



L'océan est à bout de souffle

Kirsten Isensee,
Lisa A. Levin,
Denise Breitburg,
Marilaure Gregoire,
Véronique Garçon
et Luis Valdés

La diminution du contenu en oxygène (désoxygénation) des eaux marines et côtières s'est aggravée ces dernières décennies dans différentes régions de l'océan mondial. Les causes principales sont d'une part le changement climatique (les eaux plus chaudes contiennent moins d'oxygène et l'augmentation de la stratification en surface réduit la ventilation et donc l'oxygénation de l'intérieur des océans et des estuaires) et d'autre part l'eutrophisation (enrichissement des eaux en nutriments) des zones côtières, due à l'intensification des activités humaines. La désoxygénation en océan ouvert, le réchauffement et l'acidification – tous liés à l'augmentation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère – constituent ainsi des stress multiples sur l'écosystème océanique et une menace globale dont les conséquences socio-économiques commencent juste à être reconnues.

La problématique de la diminution du contenu en oxygène (désoxygénation) des eaux côtières et océaniques s'est aggravée durant les dernières décennies dans différentes régions de l'océan mondial. Les causes principales de cette désoxygénation à grande échelle sont le changement climatique et l'eutrophisation des eaux résultant de l'intensification des activités humaines affectant les zones côtières (e.g. agriculture, urbanisation, industrialisation).

On s'attend à une aggravation de la situation dans le futur en raison du réchauffement global et de l'augmentation de la population mondiale avec des conséquences multisectorielles. L'oxygène est absolument nécessaire pour le maintien de la vie des organismes aérobies depuis l'estran jusqu'à l'océan profond. C'est un élément critique à la santé de notre planète qui est directement impliqué dans les cycles biogéochimiques du carbone, azote et autres éléments de base. Le problème de la désoxygénation affecte aussi bien la zone côtière et estuarienne que de larges régions de l'océan ouvert, appelées zones de minimum d'oxygène (OMZs pour « Oxygen Minimum Zones »). Les effets d'un phénomène de désoxygénation local peuvent se traduire à plus grande échelle notamment à travers la migra-

tion des organismes avec des conséquences écologiques, économiques et sociétales résultant de l'effondrement des pêcheries et de l'aquaculture au sein des habitats affectés par le manque d'oxygène. La désoxygénation des océans a été discutée dans le dernier rapport du GIEC (2014) mais la nature globale de cette menace émergente n'est pas encore pleinement reconnue et n'est notamment pas intégrée dans l'agenda des responsables politiques et des parties prenantes au niveau global. La désoxygénation en lien avec l'eutrophisation a généralement été gérée à l'échelle locale ou régionale tandis que la présence de faibles quantités d'oxygène dans les eaux profondes et de résurgences a souvent été considérée comme un phénomène naturel.

C'est seulement depuis peu que ce déficit en oxygène est reconnu comme étant la conséquence du changement climatique.

BASE SCIENTIFIQUE DE LA DÉSOXYGÉNATION

L'océan est un acteur majeur dans la médiation du cycle global de l'oxygène. Au moins 50 % de l'oxygène que nous respirons provient de l'océan. Les organismes photosynthétiques marins produisent



de l'oxygène tandis que la respiration dans la colonne d'eau et le sédiment ainsi que l'équilibration des eaux de surface avec l'atmosphère constituent des puits d'oxygène. Ces puits sont exacerbés par l'eutrophisation des eaux côtières et par le réchauffement global causé par la croissance du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Des conditions hypoxiques à anoxiques voire sulfidiques ont été répertoriées dans divers systèmes aquatiques, depuis les systèmes côtiers comme les lacs, estuaires et régions côtières jusqu'aux régions profondes du large dans lesquelles l'apport et la production d'oxygène ne sont pas capables de compenser sa consommation (IPCC, 2014). La valeur seuil de la concentration d'oxygène souvent utilisée pour définir la présence d'hypoxie dans les estuaires et zones côtières est de $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (environ $1,5 \text{ ml l}^{-1}$ ou 2 mg l^{-1}) (Gray et al., 2002). Les régions avec des niveaux d'oxygène en dessous de ce seuil sont souvent mentionnées comme « zones mortes ». Cependant, des expériences ont révélé que la tolérance au manque d'oxygène varie fortement en fonction du taxon marin considéré. En effet, certaines espèces ont un besoin en oxygène bien supérieur au seuil de $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ pour assurer leur croissance et reproduction, tandis que d'autres peuvent s'adapter à la vie dans des faibles conditions d'oxygène (e.g. bactéries). En général, les poissons mobiles et crustacés ont tendance à être plus sensibles au manque d'oxygène (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008). Les animaux plus grands deviennent généralement plus rares lorsque la concentration en oxygène tombe en dessous du seuil de $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ et finissent par disparaître du système.

Dans l'océan côtier, le nombre de zones mortes répertoriées a augmenté exponentiellement depuis les années 1960 avec actuellement plus de 479 systèmes recensés comme étant hypoxiques (e.g. la mer Noire, la mer Baltique, le Cattégat, le Golfe de Mexico, la mer de Chine) (Diaz and Rosenberg, 2008)¹. Une partie de cette augmentation peut être attribuée à une amélioration des stratégies d'observation et de surveillance ainsi qu'à une prise de

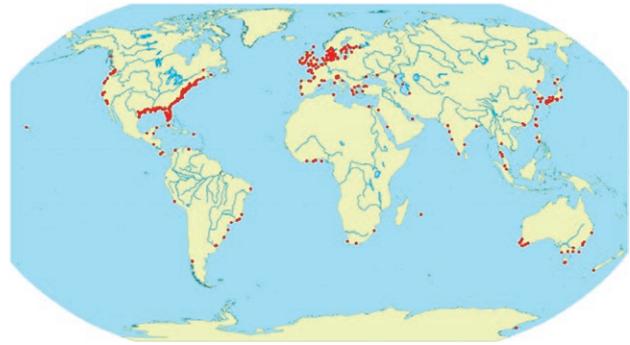


Fig.1 — Cartographie des régions côtières affectées par l'hypoxie et l'eutrophisation (Figure non publiée communiquée par Diaz, 2015, et résultant d'une mise à jour de la Figure 1 de Diaz et Rosenberg, 2008).

conscience grandissante de la problématique, mais la plus large partie est le résultat d'une utilisation accélérée et inefficace des fertilisateurs chimiques, et de la pollution intensifiée par l'augmentation de la population humaine. Dans les régions peu profondes comme les zones côtières, les plateaux continentaux et les estuaires, où le fond est peuplé par des communautés benthiques d'une grande valeur économique et écologique, les événements hypoxiques/anoxiques peuvent être catastrophiques. Parmi les événements hypoxiques les plus sévères, on note ceux qui ont (eu) lieu dans les estuaires recevant les eaux usées non traitées émanant de grands centres urbains. Cette situation représente une menace inquiétante pour la santé humaine et environnementale qui s'étend bien au-delà des problèmes de sécurité alimentaire liés aux effets potentiels de l'hypoxie sur les pêcheries et l'aquaculture.

Dans l'océan ouvert, les *upwellings* (résurgences) qui ont lieu le long de la façade est des océans (EBUSs pour « *Eastern Boundary Upwelling Systems* ») sont le siège d'une production primaire soutenue donnant lieu à un export vertical vers le fond de matière organique. La dégradation de cette production intense cause des zones dépourvues naturellement en oxygène et entraîne le développement de zones de minimum d'oxygène (OMZs) dans les eaux intermédiaires. Dans ces régions, on trouve des eaux (en dessous de la thermocline) avec des concentrations d'oxygène inférieures à $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($< 0,5 \text{ ml l}^{-1}$), tandis que la plupart des espèces subissent une

¹ World Resources Institute: Interactive Map of Eutrophication & Hypoxia <http://www.wri.org/media/maps/eutrophication/>

limitation de leur développement à des valeurs bien supérieures du niveau d'oxygène (Gilly *et al.*, 2013). Par exemple, les grands marlins ressentent le manque d'oxygène pour des concentrations de l'ordre de $150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($3,5 \text{ ml l}^{-1}$; Prince and Goodyear, 2006).

À travers l'émission de gaz traces radiativement actifs, les OMZs jouent un rôle critique dans la composition chimique de l'atmosphère et dans le climat (Law *et al.*, 2013). Elles affectent également le fonctionnement et la structure de l'écosystème dans la colonne d'eau et le fond. Ce sont des régions qui ont une dynamique marquée sur les périodes glaciaires-interglaciaires, mais leur taille semble augmenter dans les régions tropicales et subtropicales ainsi que dans la partie nord-est de l'océan Pacifique en raison du changement climatique.

Le réchauffement climatique contribue à la désoxygénation de différentes façons: les eaux plus chaudes contiennent moins d'oxygène du fait de l'influence de la température sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Le réchauffement de l'océan accroît la stratification due aux différences de densité. En effet, la fonte des glaces et les précipitations modifient la température et la salinité de l'eau. Une stratification a pour conséquence de réduire la ventilation (et donc l'oxygénation) interne des océans (Keeling *et al.*, 2010; Stramma *et al.*, 2008a, 2008b, 2010) et des estuaires (Altieri and Gedan 2014). Par ailleurs, le réchauffement augmente la demande métabolique des organismes et les taux de reminéralisation. Cela tire vers le bas les niveaux d'oxygène. En pleine mer, et en particulier dans le Pacifique nord, les apports atmosphériques de fer et d'azote renforcent la production primaire. Enfin, la décomposition microbienne consomme l'oxygène additionnel (Ito *et al.*, 2016). Le long des bords est des marges continentales, le réchauffement atmosphérique crée des différentiels thermiques entre la terre et la mer qui accentuent les upwellings, ce qui provoque des apports de nutriments plus importants (et la réduction de la production et des processus biogéochimiques associés), ainsi qu'une advection ascensionnelle d'eaux faibles en oxygène (Bakun 1990, 2015; Sydeman *et al.*, 2014; Wang *et al.*,

2015). Le réchauffement pourrait induire une autre source de consommation d'oxygène dans les eaux des marges profondes: la dissociation du méthane enfoui et gelé des hydrates de gaz (Phrampus and Hornbach 2012). L'oxydation aérobie du méthane dans la colonne d'eau devrait épuiser encore davantage les niveaux d'oxygène des eaux intermédiaires (Boetius and Wenzhoffer 2013). Dans plusieurs régions, l'altération liée au climat des schémas de circulation peut intensifier l'hypoxie, soit en renforçant les sous-courants pauvres en oxygène, soit en affaiblissant les courants transporteurs d'oxygène (Gilbert *et al.*, 2005, Bograd *et al.*, 2015, Nam *et al.*, 2015). En revanche, les prévisions d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des cyclones et des ouragans pourraient favoriser le mélange vertical. Cela pourrait atténuer localement l'hypoxie (Rabalais *et al.*, 2009). Le réchauffement devrait aussi allonger les phases d'hypoxie saisonnière (ou avancer leur apparition), et potentiellement renforcer l'impact des efflorescences algales nuisibles (HABs) qui consomment de l'oxygène en se décomposant (Wells *et al.*, 2015).

Diverses variations dans le climat peuvent exacerber l'apport de nutriments, contribuant ainsi à l'hypoxie. La montée du niveau de la mer pourrait de façon indirecte faire disparaître les zones humides, supprimant l'apport de nutriments dû à l'écoulement des eaux vers l'océan côtier. Outre le réchauffement, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère peut altérer le fonctionnement des pores des plantes. Elles utilisent alors l'eau de manière plus efficace et libèrent

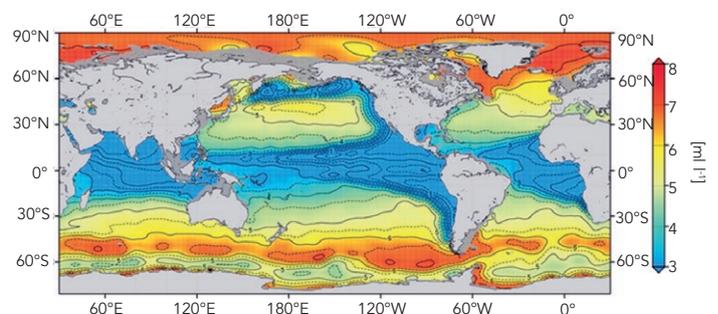


Fig.2 — Concentration d'oxygène (valeur moyenne annuelle, en ml l^{-1}) à une profondeur de 200 m (résolution $1\text{degré} \times 1\text{degré}$, espacement des isocourbes: $0,5 \text{ ml l}^{-1}$) (World Ocean Atlas 2013, Garcia *et al.*, 2014).

3 à 6 % d'écoulement d'eau en plus; une eau qui accumule des nutriments avant d'atteindre l'océan (Reay *et al.*, 2009). Enfin, la hausse des précipitations peut contribuer à l'hypoxie en intensifiant les écoulements d'eau, la fonte des neiges, l'érosion du sol, et la stratification. (<http://nca2014.globalchange.gov>).

Des travaux récents suggèrent une expansion potentielle de l'hypoxie côtière. Les OMZs pourraient avoir de larges effets sur les espèces commerciales de poissons, en réduisant la taille des habitats naturels, en altérant les réseaux trophiques, ou en modifiant les interactions entre espèces (y compris avec les pêcheurs). L'effet combiné du réchauffement et de la désoxygénation sur l'indice métabolique des poissons et des invertébrés devrait réduire la taille des habitats naturels et la distribution spatiale des espèces. Même à des niveaux non-létaux, l'exposition à des concentrations faibles en oxygène dissous peut ralentir la croissance, freiner la reproduction, réduire la taille, altérer les comportements et les distributions d'espèces (Cheung *et al.*, 2013). Cela veut dire que l'on s'attend à ce que la désoxygénation de l'océan maintienne une pression croissante sur les écosystèmes aquatiques vivant dans les habitats côtiers et l'océan profond.

Cette expansion des zones anoxiques et hypoxiques va affecter le fonctionnement et les cycles biogéochimiques des écosystèmes aquatiques ainsi que la provision des biens et services par ces écosystèmes. Les régions océaniques en état de suffocation voient leur capacité diminuer à fournir un environnement favorable à la vie.

À plus grande échelle, plusieurs synthèses globales des données collectées sur l'oxygène océanique montrent que l'étendue des eaux hypoxiques s'est accrue de 4,5 millions de km², à 200 m de profondeur (Stramma *et al.*, 2010). On constate notamment des pertes généralisées dans l'océan Austral (Helm *et al.*, 2011), le Pacifique ouest (Takatani *et al.*, 2012), et l'Atlantique nord (Stendardo and Gruber, 2012). La diminution de la teneur en oxygène a été globalement plus importante dans les zones côtières qu'en haute mer (Gilbert *et al.*, 2010), et souvent plus forte dans les eaux littorales qu'offshore (Bograd *et al.*, 2015).

Les résultats obtenus par modélisation ne sont pas complètement superposables aux données historiques d'oxygène des 40 dernières années (Cabrè *et al.*, 2015); cela signifie que nous devons encore améliorer notre compréhension des mécanismes en jeu dans la distribution de l'oxygène de l'océan global.

Les projections obtenues par des modèles climatiques suggèrent une intensification de la désoxygénation dans le futur (e.g. Matear *et al.*, 2000; Bopp *et al.*, 2002, 2013; Oschlies *et al.*, 2008). De récents efforts ont permis de modéliser la désoxygénation, tout en prenant en compte la variabilité naturelle, afin de prédire à partir de quand apparaîtra la désoxygénation dans les différentes parties de l'océan global (Fig. 3; Long *et al.*, 2016). Les capacités prédictives de ces modèles ont été testées en comparant les résultats de leurs simulations des événements passés à des données géologiques. Les prédictions des modèles ainsi que les données géologiques illustrent l'expansion des événements anoxiques en réponse aux excursions climatiques et aux périodes glaciaires-interglaciaires (Moffitt *et al.*, 2015).

STRATÉGIES POUR LE FUTUR

La désoxygénation, le réchauffement et l'acidification des océans forment un trio de menaces qui sont d'une importance critique pour les écosystèmes ma-

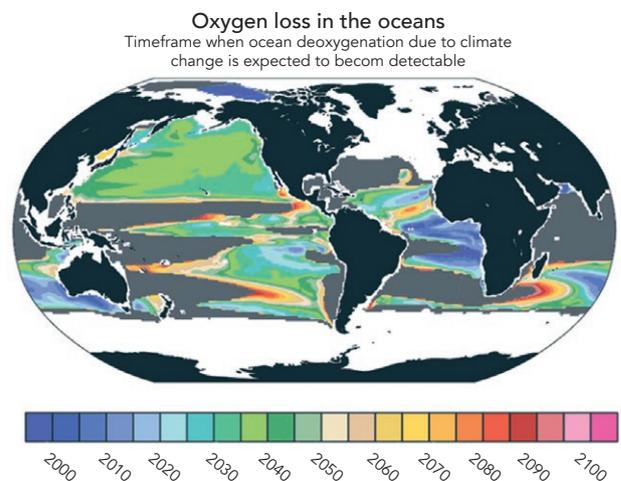


Fig.3 — Année à partir de laquelle la désoxygénation sera détectable en fonction des régions de l'océan, en prenant en compte la variabilité naturelle (from Long *et al.*, 2016).



rins de par leur accélération drastique sur des échelles de temps courtes (Gruber 2011, Mora *et al.* 2013, Bopp *et al.* 2013). Les scénarios futurs de distribution des concentrations d'oxygène dans l'océan côtier et hauturier vont dépendre en grande partie d'une combinaison de facteurs reliés au changement global et à l'utilisation des sols, incluant le réchauffement climatique, une démographie mondiale croissante, en particulier le long des côtes, et les pratiques agricoles. Dans le cas d'un scénario de développement socio-économique semblable au modèle actuel (« *business as usual* »), il est prévu une augmentation de 50 % en 2050 (Noone *et al.* 2012) de la quantité d'azote réactif arrivant à l'océan, induisant ainsi un accroissement de la fréquence, de l'intensité et de la durée de l'hypoxie côtière. Simultanément, l'intensification des vents dans les upwellings (Sydeman *et al.* 2014; Wang *et al.* 2015) et la circulation océanique ainsi modifiée (Bograd *et al.* 2008, 2014) amènent les eaux des OMZs plus près des côtes et sur la plateforme où elles peuvent interagir avec les eaux provenant du continent et les sources côtières d'hypoxie (Feely *et al.* 2008, 2010). Une action intégrée est urgente pour prévenir et remédier à l'hypoxie.

La plupart de l'information que nous avons sur l'hypoxie est basée sur les activités scientifiques de chercheurs d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie, mais des travaux récents indiquent que les marges continentales du Pérou-Chili, d'Afrique de l'Ouest, de l'océan Indien nord et de la Baie du Bengale sont de plus en plus vulnérables aux événements hypoxiques sur la plateforme (Hofmann *et al.* 2011). Nous pouvons remonter dans le passé pour trouver des exemples d'hypoxie sévère résultant des activités humaines, par exemple l'estuaire de la Tamise au Royaume-Uni ou la rivière Delaware aux États-Unis et dans l'actuel, plus particulièrement dans les pays émergents à industrialisation accélérée, comme l'estuaire de la rivière Pearl en Chine. Il y a moins d'information disponible sur les conditions dans les régions du monde les moins peuplées – l'océan ouvert et les îles océaniques, toutefois il est clair que certains de ces systèmes sont aussi fortement affectés.

Un réseau global d'observations faciliterait et améliorerait les capacités de surveillance de l'oxy-

gène océanique et permettrait d'identifier les lacunes dans notre connaissance afin d'orienter les recherches futures. Un nouvel effort collaboratif est requis pour étendre la couverture globale des données océaniques d'oxygène, pour réviser les prévisions des modèles et standardiser les méthodes appliquées afin d'améliorer les prédictions associées à la sécurité alimentaire et au tourisme, et pour évaluer les impacts sur les services écosystémiques de support tels que la séquestration du carbone, les cycles des nutriments, la biodiversité et les habitats marins. L'ampleur et la menace globales de la désoxygénation pour la santé humaine et les services écosystémiques marins commencent juste à être appréciées et beaucoup d'inconnues subsistent en ce qui concerne ses conséquences socio-économiques. Ainsi, un des plus grands défis auquel les actions scientifiques futures devront faire face est l'estimation des coûts de la désoxygénation. À l'heure actuelle, la monétarisation des conséquences économiques et écologiques de la décroissance des concentrations en oxygène est nécessaire mais est toujours très rare, trop générale (Mora *et al.*, 2013) ou restreinte à certaines régions du monde, e.g. le Golfe du Mexique (Rabotyagov *et al.*, 2014). La bonne nouvelle est que lorsque l'eutrophisation est à l'origine de l'hypoxie, il est possible de revenir à des niveaux d'oxygène normaux même dans les régions les plus touchées. Cependant, les sédiments introduisent un délai dans le processus de rétablissement du système. Ce délai est difficilement estimable en raison de la complexité du système et varie d'une région à l'autre. De plus, le réchauffement va ralentir la récupération/restauration de ces zones et peut exiger des réductions encore plus drastiques des charges en nutriments dans les cours d'eau (Capet *et al.*, 2013). Le traitement des déchets et une efficacité accrue de l'utilisation des fertilisants sont nécessaires. Des infrastructures institutionnelles pour la gestion des déchets et des charges en nutriments doivent être renforcées voire mises en place aux niveaux régional, national et global. De nouveaux partenariats publics-privés doivent se créer au sein des secteurs clés pour stimuler l'innovation technologique en matière de réduction et/ou recyclage des nutriments. Les solutions pour l'atténuation et l'adaptation à la désoxy-



génération doivent être diversifiées. Elles peuvent inclure la gestion de la qualité des eaux, la réduction ou l'arrêt de la pêche pendant les périodes de désoxygénation, la création de zones protégées (e.g. aires marines protégées (AMP), zones refuges bien oxygénés), le rétablissement de la ventilation et le contrôle des dommages causés par les maladies, les contaminants, la dégradation des habitats ou les espèces invasives.

La désoxygénation en océan ouvert, le réchauffement et l'acidification des océans sont tous induits par la croissance du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. En conséquence, la seule solution efficace pour atténuer le changement environnemental global est la réduction des émissions de carbone. Il est devenu impératif de reconnaître et comprendre l'impact combiné de ces facteurs climatiques multiples de stress avec d'autres activités humaines, et de gérer les conséquences de ces pressions sur les écosystèmes océaniques.

Les défis de la gestion des multiples pressions affectant l'océan : Réchauffement global, acidification, désoxygénation

Toutes les régions océaniques sont sous l'influence de pressions multiples. La réponse biologique à ces facteurs est très variable et complexe. La réduction de facteurs locaux de stress peut potentiellement influencer sur l'impact des facteurs globaux. Une restriction des pêches peut parfois compenser la mortalité et la production perdue en raison de l'hypoxie (Breitburg *et al.*, 2009) mais aura des conséquences socio-économiques. De façon à gérer nos océans durablement, il convient de considérer l'impact de ces facteurs multiples pour une prédiction avisée de notre environnement marin futur.

Alors que les changements physiques et biogéochimiques associés au réchauffement océanique, à l'acidification et à la désoxygénation ont lieu partout dans l'océan global, la signature de ces facteurs de stress globaux peut être de nature très régionale voire locale. Ainsi, la coalescence de différents facteurs de stress globaux dans certaines régions crée déjà un nombre de « hot spots », par exemple les systèmes d'*upwelling* (résurgences) de bord est. En addition à ces « hot spots » régionaux, certains écosystèmes marins sont hautement vulnérables aux facteurs de stress multiples, par exemple les récifs coralliens. D'autres exemples montrent que les prédateurs supérieurs marins de la chaîne trophique de l'océan Pacifique est, organismes importants pour le développement économique des régions littorales, sont altérés par la désoxygénation, l'acidification et le réchauffement océanique.

Les différents niveaux de réponse nécessitent une estimation de la prise en compte des impacts des facteurs multiples de stress aux niveaux physiologique/biogéochimique, de l'organisme et de l'écosystème. Cette estimation doit inclure la collecte d'observations, la réalisation d'expériences et le développement de modèles fiables de prévision.

En accord avec les résultats des scientifiques, les décideurs doivent agir pour gérer les ressources marines au vu des facteurs multiples de stress. Des modes de gouvernance à différentes échelles (du local au global) pour les ressources marines doivent être développés et mis en place. Des changements de comportement au niveau de la société devraient se traduire par des réductions de menaces locales et simultanément, une approche du principe de précaution devrait être adoptée à l'échelle globale. Enfin, l'éducation et la formation d'une jeune génération de scientifiques dans les régions du globe sévèrement affectées par ces menaces multiples sont primordiales, ceci d'autant plus que la connaissance et la compréhension des processus en jeu peuvent y être encore très limitées. Des programmes d'échange appropriés pourraient être mis en place afin de faciliter le transfert de connaissances entre les différentes régions du globe confrontées à la désoxygénation.



RÉFÉRENCES

- ALTIERI A.H. and GEDAN K.B., 2014 – *Climate Change and Dead Zones*. *Global change biology*, doi: 10.1111/gcb.12754.
- BAKUN A., 1990 – *Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling*. *Science*, 247: 198-201.
- BAKUN A., BLACK B.A., BOGRAD S.J., GARCIA-REYES M., MILLER A.J., RYKACZEWSKI R.R. and SYDEMAN W.J., 2015 – *Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems*. *Current Climate Change Reports* 2, 85-93.
- BOETIUS A. and WENZHÖFER F., 2013 – *Seafloor Oxygen Consumption Fueled by Methane From Cold Seeps*. *Nature Geoscience* doi: 10.1038/ngeo1926.
- BOGRAD S.J., CASTRO C.G., DI LORENZO E., PALACIOS D.M., BAILEY H., GILLY W. and CHAVEZ F.P., 2008 – *Oxygen Declines and the Shoaling of the Hypoxic Boundary in the California Current*. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12607.
- BOGRAD S.J., BUIL M.P., DI LORENZO E., CASTRO C.G., SCHROEDER I.D., GOERICKE R., ANDERSON C.R., BENITEZ-NELSON C. and WHITNEY F.A., 2015 – *Changes in Source Waters to the Southern California Bight*. *Deep-Sea Res. Pt II*, 112, 42-52.
- BOPP L., LE QUERE C., HEIMANN M., MANNING A.C. and MONFRAY P., 2002 – *Climate Induced Oceanic Oxygen Fluxes: Implications for the Contemporary Carbon Budget*. *Global Biogeochem. Cycles* 16, doi: 10.1029/2001GB001445.
- BOPP L., RESPLANDY L., ORR J.C., DONEY S.C., DUNNE J.P., GEHLEN M., HALLORA P., HEINZE C., ILYINA T., SÉFÉRIAN R., TJIPUTRA J. and VICHI M., 2013 – *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in The 21st Century: Projections with CMIP5 Models*. *Biogeosciences*, 10, 6225-6245.
- BREITBURG D.L., CRAIG J.K., FULFORD R.S., ROSE K.A., BOYNTON W.R., BRADY D.C., CIOTTI B.J., DIAZ R.J., FRIEDLAND K.D., HAGY J.D., HART D.R., HINES A.H., HOUDE E.D., KOLESAR S.E., NIXON S.W., RICE J.A., SECOR D.H. and TARGETT T.E., 2009 – *Nutrient Enrichment And Fisheries Exploitation: Interactive Effects On Estuarine Living Resources And Their Management*. *Hydrobiologia*, 629 (1), 31-47.
- BREITBURG D.L., SALISBURY J., BERNHARD J.M., CAI W.J., DUPONT S., DONEY S., KROEKER K., LEVIN L.A., LONG C., MILKE L.M., MILLER S.H., PHELAN B., PASSOW U., SEIBEL B.A., TODGHAM A.E. and TARRANT A., 2015 – *And on Top of All That... Coping with Ocean Acidification in the Midst of Many Stressors*. *Oceanography* 28: 48-61 (2015)
- CABRÉ A., MARINOV I., BERNARDELLO R. and BIANCHI D., 2015 – *Oxygen Minimum Zones in the Tropical Pacific across Cmp5 Models: Mean State Differences and Climate Change Trends*. *Biogeosci. Discuss. Special Issue on Low Oxygen Environments*.
- CAPET A., BECKERS JM, BARTH A., GREGOIRE M., 2013 – *Drivers, Mechanisms and Long-Term Variability of Seasonal Hypoxia on the Black Sea Northwestern Shelf – Is there any Recovery after Eutrophication?* *Biogeosciences*, 10, 3943-3962.
- CHEUNG W.L. et al. – *Shrinking of Fishes Exacerbates Impacts of Global Ocean Changes on Marine Ecosystems*. *Nature Climate Change* 3, DOI: 10.1038/NCLIMATE1691.
- DEUTSCH C., FERREL A., SEIBEL B., PORTNER H.O. and HUEY R.B., 2015 – *Climate Change Tightens a Metabolic Constraint on Marine Habitats*. *Science* 348, 1132-1145.
- DIAZ R.J. and ROSENBERG R., 2008 – *Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems*. *Science*, 321 (5891), 926-929.
- FEELY R.A., SABINE C.L., HERNANDEZ-AYON J.M., IANSON D. and HALES B., 2008 – *Evidence For Upwelling Of Corrosive " Acidified " Water Onto The Continental Shelf*. *Science*, 320 (5882), 1490-1492.
- FEELY R.A., ALIN S.R., NEWTON J., SABINE C.L., WARNER M., DEVOLA., KREMBS C. and MALOY C., 2010. *The Combined Effects of Ocean Acidification, Mixing, and Respiration on Ph and Carbonate Saturation in an Urbanized Estuary*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 88 (4), 442-449.



- GARCIA H.E., LOCARNINI R.A., BOYER T.P., ANTONOV J.I., BARANOVA O.K., ZWENG M.M., REAGAN J.R. and JOHNSON D.R., 2014 – *World Ocean Atlas 2013, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. LEVITUS, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 75, 27 pp.
- GATTUSO J.P. et al. – *Contrasting Futures for Ocean and Society from Different Anthropogenic CO₂ Emissions Scenarios*. Science 349, DOI: 10.1126/science.aac4722.
- GILBERT D., SUNDBY B., GOBEIL C., MUCCI A. and TREMBLAY G.H., 2005 – *A Seventy-Two Year Record of Diminishing Deep-Water Oxygen in the St. Lawrence Estuary: the Northwest Atlantic Connection*. Limnol. Oceanography, 50, pp. 1654-66.
- GILBERT D., RABALAIS N.N., DIAZ R.J. and ZHANG J. – *Evidence for Greater Oxygen Decline Rates in the Coastal Ocean than in the Open Ocean*. Biogeosciences, 7, pp. 2283-2296.
- GILLY W.F., BEMAN J.M., LITVIN S.Y. and ROBISON B. H., 2013 – *Oceanographic and Biological Effects of Shoaling of the Oxygen Minimum Zone*. Ann. Rev. Mar. Sci., 5, 393-420.
- HOFMANN A.F., PELTZER E.T., WALZ P.M. and BREWER P.G., 2011 – *Hypoxia by Degrees: Establishing Definitions for a Changing Ocean*. Deep-Sea Res. Pt I, 58 (12), 1212-1226.
- IPCC - FIELD, C.B., BARROS, V.R., MACH, K. and MASTRANDREA, M., 2014 – *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- GRAY J.S., WU R.S.S. and OR Y.Y., 2002 – *Effects of Hypoxia and Organic Enrichment on the Coastal Marine Environment*. Mar. Ecol.-Prog. Ser., 238, 249 – 79.
- GRUBER N., 2011 – *Warming Up, Turning Sour, Losing Breath: Ocean Biogeochemistry under Global Change*. Philos. T. Roy. Soc., 369, 1980-1996.
- HELM K.P., BINDOFF N.L. and CHURCH J.A., 2011 – *Observed Decreases in Oxygen Content of the Global Ocean*. Geophys. Res. Lett. 38, DOI: 10.1029/2011GL049513.
- ITO T., NENES A., JOHNSON M.S., MESKHIDZE M. and DEUTSCH C., 2016 – *Acceleration of Oxygen Decline in the Tropical Pacific over the Past Decades by Aerosol Pollutants*. Nature Geoscience 9, 443-447.
- KEELING R.F., KÖRTZINGER A. and GRUBER N., 2010 – *Ocean Deoxygenation in a Warming World*. Annu. Rev. Mar. Sci., 2, 199 – 229.
- LAW C.S., BRÉVIERE E., DE LEEUW G., GARÇON V., GUIEU C., KIEBER D.J., KONTRADOWITZ S., PAULMIER A., QUINN P.K., SALTZMAN E.S. STEFELS J. and VON GLASOW R., 2013 – *Evolving Research Directions in Surface Ocean – Lower Atmosphere (Solas) Science*. Environ. Chem, 10, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1071/EN12159>.
- LEVIN L.A., 2003 – *Oxygen Minimum Zone Benthos: Adaptation and Community Response to Hypoxia*. Oceanogr. Mar. Biol. 41, 1-45.
- LEVIN L.A. and BREITBURG D.L., 2015 – *Linking Coasts and Seas to Address Ocean Deoxygenation*. Nat. Clim. Chang. 5.
- LEVIN L.A., EKAU W., GOODAY A., JORRISEN F., MIDDELBURG J., NEIRA C., RABALAIS N., NAQVI S.W.A. and ZHANG J., 2009 – *Effects Of Natural And Human-Induced Hypoxia On Coastal Benthos*. Biogeosciences 6, 2063-2098.
- LEVIN L.A. and LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. Science 350: 766-768.
- LONG M.C., DEUTSCH, C. and ITO T., 2016 – *Finding Forced Trends in Oceanic Oxygen*. Global Biogeochem. Cycles, 30, pp. 381 – 397.
- MATEAR R.J., HIRST A.C. and MCNEIL B.I., 2000 – *Changes in Dissolved Oxygen in the Southern Ocean With Climate Change*. Geochem. Geophys. Geosyst., 1 2000GC000086.
- MOFFITT S.E., MOFFITT R.A., SAUTHOFF W., DAVIS C.V., HEWETT K. and HILL T.M., 2015 – *Paleoceanographic Insights on Recent Oxygen Minimum Zone Expansion: Lessons for Modern Oceanography*. PloS one, 1, 39.



- MORA C., WEI C.-L., ROLLO A., AMARO T., BACO A.R., BILLETT D., BOPP L., CHEN Q., COLLIER M., DANOVARO R., GOODAY A.J., GRUPE B.M., HALLORAN P.R., INGELS J., JONES D.O.B., LEVIN L.A., NAKANO H., NORLING K., RAMIREZ-LLODRA E., REX M., RUHL H.A., SMITH C.R., SWEETMAN A.K., THURBER A.R., TJIPUTRA J.F., USSEGLIO P., WATLING L., WU T. and YASUHURA M., 2013 – *Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over The 21st Century*. PLoS Biology, 11 (10): e1001682. doi: 10.1371/journal.pbio.1001682.
- NOONE K., SUMAILA R. and DÍAZ R.J., 2012 – *Valuing the Ocean Draft Executive Summary*. Stockholm Environmental Institute.
- OSCHLIES A., SCHULTZ K.G., RIEBESELL U. and SCHMITTNER A., 2008 – *Simulated 21 Century's Increase in Oceanic Suboxia in CO₂-Enhanced Biotic Carbon Export*. Global Biogeochem. Cycles, 22, GB4008, doi: 10.1029/2007GB003147.
- PRINCE E.D. and GOODYEAR C.P., 2006 – *Hypoxia-Based Habitat Compression of Tropical Pelagic Fishes*. Fish. Oceanogr., 15, 451-464.
- RABOTYAGOV S.S., KLING C.L., GASSMAN P.W., RABALAIS N.N. and TURNER R.E., 2014 – *The Economics of Dead Zones: Causes, Impacts, Policy Challenges, and a Model of the Gulf of Mexico Hypoxic Zone*. Rev. Environ. Econ. Pol., 8 (1), 58-79.
- REAY D.S., DENTENER F., SMITH P., GRACE J. and FEELY R., 2015 – *Global Nitrogen Deposition and Carbon Sinks*. Nature Geosciences, 1, pp. 430-37.
- SCHEFFER M., BARRETT S., CARPENTER S.R., FOLKE C., GREEN A.J., HOLMGREN M., HUGHES T.P., KOSTEN S., VAN DE LEEMPUT I.A., NEPSTAD D.C., VAN NES E.H., PEETERS E.T.H.M. and WALKER B., 2015 – *Creating a Safe Space for Iconic Ecosystems*. Science, 347, 1317-1319.
- SPERLING E.A., FRIEDER C.A. and LEVIN L.A. – *Biodiversity Response to Natural Gradients of Multiple Stressors on Continental Margins*. Proceeding Royal Society B. 283: 20160637
- STRAMMA L., BRANDT P., SCHAFSTALL J., SCHOTT F., FISCHER J. and KÖRTZINGER A., 2008 – *Oxygen Minimum Zone in the North Atlantic South and East of the Cape Verde Islands*. J. Geophys. Res., 113, doi: 10.1029/2007JC004369.
- STRAMMA L., JOHNSON G.C., SPRINTALL J. and MOHRHOLZ V., 2008 – *Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans*. Science, 320, 655 – 658.
- STRAMMA L., SCHMIDTKO S., LEVIN L.A. and JOHNSON G.C., 2010 – *Ocean Oxygen Minima Expansions and their Biological Impacts*. Deep-Sea Res. Pt. I, 57 (4), 587-595.
- STENDARDO I. and GRUBER N., 2012 – *Oxygen Trends Over Five Decades in the North Atlantic*. J. Geophys. Res., 117, doi: 10.1029/2012JC007909.
- SYDEMAN W.J., GARCÍA-REYES M., SCHOEMAN D.S., RYKACZEWSKI R.R., THOMPSON S.A., BLACK B.A. and BOGRAD S.J., 2014 – *Climate Change and Wind Intensification in Coastal Upwelling Ecosystems*. Science, 345 (6192), 77-80.
- TAKATANI Y., SASANO D., NAKANO T. and MIDORIKAWA T., 2012 – *Decrease of Dissolved Oxygen After the Mid-1980S in the Western North Pacific Subtropical Gyre Along the 137°E Repeat Section*. Global Biogeochemical cycles 26, GB2013, doi: 10.1029/2011GB004227.
- VAQUER-SUNYER R. and DUARTE C. M., 2008 – *Thresholds of Hypoxia for Marine Biodiversity*. Proc. Natl. Acad. Sci., 105, 15452 – 15457.
- WANG D., GOUHIER T, MENGE B. and GANGULY A., 2015 – *Intensification and Spatial Homogenization of Coastal Upwelling under Climate Change*. Nature, 518, 390-394.
- WELLS M.L. et al., 2015 – *Harmful Algal Blooms and Climate Change: Learning from the Past and Present to Forecast the Future*. Harmful Algae 49 (2015) 68 – 93.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE – www.wri.org/our-work/project/eutrophication-and-hypoxia/interactive-map-eutrophication-hypoxia.