

DEFINITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DCE BASEE SUR L'OXYGENE DISSOUS ET PRECONISATIONS POUR UNE STRATEGIE DE SURVEILLANCE OPTIMALE DES GRANDS ESTUAIRES : SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS

Document réalisé par Valérie Foussard (Coordination inter-estuaire FR SCALE, Université de Rouen) et Mario Lepage (IRSTEA) sur la base des travaux menés dans le cadre d'une action ONEMA/IRSTEA 2014 (Porteur : Mario Lepage, Post-doc associé au projet : Aurélie Lanoux).

Version : octobre 2016

Sommaire

I. Rappel du contexte.....	1
II. Objectif du projet	2
III. Tolérance des organismes aux déficits en oxygène dissous : bilan des acquis	2
1. Connaissances existantes sur la sensibilité des organismes aux déficits en oxygène dissous tirés de la bibliographie.....	2
2. Acquis du projet ETIAGE (2010-2014) sur les effets des hypoxies chez les aloses.....	3
3. Expérimentations sur la tolérance des organismes aux hypoxies dans le cadre du projet Onema/Irstea	5
IV. Caractérisation des zones hypoxiques sur les grands estuaires	10
V. Suites à donner.....	18
Bibliographie.....	20

I. RAPPEL DU CONTEXTE

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60/CE) établit un cadre visant une meilleure gestion et préservation des milieux aquatiques au travers d'objectifs à échéance, d'atteinte du " bon état " écologique et chimique de ces milieux. Pour qualifier l'état écologique, la DCE impose le développement de méthodes d'évaluation de divers éléments de qualité biologique, physico-chimique et hydromorphologique, variables selon le type de milieu concerné.

Dans les milieux estuariens concernés par la Directive, le développement de tels outils est complexe du fait de leur fonctionnement particulier lié à la rencontre entre les eaux douces et les eaux marines. Ce mélange est à l'origine de forts gradients naturels de conditions environnementales (oxygène dissous, salinité, matière en suspension, nutriments...) que ce soit d'amont en aval ou au sein même de la colonne d'eau. A ces gradients se superpose une variabilité saisonnière marquée des conditions environnementales. Ce fonctionnement spécifique, associé à des pressions anthropiques parfois très pesantes sur les estuaires, rend difficile l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de transition et plus particulièrement celle basée sur l'oxygène dissous.

Le développement d'une méthode d'évaluation basée sur l'oxygène dissous en lien avec la biologie nécessite d'avoir un minimum de connaissances sur le fonctionnement biochimique des estuaires et une quantité importante de données physico-chimiques et hydrodynamiques (oxygène dissous, température, salinité, matière en suspension, débit, conditions de marée...). Les travaux engagés par l'Irstea se sont donc concentrés en premier lieu, sur les grands estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde qui bénéficient de réseaux de suivi haute fréquence à partir desquels de précédentes études sur le sujet ont été menées. Parmi ces travaux, deux projets sont mis en avant :

- Le projet Liteau-BEEST (Vers une approche multicritère du Bon État écologique des grands ESTuaires : Seine, Loire et Gironde) qui a notamment permis de mettre en avant la variabilité naturelle des conditions physico-chimiques des estuaires et l'influence des activités anthropiques sur ces conditions, estuaire par estuaire (Foussard et Etcheber, 2011) ;

- Le projet ETIAGE (ETude Intrégrée de l'effet des Apports amonts et locaux sur le fonctionnement de la Garonne Estuarienne) visant à déterminer certaines conditions environnementales propices aux déficits en oxygène dissous (coefficient de marée, turbidité, température des eaux, débit fluvial) mais aussi à identifier quelles espèces de macrofaune s'avèrent sensibles à ces déficits dans les estuaires, les perturbations physiologiques observées chez les aloses (espèce parapluie) en cas d'exposition prolongée et à définir des premiers seuils d'oxygénation à partir desquels la survie des organismes vivants se trouve menacée (Lanoux et al., 2013, de Watteville J., 2012).

L'analyse des données disponibles associée à la connaissance déjà acquise sur les grands estuaires doit permettre de mieux comprendre le fonctionnement biochimique de ces écosystèmes particuliers et de définir un indice de qualité pertinent, adapté et opérationnel sur les grands estuaires. A terme, cette analyse pourrait être étendue à d'autres types d'estuaires afin d'obtenir une méthodologie fiable et efficace pour l'ensemble des MET de la façade Manche-Atlantique.

II. OBJECTIF DU PROJET

Les connaissances acquises jusqu'à présent sur les grands estuaires français ont permis de mettre en avant que **l'intensité, la durée et l'étendue du phénomène hypoxique jouent un rôle déterminant** dans la survie des organismes. Ces éléments constituent donc des pistes d'indicateurs intéressantes à développer qui ont été étudiées sur les 3 grands estuaires. L'indicateur de qualité à développer doit être élaboré en lien avec les besoins de la biologie, c'est pourquoi cette étude s'est également penchée sur les effets néfastes des déficits en oxygène observés chez des espèces jugées sensibles (dans la continuité du projet ETIAGE).

Ainsi, le projet coordonné par l'Irstea a pour objectif de :

- **qualifier les périodes hypoxiques** sur les 3 grands estuaires dans un 1^{er} temps, au travers de (1) leur intensité et leur durée effectives déterminées à l'aide des données haute fréquence disponibles sur ces estuaires et (2) leur localisation (superficie ou longueur maximale) ;
- **évaluer les risques d'effets nocifs des hypoxies** sur 2 espèces sensibles (gobies et crevettes blanches) au travers des perturbations physiologiques observés *ex situ* chez ces espèces, suite à une exposition à des hypoxies plus ou moins sévères et prolongées.

Ce travail se décompose donc en plusieurs tâches :

- Détermination de la tolérance des organismes aux déficits en oxygène dissous (bilan des acquis et expérimentations en laboratoire) ;
- Qualification de l'intensité et la durée des hypoxies par analyse et traitement des données haute fréquence ;
- Délimitation spatiale de la zone touchée par des hypoxies dans l'estuaire de la Gironde, durant l'été 2014 (campagne *in situ*).

Au-delà de la méthode d'évaluation, ces éléments doivent également permettre de définir des seuils de qualité déclinés sous forme de classes de qualité et de faire des préconisations pour une stratégie de surveillance de l'oxygène dissous adaptée aux grands estuaires français.

III. TOLERANCE DES ORGANISMES AUX DEFICITS EN OXYGENE DISSOUS : BILAN DES ACQUIS

1. Connaissances existantes sur la sensibilité des organismes aux déficits en oxygène dissous tirés de la bibliographie

Les effets de l'hypoxie sont nombreux dans l'environnement aquatique, engendrant des réductions d'abondance, de biomasse et de biodiversité quel que soit le compartiment biologique (Eby et al., 2005 ; Long & Seitz, 2008 ; Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008 ; Froeschke & Stunz, 2012). Les réponses biologiques aux problèmes d'hypoxie dépendent de la durée, de la sévérité et de l'étendue des événements hypoxiques (Levin et al., 2009) ainsi que des stades de développement et des espèces considérées (Wannamaker & Rice, 2000 ; Levin et al., 2009). Les premiers taxons faunistiques à être touchés par les phénomènes hypoxiques sont les poissons et les crustacés (Figure 1), suivis par les bivalves, les gastéropodes, les

annélides et les nématodes, les cnidaires étant les moins sensibles (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008 ; Steckbauer et al., 2011). Les nématodes sont les plus résistants aux événements hypoxiques (Cook et al., 2000 ; Neira et al., 2001) et peuvent supporter des conditions quasi-anoxiques ($[O_2] < 1$ mg/L) pendant plusieurs heures voire plusieurs jours. Contrairement aux nématodes, les copépodes et autres crustacés sont parmi les plus sensibles à l'hypoxie et subissent des effets délétères dès 3 à 4 mg/L (Moodley et al., 1997 ; Alves et al., 2013).

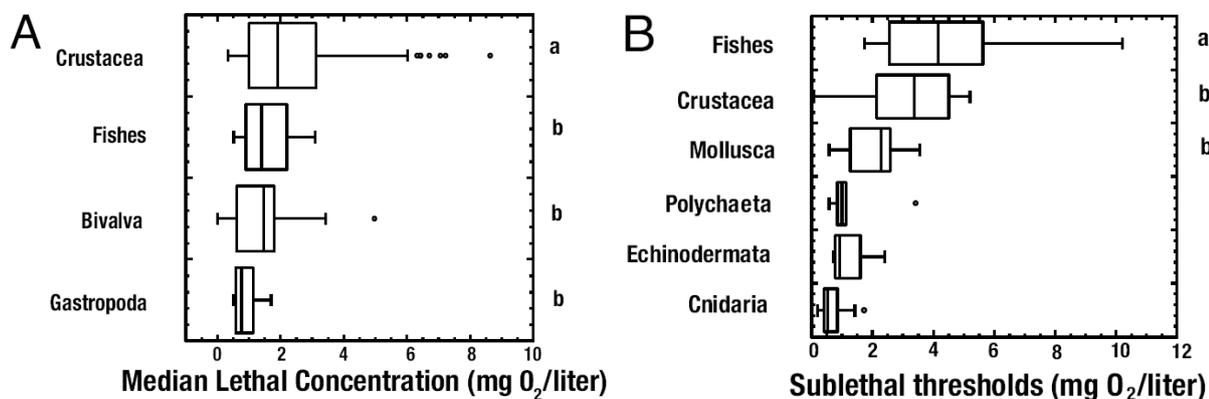


Figure 1 : Valeur médiane des concentrations létales en oxygène dissous (A) et seuils sublétaux (B) des principaux taxons rencontrés dans les zones hypoxiques (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008).

Les seuils d'oxygène dissous à partir desquels les organismes subissent un stress dépendent grandement des organismes considérés. Ainsi, une seule définition de l'hypoxie ne permet pas d'englober les sensibilités de la totalité des espèces. Le seuil de 2 mg/L a été largement utilisé pour qualifier des eaux « hypoxiques » alors que de nombreuses espèces subissent des mortalités significatives à des concentrations supérieures à ce seuil. La moitié des espèces testées dans cette analyse est sujette à des mortalités pour des teneurs en oxygène inférieures à 2.45 mg/L (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008). Un seuil plus conservatif permettant de préserver la majorité des espèces les plus sensibles a été proposé à 4.6 mg/L. Les seuils et les temps de survie aux conditions hypoxiques varient également en fonction de la température des eaux : plus la température augmente, plus les seuils létaux (en mg d'O₂/litre) augmenteront et les temps de survie diminueront (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2011).

Un grand nombre d'organismes peuvent détecter et éviter les zones hypoxiques en migrant vers des zones plus favorables (Pihl et al., 1991). Wannamaker & Rice (2000) ont mené une étude sur six espèces de poissons et une espèce de crevette, démontrant que la totalité de ces organismes pouvaient détecter et éviter les zones hypoxiques, mais que les réactions comportementales dépendaient des espèces et des stades de développement. La réponse la plus fréquente chez les organismes est l'augmentation du rythme ventilatoire (Pihl et al., 1991 ; Wannamaker & Rice, 2000 ; Decker et al., 2003) mais d'autres réactions peuvent être observées comme (1) des changements au niveau de l'activité, (2) une augmentation de la respiration aérienne ou proche de la surface et (3) une migration verticale ou horizontale impliquant un changement d'habitats (Kramer, 1987).

2. Acquis du projet ETIAGE (2010-2014) sur les effets des hypoxies chez les aloses

Une expérimentation en laboratoire a été réalisée dans le cadre du projet ETIAGE afin d'étudier entre autre, les effets des hypoxies sur les juvéniles d'aloise (Jatteau & Fraty, 2012) en vue d'établir un calendrier d'opportunités pour leur migration saisonnière. Exposés à des conditions hypoxiques, le comportement des individus (altération de la nage, perte d'équilibre et mort) a été analysé pour différents degrés d'hypoxie et pour 2 températures des eaux (20 et 25°C).

2.1. Dispositif expérimental et conditions d'expérimentation

Le dispositif est composé d'un bac de mélange équipé de systèmes de régulation de l'oxygène et de la température de l'eau, permettant d'alimenter 4 enceintes expérimentales circulaires (en circuit fermé). Le débit d'eau entrant dans chaque enceinte est contrôlé individuellement par une vanne (Figure 2). Le système est conçu pour créer un courant circulaire favorable aux alosons. Le bac de mélange et les enceintes sont couverts de façon à limiter les échanges gazeux et thermique avec l'atmosphère.

Les tests ont consisté à la détermination d'un seuil limite de tolérance aux hypoxies des poissons, en observant leurs comportements face à une variation progressive de la concentration en oxygène dissous. Deux tests ont été réalisés pour chaque condition de température comprenant (1) une phase d'acclimatation des individus puis (2) l'application du protocole hypoxique durant lequel la teneur en oxygène est baissée par paliers successifs (tableau 1, Figure 3). Chaque expérience était stoppée après la mort de tous les individus ou le cas échéant, au bout de 175 minutes maximum.



Figure 2 : Dispositif expérimental mis en place pour les alosons dans le cadre du projet ETIAGE

Tableau 1 : informations sur les expérimentations réalisées sur les alosons dans le cadre du projet ETIAGE

Température	20°C		25°C	
Nombre de poissons par enceinte	Lot 1 : 4	Lot 2 : 3	Lot 1 : 3	Lot 2 : 2
Phase d'acclimatation à la température de l'eau	Poissons directement placés dans les enceintes à 20°C après leur capture		Augmentation progressive de la T°C pour éviter un choc thermique (2°C/90min)	
Phase d'acclimatation aux taux d'oxygène dans l'eau	1. Stabulation 60 min à 70% de saturation en oxygène 2. Maintien d'une enceinte à 70 % de saturation (témoin) et application du protocole hypoxique décrit dans la figure 3 aux 3 enceintes restantes.			

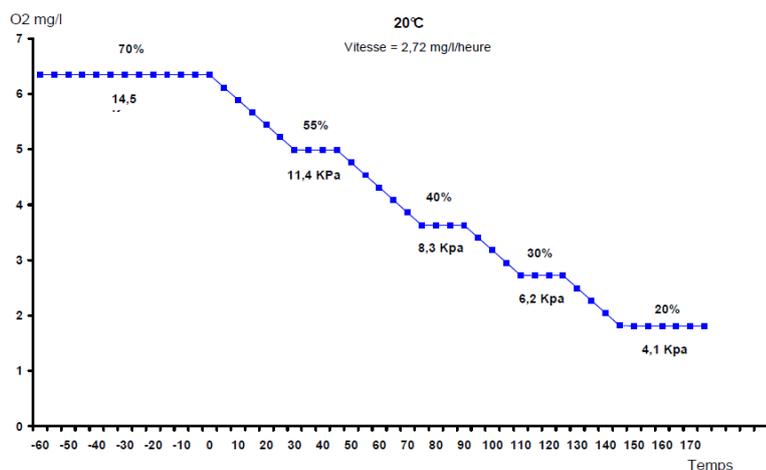


Figure 3 : Courbe de descente en oxygène réalisée au cours des expérimentations faites sur les aloses à 20°C dans le cadre du projet ETIAGE

Pendant toute l'expérience, le comportement des individus a été observé en considérant les critères suivants :

- Altération de la nage : nage saccadée, départ brutal (burst), pipage en surface...
- Perte d'équilibre : déséquilibre latéral, nage oblique, nage sur le dos...
- Mort : arrêt des battements operculaires

2.2. Résultats des expérimentations sur les juvéniles de grande alose

A 20°C, les 1^{ers} signes d'altération de la nage surviennent en moyenne à 3.4 mg/L d'oxygène (Figure 4), puis les pertes d'équilibre et les morts se produisent respectivement à 2.2 et 2.0 mg/L (ANOVA, $p=0^1$).

¹ Un test est jugé statistiquement significatif si $p < 0,05$. Selon les critères testés, l'absence de différence significative dans l'analyse peut être liée au faible nombre d'individus testés au cours de l'expérimentation.

A 25°C, les perturbations du comportement apparaissent à des seuils moyens plus élevés : les altérations de la nage dès 4,3 mg/L, les pertes d'équilibre à 3,8 mg/L et la mort des individus à 3.5 mg/L. Ces seuils sont statistiquement identiques d'après le test de Kruskal-Wallis ($p=0.53^1$).

Comparativement entre les 2 températures, l'analyse statistique montre :

- qu'il n'y a pas de différence significative dans l'apparition des 1^{ers} signes d'altération de la nage à 20 et 25°C (Test U Mann-Whitney, $p=0.191^1$).
- que la perte d'équilibre et la mort surviennent à des teneurs en oxygène significativement plus faibles à 20°C qu'à 25°C (Test U Mann-Whitney, $p=0$ et $p=0.0071^1$).

Tous les poissons ayant subi les tests à 25°C sont morts durant l'expérimentation alors que plus de 50% ont survécu à 20°C. La cinétique des mortalités indique qu'à 25°C, le phénomène apparaît dès le début du test et s'étale sur toute la durée de celui-ci. A 20°C, les mortalités apparaissent plutôt en fin de test, à partir d'une concentration en oxygène dissous de 2.2 mg/L.

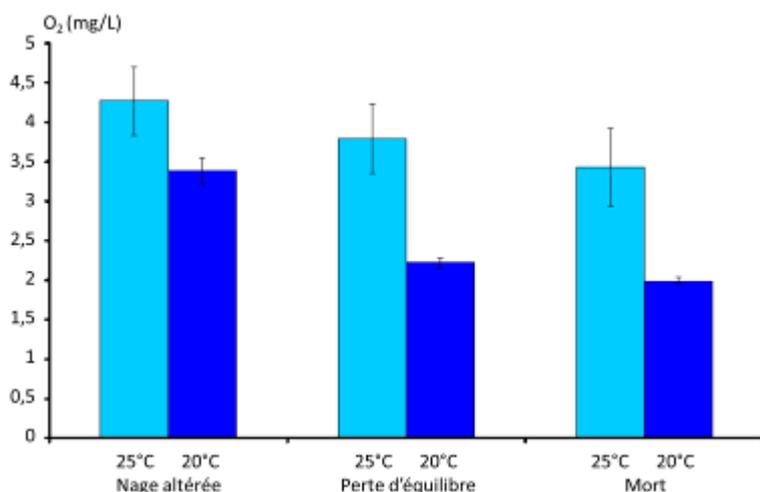


Figure 4 : Concentrations moyenne en oxygène relevées pour les critères de l'altération de la nage, la perte d'équilibre et la mort, à 20 et 25°C, chez les juvéniles de grande alose. Les barres représentent les erreurs standards (Jatteau & Fraty, 2012).

3. Expérimentations sur la tolérance des organismes aux hypoxies dans le cadre du projet Onema/Irstea (2014)

De nouveaux tests de tolérance aux hypoxies ont été mis en œuvre en laboratoire par l'Irstea afin de compléter les résultats obtenus dans le projet ETIAGE. Initialement, les tests devaient être menés sur des crevettes (maillon central du réseau trophique estuarien) et des juvéniles d'aloise (espèce parapluie en déclin d'abondance depuis le milieu des années 90). Pour disposer d'alosons, l'association MIGADO (chargée de la gestion et la restauration des migrateurs dans le bassin versant Garonne/Dordogne) a été sollicitée pour fournir des larves qu'il a fallu élever. Cet élevage n'ayant pas permis d'obtenir un nombre suffisant d'alosons viables pour les tests, les expérimentations ont finalement porté sur des gobies, espèce fréquemment observée dans les estuaires et des crevettes blanches, qui ont tous deux été directement pêchés dans l'estuaire de la Gironde.

2.1. Dispositif expérimental et conditions d'expérimentation

Le dispositif utilisé est proche de celui employé dans le projet ETIAGE (circuit fermé, régulation de la température et de l'oxygène dissous, échange avec l'atmosphère limité au maximum), excepté qu'il est composé de 4 bacs de mélanges qui alimentent chacun, 2 enceintes expérimentales rectangulaires (figure 5).

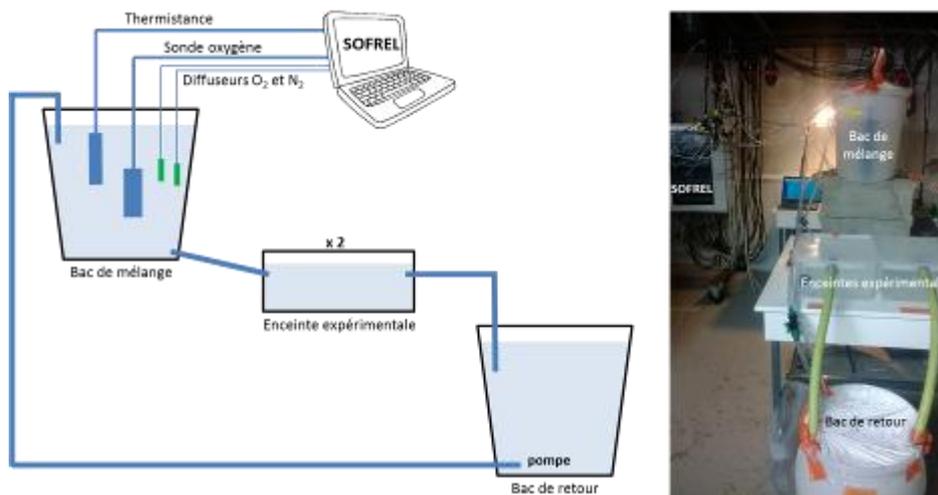


Figure 5 : Protocole expérimental pour tester la tolérance à l'hypoxie des gobies et des crevettes blanches.

Les tests ont été réalisés pour 2 conditions de température soient 20 et 25°C. Après une phase d'acclimatation dans une eau à 7,5 mg/L d'oxygène dissous puis une phase de diminution graduelle de la teneur pour atteindre les seuils souhaités, chaque lot d'individus a été exposé à une teneur en oxygène constante durant 6h (tableau 2, figure 6). Le comportement des individus a été observé selon les mêmes critères que ceux de la 1ère expérience soit l'altération de la nage, la perte d'équilibre et la mort.

Tableau 2 : informations sur les expérimentations réalisées sur les gobies et les crevettes dans le cadre du projet Onema/Irstea 2014

Teneur en oxygène (mg/L)		7,5 (témoin)		5		3,5		2	
Température		20°C	25°C	20°C	25°C	20°C	25°C	20°C	25°C
Nbre de poissons par enceinte	Gobie	10 x 2 lots	5 x 2 lots	10 x 2 lots	5 x 2 lots	10 x 2 lots	6 x 2 lots	10 x 2 lots	6 x 2 lots
	Crevette	2 lots de 15 individus pour chaque concentration en oxygène							
Phase d'acclimatation à la température		A 20°C : individus directement placés dans les enceintes à 20°C après leur capture A 25°C : augmentation progressive de la T°C pour éviter un choc thermique							
Phase d'acclimatation aux taux d'oxygène dans l'eau		1. Stabulation de 60 min jusqu'à l'atteinte de la [O2] = 7,5 mg/L 2. Maintien d'une enceinte à 7,5 mg/L (témoin) et réduction de la teneur pendant 40 min jusqu'à atteindre le palier souhaité pour chacune des enceintes restantes 3. Maintien de la concentration au seuil souhaité pendant 6h (ex de protocole dans la figure 6)							

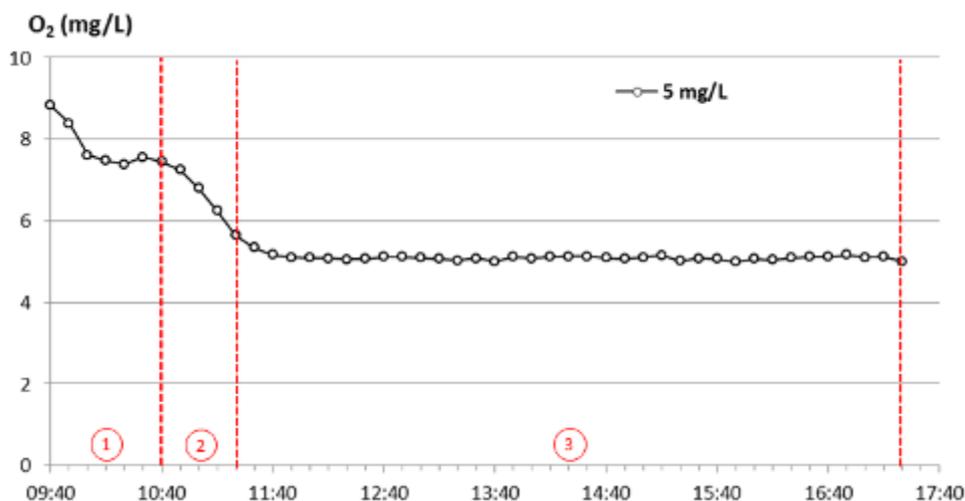


Figure 6 : Déroulement des conditions expérimentales pour la condition à 5 mg/L d'oxygène avec une phase de stabulation de 1h (1) suivi de 40min de descente d'oxygène (2) et un suivi du comportement pendant 6h consécutives (3).

2.2. Résultats des expériences

Les résultats des expérimentations menées sur le gobie et la crevette blanche concordent avec ceux obtenus dans le cadre du projet ETIAGE, même si le protocole d'exposition à des hypoxies était différent (exposition à une teneur fixe pendant 6h et non exposition à une baisse graduelle de la teneur en oxygène dissous).

Que ce soit pour le gobie ou la crevette, à 20°C ou à 25°C, pas ou peu de perturbations du comportement de ces organismes ont été relevés suite à une exposition prolongée à 5mg/L (figures 7 et 8). Comme certaines de ces perturbations ont été observées chez quelques individus témoin (exposés à [O₂]=7,5 mg/L), le facteur manipulation (capture, stabulation, acclimatation à la température...) a probablement généré un stress supplémentaire responsable des mortalités précoces observées, d'autant plus que les seuils retenus ont été difficilement maintenus sur toute la durée des tests (tableau 3).

Tableau 3 : Moyennes des températures et concentrations en oxygène (± écart-type) enregistrées lors de l'expérimentation chez le gobie et la crevette blanche selon les différentes conditions initialement prévues.

	7,5 mg/L		5 mg/L		3,5 mg/L		2 mg/L	
	Temp.°C	Conc. mg/L						
Gobie	20,0	7,8 ± 0,2	20,0	5,0 ± 0,1	20,0	4,1 ± 0,9	20,0	2,2 ± 0,2
	25,0	7,3 ± 0,4	25,0	5,0 ± 0,1	25,0	4,1 ± 0,8	25,0	2,6 ± 0,6
Crevette	20,0	7,5 ± 0,2	20,0	5,1 ± 0,1	20,0	3,4 ± 0,3	20,0	2,5 ± 0,5
	26,4 ± 0,6	7,5 ± 0,2	26,2 ± 0,7	5,1 ± 0,5	26,2 ± 0,7	3,7 ± 0,7	25,9 ± 0,7	2,6 ± 0,7

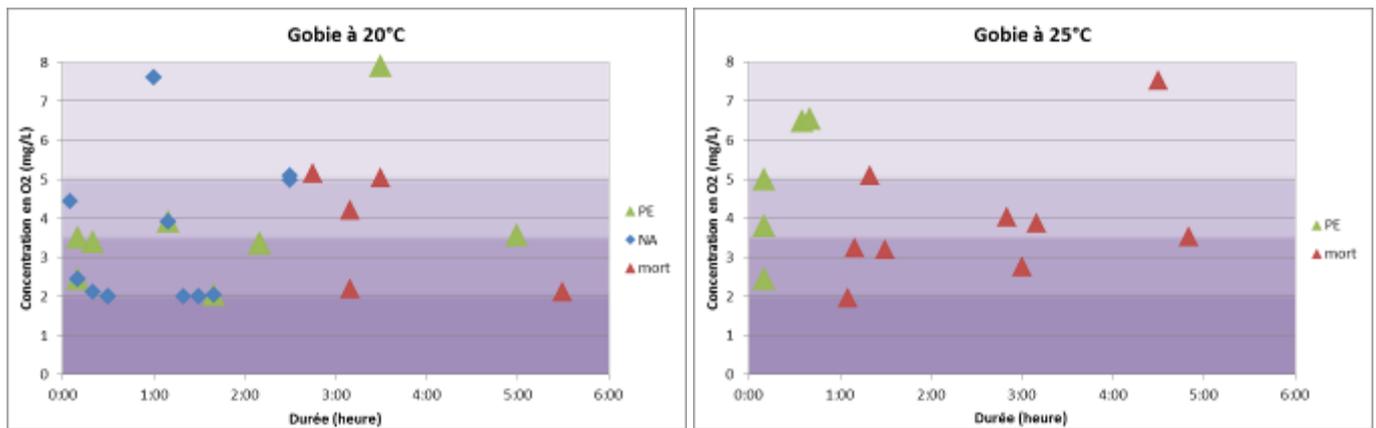
En revanche, exposés à des concentrations en oxygène proches de 4 mg/L dans une eau à 20°C, les gobies présentent de nombreuses altérations de comportements dès les premières minutes de l'expérience :

- Jusqu'à 30 % d'individus sont touchés par une altération de la nage entre 5 minutes et 2h30 d'exposition ;
- Jusqu'à 50 % d'entre eux subissent une perte d'équilibre entre 10 minutes et 5h d'exposition ;
- 10 % des gobies trouvent la mort après plus de 3h d'exposition à cette concentration en oxygène.

A 25°C, les altérations de la nage et la perte d'équilibre ont été moins visibles. Un quart des effectifs a tout de même montré des pertes d'équilibres dès les 10 premières minutes d'exposition à 4 mg/L. La mortalité dans ces conditions est par ailleurs 4 fois plus élevée qu'à 20°C avec 41 % des individus morts entre 1h10 et 4h50 d'exposition.

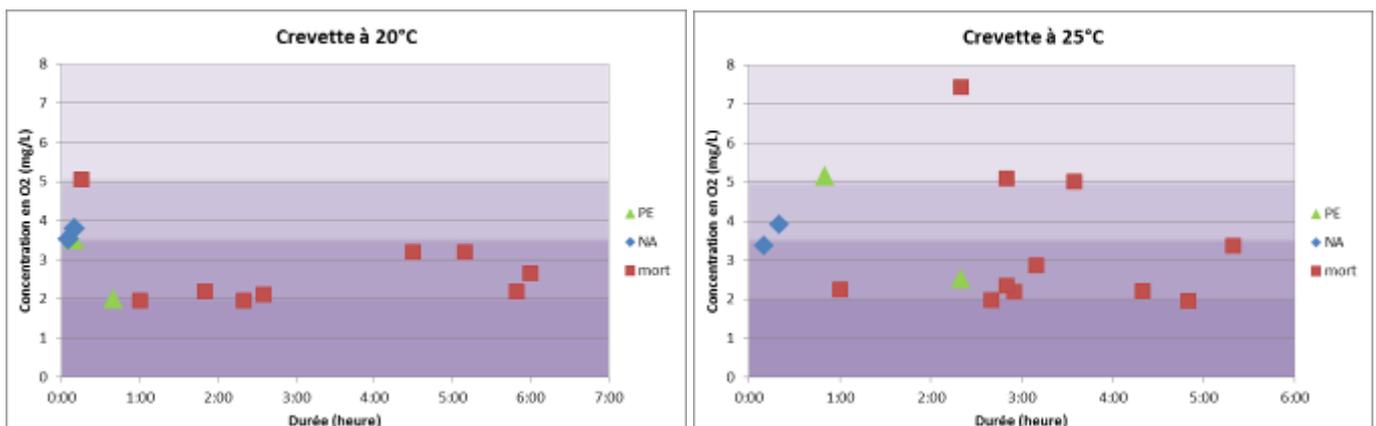
Chez les crevettes, peu d'altérations du comportement sont constatées entre 3,5 et 4 mg/L quelle que soit la température de l'eau. Il est à noter que chez ces organismes, il peut s'avérer difficile d'observer une modification de la nage ou une perte d'équilibre car même en conditions normales, le mode de déplacement des crevettes comporte des départs brutaux à l'aide de l'uropode et des périodes de nage plus calme à l'aide des pléiopodes. La nage saccadée est donc un critère difficilement applicable pour les crevettes. Des mortalités se sont tout de même produites tardivement après au moins 4h30 d'exposition.

Lors d'exposition à des hypoxies sévères (proche de 2 mg/L), tous les gobies présentent des altérations de la nage en moins de 2 h à 20°C et jusqu'à 20 % d'entre eux subissent des pertes d'équilibre dans ce même délai. Peu de modification de ce type ont été notée chez les gobies à 25°C, tout comme chez les crevettes à 20 ou 25°C. Toutefois, des mortalités importantes plus particulièrement à 25°C, ont été relevées chez les deux espèces à raison de 20 % et 33 % respectivement à 20 et 25°C chez le gobie, contre 33 % de mortalité chez la crevette à 20 et 25°C.



	Exposition à 2 mg/L		Exposition à 3,5 et 5 mg/L	
	Gobies à 20° C	Gobies à 25° C	Gobies à 20° C	Gobies à 25° C
Perte d'équilibre	dès 10 minutes	dès 10 minutes	dès 10 minutes	dès 10 minutes
Nage altérée	dès 10 minutes	-	1 cas au bout de 5 min puis à partir de 1h10	-
Mort d'individus	à partir de 3h10	A partir de 1h05	2h45	A partir de 1h10

Figure 7 : Comportement observé chez les gobies exposés aux différentes concentrations en oxygène dissous durant 6h à 20 et 25°C (NA : nage altérée, PE : perte d'équilibre, Mort) et durée à partir desquelles les premières perturbations sont observées.



	Exposition à 2 mg/L		Exposition à 3,5 mg/L		Exposition à 5 mg/L	
	Crevettes à 20° C	Crevettes à 25° C	Crevettes à 20° C	Crevettes à 25° C	Crevettes à 20° C	Crevettes à 25° C
Perte d'équilibre / Nage altérée	40 minutes	2h20	dès 5 minutes	dès 10 minutes	-	50 minutes
Mort d'individus	A partir de 1h	A partir de 1h	A partir de 4h30	A partir de 3h10	15 minutes	A partir de 2h50

Figure 8 : Comportement observé chez les crevettes blanches exposées aux différentes concentrations en oxygène dissous durant 6h à 20 et 25°C (NA : nage altérée, PE : perte d'équilibre, Mort) et durée à partir desquelles les premières perturbations sont observées.

4. Définition de seuil de tolérance des poissons aux hypoxies en estuaire

A l'échelle européenne, la plupart des espèces de poissons migrateurs sont actuellement considérées en danger. A la vue des résultats déjà obtenus sur les alosons, les phénomènes d'hypoxie semblent préoccupants et peuvent potentiellement impacter la population d'aloise.

La perte d'équilibre est considérée comme un indicateur d'une désorganisation fonctionnelle et métabolique empêchant les individus de fuir une zone dangereuse, les conduisant rapidement à la mort (Beitinger et al., 2000). Les expérimentations réalisées sur les alosons dans le cadre du projet ETIAGE

montrent que la perte d'équilibre apparaît à 2.2 mg/L à 20°C et dès 3.8 mg/L à 25°C (températures fréquemment enregistrées en période estivale sur chacun des estuaires étudiés). Toutefois, une altération de la nage devrait d'ores-et-déjà être un facteur à prendre en considération, témoin que l'individu subit déjà une désorganisation fonctionnelle. Dans ce cas, les seuils limite à considérer sont de l'ordre de 3.4 mg/L d'oxygène dissous à 20°C et de 4.2 mg/L à 25°C.

Les expérimentations complémentaires lancées en 2014 sur cette espèce n'ont malheureusement pas abouties à des résultats fiables, notamment en raison de problèmes de logistiques, mais il serait intéressant de les relancer. Les résultats obtenus témoignent tout de même d'une influence conjointe de la température et de la teneur en oxygène sur le taux de mortalité. Globalement, dès que l'oxygène dissous est inférieur à 4 mg/L, les premiers signes d'altération de la nage et de perte d'équilibre sont rapidement observés. Toutefois, le gobie semble être capable de supporter une concentration proche de 2 mg/L pendant quelques heures et de retrouver toutes ces capacités une fois qu'il se retrouve dans une eau oxygénée. Cependant, de récentes études ont montré qu'une privation d'oxygène, au stade larvaire, même de courte durée, pouvait entraîner des problèmes à la croissance, liés à un déficit d'assimilation de protéines des individus exposés à l'hypoxie, et au moment de la reproduction (Zambonino-Infante et al 2013).

Les seuils proposés suite aux expérimentations réalisées sur les juvéniles de grande alose, les gobies et les crevettes blanches, peuvent être légèrement sur-estimés. En effet, dans les conditions expérimentales (eau claire et sans micropolluant), seuls les facteurs oxygénation et température de l'eau ont été pris en compte alors que dans les grands estuaires, d'autres éléments ont tendance à augmenter la sensibilité des organismes et à ajouter un effet synergétique à la pression que représente une faible teneur en oxygène. C'est notamment le cas de l'influence du bouchon vaseux qui est un facteur difficile à intégrer dans les expérimentations pour deux raisons : (1) employer de l'eau turbide limite les possibilités d'observer correctement les changements de comportement et (2) des difficultés respiratoires et des problèmes d'érosion du tissu branchial ont déjà été observées sur certaines espèces à cause des petites particules présentes dans le bouchon vaseux (Au et al, 2004). La nature même des particules constituant la matière en suspension peut entrainer des mortalités à des concentrations moins importantes que celles parfois observées dans le système Gironde-Garonne-Dordogne (Appleby and Scarratt, 1989). Une autre pression présente dans les grands estuaires et non prise en compte dans les tests est la présence de médicaments ou encore de pesticides dans l'eau qui peut être un facteur non négligeable sur le bon développement des organismes.

Sur un consensus à l'échelle internationale, une teneur en oxygène dissous supérieure ou égale à 5mg/L est considérée adéquate pour la survie des espèces les plus sensibles (seuil au-dessus duquel les espèces ne subissent pas de stress lié à l'oxygénation des eaux). Ces conditions minimales constituent la limite inférieure de la classe « bon état » de la grille proposée par Taverny et al. (2009) (Tableau 4).

Tableau 4 : Grille de seuils de qualité pour le paramètre oxygène en lien avec les poissons, proposée par Taverny et al. (2009)

	Qualité				
	Mauvaise	Médiocre	Moyenne	Bonne	Très bonne
[O ₂] mg/L	< 2	2 ≤ [O ₂] < 3	3 ≤ [O ₂] < 5	5 ≤ [O ₂] < 7	≥ 7

D'après la bibliographie, les classes de qualité « moyenne » (3 à 5 mg/L) et « médiocre » (2 et 3 mg/L) regroupe des conditions d'oxygénation de plus en plus stressantes pour les espèces ou stades sensibles de poissons (problèmes de migration, comportements d'évitement des espèces mobiles et altérations de la croissance) (Figure 9). Enfin, en dessous de 2mg/L d'oxygène dissous, le seuil est considéré léthal à long terme quelle que soit l'espèce considérée (classe « mauvais état »).

Un autre facteur déterminant est également à rendre en compte : la durée des crises hypoxiques. Des déficits continus ou seulement de quelques heures auront un impact très différent selon la capacité de résistance de l'espèce considérée.

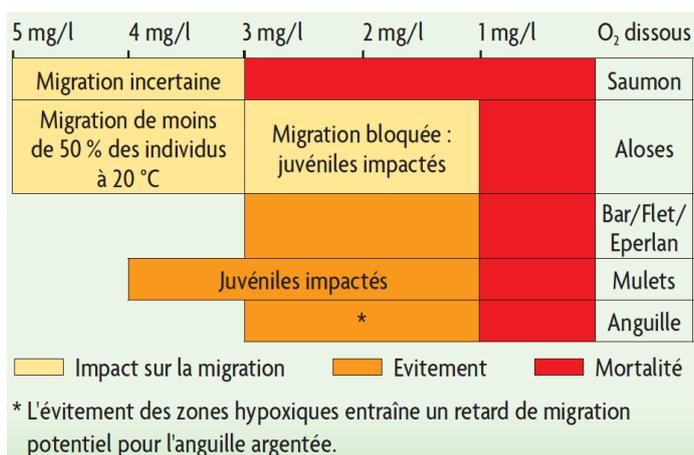


Figure 9 : Conséquences des hypoxies sur certaines espèces de poissons par rapport à leur période de présence dans l'estuaire (source : GIP Loire Estuaire).

IV. CARACTERISATION DES ZONES HYPOXIQUES SUR LES GRANDS ESTUAIRES

3.1. Analyse et traitement des données Haute Fréquence physico-chimiques (Tâche 1)

Données exploitées

La qualification des périodes hypoxiques sur les estuaires de la Seine, Loire et Gironde a consisté en une analyse des données haute fréquence (oxygène, température, turbidité, salinité) acquises par les réseaux SYNAPSES, SYVEL et MAGEST. Les données exploitées sont détaillées dans le tableau 5.

Tableau 5 : caractéristiques des données issues des réseaux de suivi haute fréquence, utilisées pour l'analyse des périodes hypoxies

Estuaire	Réseau (gestionnaire)	Station	Données traitées (années)	Paramètres ciblés	Fréquence
Seine	SYNAPSES (GIP Seine-Aval / Port de Rouen)	Rouen, Val des Leux, Heurteauville, Tancarville (subsurface)	2012 - 2013	Oxygène dissous Turbidité Conductivité	Toutes les 5 min
	AESN	Tancarville, Heurteauville, Rouen (subsurface)	1990 - 2011	Température	Suivi ponctuel : 1 fois / mois à Tancarville 1 fois / 2 mois aux autres stations
Loire	SYVEL (GIP Loire-Estuaire / EDF)	Bellevue, Trentemoult, Le Pellerin, Cordemais, Paimboeuf (subsurface)	2007 - 2013	Oxygène dissous Température	Station Cordemais EDF : toutes les 1h Autres stations :
		Donges (subsurface et fond)	2011 - 2013	Turbidité Conductivité	2007 - 2010 : toutes les 30 min Après 2010 : toutes les 10/15 min
Gironde	MAGEST (UMR EPOC, Univ. Bordeaux)	Portets (subsurface)	2005 - 2011	Oxygène dissous Température	Toutes les 10 min
		Bordeaux, Libourne, Pauillac (subsurface)	2005 - 2013	Turbidité Conductivité	

Une phase importante de prétraitement et de compilation des données a été nécessaire avant de faire les analyses : nettoyage des données aberrantes sur chacun des réseaux, correction des données acquises sur les stations aval de SYVEL avec le GIP Loire Estuaire (problème de calibration initiale des sondes) et harmonisation des formats de données pour créer une base de données unique. Ces corrections ont rendu la constitution de la base de données plus chronophage que prévue ce qui a eu un impact sur la progression de l'ensemble du projet.

Hypoxie dans l'estuaire de la Gironde

A partir des concentrations en oxygène dissous mesurées par MAGEST, une analyse a été réalisée par classe de concentration mesurée. Il a été possible de déterminer la durée maximale des hypoxies observées en chaque station, soit les plus longues périodes pendant lesquelles la concentration a été inférieure à un seuil donné. Chaque épisode hypoxique est considéré comme terminé dès lors qu'une valeur est supérieure à ce seuil ou s'il y a absence de mesure. Les seuils retenus pour cette analyse sont : 2, 3, 4 et 5 mg/L.

Malgré la présence d'un bouchon vaseux très concentré et des apports locaux de matériel organique biodégradable non négligeables, la Gironde reste relativement bien oxygénée, même en période de fortes remises en suspension des particules (Abril et al., 1999). Seule une zone centrée autour de Bordeaux connaît des hypoxies ponctuelles en période de faibles débits et de température élevée des eaux, qui peuvent être exceptionnellement longues et sévères lors d'année sèche (tableau 7 ; figure 11).

Les problèmes d'oxygénation des eaux dans l'estuaire de la Gironde sont principalement concentrés autour de Bordeaux Métropole (BMet) et ne reste qu'exceptionnels à la station de Libourne (Dordogne). La station de Portets présente également quelques évènements hypoxiques (figure 11). En considérant la température de l'eau comme étant un paramètre qui présente un signal saisonnier bien défini et constant pour toutes les stations, les différences observées entre les stations soulignent l'impact négatif d'un facteur spécifique à Bordeaux, propre à influencer la concentration en oxygène dissous. L'hypothèse avancée dans de précédents travaux est qu'un faible hydrodynamisme à basse mer et en étiage et la remontée du bouchon vaseux en période estivale associés à des apports continus d'effluents provenant de BMet (moins dilués du fait du contexte hydrodynamique), ont une incidence sur l'oxygénation des eaux. La combinaison de ces facteurs serait à l'origine d'une plus forte consommation de l'oxygène dissous aux environs de Bordeaux, liée à la dégradation de la matière organique oxydable. A la station de Portets située en amont de Bordeaux, les causes des faibles valeurs mesurées ne sont pas clairement identifiées. Des études complémentaires récentes remettent en question l'hypothèse énoncée dans le projet ETIAGE (basée principalement sur le mouvement des masses d'eau entre Bordeaux et Portets). De nouvelles pistes sont donc à explorer en lien notamment avec l'influence de rejets anthropiques situés à proximité de Portets et le rôle de l'hydrodynamisme dans ce secteur. Dans ce sens, il est nécessaire d'étudier plus finement l'étendue de la zone hypoxique *via* des mesures complémentaires sur le terrain afin d'avoir une meilleure appréciation de la répartition spatiale de l'oxygène au cours d'évènements hypoxiques.

En considérant les résultats obtenus sur les juvéniles de grande alose (projet ETIAGE), la station de Portets a relevé des concentrations en oxygène proches voire en deçà du seuil correspondant aux pertes d'équilibre observées chez ces juvéniles (3.8 mg/L d'oxygène dissous à 25°C, température fréquemment relevée dans l'estuaire en période estivale). Toutefois, les valeurs relevées ne semblent pas suffisamment basses pour entraîner des mortalités (figure 10). Contrairement à Portets, la station de Bordeaux dépasse plusieurs fois ce seuil, particulièrement durant la vague de chaleur de 2006, avec des concentrations moyennes proches de 2 mg/L. La durée de ces évènements peut atteindre plusieurs heures voire plusieurs jours consécutifs, ce qui n'est pas sans conséquences sur les espèces puisque dans des eaux à 25°C (maximum de 29°C atteint en été 2006 dans les eaux de la Garonne), les gobies et les crevettes présentent très rapidement des signes d'altération du comportement et les premières mortalités sont observées après environ 1h d'exposition à des eaux faiblement oxygénées.

Une analyse détaillée des données MAGEST réalisée dans le cadre du projet ETIAGE a montré que les déficits en oxygène autour de Bordeaux ont une forte probabilité de se produire lorsque le débit de la Garonne est inférieur à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et la température des eaux est supérieure à 24°C. Le coefficient de marée est également un critère à considérer dans le déclenchement des hypoxies car il synthétise la plus ou moins forte remise en suspension de la matière organique et des sédiments qui contribuent à la diminution de l'oxygène dissous dans le fleuve.

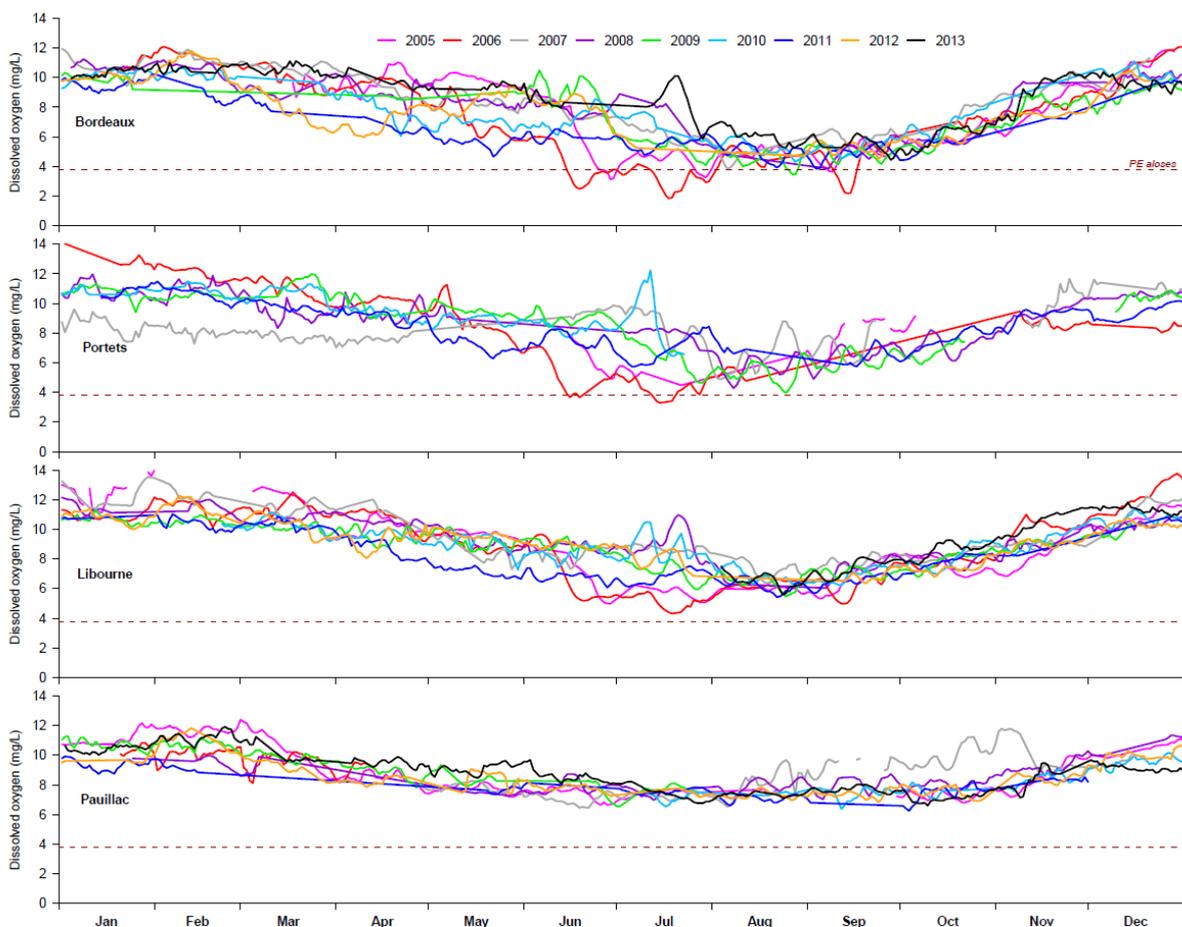


Figure 10 : Evolutions des concentrations moyennes journalières en oxygène dissous mesurées en sub-surface entre 2005 et 2013 par les stations de mesures en continu du réseau MAGEST sur l'estuaire de la Gironde. La limite en pointillée représente le seuil à partir duquel les juvéniles de grande alose présentent des pertes d'équilibre (3.8 mg/L).

Il est à noter que les résultats présentés dans la figure 11 sont à considérés avec précaution du fait de lacunes dans le jeu de données liées à des dysfonctionnements temporaires de certaines stations (panne des pompes de prélèvement, problèmes dans la transmission des données ou encore défaut des capteurs oxygène) (Etcheber, 2007). Le temps de fonctionnement des sondes oxygène disposées le long de l'estuaire de la Gironde a pu être estimé à partir des données haute fréquence disponibles (tableau 6). Le réseau présente des taux de fonctionnement moyens variables selon les stations et les années. Ainsi, les analyses statistiques décrivant les hypoxies peuvent être fortement biaisées sur certains sites comme à la station de Portets en 2005 ou encore celle de Pauillac en 2006.

Tableau 6 : Pourcentage du temps de fonctionnement des sondes oxygène sur l'estuaire de la Gironde pour chaque année de mesure.

	Pauillac	Bordeaux	Portets	Libourne
2005	74%	69%	11%	68%
2006	23%	80%	60%	91%
2007	53%	77%	65%	77%
2008	61%	68%	78%	84%
2009	43%	61%	78%	94%
2010	36%	76%	50%	83%
2011	44%	59%	83%	76%
2012	74%	73%	-	81%
2013	87%	81%	-	40%

En rouge : temps de fonctionnement < à 50 % de l'année

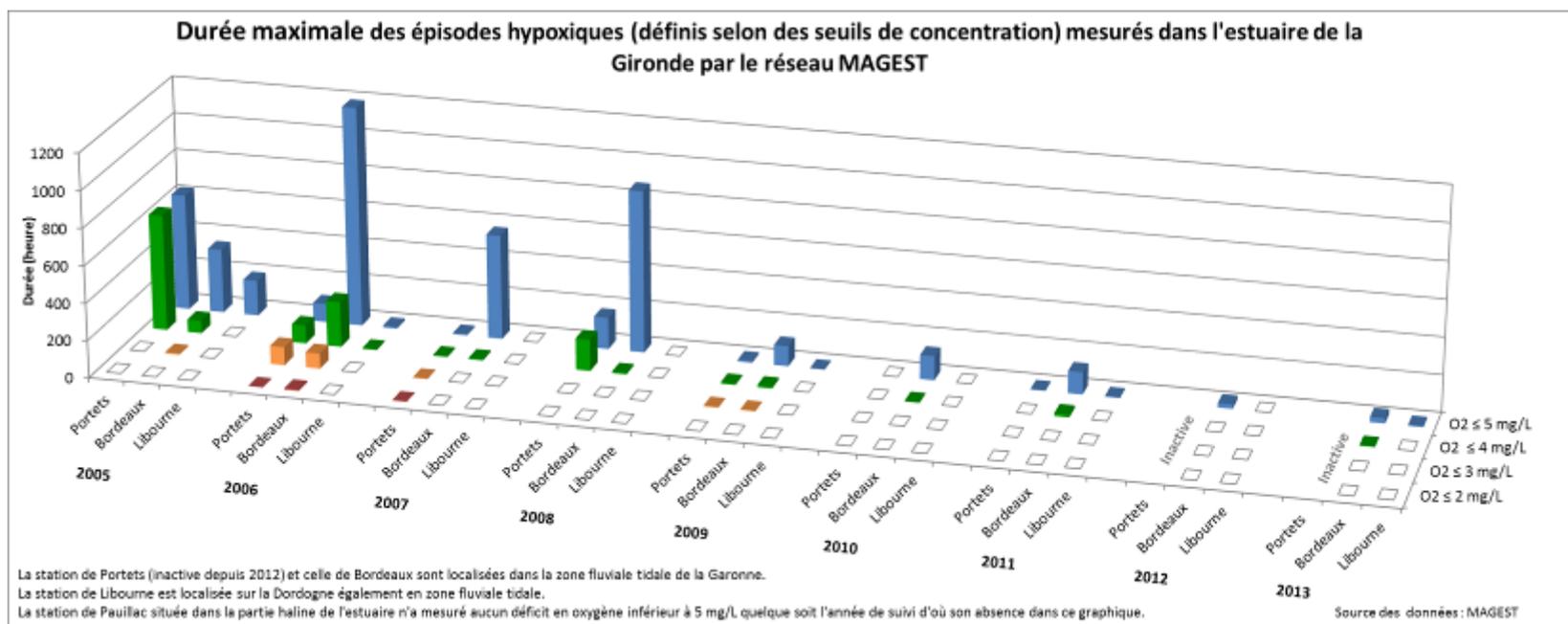


Figure 11 : Durées maximales des épisodes hypoxiques calculées selon différents seuils pour chacune des stations présentes le long de l'estuaire de la Gironde

La station Pauillac ne figure pas sur le graphique car elle n'a pas connu de déficit en oxygène dissous inférieur à 5 mg/L au cours de la période analysée.

Tableau 7 : Durées maximales des hypoxies calculées pour différents seuils d'oxygène dissous, aux 4 stations MAGEST (en jour et heure consécutifs)

	Pauillac	Bordeaux	Portets	Libourne
2005				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	14j 9h	26j 3h	8j
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	2j 21h	26j 2h	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	7h	0h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	0h	0h
2006				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	49j 13h	4j 3h	10h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	10j 4h	4j 2h	6h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	3j 10h	4j 2h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	8h	2h	0h
2007				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	23j 12h	7h	0h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	8h	6h	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	0h	4h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	2h	0h
2008				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	36j 10h	7j 3h	0h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	9h	7j 2h	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	0h	0h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	0h	0h
2009				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	4j 13h	10h	3h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	12h	8h	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	4h	4h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	0h	0h
2010				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	5j 10h	0h	0h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	5h	0h	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	0h	0h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	0h	0h
2011				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	5j	4h	5h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	16h	0h	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	0h	0h	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	0h	0h
2012				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	1j	-	0h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	0h	-	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	0h	-	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	-	0h
2013				
O ₂ ≤ 5 mg/L	0h	1j 4h	-	6h
O ₂ ≤ 4 mg/L	0h	4h	-	0h
O ₂ ≤ 3 mg/L	0h	0h	-	0h
O ₂ ≤ 2 mg/L	0h	0h	-	0h

Hypoxie dans l'estuaire de la Loire

Malgré une turbidité moyenne plus faible, les évènements hypoxiques sont plus fréquents et plus sévères (en durée et en intensité) dans l'estuaire de la Loire qu'en Gironde (figure 12 et 13 ; tableau 9). Ils se caractérisent par une zone hypoxique étendue située à hauteur du bouchon vaseux, due à la dégradation de la matière organique provenant de la biomasse algale apportée par le fleuve (Meybeck et al., 1988 ; Relexans et al., 1988) et aux fortes concentrations estuariennes en sels nutritifs (Thouvenin et al., 1994). La présence cumulée de matériel organique phytoplanctonique et anthropique engendre des déficits en oxygène pouvant aller jusqu'à l'anoxie (Chaudon, 2005) comme cela a été observé de manière prononcée, durant l'été 2010.

En considérant le seuil de la perte d'équilibre des juvéniles d'aloses, on constate que ce seuil est largement dépassé à hauteur des stations de Paimboeuf, Cordemais et Le Pellerin. L'intensité (concentrations en oxygène proches de 0 mg/L) et la durée des hypoxies (plusieurs heures à plusieurs jours) sont nettement plus importantes que sur la Gironde. Les hypoxies sont enregistrées quasiment tous les ans en période estivale par ces stations. Comme pour la Gironde, ces évènements sont critiques pour les gobies et les crevettes du fait de la sévérité des hypoxies mais surtout de par leur durée. En effet, même si lors des expérimentations, les gobies ne présentaient pas de séquelles après 1h à 2 mg/L, un évènement de plusieurs jours consécutifs engendrera très certainement des mortalités chez cette espèce, tout comme chez la crevette.

Les stations Trentemoult et Bellevue situées à proximité de Nantes, n'enregistrent qu'à de rares occasions des teneurs en oxygène dissous inférieures à 5 mg/L. Ces évènements se produisent principalement au mois d'août au cours d'étiage sévère (Figure 13).

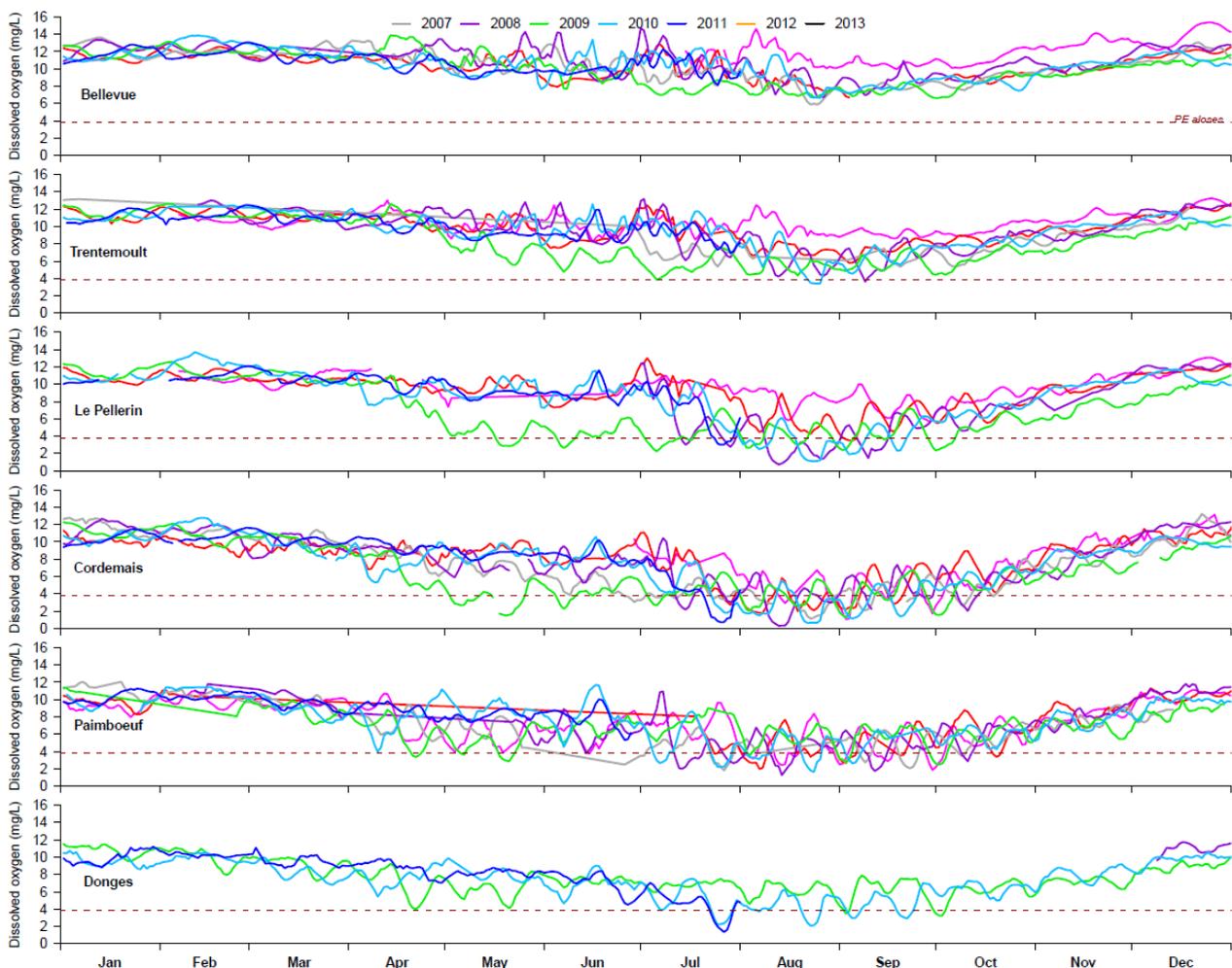


Figure 12 : Evolutions des concentrations moyennes journalières en oxygène dissous mesurées entre 2007 et 2013 par les stations de mesures en continu du réseau SYVEL sur l'estuaire de la Loire. La limite en pointillée représente le seuil à partir duquel les juvéniles de grande alose présentent des pertes d'équilibre (3.8 mg/L).

Une analyse détaillée des données SYVEL réalisée par le GIP Loire Estuaire a montré que :

- Aucun déficit n'est constaté lorsque le débit de la Loire est supérieur à $970 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Des concentrations en oxygène $< 5 \text{ mg/L}$ apparaissent systématiquement à Cordemais lorsque les conditions suivantes sont réunies : coefficient de marée > 90 , température des eaux $> 19 \text{ °C}$ et débit $< 350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Le Bot et Lebailleux, 2014).

Tout comme pour le réseau MAGEST, les stations SYVEL peuvent dysfonctionner temporairement en raison de pannes diverses. Le temps de fonctionnement des sondes oxygène a été déterminé pour chaque année (tableau 8) et doit être considéré dans l'interprétation de la figure 13.

Tableau 8 : Pourcentage du temps de fonctionnement des sondes oxygène sur l'estuaire de la Loire pour chaque année de mesure.

	Donges	Paimboeuf	Cordemais	Le Pellerin	Trentemoult	Bellevue
2007	-	96%	23%	66%	87%	46%
2008	-	53%	97%	95%	97%	94%
2009	-	73%	96%	-	37%	98%
2010	nd	64%	96%	44%	84%	94%
2011	nd	64%	97%	97%	97%	54%
2012	nd	85%	98%	92%	88%	68%
2013	nd	46%	57%	48%	53%	37%

En rouge : temps de fonctionnement $<$ à 50 % de l'année

Durée maximale des épisodes hypoxiques (définis selon des seuils de concentration) mesurés dans l'estuaire de la Loire par le réseau SYVEL

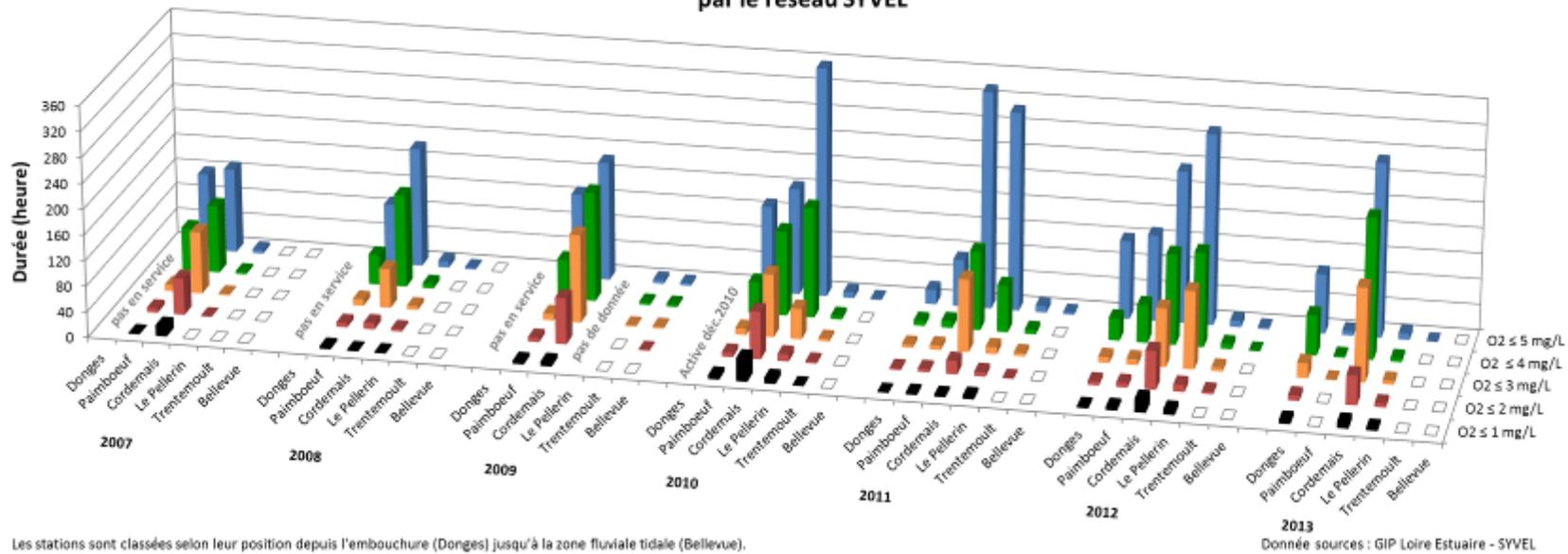


Figure 1 : Durées maximales des épisodes hypoxiques calculées selon différents seuils pour chacune des stations présentes le long de l'estuaire de la Loire

Les stations sont classées selon leur position depuis l'embouchure (Donges) jusqu'à la zone fluviale tidale (Bellevue).

Donnée sources : GIP Loire Estuaire - SYVEL

Tableau 9 : Durées

maximales des hypoxies calculées pour différents seuils d'oxygène dissous aux stations SYVEL

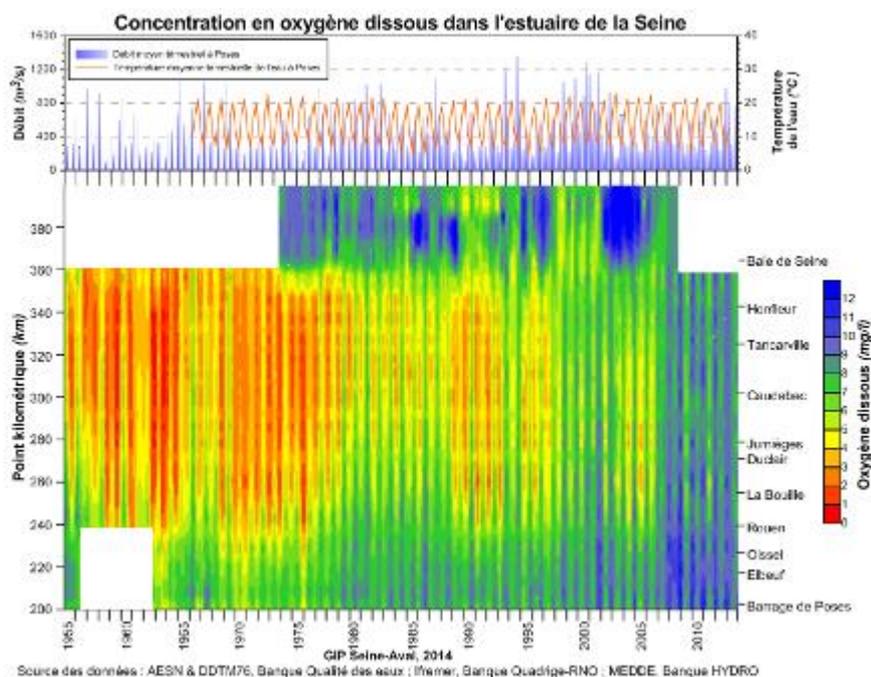
	Donges	Paim-boeuf	Corde-mais	Le Pellerin	Trente-moult	Bellevue
2007						
O ₂ ≤ 5 mg/L	-	5j 1h	5j 12h	6h	0	0
O ₂ ≤ 4 mg/L	-	2j 19h	4j 10h	4h	0	0
O ₂ ≤ 3 mg/L	-	10h	4j 1h	2h	0	0
O ₂ ≤ 2 mg/L	-	7h	2j 9h	1h	0	0
O ₂ ≤ 1 mg/L	-	2h	17h	0	0	0
2008						
O ₂ ≤ 5 mg/L	-	3j 22h	7j 18h	10h	3h	0
O ₂ ≤ 4 mg/L	-	1j 23h	6j 1h	8h	0	0
O ₂ ≤ 3 mg/L	-	10h	2j 13h	6h	0	0
O ₂ ≤ 2 mg/L	-	7h	10h	4h	0	0
O ₂ ≤ 1 mg/L	-	4h	2h	2h	0	0
2009						
O ₂ ≤ 5 mg/L	-	5j 12h	7j 18h	0	6h	4h
O ₂ ≤ 4 mg/L	-	2j 14h	7j 3h	0	4h	4h
O ₂ ≤ 3 mg/L	-	10h	5j 17h	0	2h	3h
O ₂ ≤ 2 mg/L	-	7h	3j	0	0	1h
O ₂ ≤ 1 mg/L	-	5h	7h	0	0	0

	Donges	Paim-boeuf	Corde-mais	Le Pellerin	Trente-moult	Bellevue
2010						
O ₂ ≤ 5 mg/L	-	5j 15h	6j 22h	14j 22h	9h	2h
O ₂ ≤ 4 mg/L	-	2j 1h	5j 12h	7j 4h	6h	0
O ₂ ≤ 3 mg/L	-	10h	4j 2h	2j	4h	0
O ₂ ≤ 2 mg/L	-	7h	3j 2h	11h	3h	0
O ₂ ≤ 1 mg/L	-	6h	1j 12h	9h	1h	0
2011						
O ₂ ≤ 5 mg/L	23h	3j 1h	14j 3h	12j 22h	10h	3h
O ₂ ≤ 4 mg/L	8h	11h	5j 3h	3j 1h	7h	0
O ₂ ≤ 3 mg/L	5h	7h	4j 17h	11h	5h	0
O ₂ ≤ 2 mg/L	3h	5h	21h	7h	1h	0
O ₂ ≤ 1 mg/L	1h	3h	3h	5h	0	0

	Donges	Paim-boeuf	Corde-mais	Le Pellerin	Trente-moult	Bellevue
2012						
O ₂ ≤ 5 mg/L	5j 2h	5j 14h	9j 21h	12j 10h	10h	3h
O ₂ ≤ 4 mg/L	1j 11h	2j 11h	5j 21h	6j 3h	8h	1h
O ₂ ≤ 3 mg/L	9h	9h	3j 19h	5j 1h	6h	0
O ₂ ≤ 2 mg/L	6h	7h	2j 12h	11h	4h	0
O ₂ ≤ 1 mg/L	3h	5h	21h	8h	0	0
2013						
O ₂ ≤ 5 mg/L	3j 21h	7h	11j 8h	10h	1h	0
O ₂ ≤ 4 mg/L	2j 15h	3h	9j 4h	6h	0	0
O ₂ ≤ 3 mg/L	23h	1h	6j 2h	6h	0	0
O ₂ ≤ 2 mg/L	8h	0	1j 22h	6h	0	0
O ₂ ≤ 1 mg/L	6h	0	10h	4h	0	0

Hypoxie dans l'estuaire de la Seine

L'estuaire de la Seine, caractérisé par une forte pression anthropique, a été longtemps l'estuaire français le plus touché par des déficits en oxygène chroniques sévères et sur de grandes portions de l'estuaire (Figure 14). La combinaison « température élevée, faible débit et forte teneur en nutriments » était la principale cause invoquée de ces désoxygénations. Toutefois, grâce à d'importants efforts pour améliorer la qualité des eaux notamment via la réduction des rejets anthropiques divers et une optimisation du traitement des eaux en STEP, aucune hypoxie saisonnière (inférieure à 5 mg/L) n'a été relevée depuis plusieurs années que ce soit par les suivis ponctuels de l'AESN (Figure 15) ou plus récemment, par le réseau haute fréquence SYNAPSES. En effet, depuis la mise en place du réseau SYNAPSES, aucune réelle période hypoxique n'a été mesurée. Les taux les plus faibles (toujours supérieurs à 4 mg/L) ont été relevés très ponctuellement à Rouen, durant quelques minutes en 2012. Ainsi, les espèces telles que le gobie, la crevette blanche ou encore l'aloise ne sont pas concernées par des modifications comportementales liées à l'oxygénation des eaux de cet estuaire.



Débâts moyens trimestriels (m^3/s) calculés à partir de données journalières au barrage de Poses. Températures moyennes trimestrielles ($^{\circ}C$) calculées au barrage de Poses. Les concentrations en oxygène dissous (mg/l) sont représentées à partir de données ponctuelles sur 29 stations réparties entre Poses et la partie orientale de la Baie de Seine sur la période 1956-2013 (source : GIP Seine-Aval).

Figure 14 : Concentrations en oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine (GIP Seine-Aval, 2014)

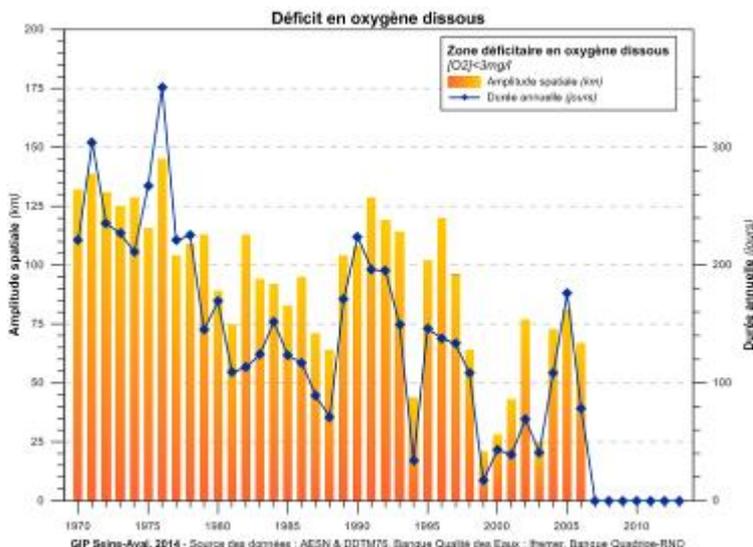


Figure 15 : Evolution des zones déficitaires en oxygène dissous, en termes d'amplitude spatiale et de durée annuelle (source : GIP Seine Aval).

4.2. Délimitation de la zone hypoxique dans l'estuaire de la Gironde

Les stations MAGEST n'étant pas suffisamment nombreuses pour détecter l'étendue spatiale des hypoxies autour de Bordeaux, des campagnes de terrain complémentaires sont nécessaires pour mieux appréhender ces déficits. Cet exercice nécessite une grande réactivité des intervenants sur le terrain. Pour anticiper un maximum ces phénomènes, une veille a été mise en place sur les critères de déclenchement présumé d'une hypoxie (débit < 200 m³.s⁻¹, température des eaux > 24°C et coefficient de marée). Si une période propice se présentait, les teneurs en oxygène acquises par MAGEST pouvaient être consultées en temps réels grâce à une transmission quasiment instantanée des données. Si une hypoxie était avérée, une campagne terrain était lancée pour délimiter géographiquement la zone touchée. Toutefois, pour pouvoir délimiter cette zone, il est préférable de réaliser la campagne de terrain durant une hypoxie marquée. Or, au cours de l'été 2014, les conditions climatiques et hydrologiques n'ont pas été propices à une hypoxie (par exemple, la température a varié entre 20.6 et 25.8°C). Ceci a été confirmé par les données MAGEST montrant qu'en juillet et août 2014, la teneur en oxygène dissous n'est pas descendue en dessous de 5 mg/L à Bordeaux. Cette tâche n'a donc pas pu être réalisée.

V. SUITES A DONNER

Afin de répondre aux questions laissées en suspens, un nouveau projet coordonné par l'Irstea, est programmé sur la période 2017-2018. Ce dernier se concentre plus particulièrement sur :

(1) la délimitation spatiale des hypoxies sur les estuaires de la Loire et de la Gironde par acquisition de données *in situ* (campagnes ponctuelles et stations fixes autonomes).

De précédents travaux ont mis en avant que les déficits en oxygène dissous apparaissent lorsqu'il y a concordance de certaines conditions de débit, température de l'eau et coefficient de marée. Ainsi, une analyse de ces paramètres permettra de cibler les périodes potentiellement les plus critiques, pour réaliser les campagnes de terrain et évaluer l'étendue réelle de l'hypoxie. Au cours d'épisodes hypoxiques, la zone concernée sera caractérisée à l'aide de mesures de l'oxygène par transect amont-aval, sur l'ensemble des secteurs touchés dans les estuaires de la Loire et de la Gironde, au cours d'un cycle de marée (mobilisation d'une embarcation légère à la journée). Ces suivis pourront être menés sur les 2 années du projet. Le réseau de mesure MAGEST sera complété par une ou deux stations intermédiaires entre Bordeaux et Pauillac vers l'aval et une ou deux stations plus amont entre Bordeaux et Cadillac. Ces stations de mesures équipées d'optodes (instrument de mesure autonome de l'oxygène à partir d'un capteur optique) permettront de mesurer dans le cas d'hypoxie, la durée du phénomène, la concentration en oxygène et l'extension dans l'espace à partir de deux sites distants. Les transects longitudinaux et les stations fixes permettront aussi d'établir une stratégie de surveillance adaptée.

L'estuaire de la Seine n'est pas intégré du fait de l'absence d'hypoxie détectée ces dernières années.

(2) une comparaison de mesures fond/surface des teneurs en oxygène sur les 2 estuaires afin d'appréhender la représentativité des données acquises par les réseaux haute fréquence (HF).

Il est proposé d'étudier les contrastes possibles entre les teneurs en oxygène mesurées en sub-surface et celles mesurées au fond. Seule une station du réseau SYVEL (Donges) dispose de sondes permettant une telle comparaison ; c'est pourquoi il est proposé de compléter certains suivis HF par un suivi de l'oxygène au fond. Pour cela, des optodes seront positionnées sur des points stratégiques par estuaire (dans la zone hypoxique, selon la proximité des stations HF et les contraintes techniques de mise en place). Ces capteurs seront fonctionnels en continu de juillet à septembre. Dans la mesure du possible, les pêcheurs locaux seront sollicités pour leur mise en place sur site et le GIP Loire Estuaire sera chargé de la gestion/récupération des optodes pour le compte de l'Irstea.

(3) une analyse des données HF de Loire et de Gironde pour proposer une stratégie de surveillance du paramètre oxygène dissous en estuaire (fréquence et période).

Ce volet comporte l'analyse aussi bien des données des réseaux HF que celles obtenues *in situ* (campagnes ponctuelles par transect et optodes laissées en continu durant l'été).

A terme, l'objectif sera d'aboutir à un outil d'évaluation de la qualité des estuaires DCE-compatible qui soit applicable aux grands estuaires puis, dans un second temps, transférable aux autres types d'estuaires concernés par la DCE. Cette démarche implique également la définition d'une grille de seuil adaptée, un classement des MET selon les exigences de la DCE et des préconisations pour la mise en place d'une surveillance des milieux pour les Agences de l'eau.

Pour réaliser les différentes tâches, des collaborations sont mises en place avec le GIP Loire Estuaire pour les campagnes de terrain dans l'estuaire de la Loire et avec le laboratoire EPOC de l'Université de Bordeaux. Ce dernier encadre actuellement deux thèses en relation avec l'oxygène en estuaire. Une thèse en modélisation de l'oxygène dissous en estuaire et une thèse sur la modélisation hydro-sédimentaire du bouchon vaseux estuarien et son incidence sur l'oxygène dissous. Pour ces raisons, l'Irstea a souhaité travailler en collaboration avec le laboratoire EPOC (en tant que sous-traitant) pour les campagnes de terrain et les analyses de données.

Bibliographie

- Abril, G., H. Etcheber, P. L. Hir, P. Bassoullet, B. Boutier and M. Frankignoulle (1999). "Oxic/anoxic oscillations and organic carbon mineralization in an estuarine maximum turbidity zone (The Gironde, France)." *Limnology Oceanography* 44(5): 1304-1315.
- Alves, A. S., H. Adão, T. J. Ferrero, J. C. Marques, M. J. Costa and J. Patrício (2013). "Benthic meiofauna as indicator of ecological changes in estuarine ecosystems: The use of nematodes in ecological quality assessment." *Ecological Indicators* 24(0): 462-475.
- Appleby, J., Scarratt, D.J., 1989. Physical effects of suspended solids on marine and estuarine fish and shellfish, with special reference to ocean dumping: a literature review, Canadian technical report of fisheries and aquatic sciences. Department of Fisheries and Oceans, Biological Sciences Branch, Halifax, Nova Scotia B3J 2S7, p. 33 p.
- Au, D.W.T., Pollino, C.A., Wu, R.S.S., Shin, P.K.S., Lau, S.T.F., Tang, J.Y.M., 2004. Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. *Marine Ecology Progress Series* 266, 255-264.
- Beitinger, T., W. Bennett and R. McCauley (2000). "Temperature Tolerances of North American Freshwater Fishes Exposed to Dynamic Changes in Temperature." *Environmental Biology of Fishes* 58(3): 237-275.
- Chaudon, A. (2005). Les crises d'anoxie dans l'estuaire de la Loire : caractérisation et approche de leur incidence sur la transparence migratoire. Nantes, Rapport Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire: 34.
- Cook, A. A., P. John D. Lamshead, L. E. Hawkins, N. Mitchell and L. A. Levin (2000). "Nematode abundance at the oxygen minimum zone in the Arabian Sea." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 47(1-2): 75-85.
- Decker, M. B., D. L. Breitburg and N. H. Marcus (2003). "Geographical Differences In Behavioral Responses To Hypoxia: Local Adaptation To An Anthropogenic Stressor?" *Ecological Applications* 13(4): 1104-1109.
- Eby, L. A., L. B. Crowder, C. M. McClellan, C. H. Peterson and M. J. Powers (2005). "Habitat degradation from intermittent hypoxia: impacts on demersal fishes." *Marine Ecology Progress Series* 291: 249-262.
- Foussard, V., Etcheber H. (2011). Proposition d'une stratégie de surveillance des paramètres physico-chimiques pour les estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde, Projet BEEST: 74 pp.
- Froeschke, J., Stunz G. (2012). "Hierarchical and interactive habitat selection in response to abiotic and biotic factors: The effect of hypoxia on habitat selection of juvenile estuarine fishes." *Environmental Biology of Fishes* 93(1): 31-41.
- Jatteau, P. Fraty R. (2012). Etude de la tolérance à l'hypoxie des juvéniles de grande alose (*Alosa alosa*), IRSTEA-EPBX Centre de Bordeaux. Etude n°146: 15 p.
- Kramer, D. (1987). "Dissolved oxygen and fish behavior." *Environmental Biology of Fishes* 18(2): 81-92.
- Lanoux, A., H. Etcheber, S. Schmidt, A. Sottolichio, G. Chabaud, M. Richard and G. Abril (2013). "Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France)." *Environmental Science: Processes & Impacts*.
- Le Bot K., Lebailleur L., 2014. Synthèse et évolution de la qualité de l'eau de la Loire de la Maine à la mer. Présentation aux « Rencontres Migrateurs de Loire » (novembre 2014).
- Levin, L. A., W. Ekau, A. J. Gooday, F. Jorissen, J. J. Middelburg, S. W. A. Naqvi, C. Neira, N. N. Rabalais and J. Zhang (2009). "Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos." *Biogeosciences* 6(10): 2063-2098.
- Long, W. C., Seitz R. D. (2008). "Trophic interactions under stress: hypoxia enhances foraging in an estuarine food web." *Marine Ecology Progress Series* 362: 59-68.
- Meybeck, M., G. Cauwet, S. Dessery, M. Somville, D. Gouleau and G. Billen (1988). "Nutrients (organic C, P, N, Si) in the eutrophic River Loire (France) and its estuary." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27(6): 595-624.

- Moodley, L., G. J. v. d. Zwaan, P. M. J. Herman, L. Kempers and P. v. Breugel (1997). "Differential response of benthic meiofauna to anoxia with special reference to Foraminifera (Protista: Sarcodina)." *Marine Ecology Progress Series* 158: 151-163.
- Neira, C., J. Sellanes, L. A. Levin and W. E. Arntz (2001). "Meiofaunal distributions on the Peru margin:: relationship to oxygen and organic matter availability." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48(11): 2453-2472.
- Pihl, L., S. P. Baden and R. J. Diaz (1991). "Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustaceans." *Marine Biology* 108(3): 349-360.
- Relexans, J. C., M. Meybeck, G. Billen, M. Brugeaille, H. Etcheber and M. Somville (1988). "Algal and microbial processes involved in particulate organic matter dynamics in the Loire estuary." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27(6): 625-644.
- Steckbauer, A., C. M. Duarte, J. Carstensen, R. Vaquer-Sunyer and D. J. Conley (2011). "Ecosystem impacts of hypoxia: thresholds of hypoxia and pathways to recovery." *Environmental Research Letters* 6(2): 025003.
- Taverny, C., P. Elie and P. Boët (2009). *la vie piscicole dans les masses d'eau de transition : proposition d'une grille de qualité pour la température, l'oxygène dissous, la salinité et la transparence. Etude Cemagref Bordeaux*. 131: 55 p.
- Thouvenin, B., P. Le Hir and L. A. Romana (1994). *Dissolved oxygen model in the Loire Estuary*, Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark.
- Vaquer-Sunyer, R., Duarte C. M. (2008). "Thresholds of Hypoxia for Marine Biodiversity." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(40): 15452-15457.
- Vaquer-Sunyer, R., Duarte C. M. (2011). "Temperature effects on oxygen thresholds for hypoxia in marine benthic organisms." *Global Change Biology* 17(5): 1788-1797.
- Wannamaker, C. M., Rice J. A. (2000). "Effects of hypoxia on movements and behavior of selected estuarine organisms from the southeastern United States." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 249(2): 145-163.
- Zambonino-Infante, J. L., Claireaux, G., Ernande, B., Jolivet, A., Quazuguel, P., Severe, A., Huelvan, C. & Mazurais, D. (2013). Hypoxia tolerance of common sole juveniles depends on dietary regime and temperature at the larval stage: evidence for environmental conditioning. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 280, 1758.