

CARAC

TÉRIS

TIQUES ET

MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

ÉTAT

ÉCOLO

GIQUE

CARACTÉRISTIQUES ET ÉTAT ÉCOLOGIQUE

MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

JUIN 2012

ÉTAT PHYSIQUE ET CHIMIQUE Caractéristiques chimiques Répartition spatio-temporelle de l'oxygène

Dominique Lefèvre

(Aix-Marseille université et université du Sud Toulon-Var, CNRS/Insu, IRD, MIO, UM 110, Marseille et La Garde).

Contributeurs :

Tracy Bentley,

Michel Lafont

(Aix-Marseille université et université du Sud Toulon-Var, CNRS/Insu, IRD, MIO, UM 110, Marseille et La Garde),

Laurent Coppola,

Laure Mousseau,

Ornella Passafiume (Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer, CNRS-UPMC)
et Étienne Laffay (Ifremer, PDG-REM-GM-CTDI, Brest).



L'oxygène dissous dans l'eau de mer est un composé ubiquiste dont la concentration dans une masse d'eau est régie par une multitude de processus biotiques et abiotiques.

Les propriétés thermodynamiques – température, salinité, pression –, la dynamique physique – courant, mélange de masses d'eau, injection de bulles ou microbulles, échange air-mer –, le processus de photo-oxydation, le processus d'oxydation chimique et les processus biologiques – photosynthèse, respiration et nitrification en milieu aérobie – influent, à des échelles diverses et variables, sur la concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer. Tout comme la Méditerranée dans son ensemble, la Méditerranée occidentale peut être considérée comme représentative d'un océan miniature i) où la circulation thermohaline est prédominante, ii) soumis au régime des entrées d'eau atlantique dans le bassin depuis le détroit de Gibraltar et iii) sous l'influence de phénomènes climatiques générant la convection des masses d'eau de surface en profondeur ou des événements de cascading. Les sources d'eau douce, essentiellement constituées des apports du Rhône, viennent influencer les propriétés physiques et biogéochimiques de ce bassin. Le bassin méditerranéen est astreint à une forte pression anthropique, liée à l'activité socio-économique et à l'urbanisation de son littoral. Les effets des changements globaux peuvent par ailleurs y avoir une influence notable sur le fonctionnement de l'écosystème méditerranéen occidental [1].

1. PRÉSENTATION DU JEU DE DONNÉES

Le jeu de données fourni pour cette analyse sur la sous-région marine couvre une zone géographique allant de 44° N à 44° 30' N et de 2° E à 11° E. Les données référencées comme données bouteilles et profils ont été utilisées, alors que celles issues des flotteurs profileurs Argo n'ont pas été prises en compte. Les données sont exprimées en millimoles par mètre cube ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-3}$), généralement après conversion de milligrammes par litre ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) ou millilitres par litre ($\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$). Les données sont aussi présentées sous la forme d'UAO (utilisation apparente de l'oxygène, en micromoles par kilogramme, $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$). La valeur de l'UAO est calculée comme la différence entre la saturation en oxygène dissous et la concentration en oxygène dissous mesurée normalisée par la masse volumique *in situ*. La saturation en oxygène dissous est calculée à partir de l'algorithme de García et Gordon [2]. L'UAO permet en partie de tenir compte des propriétés physico-chimiques, mais aussi de l'activité biologique. Ainsi, dans les eaux de surface, les valeurs d'UAO sont le plus souvent voisines de zéro – concentration en oxygène dissous proche de la saturation – ou négatives, valeurs liées à la ventilation des eaux de surface par l'action mécanique du vent ou par la production d'oxygène par la photosynthèse en période d'efflorescence printanière. En deçà de la couche de mélange et de la couche euphotique, l'évolution de la concentration en oxygène dissous évolue essentiellement sous l'influence de l'activité biologique des micro-organismes présents le long de la colonne d'eau, et en fonction du mélange advectif avec d'autres masses d'eau présentant des concentrations en oxygène dissous différentes. L'UAO, en ce sens, est un proxy de la reminéralisation pour les régions mésopélagiques et bathypélagiques.

1.1. INTERROGATION DES BASES DE DONNÉES

Les données (tableau 1) sont issues de la base de données du Somlit et des bases de données nationales (Lefcyber et internationales (SeaDataNet, Sismer), qui ont fourni la majeure partie des valeurs.

CAMPAGNES	STATIONS	SAMPLES	LONGITUDE	LATITUDE	PÉRIODE
110	4 762	330 995	2,1° E–32,1° E	3,5° N–44,3° N	29/8/1930–19/4/2011

Tableau 1 : Résumé des propriétés de la base de données.

1.2. QUALITÉ DE LA DONNÉE

Les bases de données sources – SeaDataNet, Sismer, Somlit, entre autres – qualifient de manière hétérogène leurs données. Ces bases de données n'utilisent pas les mêmes indices de contrôle qualité, lequel est dépendant des protocoles de prélèvement, des procédures analytiques, des laboratoires d'analyse, des capteurs utilisés et des procédures d'étalonnage de ces derniers, etc. De plus, les protocoles analytiques ne sont pas explicités pour tous les jeux de données, ce qui ne permet pas une synthèse exhaustive. Néanmoins, la figure 1 représente la répartition des données issues du tableau 1 en fonction de leur validité.

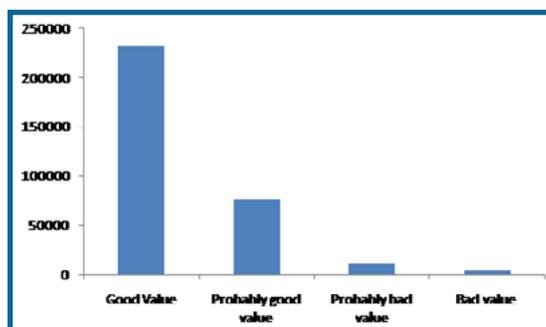


Figure 1 : Répartition des données en fonction des critères de qualités, issue de la base de données décrites dans le tableau 1 (Sources : SeaDataNet, Sismer, Somlit, Fichier ODV, 2013).

Dans un premier temps, pour séparer les données côtières des données du large, le jeu de données est analysé en utilisant un découpage géographique basé sur la bathymétrie 200 m. Ce critère est retenu sur la base que le

courant Nord Méditerranéen suit l'isobathe 200 m et « découple » spatialement l'écosystème côtier du large. Les données côtières sont analysées à l'échelle régionale en discriminant les régions suivantes en partant de l'est : ligure, provençale jusqu'au Rhône, provençale sous l'influence directe du Rhône et provençale sur le plateau continental. La validation verticale est effectuée en examinant la saturation en oxygène dissous dans la couche de mélange et les écarts à la médiane – ce critère d'exclusion n'est pas encore robuste et définitif, mais les extrêmes 10 % sont testés.

Pour les données du large destinées à la régionalisation spatiale, nous nous appuyons sur le critère de province biogéographique défini par D'Ortenzio et Riberra d'Alcalà [3] (figure 2). Ces auteurs définissent sept provinces sur l'ensemble de la Méditerranée, sur les critères de contenu en chlorophylle *a* déduit de l'analyse des images satellitaires. Pour la sous-région marine, nous identifions trois provinces biogéographiques : côtière, intermédiaire et efflorescence. La limite « intermédiaire-efflorescence » correspond approximativement à l'isobathe 200 m.

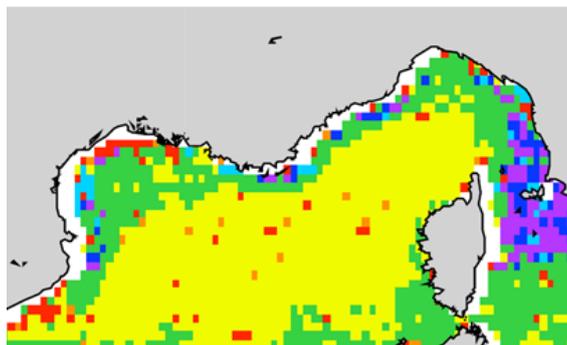


Figure 2 : Province océanique telle que définie par D'Ortenzio et Riberra D'Alcalà (3), 2009. Les codes couleurs expriment les régions liées à la dynamique des efflorescences phyto-planctoniques (efflorescence, pas d'efflorescence et efflorescence intermittente). Au sein de chaque groupe les couleurs représentent le niveau de chlorophylle moyen de ces régions : en rouge efflorescence côtière très intense, en orange, efflorescence côtière forte, en jaune efflorescence printanière, en vert, efflorescence intermittente, en cyan pas d'efflorescence avec un niveau de chlorophylle moyen, en bleu pas d'efflorescence avec un niveau de chlorophylle faible, en mauve pas d'efflorescence avec un niveau de chlorophylle très faible.

L'ensemble de la province biogéographique « efflorescence » correspond à la « partie » océanique de la Méditerranée occidentale. Pour cette province, l'analyse et la validation du jeu de données se basent sur la répartition verticale des masses d'eau, telle que définie par la CIESM [4]. Les principales masses d'eau se retrouvent sur le diagramme T-S de la figure 3.

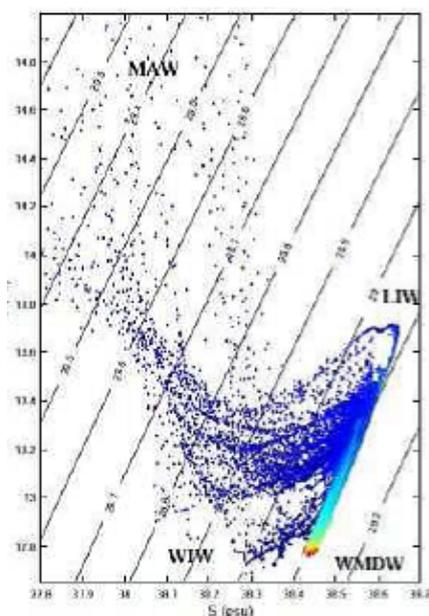


Figure 3 : Diagramme T-S (température potentielle-salinité) observé en 2009-2013 dans le bassin Liguro-Provençal (Sources : campagne à la mer NO Tethys II, Opera-Dark Vador et MOOSE).

2. BASE DE DONNÉES

La base de données constituée lors de ce travail comprend cent dix campagnes à la mer entre 1930 et 2011. Cela correspond à 4 762 stations et 328 977 données issues d'analyses chimiques – par la méthode Winkler – ou de profils verticaux effectués au moyen de capteurs polarographiques Seabird® (SBE13, SBE43) réparties de manière hétérogène à l'échelle du bassin nord-occidental (Figure 4). La discrimination méthodologique n'est pas faite car cette information n'est pas disponible dans les métadonnées.

La consolidation de cette base de données a été effectuée sur les critères édictés ci-avant, à savoir la régionalisation et la zonation verticale en fonction des masses d'eau. Néanmoins, en raison du manque d'information environnant les données, une erreur non quantifiable est associée à cette base de données. Une deuxième phase de consolidation pourra être effectuée ultérieurement en traitant les relations nutriments vs oxygène. Cette deuxième phase devrait réduire significativement les erreurs associées aux profils verticaux.

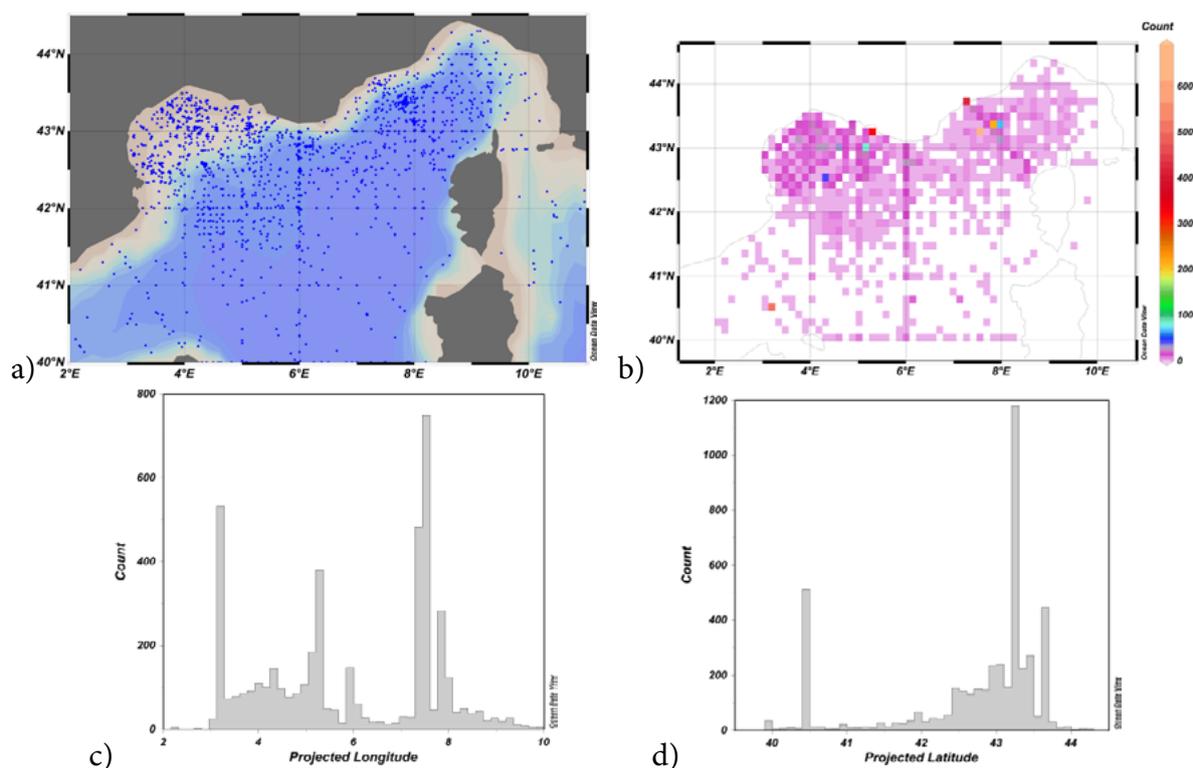


Figure 4 (a) Distribution spatiale des données recueillies ; (b) fréquence d'échantillonnage de la sous-région marine ; (c) répartition longitudinale des données ; (d) répartition latitudinale des données (les données sont celles collectées lors de ce travail et constituent la base de données résumée dans le tableau 1) (Sources : SeaDataNet, Siser, Somlit, Fichier ODV, 2013).

3. PRÉSENTATION DES CLIMATOLOGIES

3.1. DISTRIBUTION VERTICALE

Sur l'ensemble du bassin méditerranéen, la distribution verticale de l'oxygène dissous pélagique (figure 5) suit une courbe de décroissance exponentielle depuis la surface jusqu'aux eaux intermédiaire (LIW). Ce minimum correspond à l'isopycne 29,04-29,06 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, avec une valeur de saturation en oxygène dissous de 60 %, soit une concentration de 180 $\mu\text{mol O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$. En dessous de 500 m, la concentration en oxygène dissous augmente linéairement pour atteindre une concentration dans les eaux profondes (WMDW) de 200 $\mu\text{mol O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ sur l'isopycne 29,10 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. L'empatement de la distribution verticale autour de la courbe moyenne est essentiellement dû à la variabilité spatiale et temporelle.

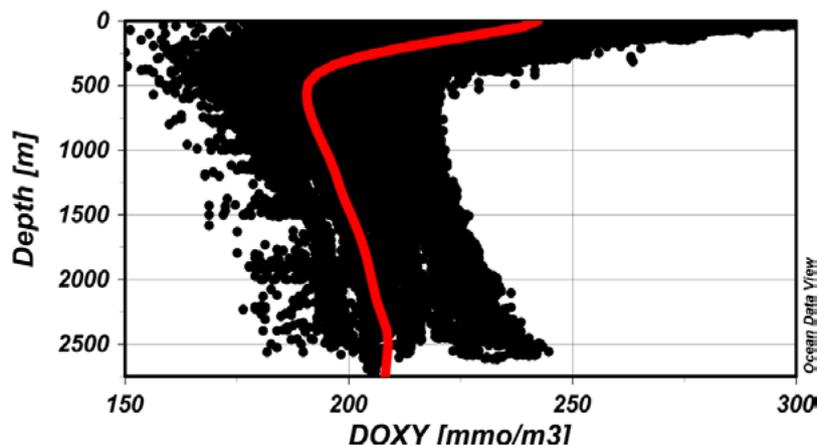


Figure 5 : Distribution de la concentration en oxygène dissous sur la profondeur. La courbe rouge correspond à la tendance moyenne de la répartition verticale de l'oxygène dissous sur la colonne d'eau (les données sont celles collectées lors de ce travail et constituent la base de données résumée dans le tableau 1) (Sources : SeaDataNet, Simer, Somlit, Fichier ODV, 2013).

3.2. DISTRIBUTION HORIZONTALE

La distribution horizontale de l'oxygène dissous selon les horizons isopycnaux est essentiellement liée à la circulation géostrophique des masses d'eau présentes dans le bassin et aux forçages climatiques et saisonniers. Pour ces raisons, nous avons choisi de regarder la distribution sur quatre horizons représentatifs des masses d'eau principales : les eaux de surface à 10 m, les eaux d'origine levantine à 500 m, les mélanges des eaux levantines et des eaux profondes sous influence des eaux tyrrhéniennes à 1 000 m, et les eaux profondes à 2 000 m [5].

3.2.1. Évolution saisonnière en surface

La figure 6 représente la répartition de l'oxygène dissous, ou plus exactement la distribution de l'utilisation apparente d'oxygène dissous à 10 m de profondeur en fonction de la saison. Les valeurs d'UAO égales à zéro correspondent à des valeurs d'oxygène dissous en équilibre avec l'atmosphère. Les valeurs négatives correspondent à des valeurs d'oxygène dissous en excès par rapport à la solubilité de l'oxygène dans l'eau de mer, liées à une ventilation accrue par le forçage climatique ou une activité de photosynthèse intense liée aux efflorescences algales. Les valeurs positives sont des valeurs sous-saturées par rapport à la solubilité, situations engendrées essentiellement par l'activité de reminéralisation des micro-organismes marins.

Les eaux de surface présentent une répartition homogène, en moyenne sur l'ensemble de la région, au cours des saisons, mais avec des concentrations plus élevées sur le plateau continental. Cette situation est liée à l'influence du Rhône sur la distribution de l'oxygène dissous et à une salinité plus basse, cette dernière augmentant la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Nous noterons que quelques valeurs d'UAO sont en excès ou en déficit par rapport à la saturation en oxygène. Ces écarts à la saturation en oxygène pourraient être dus à des structures méso-échelles « pérennes » – tourbillons cycloniques ou anticycloniques [5] [6]. Ces structures méso-échelles pourraient favoriser la signature de l'activité biologique par rapport au forçage atmosphérique. Néanmoins, la situation estivale laisse apparaître des valeurs d'UAO négatives, signature d'un excès d'oxygène en surface. L'amplitude de ces valeurs est cependant à prendre avec précaution ($> 10 \mu\text{mol O}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$), et pourrait être due à des valeurs surestimées et non identifiées lors de la mise en place de cette base de données. Ces cartographies sont à rapprocher des cartographies de SST et de chlorophylle *a* de surface dérivées des images satellitaires, afin de procéder à un filtrage plus fin et/ou des corrections plus appropriées.

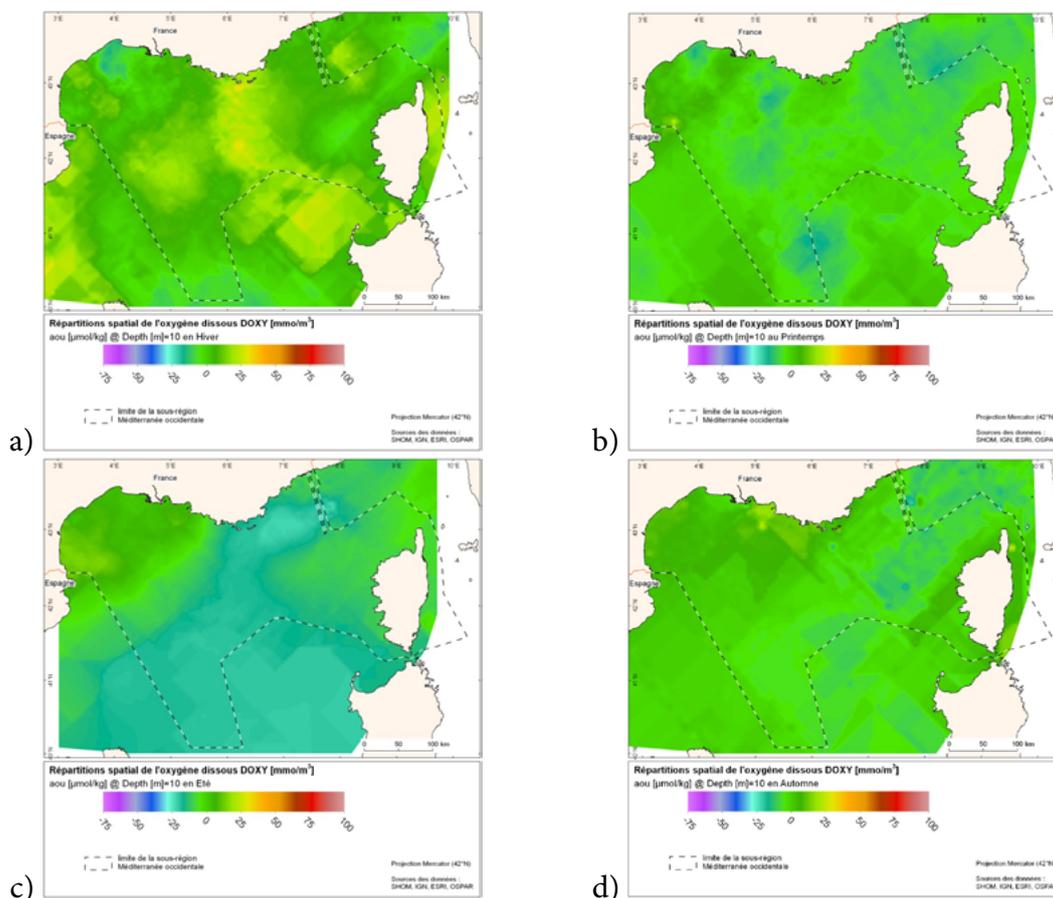


Figure 6 : Distribution saisonnière moyenne de l'UAO (en $\mu\text{mol O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$) à 10 m de profondeur (1930–2011) : (a) en hiver ; (b) au printemps ; (c) en été ; (d) à l'automne (Sources : SHOM, IGN, ESRI, OSPAR).

3.2.2. RÉPARTITION SPATIALE À QUATRE PROFONDEURS : AW, LIW, TDW, WMDW

La distribution spatiale sur les quatre masses d'eau choisies (10, 500, 1 000 et 2 000 m ; figure 7), basée sur l'ensemble de la base de données disponible, présente des valeurs en oxygène dissous très différentes : les valeurs de surface (AW) sont proches de la saturation et relativement homogènes (figure 7a). Les LIW présentent les valeurs minimales, avec des valeurs moyennes entre 160 et 180 $\mu\text{mol O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ (figure 7b) – à noter les valeurs fortes centrées sur la position 42° N, 5° E. Ces valeurs fortes sont certainement liées à la zone de convection et de formation des eaux profondes [2], entraînant un enrichissement en oxygène sur l'ensemble de la colonne d'eau. Ces fortes valeurs sont aussi remarquées sur les distributions spatiales à 1 000 m (TDW) et 2 000 m (WMDW). Hormis ces valeurs plus fortes dans la région de convection, la distribution à 1 000 m est homogène sur l'ensemble du bassin (figure 7c). L'horizon à 2 000 m (figure 7d) présente aussi une distribution spatiale assez homogène, avec les valeurs maximales dans la région de formation des eaux profondes.

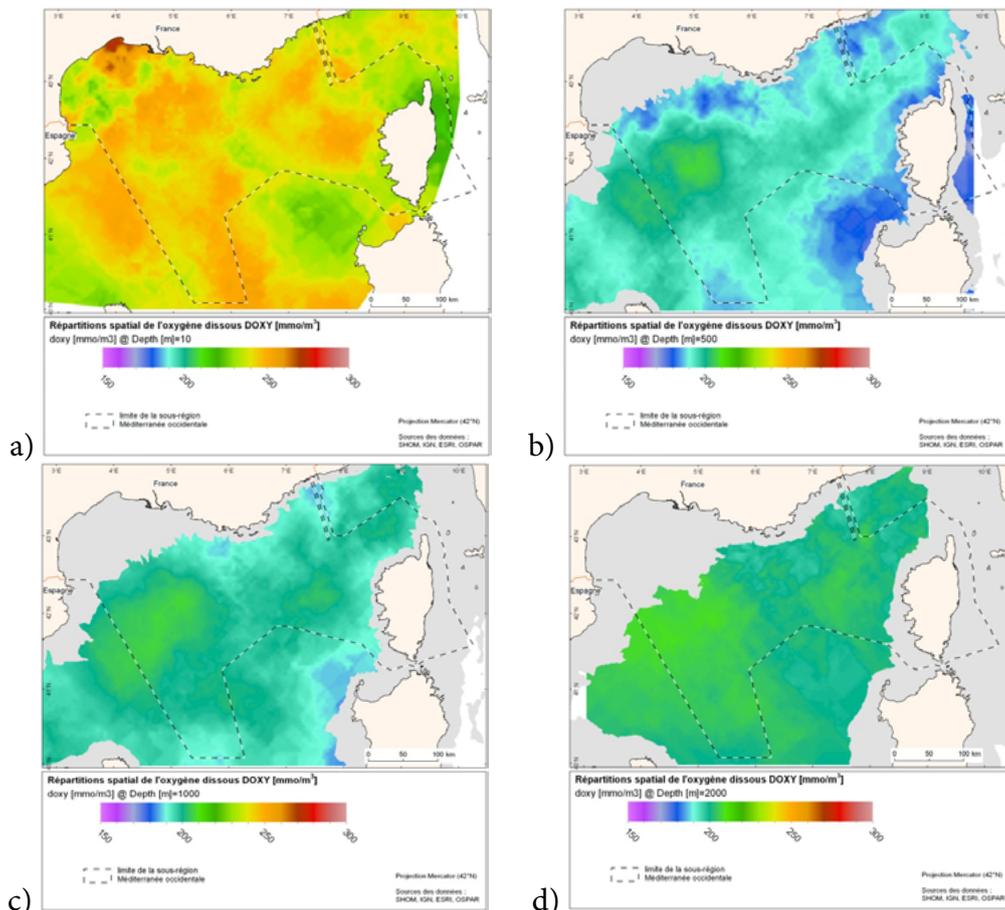


Figure 7 : Distribution spatiale de l'oxygène dissous (en $\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$) à quatre profondeurs de référence : (a) dans les eaux de surface (SW, 10 m) ; (b) dans les LIW (500 m) ; (c) dans le mélange eaux levantine et eaux profondes sous influence tyrrhénienne (TDW, 1 000 m) ; (d) dans les eaux profondes (WMDW, 2 000 m) (Sources : SHOM, IGN, ESRI, OSPAR).

4. CONCLUSION

La répartition spatio-temporelle à différents niveaux bathymétriques, choisis en fonction de leur pertinence vis-à-vis de l'activité biologique et/ou de la ventilation des masses d'eau, devra faire l'objet d'études spécifiques ultérieures. Lorsque les bases de données auront pu être croisées pour compléter ce travail (pour prendre en compte les sels nutritifs et les paramètres biogéochimiques) dans la perspective d'estimer le devenir de l'écosystème méditerranéen marin sur le long terme, nous devons nous attacher à l'étude des tendances annuelles, voire décennales, sur les sites privilégiés, où l'échantillonnage est pertinent pour ce type d'analyse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] The MerMex Group, 2011. Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean, *Progress in oceanography*, 91 (2) : 97–166.
- [2] García H.E., Gordon L.I., 1992. Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations, *Limnology and Oceanography*, 37 (6) : 1307–1312.
- [3] D'Ortenzio F., Ribera d'Alcalà M., 2009. On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis, *Biogeosciences*, 6 : 139–148.
- [4] CIESM, 2001. *Mediterranean Water Mass Acronyms*, 36th CIESM Congress, Monte Carlo, 26 September 2001, CIESM Round table session. Monaco, CIESM, 3 p.
- [5] Millot C., 1999. Circulation in the Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems*, 20 (1–4) : 423–442.
- [6] Millot C., Taupier-Letage I., 2005. Circulation in the Mediterranean Sea. In *The Mediterranean Sea*, Saliot A. (ed.). Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, *Handbook of Environmental Chemistry*, Volume 5–K : 29–66.