

Analyse de l'apparition des épisodes d'anoxies dans l'estuaire de la Loire

Rapport Final

Réf.: A1651-1047/02/RE/V1.1

Date: 23/09/2019



**Client : Grand Port Maritime de
Nantes Saint-Nazaire**



Signatures

	Nom	Société
Rédigé par	Nicolas Chini, Roger Delmas	ACRI-IN
Vérifié par	Lydie Denis	ACRI-IN
Autorisé par	Roger Delmas	ACRI-IN

Version

Version	Contenu	Auteurs
1.0	Rapport Final	NC, RD
1.1	Modifications avant relecture GPM	RD



**Analyse de l'apparition des épisodes d'anoxies
dans l'estuaire de la Loire
Rapport final**

Réf. : **Erreur !
Nom de propriété
de document
inconnu.**



**Analyse de l'apparition des épisodes d'anoxies
dans l'estuaire de la Loire
Rapport final**

Réf. : **Erreur !
Nom de propriété
de document
inconnu.**

Page blanche

Table des matières

1. RAPPEL DU CONTEXTE	1
1.1. POSITIONNEMENT DE L'ÉTUDE	1
2. ANALYSES DES DONNEES DU RESEAU ESTUAIRE	2
2.1. CONCENTRATIONS EN MATIÈRES ORGANIQUES DANS LE FLEUVE	2
2.1.1. Variations en fonction du débit	2
2.1.2. Variations en fonction des MES	4
2.2. EVOLUTION DES PARAMÈTRES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS L'ESTUAIRE	7
2.2.1. Relations MES – Matières organiques	7
2.2.2. Comparaison des données Syvel / DDTM	8
3. ANALYSES DES DONNEES SATELLITALES	9
3.1. MESURES AU LARGE	9
3.2. DONNÉES SATELLITALLES SUR LE FLEUVE	9
4. FLUX DE MATIERES ORGANIQUES DANS LE FLEUVE	11
5. RELATION ENTRE PRODUCTION PRIMAIRE ET APPARITIONS D'ANOXIES ENTRE 2007 ET 2017	13
5.1. RELATION AVEC LA PRODUCTION PRIMAIRE DU LARGE	13
5.2. RELATION HYPOXIES ET PRODUCTION PRIMAIRE DU FLEUVE	14
5.3. INFLUENCE DE LA TURBIDITÉ	1
6. PREDICTION COURT TERME DES MINIMA	3
7. BILAN DE MASSES	12
7.1. BILAN DES MASSES SÉDIMENTAIRES	12
7.2. BILAN DES MASSES DE MATIÈRES ORGANIQUES	12
7.2.1. Apports journaliers des STEU de l'agglomération nantaise	13
7.2.2. Apports journaliers du fleuve	13
7.2.3. Rapports des flux	13
8. ANALYSE	15
8.1. RÉSULTATS DE L'OUTIL DE PRÉDICTION DES HYPOXIES	15
8.2. RETOUR SUR LES DONNÉES DDTM	16
8.2.1. Relation DBO5 et pigments	17
8.2.2. DCO	18
9. CONCLUSION	19

Liste des figures

Figure 1 : Variation de la matière en suspension en fonction du débit de la Loire -----	2
Figure 2 : Variation de la DCO en fonction du débit de la Loire -----	3
Figure 3 : Variation de la Chlorophylle en fonction du débit de la Loire -----	3
Figure 4 : Variation de la DCO en fonction de la MES-----	4
Figure 5 : Variation de la Chlorophylle en fonction de la MES-----	4
Figure 6 : Variation de la Chlorophylle en fonction des MES -----	5
Figure 7 : Variation de la Chlorophylle en fonction des MES pour des débits inférieurs à 500 m ³ /s-----	6
Figure 8 : Relation liant la chlorophylle à la MES dans la Loire aval -----	6
Figure 9: Relations entre DCO et MES aux différentes stations du réseau estuaire-----	7
Figure 10: Relation entre pigments et MES dans l'estuaire -----	8
Figure 11: Série de chlorophylle au large à partir des données de satellites couleur de l'eau -----	9
Figure 12: Evolution de ma turbidité à la station de pompage des Eaux de la Ville de Nante à Mauves. 12	12
Figure 13: Relations entre Chlorophylle a au large et indices d'anoxies -----	13
Figure 14: Evolution de l'indice d'anoxie (Nombre de jours d'hypoxie/ Nombre de jours observables) et de l'activité planctonique dans le fleuve représentée par le Flux de Chl-a et au large par la concentration en Chl-a-----	1
Figure 15: Evolution journalière du P90 des MES et du minimum d'oxygène dissous-----	1
Figure 16: Maxima par cycle VE/ME du P90 des MES et du minimum d'oxygène dissous au Pellerin en surface-----	1
Figure 17: Relation entre le maximum du P90 des MES avec le minimum d'O2 d'un cycle journalier -----	2
Figure 18: Evolution de la teneur en O2 lors des période revif-----	3
Figure 19: Tableau comparant le minimum d'oxygène au Pellerin par période de VE/ME, le risque calculé par le prédicteur d'hypoxie, la ligne Validité représentant le score (de prédiction (Bon (1, 0 Mauvais).- 10	10
Figure 20 Bilan annuel des masses sédentaires dragués par des systèmes remettant les particules en suspension dans le milieu (Source GPM-NSN) et apports fluviaux -----	12
Figure 21: Relation entre DBO5 et Pigments à Montjean en période de débits faibles (<500 m3/s) -----	14
Figure 22 : Distribution de la somme des pigments chlorophylliens (Chl-a+Phéo-A) en fonction de la DBO5 sur l'ensemble de la période d'observation et sur la même période uniquement les valeurs des mois de juin à septembre (à droite)-----	16
Figure 23 : Relation entre concentrations en pigments et DBO5 normalisées par la MES pour les périodes de juin à septembre, 1992 à 201, en haut toute valeurs confondues, en bas en période d'été avec des débits <500m3/s.. -----	17
Figure 24 : Relation entre concentrations en pigments et DBO5 normalisées par la MES pour les périodes de juin à septembre, de 1998 à 2017. -----	18
Figure 25: Relation entre les rapports Pigments/MES et DCO/en été avec des débits <500 m3/s -----	18

1. Rappel du contexte

1.1. Positionnement de l'étude

En 2016 la société ACRI-HE en 2016 a réalisé une étude sur l'influence des paramètres environnementaux dans l'apparition des anoxies en période estivale dans l'estuaire amont de la Loire. Cette étude était initialement basée sur une analyse fréquentielle des mesures du réseau Syvel, pour essayer de mettre en évidence des phénomènes aperiodiques en éliminant les sources de variations du signal lié à la marée. Si cette approche permet effectivement de supprimer les variations haute fréquence du signal et les fluctuations liées au cycle de syzygie (VE/ME) elle n'a pas vraiment permis d'établir de relations entre le signal filtré et d'autres phénomènes pouvant agir sur la teneur en oxygène (activité biologique, teneurs en matières organiques,...) et notamment la variabilité interannuelle de l'intensité de ces anoxies. Lors de cette étude une approche plus globale de l'estuaire menée en parallèle et considérant les anoxies à l'échelle de l'estuaire en établissant des indicateurs d'intensité des anoxies à l'échelle annuelle (durée maximale des épisodes d'anoxies, minimum annuel atteint) a permis de mettre en évidence des relations entre les variations interannuelles de ces indicateurs et l'activité phytoplanctonique à la fois dans le milieu marin et le fleuve. Elle a aussi permis de mettre clairement en évidence la relation entre le débit et l'apparition des phases intenses d'anoxies, celles-ci paraissant intervenir lorsque les débits descendent en dessous des 500 m³/s, débits à partir duquel le bouchon vaseux se cantonne dans la partie à plus faible profondeur de l'estuaire en amont de Paimboeuf. Dans ces conditions la dispersion en VE des Matières à fort potentiel réducteur piégées dans la crème de vase dans le volume d'eau réduit de l'estuaire amont, entraîne l'apparition des hypoxies les plus importantes.

L'objectif de l'étude en cours était donc principalement de valider et approfondir les relations de causalité qui ont commencé à être décrites dans l'étude 2016 en analysant à l'échelle mensuelle les variations d'intensités des anoxies décrites à partir d'indicateurs similaires à ceux utilisés dans l'étude 2016 à l'échelle annuelle et en étudiant leur relation aux variations des apports de matières organiques liées à l'activité planctonique.

Pour appréhender ces relations entre la matière organique et l'intensité des anoxies, nous disposons en début d'étude de différents jeux de données :

- les mesures du réseau Syvel qui permettent de décrire précisément la dynamique des phénomènes d'hypoxies, et éventuellement grâce à la station amont du réseau d'avoir une information sur les apports du fleuve ;
- les mesures du réseau d'observations de l'estuaire actuellement géré par la DREAL/DDTM et le Conseil Départemental de Loire Atlantique (mesures mensuelles à basse mer de vives eaux entre Saint-Nazaire et Saint-Géréon), portant sur un ensemble de mesures physico-chimiques et biologiques ;
- les observations satellitaires dans la bande visible qui sont maintenant régulièrement utilisées pour appréhender le contenu en pigment et matières en suspension des eaux de surface et qui sont susceptibles d'amener des informations à une fréquence journalière.

2. Analyses des données du réseau Estuaire

Plusieurs objectifs sont poursuivis à travers l'analyse de ces données :

- le premier est d'étudier les variations dans les eaux du fleuve de pigments, considérés comme traceur de matières organiques liées à une production primaire ; pour cela, on considèrera uniquement la station amont du réseau située à Saint-Géréon ;
- le second est d'étudier les variations des paramètres liés à la matière organique dans l'estuaire.

2.1. Concentrations en Matières organiques dans le fleuve

2.1.1. Variations en fonction du débit

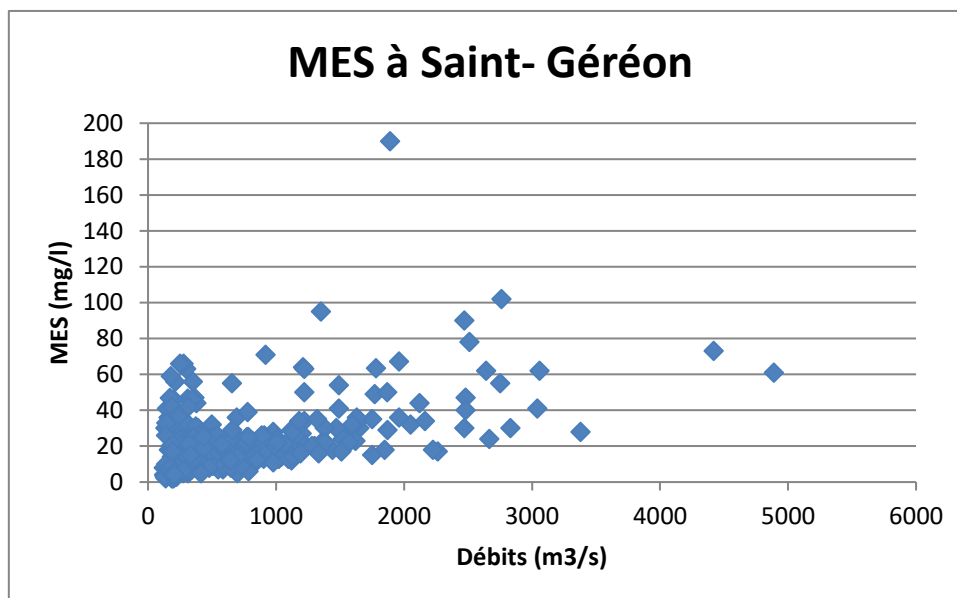


Figure 1 : Variation de la matière en suspension en fonction du débit de la Loire

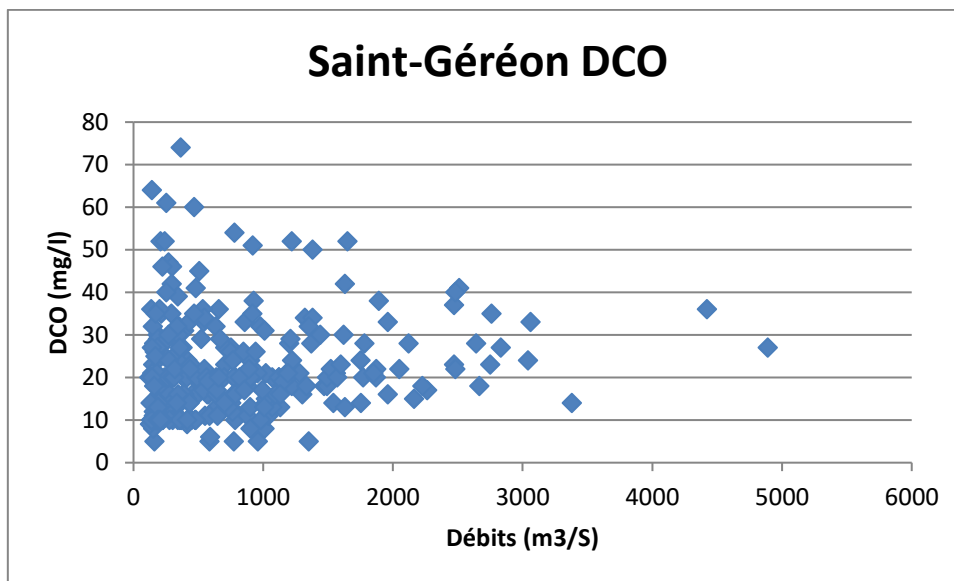


Figure 2 : Variation de la DCO en fonction du débit de la Loire

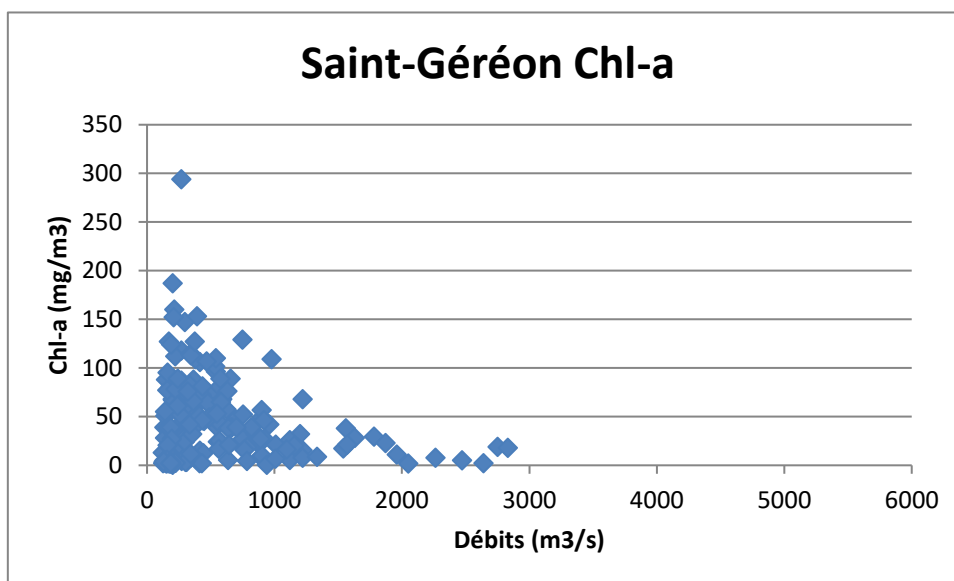


Figure 3 : Variation de la Chlorophylle en fonction du débit de la Loire

Les relations entre débits et MES, DCO et Chl-a sont fortement dispersées. Elles montrent une distribution bi-modale plus marquée pour la chlorophylle qui semble évoluer selon deux lois différentes à faibles débits et lorsque les débits du fleuve augmentent, ce qui se retrouve mais de manière moins marquée pour la MES et la DCO.

2.1.2. Variations en fonction des MES

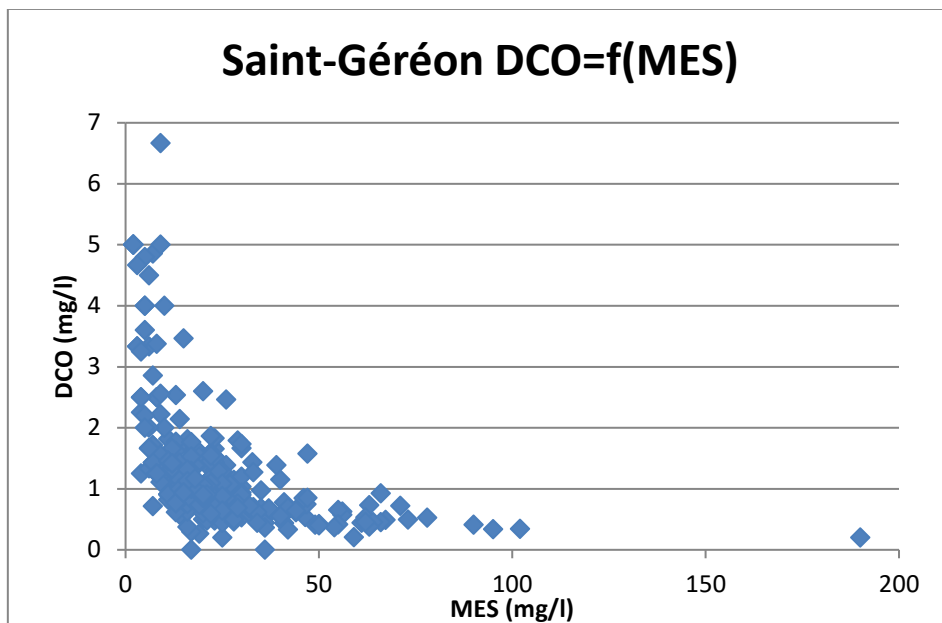


Figure 4 : Variation de la DCO en fonction de la MES

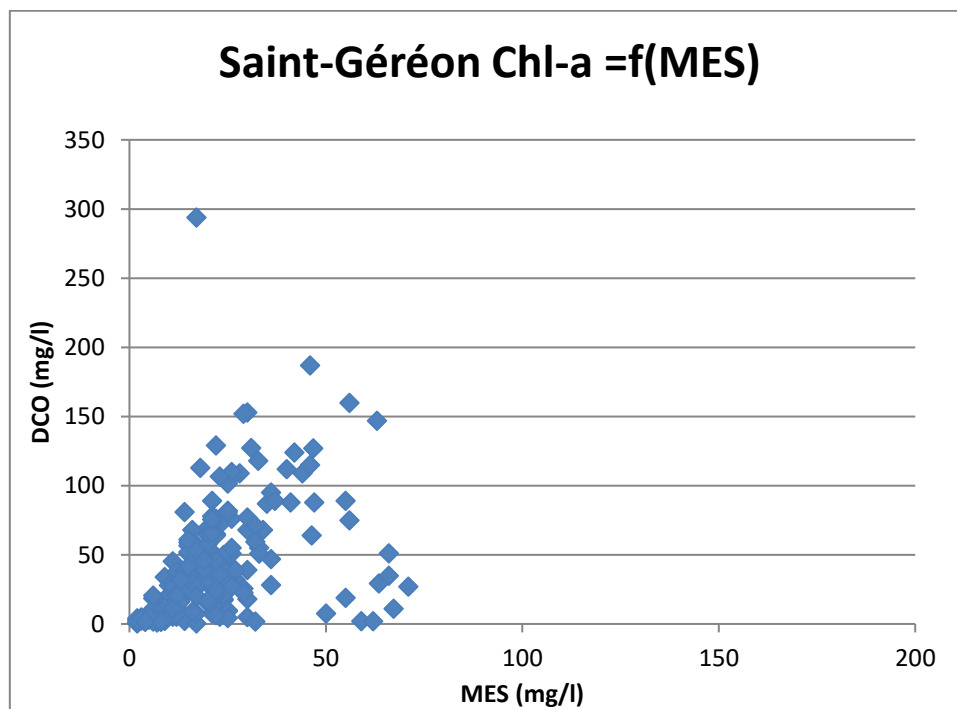


Figure 5 : Variation de la Chlorophylle en fonction de la MES

Les évolutions pour les deux paramètres sont très différentes. Toutefois, on doit noter que la DCO est mesurée toute l'année et que la Chl-a, elle, n'est mesurée que de mars à octobre.

L'évolution de la DCO montre assez clairement une concentration plus importante de matière organique lorsque les eaux sont moins turbides, suggérant une présence de matières endogènes ou anthropiques plus importantes par faibles débits.

La distribution de la Chl-a en fonction des MES est plus dispersée mais avec une tendance à l'augmentation lorsque la MES augmente. Une recherche des facteurs pouvant permettre d'expliquer plus clairement la relation MES / Chl-a dans les eaux du fleuve (selon le mois, le débit, le développement de certains planctons (Diatomées)) n'a pas donné de résultats faciles à exploiter.

En analysant les données des deux stations de Montjean et Saint-géréon sur la période 1997-2017, on se rend compte que les observations de chlorophylle élevées ont fortement diminuées sur les dernières années. Cette diminution est souvent mise en relation avec la diminution des teneurs en phosphates dans le fleuve.

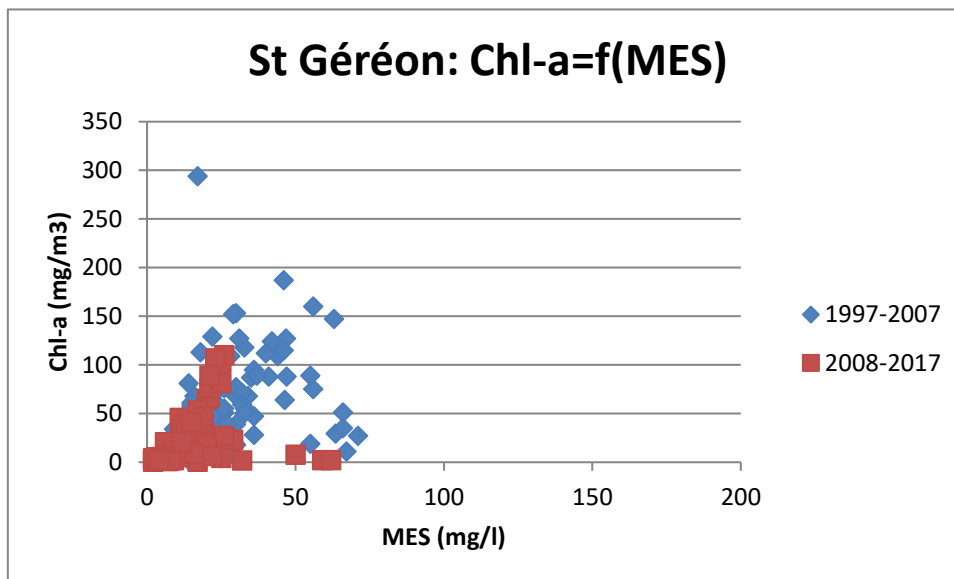


Figure 6 : Variation de la Chlorophylle en fonction des MES

En étudiant alors uniquement le jeu de données 2007-2017 et en ne considérant uniquement les débits < 500 m³/s qui correspondent aux débits pour lesquels le bouchon vaseux se concentre dans la partie amont de l'estuaire, et qui nous intéresse au premier chef, on observe une relation beaucoup moins dispersée.

Si on reporte les données de Saint-Géréon et celles mesurées à Montjean sur Loire (données OSUR), on observe alors une relation MES/ Chl-a relativement peu dispersée si l'on exclut deux points des 80 mesures disponibles.

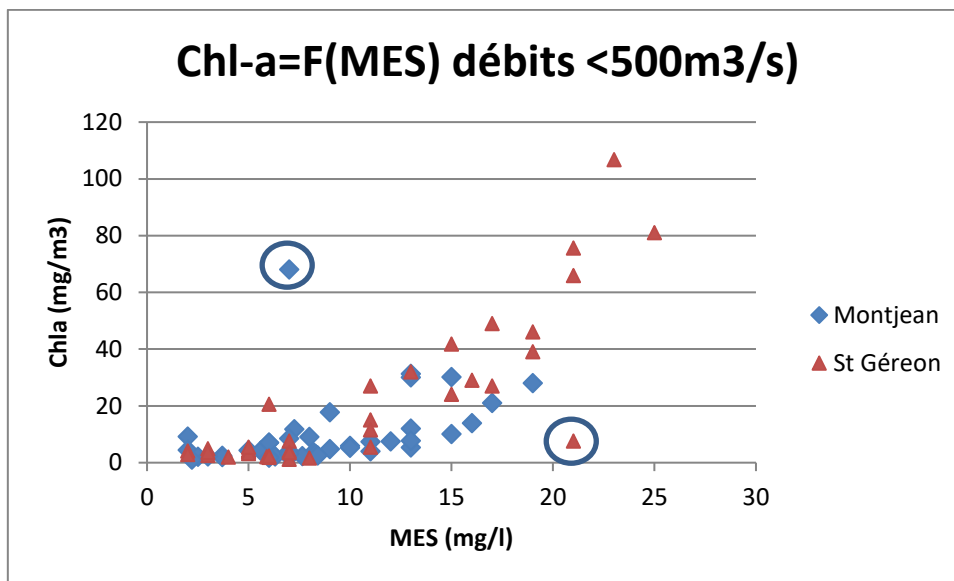


Figure 7 : Variation de la Chlorophylle en fonction des MES pour des débits inférieurs à 500 m³/s, entourés : points particuliers

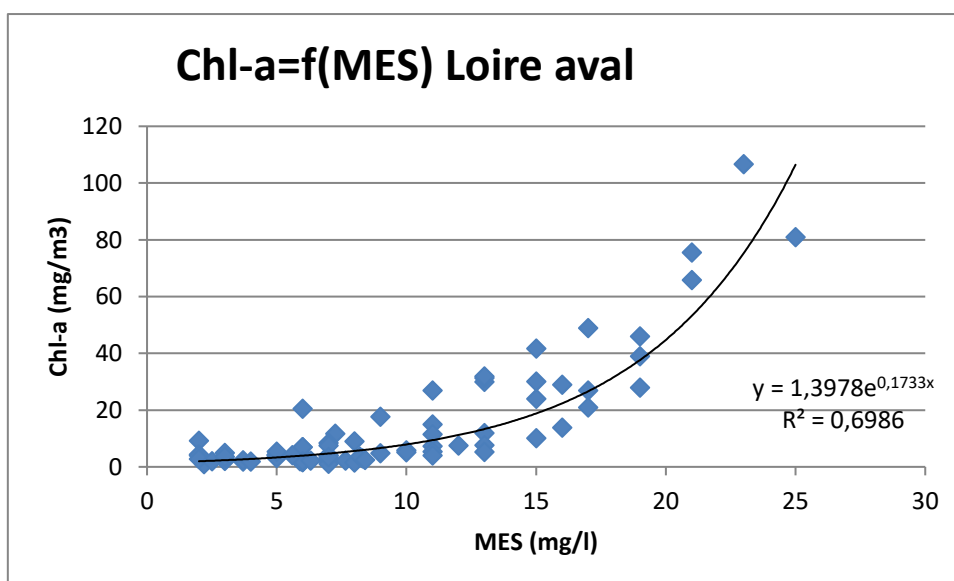


Figure 8 : Relation liant la chlorophylle à la MES dans la Loire aval

Cette relation est intéressante dans le cadre de l'analyse des données à haute fréquence car elle pourrait permettre de calculer un apport de matières planctoniques à partir de la mesure des turbidités ou MES, si toutefois une telle chronique peut être constituée.

2.2. Evolution des paramètres de la matière organique dans l'estuaire

2.2.1. Relations MES – Matières organiques

Une remarque liminaire s'impose concernant l'analyse de la matière organique et de la chlorophylle dans l'estuaire. En effet, ces deux paramètres sont dépendants des conditions dynamiques dans l'estuaire : le long de l'estuaire, le niveau de MES est très dépendant de l'instant de la mesure dans le cycle semi-diurne de marée. Les mesures du réseau DDTM sont effectuées aux alentours de la marée basse locale. Cela peut être une période de variation rapide des courants et les comparaisons effectuées ici ne prennent pas en compte le positionnement précis de la mesure sur la courbe de marée. Il peut donc en résulter une certaine dispersion qui perturbera l'analyse en fonction des autres facteurs environnementaux (débits, saison).

L'analyse des variations de DCO, Chl-a et phéophytine dans l'estuaire est assez difficile à interpréter : en partie probablement en lien avec la remarque précédente, mais aussi car la fréquence d'une mesure par mois est trop faible dans un milieu à très forte variabilité spatiale et temporelle.

Il en ressort toutefois certains points, concernant notamment les relations entre matières organiques et matières en suspensions de l'estuaire.

On observe notamment des relations assez similaires à celles observées dans le fleuve. Si on analyse la relation DCO et MES on observe ainsi pour les points à teneurs importante en MES du bouchon vaseux une relation relativement bien marquée entre DCO et MES. Par contre pour les plus faibles valeurs de MES observées dans les eaux marines et fluviales la relation entre DCO et MES est différente avec des rapports DCO/MES beaucoup plus élevées dans ces eaux. Les eaux du bouchon vaseux paraissant être relativement moins chargées en matières organiques, et plus constituées de matières d'origine minérale.

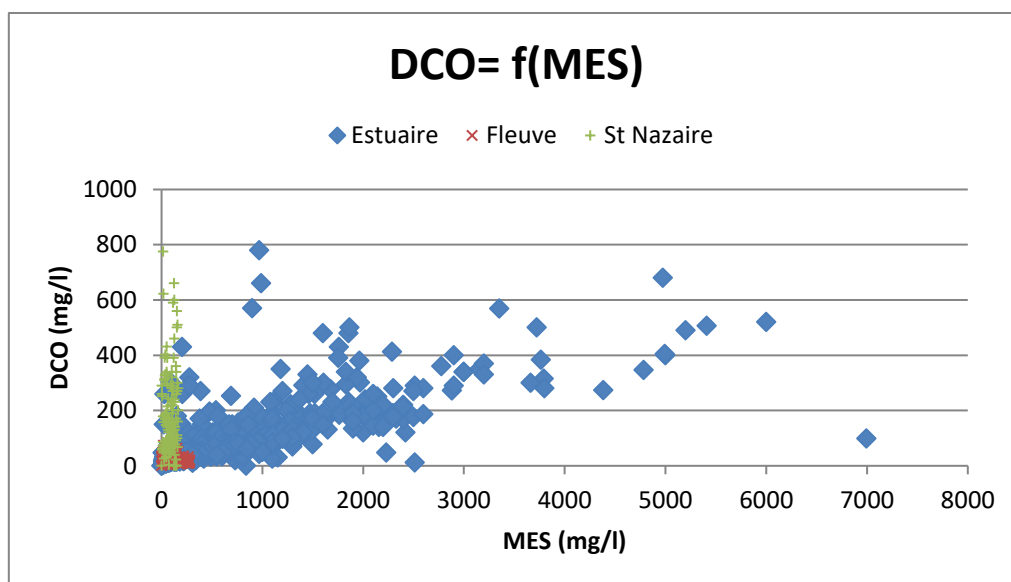


Figure 9: Relations entre DCO et MES aux différentes stations du réseau estuaire

Concernant les pigments chlorophylle et phéophytines, ces paramètres montrent des évolutions en fonction de la MES assez différentes. La phéophytine, molécule en partie liée à la dégradation de la chlorophylle, présente une relation croissante avec la concentration en MES, alors que la concentration en chlorophylle est peu reliée à celle de la MES. Ceci confirme les analyses antérieures

(Fiches GIP-LE xxx) qui montrent une présence de phytoplanctons d'origine marine et terrestre dans le bouchon vaseux mais très peu actifs et dépourvus de molécules de chlorophylle:

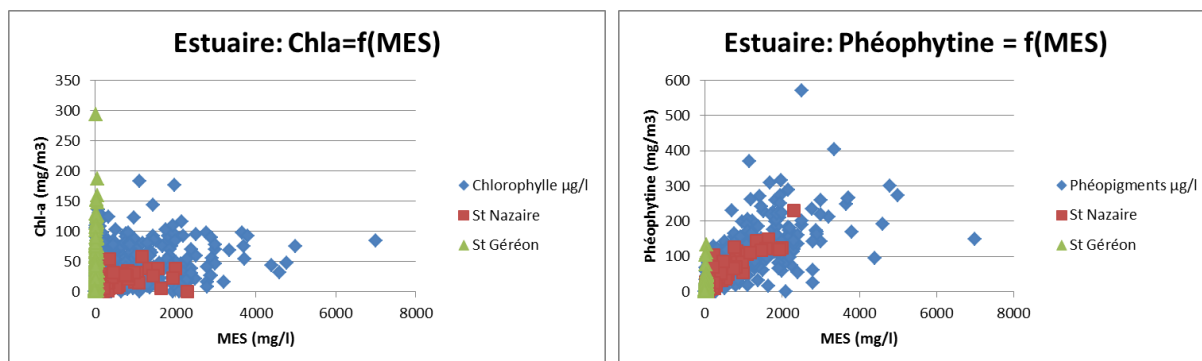


Figure 10: Relation entre pigments et MES dans l'estuaire

2.2.2. Comparaison des données Syvel / DDTM

L'analyse des données de matières organiques et de pigments aux périodes d'anoxies estivales est délicate. Les mesures du réseau estuaire sont réalisées une seule fois dans le mois sur une ou l'autre des périodes de grandes marées. Toutefois, dans les rapports précédents, il apparaît que les hypoxies sont en principe plus marquées sur les plus grandes vives eaux et les rapprochements entre les données Syvel et DDTM sont donc plus difficiles.

3. Analyses des données satellitales

Les données des satellites couvrant la bande visible du spectre lumineux sont depuis maintenant une vingtaine d'années utilisées pour estimer les quantités de MES et de chlorophylle des eaux. D'abord mis au point pour l'observation des océans, les satellites, possédant une résolution spectrale intéressante pour la détection de la chlorophylle, n'avait initialement qu'une résolution spatiale moyenne (800 à 1000m). Ces dernières années notamment avec la mise en orbite des satellites européens Sentinel, des observations à plus haute résolution spatiale (20 à 30m) sont possibles.

L'objectif dans le cadre de ce travail était de constituer des séries chronologiques de Chlorophylle-a à l'embouchure de l'estuaire, d'une part, et, d'autre part, d'utiliser les satellites à haute résolution spatiale, et possédant des bandes utilisables pour l'estimation de la Chl-a, afin de constituer une série chronologique de chlorophylle-a dans une zone du fleuve à l'amont de Nantes. La zone retenue a été la zone de Mauves qui présente des profondeurs assez importantes et surtout une largeur suffisante pour que la mesure ne soit pas perturbée par la présence des rives.

3.1. Mesures au large

Une série de mesures de Chlorophylle a pu être constituée entre 2007 et 2017 avec une fréquence d'observation de plusieurs mesures par mois (jusqu'à une quinzaine). L'algorithme utilisé est celui développé par Ifremer qui a fait l'objet de nombreuses validations. Les données sont issues des satellites Seawifs, Modis, Meris et Sentinel.

Ces mesures sont issues de données Copernicus ⁽¹⁾

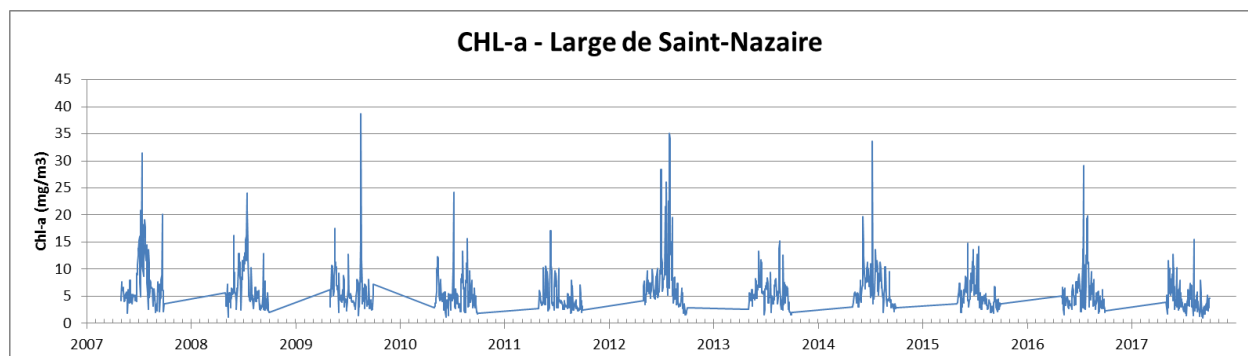


Figure 11: Série de chlorophylle au large à partir des données de satellites couleur de l'eau

3.2. Données satellitales sur le fleuve

Concernant les mesures sur le fleuve, seules deux années de données sont pour l'instant disponibles. Cette approche s'est révélée moins intéressante ; la période de retour du satellite est d'un peu moins de deux semaines, la zone à observer est de faible étendue et la couverture nuageuse même en été

¹ http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=OCEANCOLOUR_ATL_CHL_L4_REP_OBSERVATIONS_009_098



**Analyse de l'apparition des épisodes d'anoxies
dans l'estuaire de la Loire
Rapport Intermédiaire n°1**

Réf. : **Erreur !
Nom de propriété
de document
inconnu.**

réduit la période d'observation. En conséquence, même si depuis l'été 2017, deux satellites sont disponibles, il n'a pu être obtenu que une à deux observations par mois ; ce qui n'apporte que peu par rapport aux données existantes.

4. Flux de matières organiques dans le fleuve

Plusieurs approches ont été mises en œuvre pour estimer l'apport de matières organiques par le fleuve. Pour arriver à mettre en relation les critères d'anoxies par période et les apports de matières organiques il est nécessaire d'avoir une information sur la production primaire a minima à une fréquence au moins hebdomadaire. Les données actuellement disponibles en tant que mesures sont celles à fréquence mensuelle des réseaux d'observation de l'estuaire à Saint-Géréon et de la DCE Montjean sur Loire. Au mieux pourrait-on disposer par ce biais d'une information à fréquence bi-mensuelle, mais, dans la pratique, les dates peuvent être très proches, ce qui n'améliore pas la fréquence de mesures.

Les deux sources de données à plus haute fréquence envisagée pour cette étude étaient d'une part la mesure satellitaire dans la bande visible (satellite Sentinel) et l'utilisation d'informations sur l'oxygène dissous acquises au niveau de la station de Bellevue du réseau Syvel.

Concernant l'observation satellitaire, nous avons vu que cette information en rivière restait pour l'heure une observation à basse fréquence (1 à 2 fois /mois).

Concernant l'utilisation des données d'oxygène du réseau Syvel à Bellevue, nous pensions pouvoir utiliser, comme indice de la production primaire, la consommation et/ou la production d'oxygène dans le fleuve comme indice de présence de matières végétales actives dans la rivière.

Des calculs de ce type ont été réalisés (Delta O2 journalier maximum) et l'évolution comparée de cette grandeur sur la période précédant immédiatement les jours de grande marée était tout à fait intéressante. Toutefois, en analysant plus finement les données, nous nous sommes rendu compte que les eaux de Bellevue peuvent, certaines années, en période d'étiage, être fortement impactées, même à basse mer, par le bouchon vaseux. Dès lors, on ne peut considérer que ces données puissent être utilisées pour calculer un indice de présence de matières organiques venant du fleuve.

Les données satellitaires et celles de la station de Bellevue s'étant avérées inexploitable pour tenter une estimation des flux de matières organiques venant du fleuve, nous avons contacté, en accord avec le GPM-NSN le service des eaux de la Ville de Nantes (Mme David) pour voir s'il était possible de disposer des différentes chroniques de mesures dont ils disposent.

Deux types de mesures sont réalisés sur l'eau brute :

- d'une part des mesures en continu portant sur la température, la conductivité, l'oxygène dissous, et la turbidité, ces mesures sont réalisées probablement à une fréquence élevées mais nous n'avons pas eu l'information et seule une donnée journalière nous a été fournie.
- D'autre part des mesures de contrôles laboratoire effectuée pour l'ARS sur une base mensuelle.

Nous n'avons finalement à ce jour pu obtenir qu'un fichier de données journalières non validées issus des mesures en continu sur la période 2007-2017. Cette information est en soi insuffisante pour calculer les flux de matières pertinents pour l'étude. En effet même si une base journalière est un progrès important, et tout à fait utilisable pour calculer des flux, il aurait été souhaitable de disposer des données ARS de laboratoire pour relier les mesures de turbidité à des grandeurs biogéochimiques (DBO, DCO, Chl-a) Ces données devaient nous être fournies avant la mi-avril, mais pour des raisons de disponibilités des personnels nous n'avons pu les obtenir. Pour pallier ce problème et relier la mesure de turbidité en continu aux paramètres d'intérêts (Chlorophylle, DBO) nous avons donc utilisé les données du réseau OSUR mesurées sur le site de Montjean sur Loire, plus en amont.

NDLA : Les données physico-chimiques dont dispose la Ville de Nantes à Mauves sont mesurées par des sondes installées en aval des systèmes de pompage du site. Les mesures sont acquises et sauvegardées au pas de 1mn, mais pas validées.

Pour cette étude, mais de manière plus générale, nous réitérons la conclusion de notre étude de 2003 qui mettait en avant l'intérêt de ces mesures pour la compréhension de long terme des phénomènes estuariens et fluviaux en Loire aval pour un coût d'acquisition extrêmement faible (coûts résiduels d'archivage et diffusion).

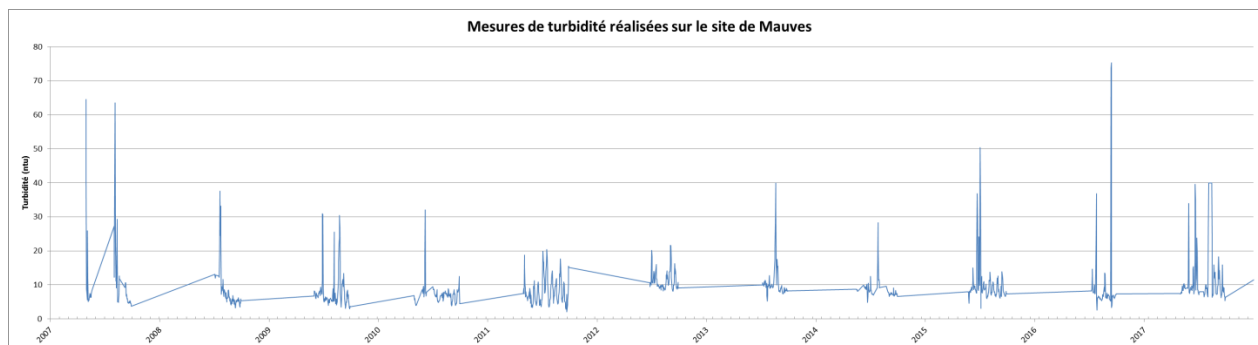


Figure 12: Evolution de la turbidité à la station de pompage des Eaux de la Ville de Nantes à Mauves.

5. Relation entre production primaire et apparitions d'anoxies entre 2007 et 2017

5.1. Relation avec la production primaire du large

A ce stade l'analyse des relations entre indices d'anoxies et production primaire au large a permis de montrer une certaine similitude entre l'évolution temporelle des teneurs en Chla au large sur la période de mortes eaux précédant la vive-eau analysée et le nombre de jours d'anoxies observés dans l'estuaire, et une relation inverse avec le minium d'oxygène dissous dans l'estuaire. Globalement on constate que les maximums hypoxies sont dans beaucoup cas précédés d'une période de production primaire importante dans la zone côtière, et ce plutôt en début de saison, période maximale de production primaire dans les eaux côtières locales.

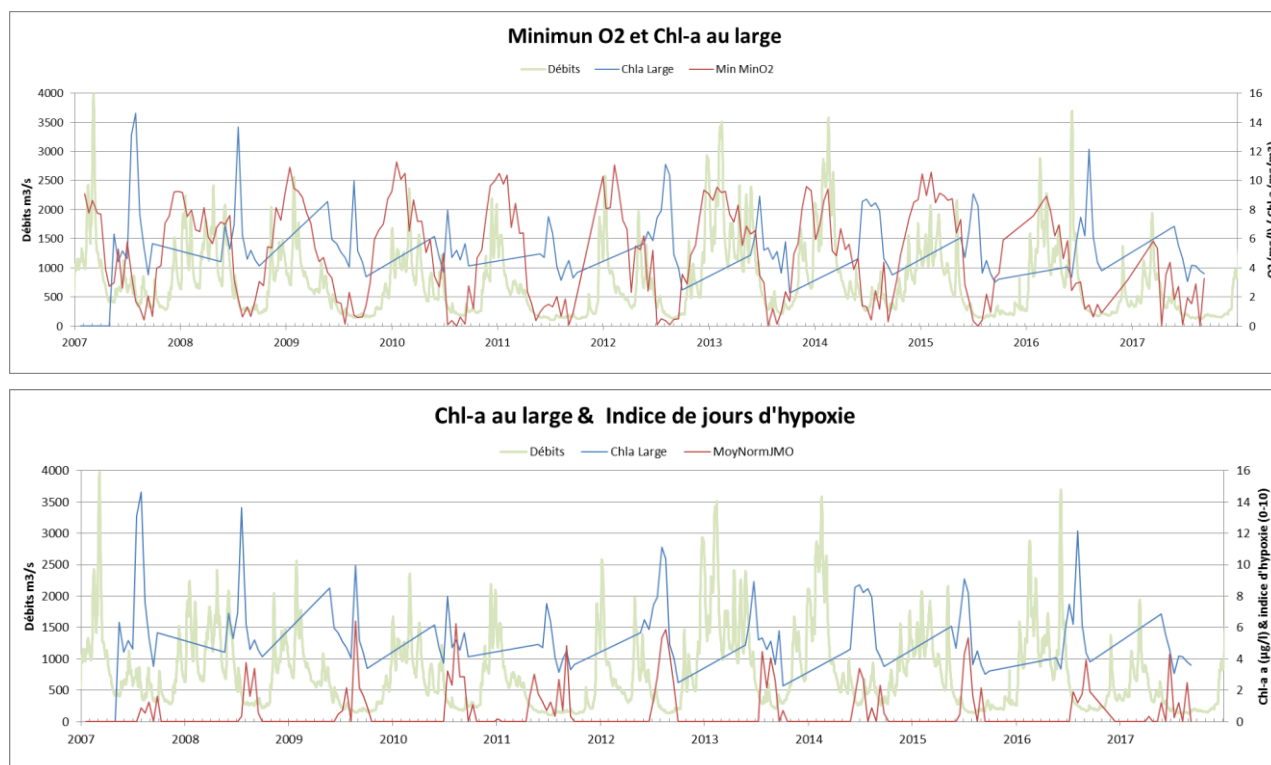
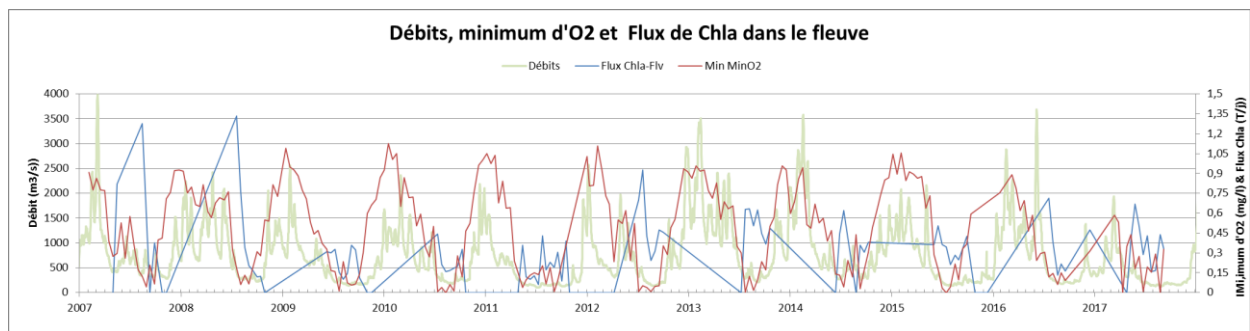
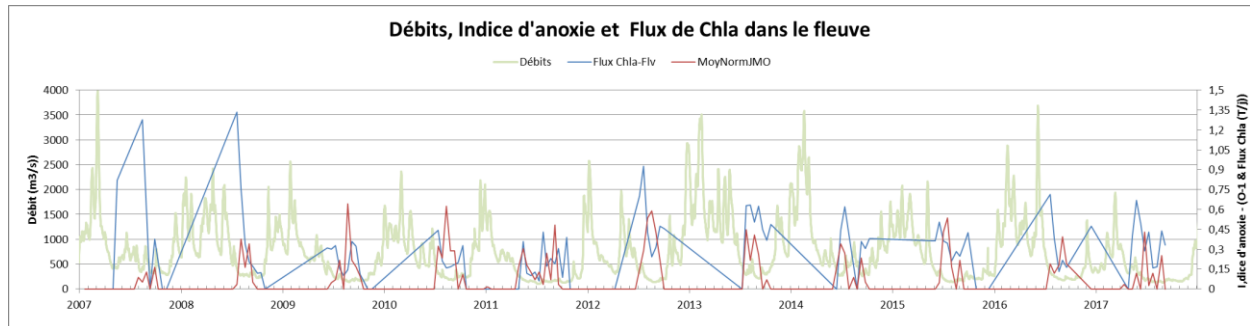


Figure 13: Relations entre Chlorophylle a au large et indices d'anoxies

5.2. Relation hypoxies et production primaire du fleuve



La relation entre les flux de Chl-a dans le fleuve et les variations des indices d'anoxies paraît moins marquée que pour la chlorophylle-a au large, on note plusieurs concordances entre un indice d'anoxie fort et des pics de flux (08/2008, 09/2011, ...) , et des faibles indices d'anoxies associés à des flux bas (08/2014 , 08/2017, 07/2017, qui montre une certaine relation, mais dans le même temps on observe aussi des indices d'anoxie fort avec des flux faibles (08/2009, 08/2010).

Si l'on agrège les deux informations (chl-a au large et flux du fleuve) (figure ci-après) on observe alors une meilleure concordance avec l'indice d'anoxie, bien qu'il reste encore des situations incohérentes (06/2011, 06/2012) mais lorsque soit les niveaux de flux dans le fleuve sont assez élevés (~400 Kg Chl-a / jour) ou que la chlorophylle au large atteint aussi des valeurs moyennes (6 µg/l) la correspondance avec l'indice d'anoxie s'améliore. Il reste toutefois des situations où les deux évolutions ne sont pas cohérentes (06/2014, 07/2017, 08/2010).

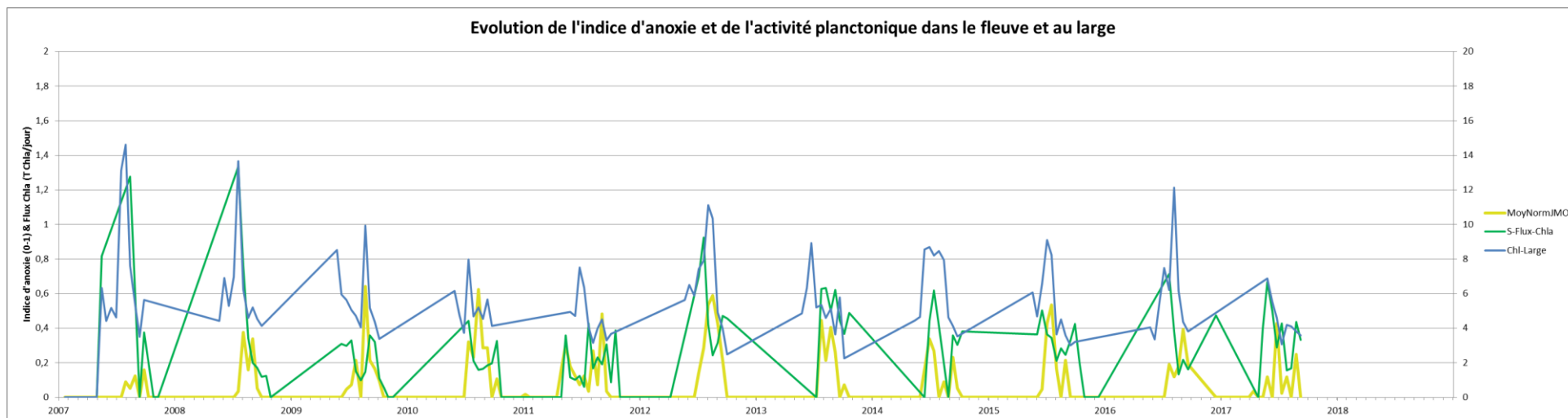


Figure 14: Evolution de l'indice d'anoxie (Nombre de jours d'hypoxie/ Nombre de jours observables) et de l'activité planctonique dans le fleuve représentée par le Flux de Chl-a et au large par la concentration en Chl-a

L'analyse de cette courbe montre que certains évènements d'anoxie de fin d'été (Aout et Septembre) apparaissent lorsque qu'un certain niveau dans le cumul de flux est atteint, et n'existe a contrario pas lorsque les niveaux de cumul de flux sont trop bas. C'est une première analyse et pour l'instant doit être relativisée en attendant que la qualité de l'estimation des quantités de matière planctonique puisse être affinée à partir des données du service des Eaux de Nantes Métropole.

Il n'apparaît cependant pas de relation entre les fluctuations de cette variable de flux et l'indice d'anoxie.

5.3. Influence de la turbidité

L'étude précédente () ne montrait pas d'influence des valeurs de MES sur le niveau de risque d'hypoxie. Nous avons voulu vérifier cette observation sur les données du Pellerin (surface).

Le graphe suivant montre qu'il n'y a pas de relation directe entre la concentration en MES du bouchon vaseux et l'intensité des épisodes d'hypoxies. Cette observation est corroborée par l'analyse des teneurs moyenne maximale en turbidité et les minima d'oxygène observé au Pellerin. Par exemple en 2012 et 2013 avec des turbidités nettement plus faibles qu'en 2011 on atteint des minima d'oxygène inférieurs à ceux de 2011. Ceci se retrouve si on compare l'évolution du maxima de turbidité (l'indicateur de turbidité est ici le percentile 90 des mesures journalières) sur un cycle de sysygie et du minima d'oxygène sur le même cycle, ou aucune relation n'apparaît entre ces grandeurs n'est perceptible.

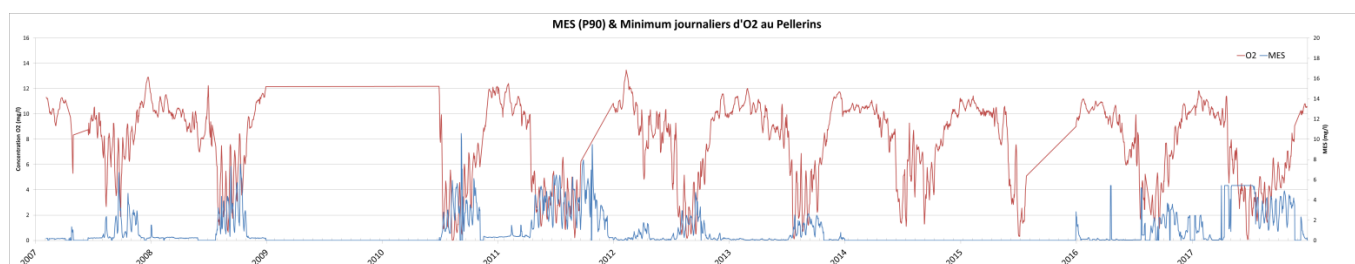


Figure 15: Evolution journalière du P90 des MES et du minimum d'oxygène dissous

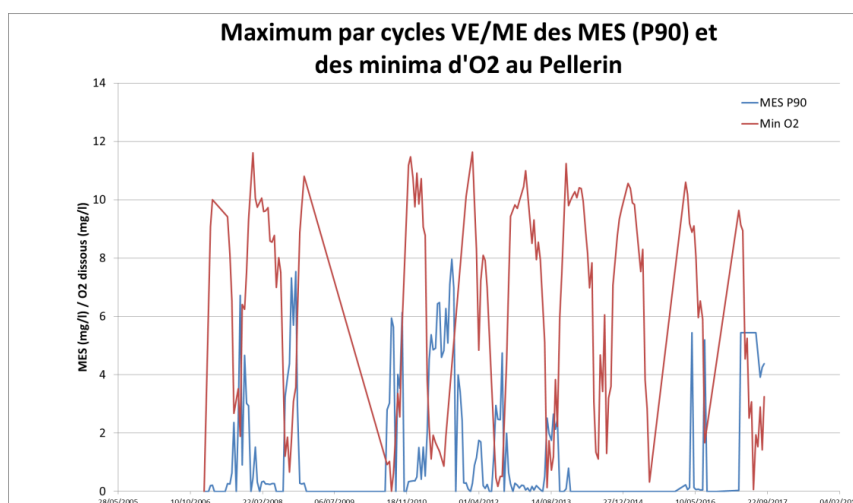


Figure 16: Maxima par cycle VE/ME du P90 des MES et du minimum d'oxygène dissous au Pellerin en surface

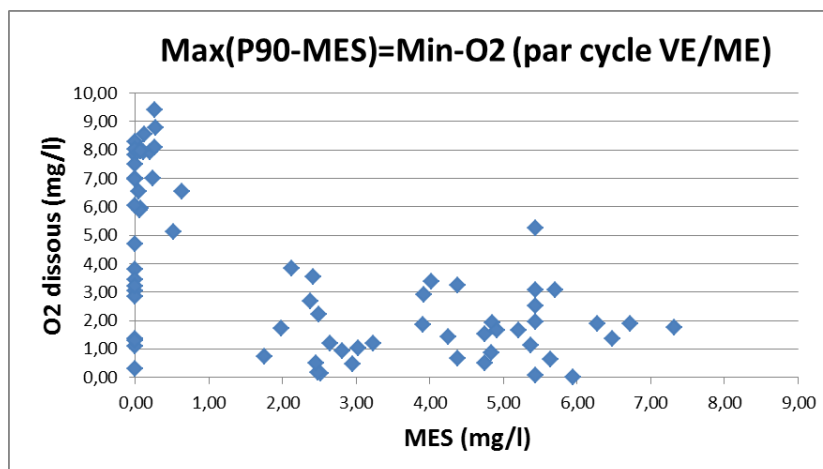


Figure 17: Relation entre le maximum du P90 des MES avec le minimum d'O2 d'un cycle journalier

6. Prédiction court terme des minima

L'approche de base pour l'étude d'un outil de prévision à court terme des risques d'anoxies dans l'estuaire était basée sur l'extrapolation des teneurs en oxygène à partir des valeurs observées à la Morte eau du cycle, ce qui pourrait permettre 4 à 5 jours à l'avance d'avoir une idée du risque d'hypoxie à la vive eau suivante.

L'objectif était de calculer une ou des courbes type d'évolution de l'oxygène sur les quelques jours suivants la morte eau d'un cycle de sysgie.

Toutefois rapidement nous avons pu observer en étudiant en détails à la station du Pellerin l'ensemble des courbes d'oxygène qu'il était très difficile de faire une classification de ces évolutions qui puissent être utilisées de manière prédictive.

Les 2 graphes suivants illustrent cette dispersion, ils représentent les différences entre minima journaliers, sur les jours suivant la morte eau du cycle.

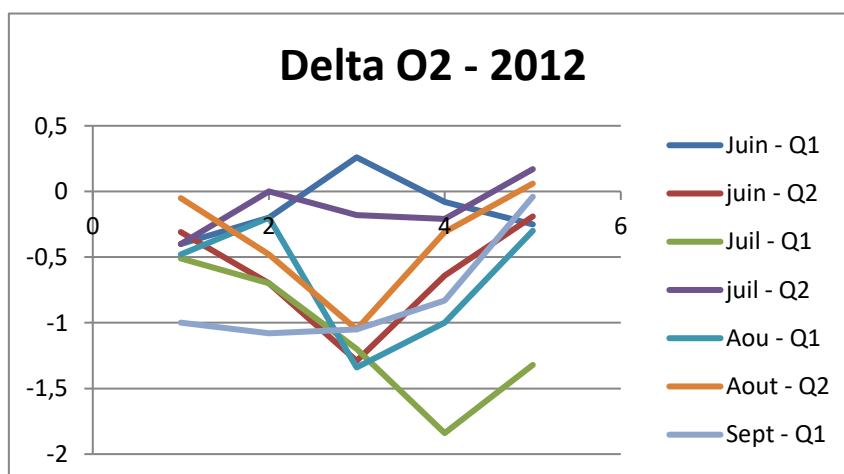
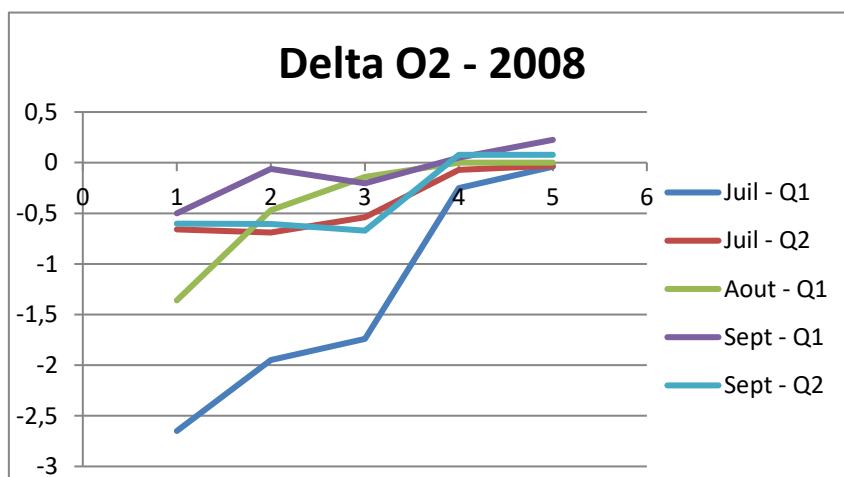
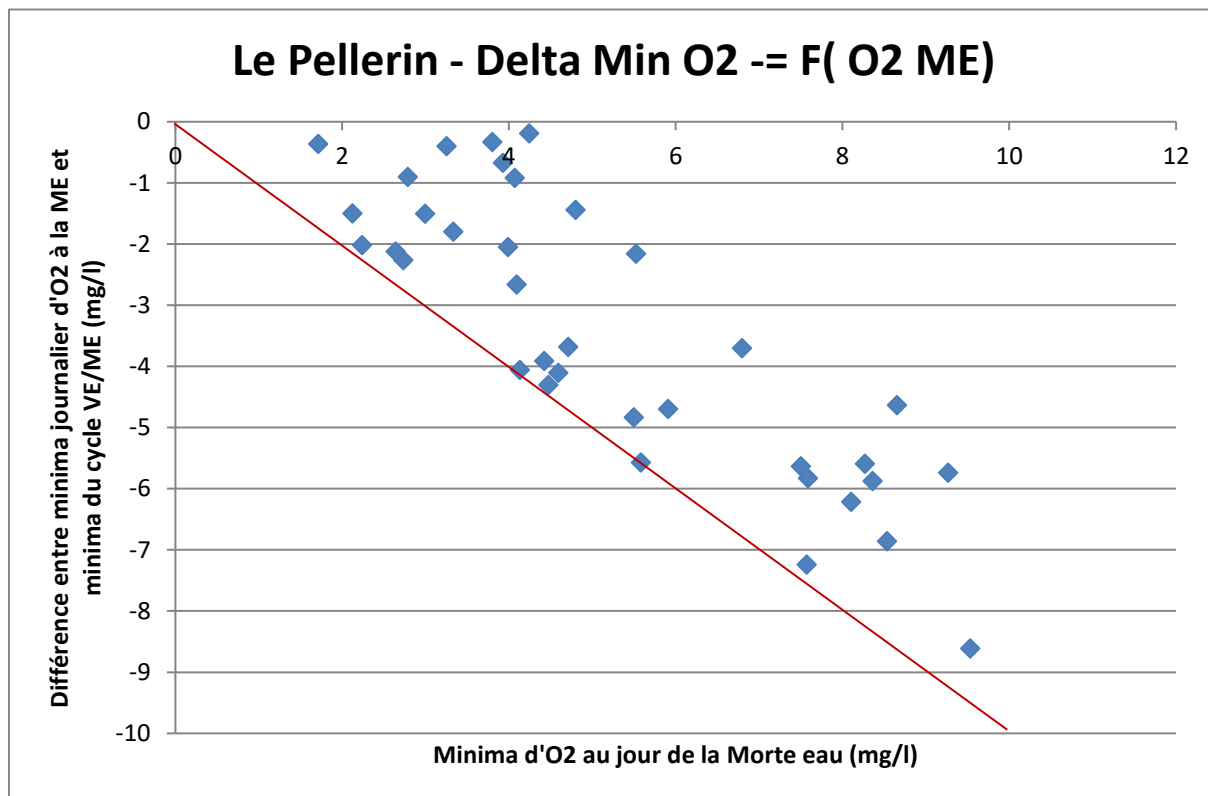


Figure 18: Evolution de la teneur en O₂ lors des période revif (Q1 ; quinzaine 1, ...)

Ces graphes montrent des variabilités assez fortes d'un jour à l'autre ce qui nous a conduits à plutôt analyser une valeur plus intégrative de l'évolution sur la période de revif et nous avons ensuite travaillé sur la différence entre la valeur du minimum d'oxygène au jour de la Morte eau et la valeur minima d'oxygène sur le cycle de VE-ME.

Le graphe suivant montre la relation entre ces deux grandeurs pour la Station du Pellerin.



La courbe rouge indique la droite de pente 1 qui correspond à la consommation de l'oxygène disponible à la ME et à une anoxie complète.

Plusieurs hypothèses sont envisageables pour expliquer cette distribution. D'une part lors des mortes eaux de coefficient assez élevé, les effets de mélange restent actifs et la couche de crème de vase se forme moins, cela doit avoir deux effets, d'une part le maintien de conditions relativement turbides dans la colonne et d'autre part la dispersion de matières réduites et d'eaux hypoxiques de la couche de la couche de fond. A l'inverse lors du revif suivant moins de matières réduites de la crème de vase sont relarguées entraînant une baisse moindre de l'oxygène.

A contrario pour les périodes de faibles coefficients, la couche de crème de vase s'isole plus du reste de la colonne d'eau, permettant ainsi de concentrer plus fortement la couche de fond contribuant lors du revif suivant à la réintroduction de quantité plus importante de matières fortement réduites, et d'eaux anoxiques. Autre effet probable durant les faibles mortes eaux, la couche de surface redevient plus claire et l'ensemble de l'estuaire retrouve des conditions hydrodynamiques et d'éclairement (turbidités plus faibles) plus favorables à la photosynthèse. Cela doit avoir deux effets : à la fois la présence de plus fortes concentrations en O2 lors de la morte eaux et une plus grande consommation d'oxygène liées à la présence du plancton produit pendant la morte-eau qui n'est alors plus actif du fait de l'éclairement réduit et de la turbulence du milieu en revif et qui alors ne fait consommer de l'oxygène par sa respiration ou le début de lyse.

Cette relation restant encore relativement dispersée pour disposer d'un outil prédictif nous avons essayé d'étudier quels autres paramètres pourraient influencer sur les concentrations en oxygène et pourraient être susceptibles d'expliquer une partie de la variance observée.

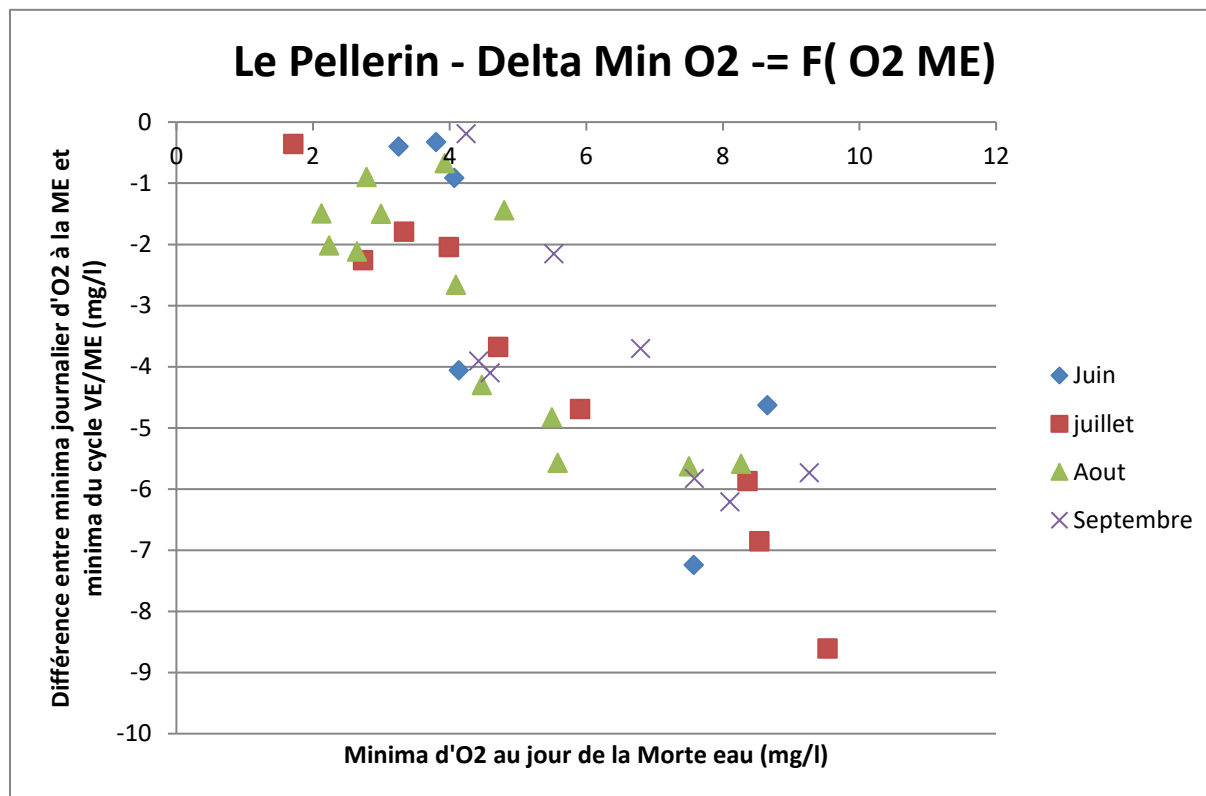
Nous avons évalué différentes grandeurs pouvant avoir un effet sur ces concentrations entre autres nous pouvons citer :

- La température de l'eau qui a une influence sur la dissolution de l'oxygène,
- Le vent moyen sur la période de revif, et sur la période de déchet précédente,
- La concentration moyenne en MES sur la période de VE/ME
- La différence de coefficient entre la morte eau et la vive eau suivante.

Nous avons procédé pour ces paramètres de deux manières : par une analyse graphique de la répartition des points en fonction de chacun de ces paramètres ainsi que par le calcul de régressions multiples incluant chacun de ces paramètres.

Ces tests ne permettent pas de réduire significativement la variance observée ou de définir de nouvelles relations moins dispersées.

Toutefois en analysant les données du graphe précédent en fonction de la période de l'année on peut percevoir une distinction plus explicative.



On observe ici une relation plus forte de la majorité des points de juillet aout avec quelques points de septembre et juin, alors que les points de septembre et juin semble avoir une distribution légèrement différente. La relation pour le mois de juillet est particulièrement marquée ($r^2=0,95$).

On note par ailleurs sur ce graphe que les points de juin situés dans le nuage de points des mois de juillet/aout correspondent par exemple à des jours de températures très élevées > 30°C). De la même manière pour certains des points de septembre mais pas tous. Un essai de classification sur des critères basés sur la différence de température Air/eau ne permet pas non plus de mieux classer les points de cette relation. Cette très bonne relation pour le mois de juillet, et des relations plus dispersée pour

juin et septembre et dans une moindre mesure août est peut-être à rapprocher d'une plus grande variabilité en juin et septembre des conditions influant sur la teneur en oxygène :

- Variabilité de la production primaire en fonction de l'éclairement et de disponibilité des nutriments dans le milieu marin notamment en juin,
- Conditions météorologiques et hydrologiques influant sur la dissolution de l'oxygène plus variables dans l'estuaire à ces périodes (plus de coup de vent, et d'épisodes de réchauffement ou refroidissement de la masse d'eau).

En l'état il paraissait possible d'utiliser la relation trouvée pour les points de juillet/août pour prédire à court terme le risque d'apparition d'anoxie à la station du Pellerin, selon un modèle linéaire simple, mais pour le début et la fin de saison cette méthode ne permet toutefois pas d'effectuer une prédiction sûre.

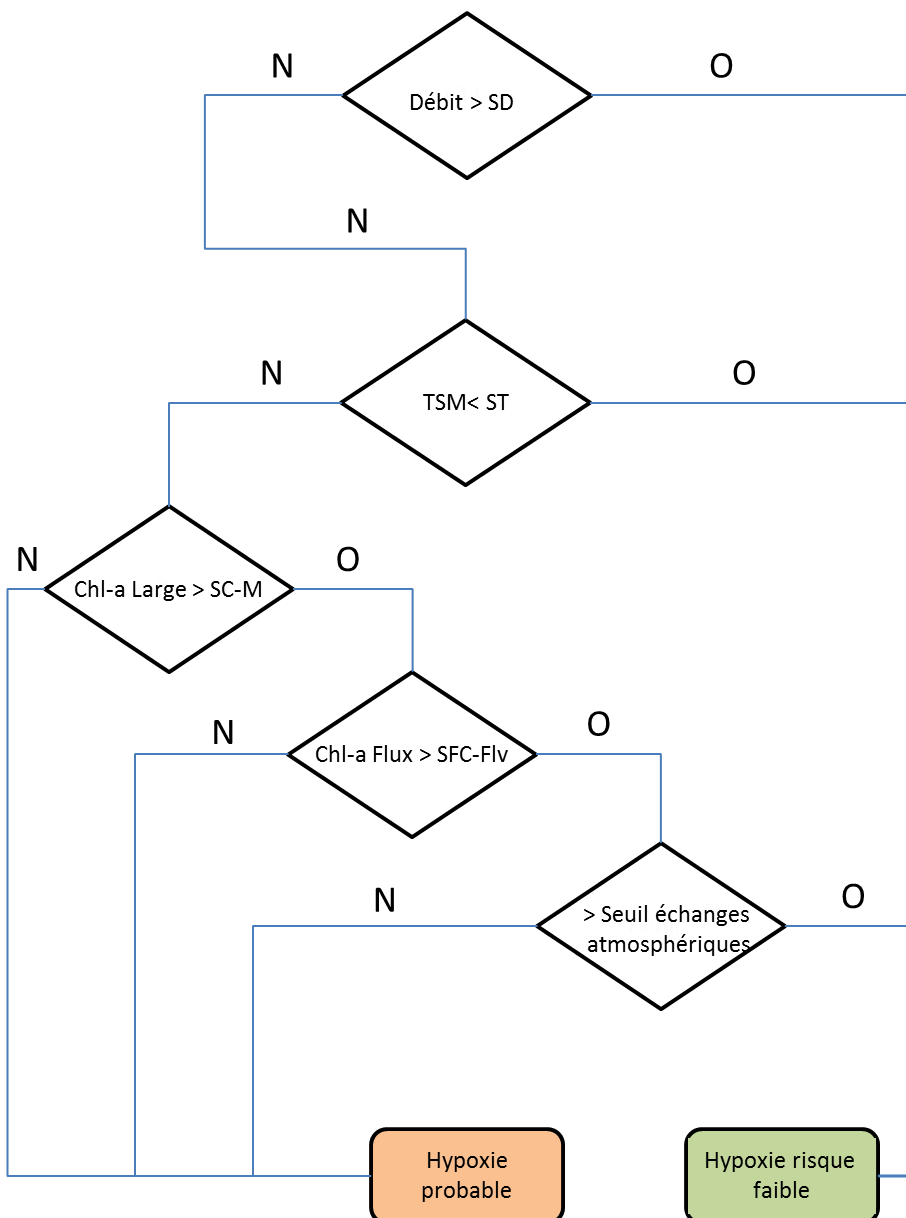
Les différents facteurs impactant la variabilité peuvent jouer dans des sens différents à un même moment et les tentatives de classification menées sur la base de différents paramètres environnementaux ne nous ont pas permis de rendre compte totalement de cette dynamique complexe.

Pour rendre compte de l'interaction de ces différents paramètres nous avons alors essayé de développer un moteur de règles à partir des observations précédentes, qui nous permettent de tester l'influence conjointe de ces facteurs environnementaux.

Nous avons testé l'influence de différents facteurs environnementaux sur le taux d'oxygène dissout dans l'estuaire :

- Le débit,
- La production primaire dans le fleuve et le milieu côtier aval,
- La température de l'eau,
- Les échanges gazeux en fonction des conditions hydro-météorologiques.

Sur ces bases nous avons développé un ensemble de règles basés sur l'algorithme suivant :



Les différents seuils ont été déterminés ou affinés à partir des tests des résultats sur l'ensemble de la période.

SD : Seuil de débit, qui correspond à la valeur déjà évoqué dans l'étude précédente et qui correspond au débit à partir duquel le bouchon vaseux se situe en grande partie en amont de Paimboeuf. (GIP-LE, ...)

TS : température Seuil en deçà de laquelle on n'observe pas d'hypoxie inférieure à 2mg/L,

SCL : Seuil de Concentration en Chl-a à partir duquel on se trouve dans une efflorescence importante, ce seuil correspond au maximum observé sur l'imagerie satellitaire sur la période précédant la vive-eau courante.

SFC-F : Seuil de masse de Chl-a apporté sur une période de débits faibles sur la période précédant la vive-eau courante. Ce seuil correspond à un seuil de masse de Chl-a. Le calcul de Chl-a du fleuve est

réalisé à partir de la relation définie au paragraphe 2.1.2 entre turbidité et Chl-a par faible débits et appliquée aux mesures de Mauves. L'indice correspond à la masse maximale observée sur une période de quelques jours précédant la vive-eau.

Les deux premiers tests proposés correspondent à des facteurs physiques prédominants, le débit et la température. Effectivement dans tous les cas si un de ces deux tests est positif (température faible, et débits forts) la probabilité d'apparition d'hypoxie en surface au Pellerin est faible.

Le troisième test porte sur l'influence de la production primaire, il exprime le fait qu'il doit y avoir suffisamment de matière organique à oxyder dans le bouchon vaseux et pour l'évaluer les fluctuations de compartiment on observe la production au large si elle présente dans la période précédant immédiatement la vive eau courante alors les conditions de présence d'anoxie sont réunies. L'approche est la même pour la production primaire du fleuve, mais ici au lieu de chercher un maximum ponctuel de concentration on cherche plutôt l'estimation d'un flux max sur une période donnée de 10 jours précédant le maximum de vives-eaux.

Le quatrième niveau de test porte sur les conditions de transferts thermiques et gazeux à l'interface océan-atmosphère. La concentration en oxygène est aussi influencée par ces échanges. Dans la littérature les flux gazeux sont décrits comme dépendants de plusieurs facteurs,

- L'écart entre les concentrations en gaz dans chaque milieu,
- Les conditions de stabilité dans chaque milieu affectant le mélange et donc les concentrations à l'interface,
- Les conditions physico-chimiques contrôlant la dissolution des gaz dans l'eau (Température, salinité),

Nous avons retenu la formulation proposée par Ifremer, pour le développement de ces modèles :

A partir de cette formule nous avons étudié l'évolution du paramètre KO_2 , sur la période précédant la VE. L'introduction de ce paramètre si elle pourrait permettre d'améliorer les résultats de certains tests perturbe aussi les résultats pour d'autres et au final n'améliore pas la prédiction.

Dans cette formule il est à noter que les paramètres d'agitation de surface ne sont pas pris en compte, même si ceux dans l'estuaire interne, sont a priori relativement peu influent, nous avons toutefois évalué l'influence des vents soufflant dans l'axe de l'estuaire interne (Secteur ouest et est) pouvant potentiellement dans le secteur du Pellerin être à même de lever un petit clapot. Ce paramètre ne permet pas non plus d'améliorer le score de prédiction.

Nous avons aussi testé l'influence du refroidissement atmosphérique, faisant l'hypothèse d'une déstabilisation de la colonne d'eau, pour cela nous avons utilisé les données de bilan thermique fourni par les modèles de Météo-France, (selon la période Aladin ou Arome) calculé sur le point de grille situé à l'ouvert de Saint-Nazaire. L'indicateur calculé était le minimum du flux thermique (refroidissement maximum). L'utilisation de cet indicateur n'a pas permis non plus d'améliorer les scores de prédiction de risques d'hypoxie au Pellerin en surface.

Les résultats présentés ci-dessous ne prennent donc en compte que les variables suivantes avec les seuils suivants :

Paramètres	Seuils	Actions
Débits	500m ³ /s	>500 m ³ /s pas d'hypoxie
Température de l'eau	<19,6°C	Pas d'hypoxie
Chlorophylle au large (Maximum sur les 15 jours précédents la VE)	9 µg/l	>9µg/l, possibilité d'hypoxie
Flux de chlorophylle dans le fleuve pour des débits > 500 µg/l et sur 7 jours précédents la VE	16000	>16000, possibilité d'hypoxie

Les deux derniers paramètres sont combinés par une fonction OU, si un des deux critères donne une possibilité d'anoxie, le risque d'hypoxie est possible.

Sur cette base, le graphe suivant permet de comparer la prédiction effectuée, et l'observation de l'hypoxie à la station du Pellerin en surface.

2008											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	8,77999973	7	8,02000046	8,5545435	9,11585426	1,21205878	1,86792183	0,66510916	999	3,0927453	
Risque	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
Validité	1	1	1	1	1	1	1	1	999	1	
2009											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	
Risque	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	
Validité	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	
2010											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	999	999	999	11,3800001	0,92000002	1,02999997	0,01	0,62342322	0,48766693	3,36653304	
Risque	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	
Validité	999	999	999	1	1	1	1	1	1	1	
2011											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	2,11307454	1,93696833	1,66766693	3,47000003	1,37	4,11000013	0,86556	1,88475025	0,21904561	2,35183787	
Risque	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	
Validité	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2012											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	8,81000042	6,98999977	8,52999973	4,01999998	2,51999998	0,47	0,22	0,51999998	0,50999999	4,05000019	
Risque	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
Validité	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2013											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	7,94000006	8,53999996	7,94999981	7,28000021	5,75	0,13	1,74000001	0,73000002	1,20000005	3,83999991	
Risque	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	
Validité	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
2014											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	9,17146015	7,84000015	3,83999991	1,35000002	1,11000001	4,67999983	3,43000007	6,05999994	1,29999995	3,21000004	
Risque	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	
Validité	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
2015											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	8,30000019	4,32000017	2,84999999	0,33000001	1,35000002	4,5	999	999	999	999	
Risque	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	
Validité	1	1	0	1	1	1	999	999	999	999	
2016											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	8,52132797	5,96317673	6,53188944	7,22994804	1,67443979	2,44703388	999	1,58782411	0,92160106	3,80126047	
Risque	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	
Validité	1	1	1	1	1	0	999	1	0	1	
2017											
Période	Mai		Juin		Juillet		Aout		Sept		
Min O2	5,25686121	3,79409385	3,66324186	0,07224261	1,94149601	1,53613389	3,58408451	1,48224318	3,25289845	3,80126047	
Risque	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	
Validité	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	

Figure 19: Tableau comparant le minimum d'oxygène au Pellerin par période de VE/ME, le risque calculé par le prédicteur d'hypoxie, la ligne Validité représentant le score de prédiction (Bon 1, Mauvais 0).

De 2008 à 2017, 100 périodes pouvaient être analysées, sur ce total un certain nombre d'absence de données de longue durée ne permettait pas de faire le calcul. Il n'y a au final que 67 périodes avec des données éventuellement partielles.

On observe au total 7 périodes avec une prédiction incorrecte soit 10% d'échec.

Toutefois sur ces périodes de prédiction incorrectes deux présentent une anomalie perturbant l'évaluation (première période d'août 2015 et dernière période de juillet 2016) en effet dans les deux cas la mesure d'oxygène est absente sur la fin de période revif et le minimum n'est ainsi pas calculé sur toute la période dans laquelle il est susceptible d'apparaître. Si on exclut ces deux périodes douteuses le score de prédiction incorrecte descend à 7,5%.

On note aussi une mauvaise prédiction en juillet 2015 où le débit remonte pendant 3 jours légèrement au-dessus 500 m³/s, le calculateur ne prédit pas donc d'hypoxie alors que celle-ci est effectivement avérée.

Pour le reste on notera que toutes les périodes de fausses prédictions sont quasiment toutes situées entre début ou fin de période (mai-début juin et septembre).

7. Bilan de masses

7.1. Bilan des masses sédimentaires

Dans le cadre de ce contrat nous avons prévu d'effectuer un bilan de masse des sédiments mis en jeu par les différents processus anthropiques ou naturels influant sur la quantité des matières présentes dans le bouchon vaseux, notamment pour évaluer l'impact que pourrait avoir sur la masse de sédiments en mouvement les différentes actions de dragages.

La figure suivante récapitule l'évolution des volumes annuels dragués par nos systèmes remettant des particules en suspension dans le milieu, ainsi que celle des apports par le fleuve (Bleu foncé).

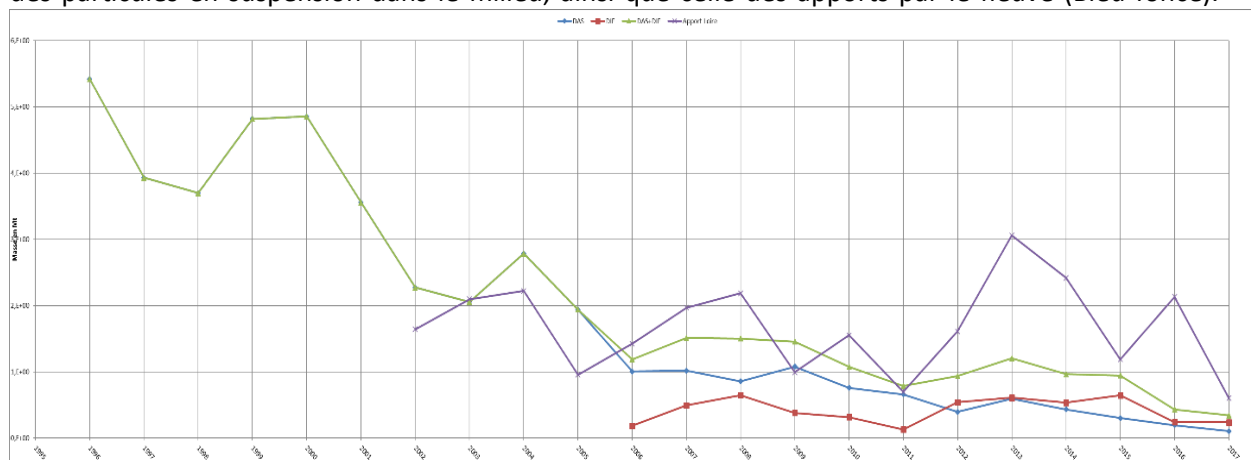


Figure 20 : Bilan annuel des masses sédimentaires draguées par des systèmes remettant les particules en suspension dans le milieu (Source GPM-NSN) et apports fluviaux (Bleu : DAS, rouge : DIE, vert : DAS+DIE, violet : apports de la Loire)

Depuis 2002, ces quantités sont relativement stables variant entre 1 et 2 M de t, les deux dernières années étant sensiblement plus basses (0,5 M de T). Cette valeur étant de l'ordre de grandeur de celle des apports fluviaux. Auparavant les masses remises dans le milieu en surverse étaient par contre de l'ordre de 2 à 3 fois supérieures.

Si on rapporte ces masses à l'estimation de masse de la crème de vase 11 Mt (Source Fiche dragage GIP-LE) on est pour la période récente (depuis 2007) à environ un rapport de 10 à 15%. L'impact de ces dragages paraît donc limité par rapport à la masse totale de la crème de vase de l'estuaire.

7.2. Bilan des masses de matières organiques

Il nous a aussi paru intéressant d'effectuer un bilan des quantités globales de matières organiques dans l'estuaire. Selon les différents milieux (marin, estuaire, fleuves, rejet) les usages pour analyser la matière organique varient. Si le COT est de plus en plus utilisé dans les différents milieux, dans le passé et en rivières, il était plutôt utilisé la DCO et la DBO5, ainsi d'ailleurs que dans les eaux résiduaires ou urbaines.

Pour faire ce bilan nous avons donc soit utilisé les données existantes, soit pour le COT quand il n'est pas disponible, utilisé des rapports moyens entre DCO et COT issus de la littérature. Nous avons ainsi pris un rapport DCO/COT de 3,1 pour les eaux de rejets et un rapport 3,8 pour les eaux du fleuve (données PIREN Seine).

7.2.1. Apports journaliers des STEU de l'agglomération nantaise

Nous avons calculé, les flux d'entrée à partir de données bibliographiques communes (site assainissement.gouv.fr), qui donne une équivalence de 60g de DBO5 et 120 g de DCO pour un effluent urbain.

STEU Nantes	Flux d'entrée	Abattement	Rejet (t)
Eq Habitant	700 000		
DBO5 (t d'O2)	42,00	97%	1,26
DCO (t d'O2))	84,00	97%	2,52
COT (t de C)	27,10	97%	0,81

7.2.2. Apports journaliers du fleuve

Fleuve	COT	DBO	DCO
Conc (mg/l)	1,3	0,5	5,0
Débit (m3/s)	200	200	200
Flux en T (Mini)	22,74	8,64	86,40

7.2.3. Rapports des flux

Rapport STEU/Fleuve	COT	DBO	DCO
Flux Minimum	3,6%	14,6%	2,9%
Flux Moyen	0,8%	2,5%	0,7%
Flux Median	0,9%	3,5%	0,7%

Le flux minimum est calculé en multipliant le débit d'étiage par la valeur du minimum de DCO, DBO5 ou COT observé à Montjean par débits inférieurs à 500 m³/s

L'analyse de ces tableaux tend à montrer que l'apport anthropique est d'un ordre de grandeur plus faible que l'apport du fleuve, c'est toutefois un peu moins vrai pour la DBO5.

Il faut par ailleurs noter que ce calcul simplifié des apports ne prend pas en compte toutes les sources anthropiques. Ne sont ici prises en compte aucune des STEI présentes sur l'estuaire, ne sont pas non plus inclus les apports de temps de pluie par des parties unitaires du réseau urbain de l'agglomération de Nantes apports sur lesquels nous n'avons pas d'informations. Toutefois ce chiffre permet de situer les ordres de grandeurs, qui tendent à montrer la prépondérance de l'apport du fleuve même en termes de DBO5.

Pour compléter l'analyse de l'apport fluvial et pour corroborer notre hypothèse de l'influence de la production primaire sur la charge organique, nous avons étudié la relation entre DBO5 et pigments dans le fleuve.

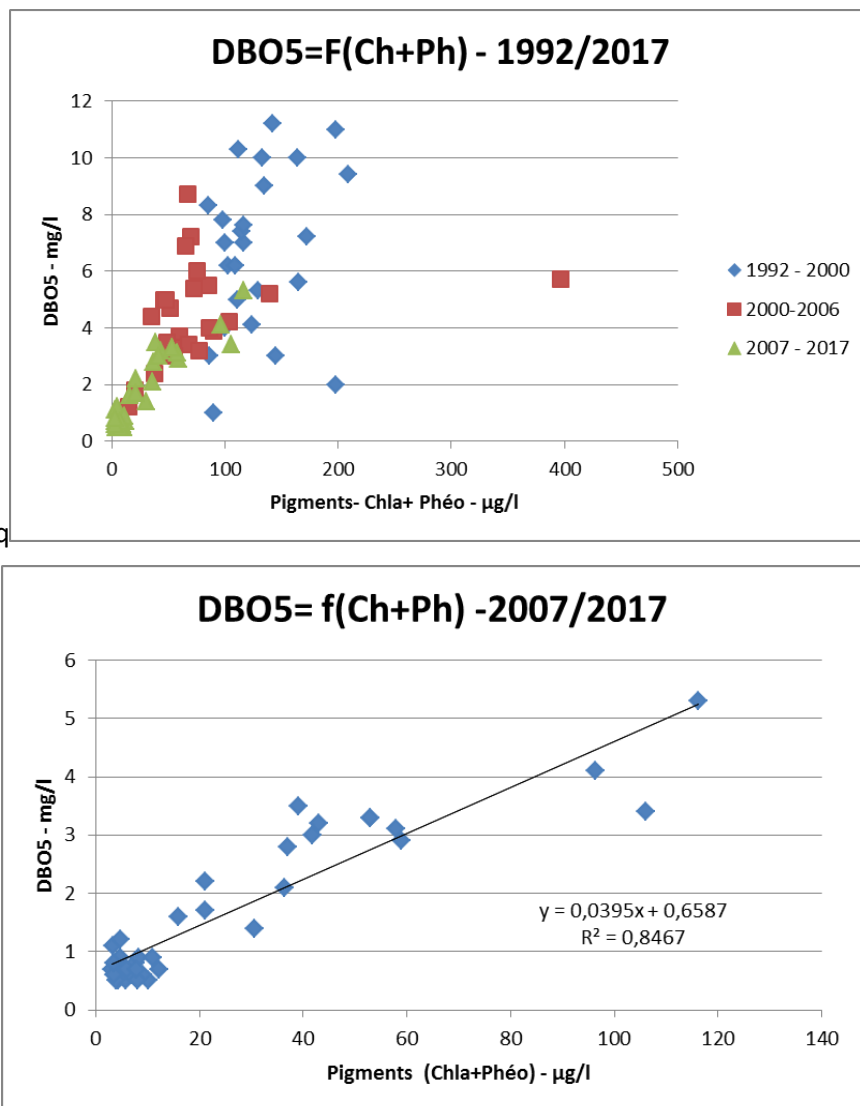


Figure 21: Relation entre DBO5 et Pigments à Montjean en période de débits faibles (<500 m3/s)

Le premier graphique montre la relation entre ces deux paramètres sur l'ensemble de la période d'observation. On y note qu'avant 2007 la relation est très dispersée. Cependant après 2007 On observe une relation marquée entre DBO5 et pigments ce qui tend effectivement à confirmer l'importance de la production primaire dans l'apport de matières organiques rapidement dégradables, dans la période actuelle.

En traçant l'évolution de ces deux paramètres sur la période d'observations à Montjean (1992 à 2017) on note aussi une évolution intéressante au regard du sujet de cette étude.

On observe en effet une diminution très importante (facteur 2 ou plus) des concentrations à partir du début des années 2000, tant pour la DBO5 que pour les concentrations en pigments et une stabilisation à un niveau plus bas à partir de 2005-2007 jusqu'à aujourd'hui. Cette évolution correspond aux travaux importants de mise aux normes des STEP effectués dans les années 90 sur l'impulsion des agences de l'eau. On peut rapprocher cette observation de l'interprétation qualitative des données d'anoxies effectuées par le GIP LE dans sa fiche sur l'oxygène dissous ⁽²⁾, qui montre une certaine régression de l'amplitude des hypoxies dans cette période.

² L'oxygène de l'eau. 2012. Cahiers indicateurs du GIP-LE

8. Analyse

8.1. Résultats de l'outil de prédiction des hypoxies

L'application de l'ensemble des règles définies précédemment permet d'obtenir un outil de prédiction relativement satisfaisant avec moins de 10% de fausses prédictions du risque d'hypoxie.

Bien que les calculs précédents soient réalisés avec un jeu de données d'une représentativité qui laisse parfois à désirer, l'estimation de la production de chlorophylle-a est réalisée à partir d'images satellites interpolées par krigeage dans le temps et l'espace, et l'estimation de chlorophylle a est déduite d'une relation avec la turbidité, mais cela confirme bien l'importance probable de la variabilité des apports de matières organiques rapidement dégradables liés à la production phytoplanctonique. Par ailleurs le calcul de flux actuel n'est effectué que lorsque le débit est inférieur à 500 m³/s, dans les phases de diminution des débits cela engendre probablement certaines erreurs de prédiction.

Les échanges gazeux avec l'atmosphère, autre que la température de l'eau, n'apparaissent pas au travers des tests effectués, comme déterminant en termes de variation pour expliquer les différences de niveau d'hypoxie d'une année à l'autre.

On a par ailleurs vu que, contrairement à l'intuition première, la concentration en MES du bouchon vaseux ne semble pas non plus être un facteur explicatif de la variabilité des épisodes d'anoxies. Les sédiments de la crème de vase créent, en morte-eau une couche dense qui limite les échanges gazeux avec le reste de la colonne d'eau, entraînant sous l'effet de l'action bactérienne de la dégradation des matières organique l'apparition d'un milieu anoxique et la concentration de formes réduites qui lors de la remise en suspension consomment l'oxygène de l'eau. Toutefois l'intensité de la désoxygénation n'apparaît pas liée à la quantité de matières remises en suspension mais semble-t-il plutôt à la quantité de matières organiques dégradables qui a été introduite dans le système et plus particulièrement de matières rapidement biodégradables, comme tend à le montrer l'outil de prédiction basé sur les calculs d'apports dans les jours précédents le revif et la relation observée dans le fleuve entre DBO5 et Pigments.

Les bilans de masses effectués tendent aussi de leur côté à corroborer l'hypothèse de la prépondérance de l'influence de la variabilité de la production primaire comme un des facteurs explicatifs des variations mensuelles et interannuelles des apparitions d'hypoxies dans l'estuaire.

Les variations de flux de DBO dans le fleuve sont d'un ordre de grandeur supérieur à la DBO5 liée aux apports anthropiques. Toutefois la réduction des apports anthropiques est certainement une variable à étudier. En effet s'il est probable que ces apports n'impactent pas les variations interannuelles ou mensuelles, leur diminution pourrait être susceptible de réduire de manière globale la demande en oxygène dans l'estuaire et permettre ainsi d'abaisser le nombre de jours où le seuil d'hypoxie en surface est atteint.

Le prototype d'outil de prédiction développé permet d'estimer un risque d'apparition d'anoxie à la station du Pellerin.

Cet outil nécessite de disposer de données sur la période précédant immédiatement la vive-eau du cycle de marée. Les différentes informations nécessaires sont :

- La concentration en Chlorophylle-a au large, elle accessible sur le site Ifremer
- pour les concentrations en Chl-a dans le fleuve:
 - La turbidité de l'eau à Mauves, cette information est potentiellement disponible auprès du service de l'eau de la Ville de Nantes

- Le débit mesuré ou prévu jusqu'à la vive-eau du cycle de marée,
- La température de surface, prévue ou estimée jusqu'à la vive-eau.

Ce prototype d'outil a pour l'instant été testé sur les données de la station du Pellerin. Il devrait être adapté pour les stations de Paimboeuf et de Trentemoult fortement exposées elles aussi au risque d'hypoxies pour valider son intérêt.

Il pourrait par ailleurs être amélioré en donnant un indice de confiance dans la détermination du risque, basé sur l'écart des valeurs observées et des valeurs seuils.

8.2. Retour sur les données DDTM

A partir de l'analyse précédente, qui tend à montrer l'influence prédominante des apports de matières végétales planctonique sur la variabilité des conditions d'apparitions d'hypoxies dans l'estuaire sur les dix dernières années (Période d'observation Syvel), il nous paraît intéressant de revenir sur les données DDTM au travers de cette grille de lecture et d'essayer d'analyser plus profondément les relations observables entre DCO, DBO5 et quantité de pigments dans l'estuaire.

Les données DDTM disponibles sont la DCO, la DBO5, les MES et pendant les mois de mars à octobre les mesures de pigments.

Le graphe des relations entre pigments et DBO5 ne montre aucune relation, même si on filtre les données et on se concentre sur les données correspondant à la période estivale d'apparition des anoxies.

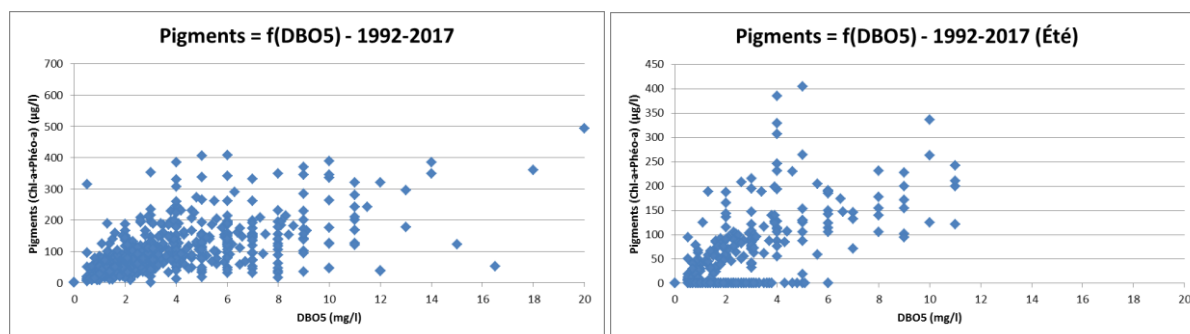


Figure 22 : Distribution de la somme des pigments chlorophylliens (Chl-a+Phéo-A) en fonction de la DBO5 sur l'ensemble de la période d'observation et sur la même période uniquement les valeurs des mois de juin à septembre (à droite)

Les prélèvements de la DDTM sont effectués généralement autour de la marée basse en périodes de vives-eaux. Le bateau se déplaçant d'aval en amont suit l'onde de marée et de ce fait les prélèvements peuvent ainsi rester distribués autour de la basse mer locale. Toutefois on a observé que les minima d'O₂ et les maxima de MES ne sont pas corrélés avec la marée basse et que par ailleurs l'apparition de ces extrema varie d'un point à l'autre de l'estuaire en fonction de la position relative par rapport au bouchon vaseux. Ainsi ces prélèvements d'un point à l'autre se placent probablement de manière assez aléatoire sur les courbes d'O₂ et de MES. Pour rendre ces échantillons plus comparables nous proposons de normaliser les mesures par rapport à la matière en suspension de l'échantillon. L'approche sous-jacente étant que la MES peut représenter un indice du mélange entre la crème de vase (milieu anoxique) et la colonne d'eau. Nous pouvons alors calculer des rapports DCO/MES, DBO/ME, Pigments/MES, la variable « pigments » représentant la somme des concentrations en chlorophylle-a et phéophytine-a.

On observe alors des distributions beaucoup plus ordonnées.

8.2.1. Relation DBO5 et pigments

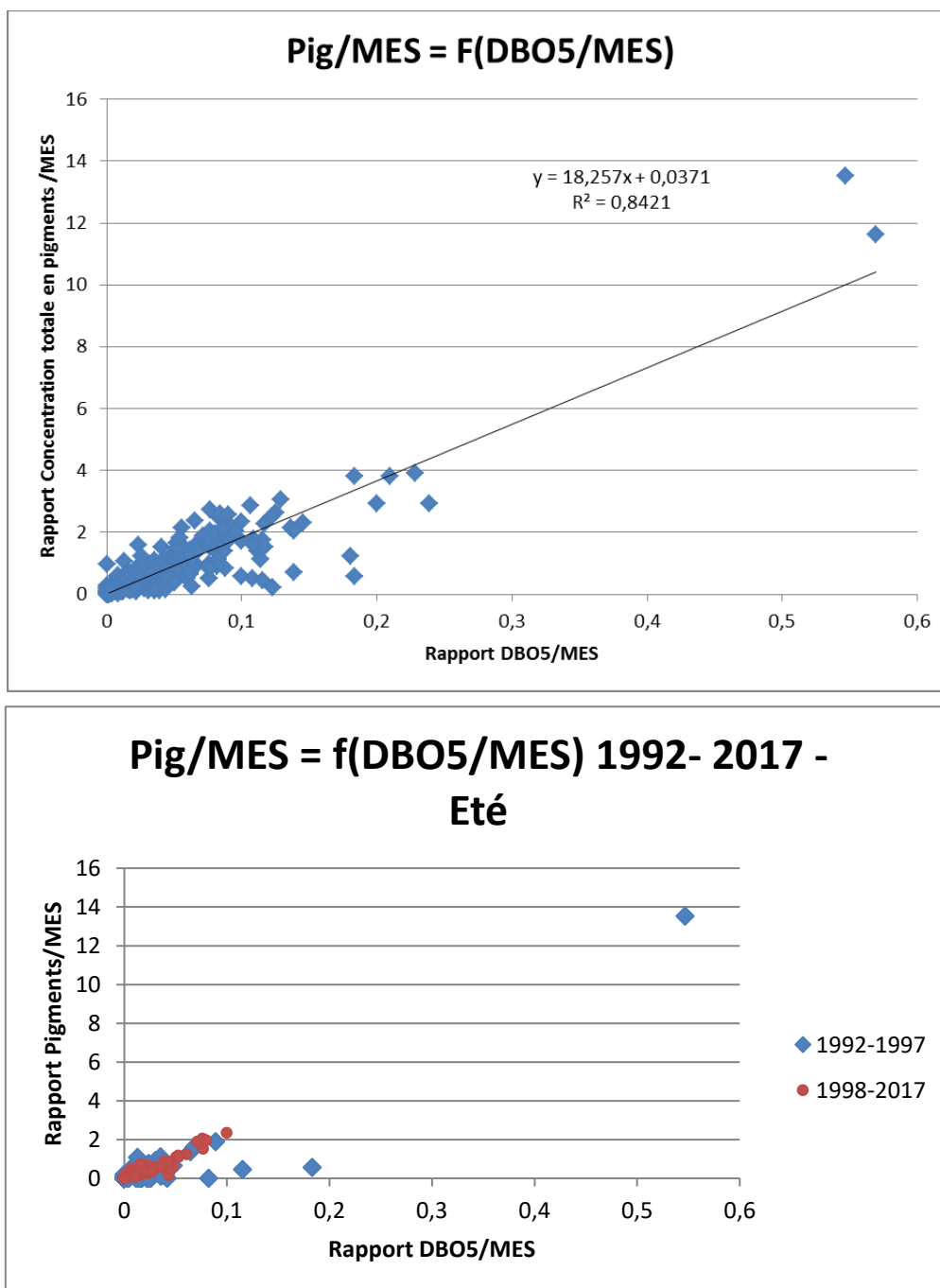


Figure 23 : Relation entre concentrations en pigments et DBO5 normalisées par la MES pour les périodes de juin à septembre, 1992 à 201, en haut toute valeurs confondues, en bas en période d'été avec des débits <500m3/s..

Le graphe de l'ensemble des mesures reste dispersé. Toutefois si on introduit un premier filtre visant à ne considérer que les données sur la période d'observation majoritaire des anoxies (juin à septembre), apparaît alors une distribution bi-modale avec un ensemble de points présentant une corrélation forte. En introduisant un filtre sur l'année d'observation on s'aperçoit que en éliminant les données avant 1997, la relation sur les données 1998 à nos jours devient bien meilleure entre DBO5 normalisée et concentrations normalisées en pigments, ce qui conforte de manière claire la relation

prépondérante entre présence de cellule planctoniques peu dégradées et capacité de désoxygénation du milieu, au moins sur les 20 dernières années.

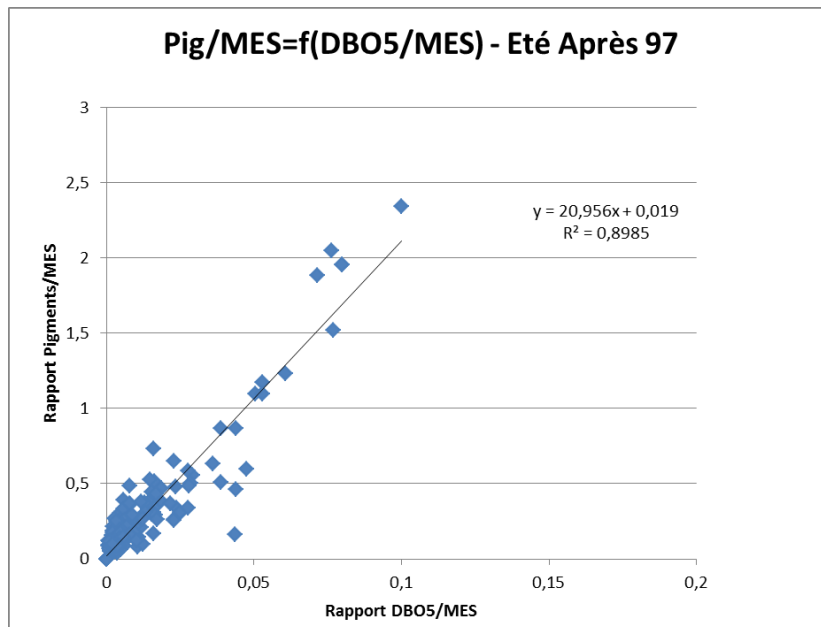


Figure 24 : Relation entre concentrations en pigments et DBO5 normalisées par la MES pour les périodes de juin à septembre, de 1998 à 2017.

Par ailleurs l'année 1997 est l'année qui a vu la mise en service des deux grandes stations d'épuration de Nantes, ce qui peut peut-être expliquer la diminution du nombre d'indice DBO5/MES élevés pour de faibles valeurs de l'indice Pigments/MES, marquant peut être une moindre influence des apports anthropiques de DBO.

8.2.2. DCO

Pour la DCO, en appliquant les mêmes filtres sur les mois et les débits on obtient une distribution des indices DCO/ME et Pigments/MES, clairement selon deux modes, qui illustre probablement la présence d'apports anthropiques dans l'estuaire.

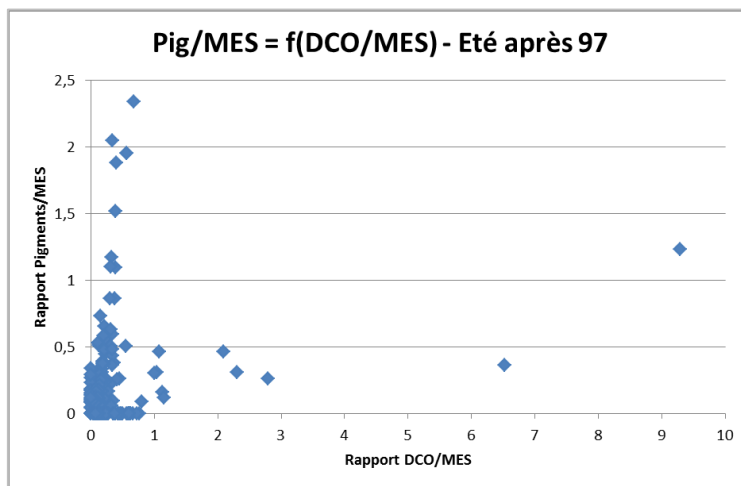


Figure 25: Relation entre les rapports Pigments/MES et DCO/en été avec des débits <500 m3/s

9. Conclusion

Les différentes études que nous avons menées sur les apparitions de conditions anoxiques dans l'estuaire de la Loire avaient initialement pour but d'évaluer l'impact des dragages par injection d'eau dans l'estuaire amont sur ce phénomène anoxies/hypoxies préexistant à l'utilisation de cette technique mais dont on pouvait penser que tendant à augmenter les masses de sédiments mobilisables dans le milieu, ces dragages pouvaient aussi aggraver le phénomène.

Dans les premières études nous nous sommes attachés à rechercher des anomalies de MES ou de concentration en O₂ qui pourraient apparaître pendant ou immédiatement après les dragages.

Si lorsque l'on se place à quelques centaines de mètres de la drague en action on peut bien sûr voir un impact sur les teneurs en MES, l'impact sur l'oxygène est déjà beaucoup plus diffus et difficile à cerner, et de toute façon minime. Cela étant peut-être dû au fait que si des quantités de matières réduites sont injectées dans le milieu, l'action hydraulique de la drague crée des remous puissants qui contribuent à ré-oxygéner le milieu. L'analyse des observations sur les sites Syvel ou des sites d'observations en continu plus proches de la zone de dragages, en utilisant différents outils, dont des techniques d'analyses spectrales, n'a pas non plus permis de mettre en évidence des anomalies qui pourraient être reliées à l'occurrence des dragages.

Partant alors de l'hypothèse que l'injection de sédiments consolidés dans la crème de vase pouvait avoir un effet à plus long terme en augmentant la quantité de matières organiques disponibles dans le bouchon vaseux, nous avons essayé d'analyser les variations interannuelles d'apparitions d'anoxies aux quantités draguées. De cette analyse il n'est pas non plus ressorti d'influence des dragages par injection d'eau dans l'estuaire amont. Toutefois lors de cette étude trois points sont apparus intéressants. En premier lieu, il est apparu une concordance importante entre l'apparition des anoxies et le débit du fleuve, celles-ci n'étant pratiquement observées que lorsque le débit est inférieur à 500m³/s, débit en deçà duquel le bouchon vaseux vient se positionner en amont de Paimboeuf dans une zone moins large et moins profonde de l'estuaire. En deuxième point, en utilisant les indicateurs d'anoxies à l'échelle annuelle (nombre de jours d'anoxie, minima d'O₂ dans l'estuaire), on a pu mettre en évidence certaines relations entre intensité de l'hypoxie et des années à plus forte production primaire que ce soit dans le fleuve ou dans la zone côtière. La troisième observation concernait le rapprochement fait entre deux diagrammes disponibles dans les fiches thématiques du GIP-LE concernant d'une part l'évolution globale des anoxies sur la période 1996-2007 et celle des dragages sur la même période où l'on pouvait observer de manière assez qualitative une certaine diminution de l'emprise des anoxies dans l'estuaire à la même période où les dragages par surverse de la drague aspiratrice en marche étaient autorisés.

Ces deux observations étaient en soi contradictoires, l'étude ne montrait aucune relation entre indice d'anoxie et dragages et au contraire pointait plutôt des phénomènes d'échelle plus large, et d'un autre côté la diminution des quantités de sédiments dispersés dans le milieu par la DAM intervenant en parallèle d'une diminution des hypoxies. Pour affiner les résultats de cette étude, nous avons donc dans le cadre de cette étude approfondi l'analyse de l'influence du développement de phytoplancton dans le milieu fluvial et côtier en s'intéressant cette fois à l'analyse des événements à l'échelle intermensuelle et interannuelle. Les résultats exposés dans ce document tendent à confirmer la validité des hypothèses émises précédemment et confirme l'influence de l'intensité de la production primaire dans les semaines précédant la vive-eau d'un cycle de syzigie. A partir de ces observations nous avons ainsi proposé un prototype d'outil de prédiction du risque d'apparition d'hypoxies à la station du Pellerin qui par les résultats obtenus tend à corroborer l'influence prépondérante de 3 paramètres, le débit, la température de l'eau et les conditions de production primaire au cours de l'été.

En dernier point nous avons aussi pu observer en analysant les données de qualité des eaux dans le fleuve que la charge organique rapidement dégradable estimée à travers la mesure de DBO était dans les dix dernières années très liée à la production primaire mais aussi que cette charge organique ainsi que la production primaire avait fortement chuté au début des années 2000 ce qui correspond aussi à la diminution relative des anoxies dans l'estuaire décrite dans les fiches du GIP-LE.

Cette analyse est corroborée par une analyse plus fine des données DDTM. En établissant des indices normalisés par rapport à la MES, on voit apparaître des relations claires entre demande biologique en oxygène et présence de pigments chlorophylliens, relation moins nette pour la DCO pour laquelle d'autres apports anthropiques paraissent parfois être importants. Toutefois cette dépendance entre pigments et DBO5 qui caractérise les processus influant à court terme sur la concentration en oxygène permet de confirmer l'intérêt de comprendre la dynamique de la production primaire en amont et dans l'estuaire aval pour prévoir l'évolution à court terme de l'oxygène et le risque d'apparitions d'hypoxies.

En conclusion et même s'il est plus difficile de montrer l'absence d'effet que le contraire, il nous semble donc qu'il y a au travers de ces différents travaux de nombreux éléments qui indiquent que les dragages ne sont pas impliqués de manière significative dans l'apparition des anoxies tout du moins dans leur variabilité, celle-ci étant plus liée à des paramètres environnementaux.

Par contre nous n'avons pas abordé l'influence des entrants de matières organiques ou de matières génératrices de demande en oxygène (Ex : NH₄) qui s'ils paraissent jouer un rôle moins important pourraient cependant contribuer à diminuer la demande biologique et chimique en oxygène dans l'estuaire, et ainsi permettre de diminuer les occurrences et l'intensité des hypoxies. Dans ce cadre, il pourrait être intéressant d'analyser de manière plus précise les contributions des différentes sources de matières participant à la demande en oxygène dans l'estuaire (matières organiques liées à la production primaire, matières organiques partiellement dégradées qui pourraient être en partie stockées dans les sédiments, apports anthropiques direct via les différentes STEP ou les apports directs par ruissellement ou par apports atmosphériques.