contribuent de façon négligeable ($< 0.1\%$) à l'enrichissement du secteur côtier de Vendée.

Le grand modèle 3D de rang 0 qui simule la dispersion de 7 sources d'azote (Vilaine, Loire, Charente, Dordogne, Garonne, Lay, Sèvre Niortaise) confirme logiquement la part très importante de la Loire dans l'alimentation en azote dissous de la côte Vendéenne avec toutefois au niveau du Pertuis Breton un recul notable de sa contribution au profit de la Garonne, de la Sèvre Niortaise et de la Charente.

L'exploitation du modèle de rang 2 centré sur la baie de Bourgneuf (action en cours) devrait confirmer la tendance observée pour ce qui est de la très nette prépondérance de la Loire à l'enrichissement en azote dissous du littoral Vendéen.

On précise que l'ensemble de ces résultats ont été obtenus en sur-estimant les débits des apports provenant du Lay, de la Sèvre Niortaise, de la Vie, du Jaunay, des étiers de Sallertaine, du Dain, du Collet et des Step de la Salaisière, de la Casie et de St Gilles (car écoulements nuls en période estivale de production des marées vertes). Cette considération renforce encore davantage le diagnostic obtenu concernant le rôle prépondérant joué par la Loire et la Vilaine par rapport aux apports locaux du littoral Vendéen.

Références

Guillaud JF. *Calcul en temps réel des concentrations fluviales en nutriments, en fonction des débits, sur la façade Atlantique, la Manche et le sud de la Mer du Nord*. Rapport Ifremer Dyneco/Pelagos, Septembre 2008, 24 p.

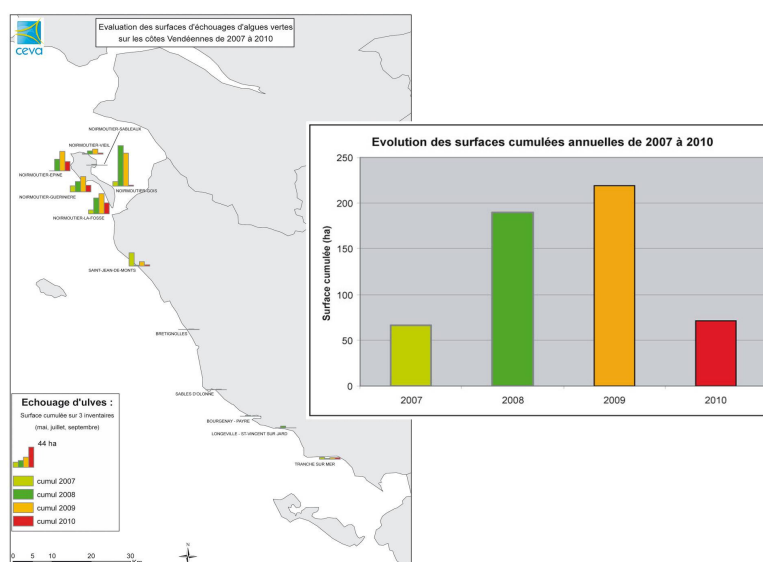
Le Roy R. et Simon B. *Réalisation et validation d'un modèle de marée en Manche et dans le Golfe de Gascogne. Application à la réalisation d'un nouveau programme de réduction des sondages bathymétriques*. – Rapport technique, EPSHOM, Rapport n°002/03, 2003, 89 p.

Lazure P. *Etude de l'hydrodynamique de la baie de Bourgneuf*. Rapport DEL-Ifremer pour la Préfecture de la Région des Pays de Loire, 1992, 59 p.

Lazure P. et Dumas F., 2008. *An external-internal mode coupling for 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)*. Advances in Water Resources 31: 233-250.

Expertise du phénomène de prolifération algale sur les côtes vendéennes : origine des algues et des nutriments

Phase 3 : Synthèse des résultats



Rapport final avril 2011 pour le Conseil Général de Vendée
(commande n°20100020100204)

Expertise du phénomène de prolifération algale sur les côtes Vendéennes : synthèse des résultats

1 Rappels des objectifs

Le développement d'algues vertes est constaté depuis plusieurs années sur différents secteurs du littoral vendéen. La quantité d'algues échouées durant la saison estivale semble de plus en plus importante au fil des années et pose de plus en plus de questions sur leur origine et leurs moyens de traitement.

L'objet de la présente étude était de faire le point sur l'étendue de ce phénomène, sur ses origines possibles et les sources d'alimentation en azote des marées vertes en Vendée.

La phase 1 de l'étude a concerné un état des lieux sur le phénomène d'échouage d'algues vertes sur les côtes vendéennes et une recherche de l'origine géographique des algues constituant ces échouages.

La phase 2 de l'étude a permis, dans les secteurs géographiques de développement des algues vertes, de distinguer l'importance relative des grands fleuves (Loire, Vilaine, Charente, Garonne, Dordogne ...) et d'éventuels apports locaux (rivières et stations d'épuration) dans la nutrition de ces algues, produites en principe dans le très proche littoral.

La présente phase 3 récapitule les conclusions apportées aux deux premières phases dans une présentation synthétique et présente quelques perspectives d'amélioration du diagnostic.

2. Bilan sur l'ampleur phénomène d'échouages d'algues vertes sur les côtes vendéennes :

Les échouages d'algues susceptibles de contenir des fractions plus ou moins importantes d'algues vertes ne concernent, sur le littoral vendéen que des masses d'eaux côtières (au sens Directive Cadre Eau). Dans ce type de masse d'eau, seuls les sites d'échouages à ulves en lames (Fig.1) sont actuellement classés comme site à marées vertes. Sur les côtes vendéennes particulièrement, les ulves en lames peuvent être associées à d'autres algues vertes (généralement des entéromorphes) et surtout se retrouver en mélange avec du goémon brun et rouge. On ne gardera, dans la suite de la présentation, que le terme « ulve » pour désigner les ulves en lames et le terme « entéromorphe » pour désigner les ulves rubanées ou filamenteuses (Fig.1).

Fig. 1 : Illustration des différentes morphologies du genre *Ulva*



Le classement d'un site comme « site à marée verte », ainsi que les calculs de surfaces couvertes en ulves à partir de photos aériennes ne sont engagés que quand l'échouage observé au sol est composé visuellement de plus de 30% d'ulves. On estime alors, par une procédure spéciale, un taux de couverture qu'auraient seules les ulves dans le polygone (ou périmètre) d'échouage. Les surfaces en ulves sont calculées en équivalents 100% de couverture dans chacun des polygones. Les valeurs d'équivalent 100% de couverture de l'ensemble des polygones sont additionnées à l'échelle d'un site d'échouage pour en quantifier l'importance.

Bilan des échouages d'algues vertes en Vendée :

- Une douzaine de secteurs d'échouages d'algues vertes de **type ulve (en lame)** ont été recensés au moins une fois depuis 2007 sur les côtes vendéennes (Figs. 2 et 3).
- Les ulves sont souvent en mélange avec du goémon d'épave et participent, avec les entéromorphes, à un verdissement plus ou moins prononcé d'échouages naturels (Fig.5).
- Les surfaces cumulées d'ulves sur les trois observations annuelles du littoral vendéen culminent autour de 200 ha d'équivalent 100 % de couverture en 2008 et 2009 (Fig.3).
- Ces surfaces connaissant une diminution importante (à 70 ha) en 2010, diminution par ailleurs constatée dans les sites à marées vertes sur l'ensemble des côtes bretonnes (Fig.3).
- L'essentiel des dépôts d'ulves observés sur les côtes vendéennes se retrouve dans les sites d'échouages du pourtour de l'Île de Noirmoutier, et secondairement dans celui de St Jean de Mont.
- Dans ces sites, la proportion d'ulves dans les échouages est très souvent importante (plus de 80%), en particulier sur la face interne (côté baie de Bourgneuf) de l'île de Noirmoutier.
- Les valeurs de couvertures en ulves des plus grands sites d'échouage (ceux de l'île de Noirmoutier) sont déjà comparables à celles de sites bretons de dimension moyenne, que ce soit à l'échelle de sites ou de masses d'eau côtières (Fig.4).
- De telles quantités d'ulves en échouages (valeurs brutes et proportions dans les échouages) doivent être considérées comme une indication d'eutrophisation locale pour des eaux côtières dont la note de qualité risquera d'être affectée quand les grilles de classement seront publiées.
- Pour la période 2007-2010, l'activité de collecte d'échouages d'algues, plus ou moins « verdis » par des ulves et susceptibles d'engendrer des nuisances, s'élève pour le département à 5-7 000 m³/an (hors échouages exceptionnel d'algues rouges). Ces quantités prélevées sont sans doute inférieures aux besoins de ramassage des communes, notamment en années hautes (telles que 2008 et 2009).

Fig.2

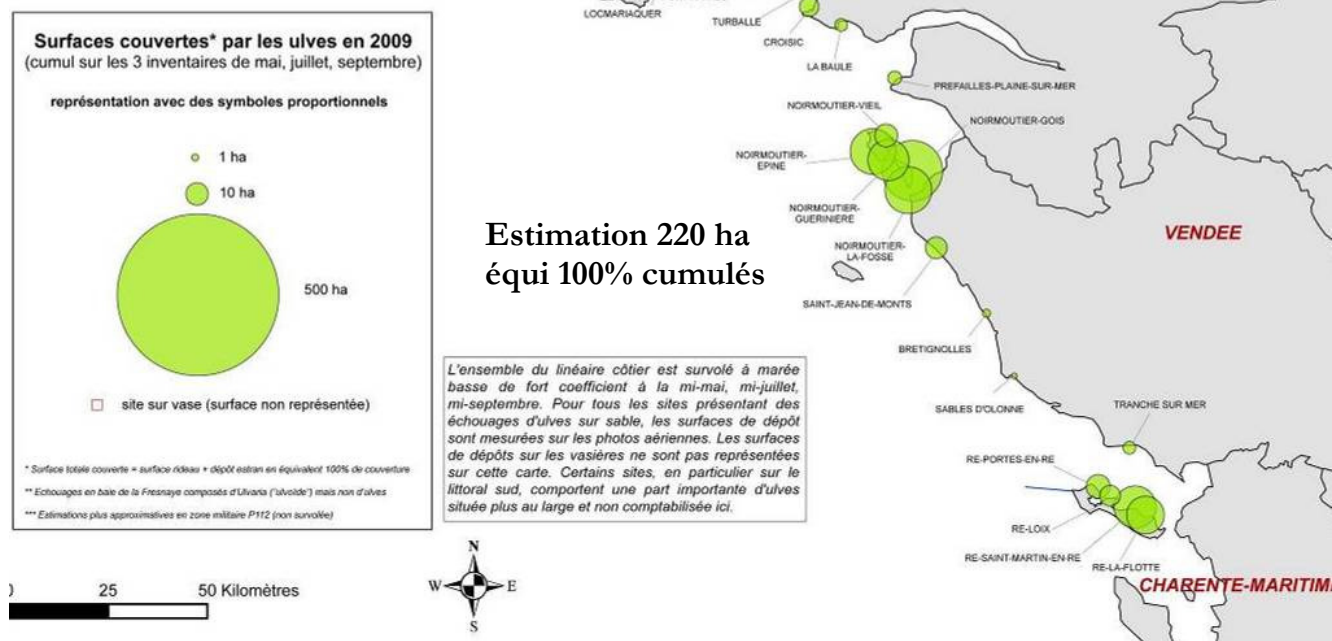
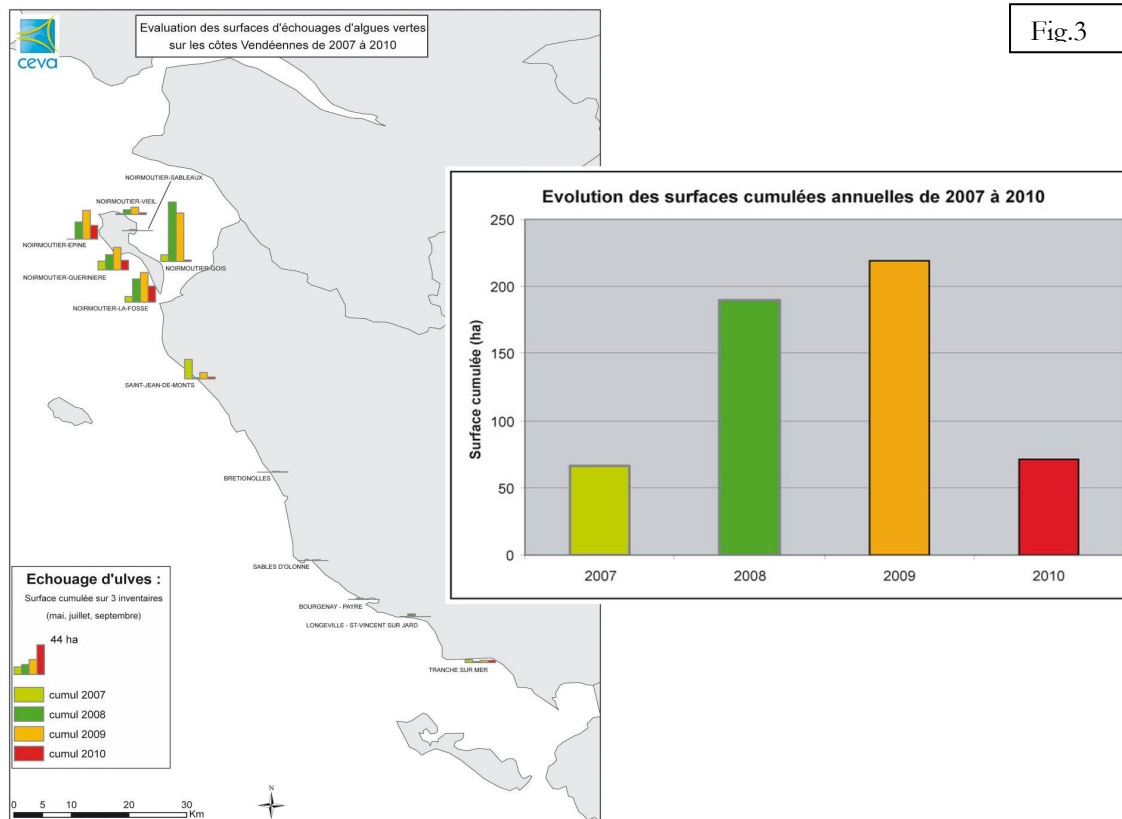
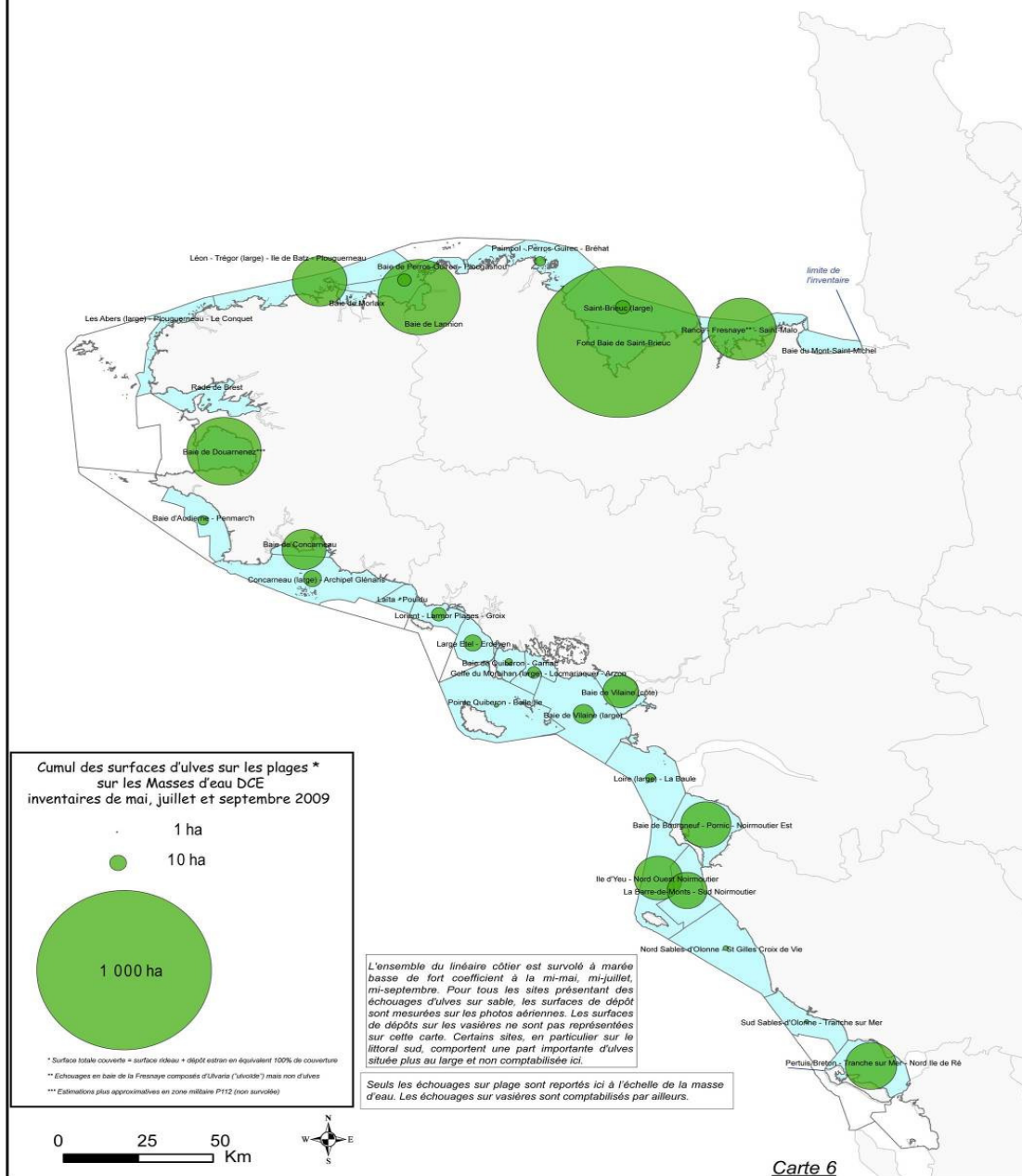


Fig.3



Surfaces couvertes par les ulves sur les plages Cumul par Masse d'Eau en 2009 (contrôle de surveillance BCE)



3. Phénomènes en jeu dans le développement des marées vertes sur les côtes vendéennes :

3.1. Type de marée verte observable sur les côtes vendéennes :

Les caractéristiques d'une « marée verte à ulves » classique, telle que celles apparues historiquement les premières, sur les côtes bretonnes sont de :

- Se dérouler au niveau de baies sableuses enclavées en eaux côtières.
- présenter un cycle annuel de développement entièrement sous forme dérivante, avec fortes productions de biomasse sous cette forme.
- présenter des échouages constitués quasi exclusivement de l'algue verte responsable du bloom qui est généralement une ulve en lame.

Ce type de marée verte n'apparaît pas présent sur les côtes vendéennes.

Un deuxième type de marée verte peut aussi intervenir en eaux côtières ouvertes à l'hydrodynamisme du large. Ce sont des marées dites « d'arrachage ». Elles concernent plus particulièrement les côtes vendéennes.

- Elles sont aujourd'hui les moins bien connues, car apparues plus tardivement sur les côtes Manche - Atlantique.
- Leur cycle de développement passe sans doute par une étape de recolonisation annuelle de la zone estran / petits fonds.
- Les populations d'algues vertes fixées concernées sont en mélanges plus ou moins hétérogènes avec les grandes algues de ceinture.
- Ces algues vertes fixées sont plutôt des ulves en lame dans les bas niveaux, de même que dans les retenues d'eau et chenaux de l'estran, et des entéromorphes dans les parties moyennes et hautes de l'estran.
- Leurs échouages se produisent en mélange avec des quantités plus ou moins importantes de goémon d'épave. Il y a verdissement progressif des échouages vers l'été (avec effet croissant de colmatage et de pourrissement des dépôts) (Fig.5).
- Dans ce type de marées vertes, la proportion d'ulves dans l'échouage semble pouvoir être augmentée par une phase de transport (sélective) du matériel dérivant et/ou dans certains cas par reprise de croissance de ces ulves dans l'eau (avec phase plus ou moins longue de production de biomasse supplémentaire) avant échouage.

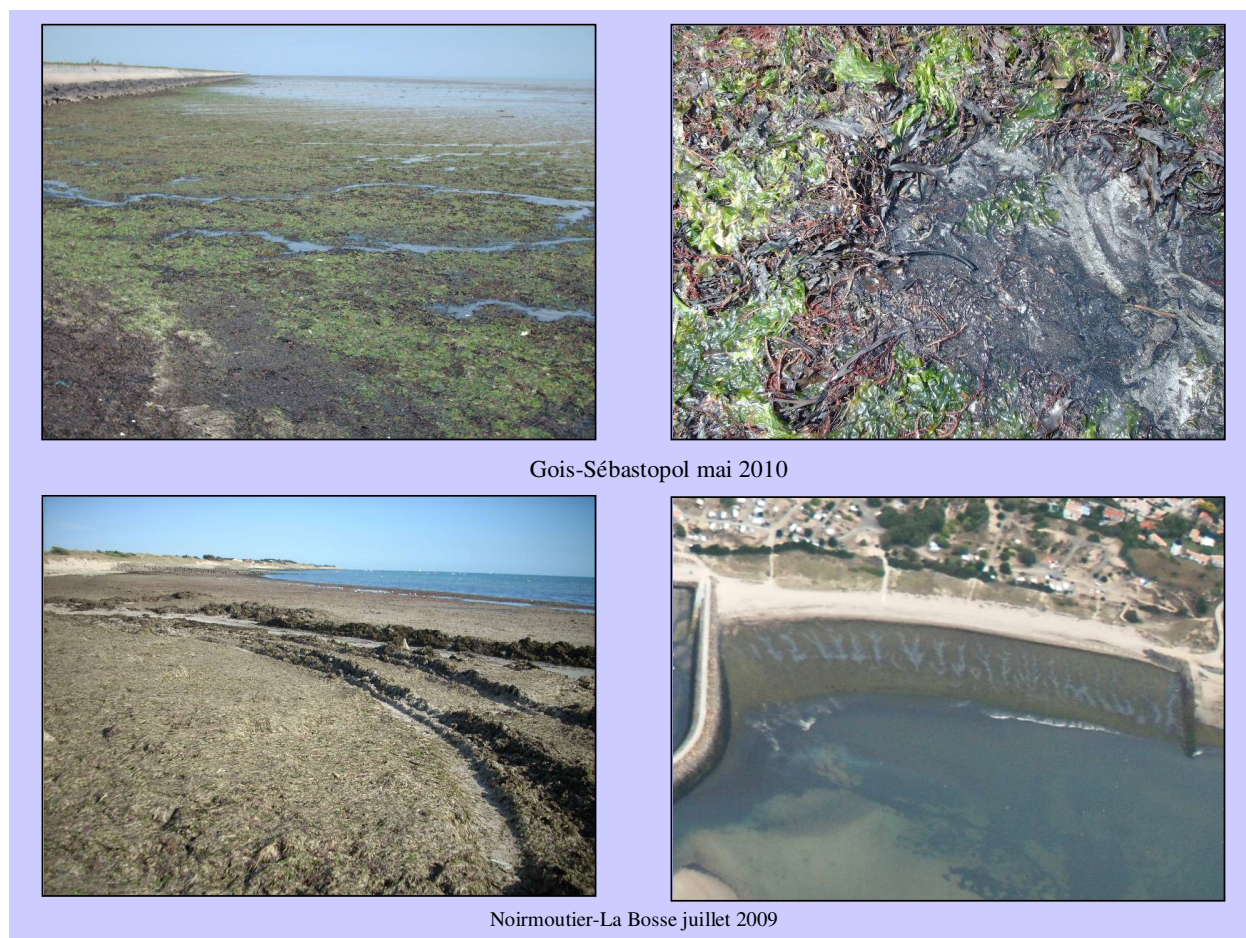


Fig.5 : Aspect de dépôts de marées vertes d'arrachage autour de l'île de Noirmoutier

Un troisième type de marée verte existe en milieu estuarien très abrité, généralement en masse d'eau DCE de transition. Ce sont les marées vertes « de vasières » qui concernent pas ou très peu le littoral vendéen.

3.2. Origine géographique des algues vertes échouées :

Les marées vertes d'arrachage du secteur de l'Île de Noirmoutier ont fait l'objet d'une analyse concernant l'origine des algues impliquées. Les résultats confirment l'origine locale des échouages.

Faces nord et ouest exposées de l'Île :

- Les échouages d'ulves en lames recensés sur les faces nord et ouest exposées de l'île (sites d'échouages de Noirmoutier-Veil, Noirmoutier l'Epine et Noirmoutier Guérinière proviennent en toute vraisemblance de **populations sources locales d'ulves fixées** en limites basses de platiers rocheux situés dans la partie nord de l'île, **entre la Guérinière et le Grand Veil**.

- Les échouages importants d'ulves en lames qui sont recensés dans le grand site abrité de Noirmoutier-Gois proviennent en toute vraisemblance de populations fixées sur les vastes surfaces de platiers rocheux plus ou moins couverts de sédimentation fine de cette zone.
- Cette zone de platiers est parsemée de retenues d'eau favorables aux colonisations d'ulves en lames, notamment au niveau des zones de parc à huîtres du secteur de Noirmoutier-en-Ile. La production d'ulves d'arrachage à partir de ces gisements pourrait être renforcée par la contribution d'algues provenant de limites de platiers s'étendant encore plus au large (secteur de Vendette).
- L'observation des courants résiduels de marée laisse à penser que du matériel dérivant pourrait être expulsé de cette zone par le goulet de la pointe de la Fosse et se retrouver, selon les vents, sur les sites d'échouages de Noirmoutier-la-Fosse et même de Saint-Jean-de-Monts.

4. Facteurs à l'origine des proliférations d'algues vertes sur les côtes vendéennes

4.1. Rôle de l'eutrophisation :

- Les marées vertes, comme tous les blooms macro-algaux, sont une manifestation en eaux littorales du **phénomène d'eutrophisation**. Le phénomène d'eutrophisation peut être résumé comme une « surproduction » de végétaux aquatiques, en lien avec des apports excessifs de sels nutritifs et conduisant à un stockage de biomasse et de matière organique dans le milieu.
- L'abondance de populations fixées d'ulves ou d'entéromorphes sur certains secteurs d'estran, notamment sur les platiers nord et ouest de l'île de Noirmoutier, doit être considérée comme un **indicateur de niveau élevé de sels nutritifs dans la masse d'eau côtière**, même si **d'autres facteurs que nutritionnels** peuvent contrôler le développement de ces algues opportunistes sur les estrans rocheux.
- En effet, un dérèglement de ces facteurs de contrôle peut favoriser la colonisation ou le maintien hivernal de ces algues opportunistes, et **faire apparaître des phénomènes de marées vertes dans des masses d'eau qui n'ont pas connus d'élévation récente sensibles de leurs niveaux de sels nutritifs**, mais bien sûr **à condition que ces niveaux soit déjà élevés**.
- La **maîtrise des flux de sels nutritifs (en particulier d'azote)** pénétrant en mer restera cependant un **moyen de contrôle efficace** pour limiter ces développements d'algues vertes.

4.2. Origine des flux de sels nutritifs responsables de la croissance des algues vertes :

- Des modèles hydrodynamiques 3D d'emprises et de résolutions spatiales différentes ont été élaborés afin d'estimer la contribution des différentes sources d'azote (rivières + STEPs) à l'alimentation en azote dissous des marées vertes présentes sur le secteur côtier de Vendée. Le recours à des modèles emboîtés a permis d'intégrer dans cette étude les grands fleuves de la région côtière, ainsi que les sources locales d'azote (étiers et STEP). Cette étude ne prend pas en compte de consommation possible de l'azote dissous par les micro-organismes, ce qui tendra à sur estimer la contribution des sources d'azotes les plus lointaines aux valeurs de concentration locales.
- Les modélisations ciblant le secteur de Noirmoutier - Baie de Bourgneuf (Fig.6) soulignent le rôle prépondérant joué par la Loire (plus de 80 %) et la Vilaine (16-17%) dans l'alimentation des algues vertes sur la période de production d'avril à septembre. Les 15 autres sources d'azote prises en compte, incluant Charente, Dordogne, Garonne, Lay, Sèvre Niortaise, Vie, Jaunay, Step de St Gilles Croix de Vie contribuent de façon négligeable (< 0.1 %).

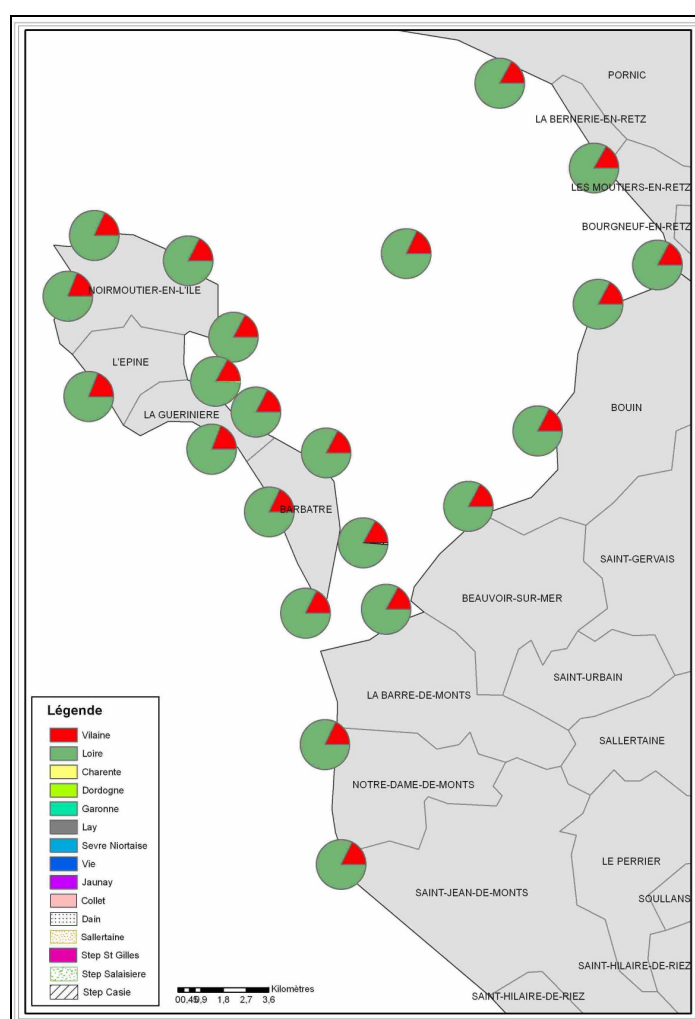


Fig.6 : Pourcentage moyen sur la période d'avril à septembre de l'azote dissous calculé au moyen du modèle de rang 2 (contribution moyenne aux 21 points fixes pour la Loire : 82 % et la Vilaine : 17 %)

- Le grand modèle 3D de rang 0 qui simule la dispersion de 7 sources d'azote (Vilaine, Loire, Charente, Dordogne, Garonne, Lay, Sèvre Niortaise) confirme logiquement la part très importante de la Loire dans l'alimentation en azote dissous de la côte vendéenne avec toutefois au niveau du Pertuis Breton un recul notable de sa contribution au profit de la Garonne, de la Sèvre Niortaise et de la Charente (Fig.7). L'élaboration d'un modèle de détail à mailles fines sur le secteur du Pertuis Breton permettrait d'affiner les premiers ordres de grandeurs obtenus dans le cadre de cette étude.

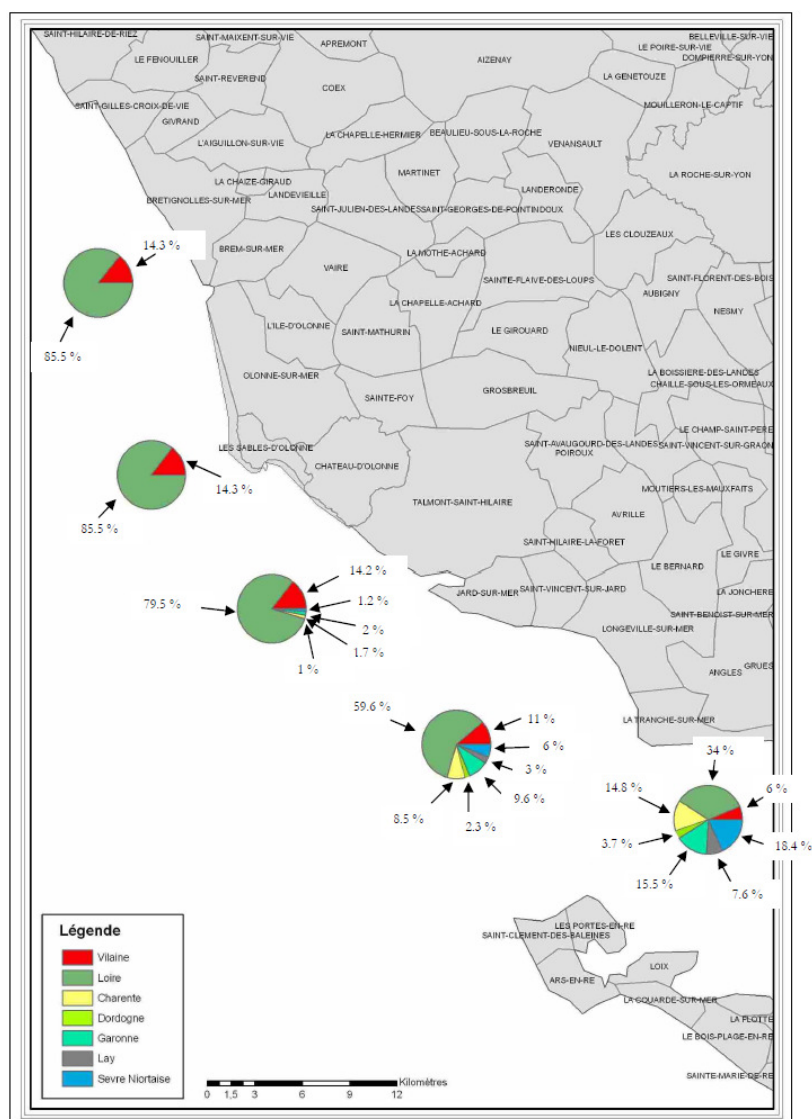


Fig.7 : Pourcentage moyen sur la période d'avril à septembre de l'azote dissous calculé au moyen du modèle de rang 0

5. Perspectives d'amélioration du diagnostic :

- L'action directe des collectivités vendéennes sur la qualité des eaux littorales, par rapport au risque eutrophisation, paraît limitée au niveau des grands contributeurs de sels nutritifs (Loire, Vilaine) impactant les masses d'eaux côtières de la partie nord du département. Il reste cependant utile d'améliorer la **connaissance de détail des flux secondaires de sels nutritifs**, notamment au niveau des étiers et diverses STEP littorales dont les faibles contributions potentielles en période printemps-été nécessitent, notamment dans la partie sud du littoral vendéen, d'être vérifiés pour mieux évaluer leurs risques d'alimenter des masses d'algues susceptibles d'être produites dans le très proche littoral.
- Il serait nécessaire de mieux connaître le **cycle biologique des marées vertes d'arrachage**, type de marée verte prédominant en Vendée, pour pouvoir notamment :
 - intégrer ce type de cycle dans un **modèle de production écologique** capable de prévoir des relations pression / impact, en particulier des réductions de biomasses produites en relation avec des abattement de flux de sels nutritifs.
 - développer des **modèles prédictifs d'échouages** à partir de connaissances croisées d'états de populations algales, de contextes climatiques et de situations/prévisions météorologiques, afin de mieux gérer l'activité de ramassage et assurer la meilleure prévention possible des risques sanitaires qui paraissent réels aux vues de certains types de dépôts rencontrés en 2009.
- Le développements de tels modèles pour ce type de marée verte trouverait aussi son utilité dans un périmètre plus large que celui des collectivités littorales vendéennes (sud Bretagne, masses d'eaux de l'île d'Oléron, probablement les côtes de basse Normandie). Ces recherches appliquées pourraient faire l'objet de programmes de recherche à financements partagés.
- Une analyse de besoins éventuellement non satisfaits - et des réponses qu'il serait possible d'apporter - en matière d'outils/stratégies de ramassage et d'élimination des algues, doit être aussi conduite pour garantir à l'avenir une qualité d'accès aux plages les plus touchées.