

CARAC

TERIS

TIQUES ET

MANCHE - MER DU NORD

ÉTAT

ÉCOLO

GIQUE

CARACTÉRISTIQUES ET ÉTAT ÉCOLOGIQUE

MANCHE - MER DU NORD

JUIN 2012

ÉTAT PHYSIQUE ET CHIMIQUE Caractéristiques chimiques Acidification du milieu marin

Catherine Goyet
(UPVD/IMAGES, Perpignan).

Avec la participation de
Véronique Guglielmi,
Yves Maurissen
et Annick Fabre.



Nous nous intéressons ici aux variations spatio-temporelles des flux air-mer de CO₂ et du pH dans la sous-région marine Manche-mer du Nord, qui correspond à la Manche et au sud de la mer du Nord (ou Baie Flamande).

Ce secteur est caractérisé par de faibles profondeurs, de forts courants de marée, et d'importants apports fluviaux en nutriments ainsi qu'en carbone organique et inorganique, provenant du Rhin, de la Meuse, de l'Escaut, de la Tamise, de la Somme et de la Seine.

Ces apports fluviaux ont deux effets opposés sur le système des carbonates : les nutriments, en augmentant la production primaire, amènent à un comportement de type puits de CO_2 atmosphérique, tandis que le carbone amène au comportement opposé, de type source : l'apport de carbone inorganique et la dégradation microbienne de la matière organique augmentent la pression partielle de CO_2 dans l'eau.

De plus, l'impact de ces effets n'est pas le même partout : les apports fluviaux sont plus importants dans les eaux côtières que dans les eaux du large, et les fleuves n'ont pas tous les mêmes propriétés physico-chimiques.

Ceci conduit à de grandes variations, à la fois spatiales et saisonnières, des flux air-mer de CO_2 et du pH, selon qu'un effet prédomine par rapport à l'autre.

Par ailleurs, des variations inter-annuelles sont aussi notées : en moyenne sur l'année, l'ensemble de la zone alterne entre puits et source de CO_2 atmosphérique.

Du fait de la grande variabilité des paramètres du système des carbonates, la disponibilité de données régulièrement échantillonnées à la fois dans le temps et dans l'espace, est ici cruciale. Des modèles 3D couplant phénomènes biogéochimiques et phénomènes hydrodynamiques ont été proposés pour extrapoler les mesures : le modèle MIRO- CO_2 & CO [1], et le modèle ECOHAM [2] [3].

1. VARIABILITÉ SAISONNIÈRE ET SPATIALE DES FLUX AIR-MER DE CO₂

Les flux air-mer sont estimés à partir de la pression partielle de CO₂ dans les eaux de surface. La pression est elle-même donnée soit par des mesures, soit par des extrapolations de ces mesures.

Les différentes études s'accordent sur une pression partielle très variable selon la date et le lieu, avec une étendue des valeurs allant de 100 à 750 ppm.

1.1. CYCLE SAISONNIER

Tous les résultats, depuis ceux de Frankignoulle *et al.* [4] sur des mesures de 1992 et 1993 jusqu'à ceux de Gypens *et al.* [1] sur des simulations de 1994 à 2004, mettent en évidence des variations saisonnières fortes du flux air-mer de CO₂.

À l'échelle du secteur tout entier, un cycle saisonnier apparaît [1] [5].

La zone est successivement, par rapport au CO₂ atmosphérique :

- au printemps, un puits important (forte production primaire à cause de l'efflorescence du phytoplancton), de taux entre 1,2 et 20,2 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 0,44 et 7,38 mol·m⁻²·an⁻¹ [1] ;
- en été, une source faible, en raison de l'augmentation de la température de surface, qui diminue le coefficient de solubilité du CO₂ dans l'eau de mer, et du début de la dégradation de la matière organique produite au printemps ;
- en automne, une source importante (forte dégradation de la matière organique) ;
- en hiver, un puits faible.

La moyenne annuelle (cf. § suivant) est un flux très faible, variant autour de zéro.

Ce cycle saisonnier est confirmé par différentes études portant sur des périodes précises de l'année. Par exemple, Bozec *et al.* [6] établissent que, durant l'été 2001, dans la Manche et le sud de la mer du Nord, il n'y a pas de stratification, la colonne d'eau toute entière est mélangée par les forts courants de marée, et le secteur est une source de CO₂ atmosphérique, à un taux compris entre 0,8 et 1,7 mmol·m⁻²·jour⁻¹ soit entre 0,29 et 0,62 mol·m⁻²·an⁻¹.

À partir de mesures effectuées en 2003 et 2004, Gypens *et al.* [1] ont estimé les flux dans la Manche et le sud de la mer du Nord, de 1994 à 2004, en utilisant un modèle 3D. Ils concluent que le secteur est un puits de CO₂ atmosphérique de décembre à juin, captant entre 0,6 et 3,5 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 0,22 et 1,28 mol·m⁻²·an⁻¹ et une source de CO₂ pour l'atmosphère de juillet à novembre, émettant entre 0,3 et 3,7 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 0,11 et 1,35 mol·m⁻²·an⁻¹.

Ce cycle saisonnier se décompose en deux cycles différents, selon qu'il s'agit des eaux du large ou des eaux côtières (et des panaches fluviaux).

Les eaux du large [1] [5] [7] suivent le même type de cycle que celui du secteur tout entier et sont ainsi successivement, par rapport au CO₂ atmosphérique :

- au printemps, un puits ;
- en été, une source : taux entre 3,1 et 13,2 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 1,13 et 4,82 mol·m⁻²·an⁻¹ [1] ;
- en automne, une source, moins importante qu'en été ;
- en hiver, un puits : taux entre 1,2 et 6,2 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 0,44 et 2,26 mol·m⁻²·an⁻¹ [1].

La moyenne annuelle (cf. § suivant) est un puits. Ce résultat est confirmé par Frankignoulle *et al.* [8], qui ont estimé le cycle saisonnier et le flux annuel des eaux du large, entre 1993 et 1999, dans la sous-région marine Manche-mer du Nord.

Les eaux côtières et les panaches fluviaux [1] [5] [9] [10] suivent un cycle différent ; ils sont successivement, par rapport au CO₂ atmosphérique :

- au printemps, un puits, plus important que celui des eaux du large à la même période (seule exception notée par Gypens *et al.* [1] : le panache fluvial de la Tamise, qui se comporte comme une source) ;
- en été, un puits : taux entre 2,4 et 11,2 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 0,88 et 4,09 mol·m⁻²·an⁻¹ [1] ;
- en automne, une source (importante dans les panaches fluviaux, cf. [1]) ;
- en hiver, une source : taux entre 2,4 et 12,0 mmol·m⁻²·jour⁻¹, soit entre 0,88 et 4,38 mol·m⁻²·an⁻¹ [1].

La moyenne annuelle (cf. § suivant) est une source.

On peut noter que l'amplitude des variations saisonnières est plus importante pour les eaux côtières et les panaches fluviaux que pour les eaux du large ; au large, l'amplitude est plus importante dans le sud de la mer du Nord que dans la Manche.

1.2. MOYENNES ANNUELLES

Chen *et al.* [7], à partir d'une synthèse mondiale et d'une mise à jour des différentes mesures disponibles de la pression partielle de CO₂ [11] [12] démontrent que le secteur considéré ici ne fait que suivre le comportement de toute mer épicontinentale : à l'échelle annuelle, les estuaires (internes et externes) des fleuves et les eaux côtières se comportent comme des sources de CO₂ pour l'atmosphère, avec une émission moyenne mondiale de CO₂ de 32,1 mol·m⁻²·an⁻¹, tandis que les eaux du large – en dehors donc des panaches fluviaux – sont des puits de CO₂ atmosphérique (absorption moyenne mondiale de CO₂ de 1,1 mol·m⁻²·an⁻¹).

Par exemple, Frankignoulle *et al.* [13] avaient établi une émission moyenne de CO₂ atmosphérique de 62,1 mol·m⁻²·an⁻¹ à l'estuaire interne des fleuves européens – 39,7 mol·m⁻²·an⁻¹ pour le Rhin ; 63,0 mol·m⁻²·an⁻¹ pour l'Escaut ; 73,6 mol·m⁻²·an⁻¹ pour la Tamise – et de 3,7 mol·m⁻²·an⁻¹ à l'estuaire externe.

Les résultats de Borges *et al.* [9] [10] sont du même ordre de grandeur : le panache fluvial de l'Escaut, entre 1995 et 1999, est une source de CO₂ à raison de 1,10 mol·m⁻²·an⁻¹ ou 1,89 mol·m⁻²·an⁻¹ (selon la méthode d'estimation du flux utilisée) ; les eaux du large, en-dehors du panache de l'Escaut, sont un puits, avec un taux variant entre 0,33 mol·m⁻²·an⁻¹ et 1,36 mol·m⁻²·an⁻¹, ou entre 0,58 mol·m⁻²·an⁻¹ et 2,28 mol·m⁻²·an⁻¹, selon la méthode d'estimation utilisée.

À l'échelle maintenant de l'ensemble du secteur, Schiettecatte *et al.* [14] donnent le sud de la mer du Nord comme un faible puits de CO₂ atmosphérique au taux de 0,7 mol·m⁻²·an⁻¹ pour la période 2003-2004, tandis que Prowe *et al.* [2] le donnent comme une faible source au taux de 0,78 mol·m⁻²·an⁻¹, selon des simulations réalisées avec un modèle 3D couplé physique-biogéochimique, à partir de données de 2001 et 2002. Kühn *et al.* [3] utilisent le même modèle que Prowe *et al.* [2] pour une période différente (1995-1996), et confirment le comportement de source faible.

Borges *et al.* [5], à partir de mesures effectuées entre 1995 et 1999, donnent la Manche comme un secteur en équilibre par rapport à l'atmosphère : le flux moyen annuel serait nul.

Les moyennes annuelles calculées par Gypens *et al.* [1] entre 1994 et 2004, varient entre -0,33 mol·m⁻²·an⁻¹ (puits) et + 0,22 mol·m⁻²·an⁻¹ (source) dans le sud de la mer du Nord, et entre -0,21 mol·m⁻²·an⁻¹ (puits) et + 0,13 mol·m⁻²·an⁻¹ (source) dans la Manche. Cela donne au final, en moyenne sur la période 1994-2004, un faible puits de CO₂ atmosphérique dans le sud de la mer du Nord et la Manche : 0,15 mol·m⁻²·an⁻¹ pour le sud de la mer du Nord et 0,08 mol·m⁻²·an⁻¹ pour la Manche.

Les variations inter-annuelles ne s'expliquent pas de la même manière dans la Manche et dans le sud de la mer du Nord [1] [15]. Dans la mer du Nord, elles sont liées essentiellement aux variations des apports fluviaux et des activités biologiques qui en découlent ; dans la Manche, les apports fluviaux sont moins prédominants et les variations inter-annuelles sont liées davantage aux changements de la température de surface et des caractéristiques du vent.

En définitive, toutes les études s'accordent sur un flux annuel global de l'ensemble du secteur faible, variant autour de zéro.

Le tableau 1 ci-dessous récapitule les différentes variations spatio-temporelles observées [1].

	EAUX CÔTIÈRES ET PANACHES FLUVIAUX	EAUX DU LARGE (HORS PANACHES FLUVIAUX)	ZONE ENTIÈRE
Printemps	Puits de CO ₂	Puits de CO ₂	Puits important de CO ₂ De -0,44 à -7,38 mol·m ⁻² ·an ⁻¹
Été	Puits de CO ₂ -0,88 à -4,09 mol·m ⁻² ·an ⁻¹	Source de CO ₂ 1,13 à 4,82 mol·m ⁻² ·an ⁻¹	Source faible de CO ₂
Automne	Source de CO ₂	Source de CO ₂	Source importante de CO ₂
Hiver	Source de CO ₂ 0,88 à 4,38 mol·m ⁻² ·an ⁻¹	Puits de CO ₂ -0,44 à -2,26 mol·m ⁻² ·an ⁻¹	Puits faible de CO ₂
Année entière	Source de CO ₂	Puits de CO ₂	Flux nul de CO ₂

Tableau 1 : Distribution spatio-temporelle des flux air-mer (Sources : Gypens *et al.*, 2011 (1)).

Notons par ailleurs que Thomas *et al.* [16] indiquent une diminution (aux causes non totalement expliquées) à long terme du taux d'absorption dans la mer du Nord.

2. ÉTUDE DU PH

Le pH des eaux de surface connaît lui aussi de grandes variations spatiales et saisonnières.

Les résultats de Gypens *et al.* [1], récapitulés dans le tableau 2, sont les suivants : en hiver, les eaux du large ont un pH compris entre 7,95 et 8,07 tandis que le pH des eaux côtières et surtout des panaches fluviaux; tombe à 7,95 à cause de la décomposition de la matière organique. Au printemps et en été, le pH des eaux côtières augmente jusqu'à 8,60, du fait de l'activité du phytoplancton. En automne, le pH des eaux côtières est plus faible – 7,95 à l'embouchure de l'Escaut et de la Tamise – que celui des eaux situées plus au large (pouvant atteindre 8,07) du fait de la prédominance des processus hétérotrophes émettant du CO₂.

	EAUX CÔTIÈRES ET PANACHES FLUVIAUX	EAUX DU LARGE (HORS PANACHES FLUVIAUX)
Hiver	descend jusqu'à 7,95	7,95 à 8,07
Printemps – été	augmente jusqu'à 8,60	
Automne	descend jusqu'à 7,95	augmente jusqu'à 8,07

Tableau 2 : Distribution spatio-temporelle du pH (1).

En moyenne annuelle, Gypens *et al.* [1] notent une baisse sensible du pH dans la Manche et dans le sud de la mer du Nord pour la période 1994-2004. Dans la Manche, cette baisse annuelle du pH est proche de celle directement attendue du fait de l'augmentation du CO₂ atmosphérique dans la zone à la même période. La baisse dans la mer du Nord est plus importante que celle dans la Manche. Elle est plus forte que celle directement liée à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Elle dénote sans doute un déclin de la production primaire, lié à des changements dans la composition des apports en nutriments amenés par les fleuves.

La figure 1 présente les données disponibles pour trois années consécutives (2006, 2007 et 2008) dans la sous-région marine Manche-mer du Nord. D'après cette figure, il est clair que la mer du Nord a une tendance à être plus « basique » que la Manche. L'évolution temporelle sur ces trois ans indique que l'eau de mer de surface de la Manche s'acidifie mais de nouvelles mesures sont nécessaires pour confirmer cette tendance.

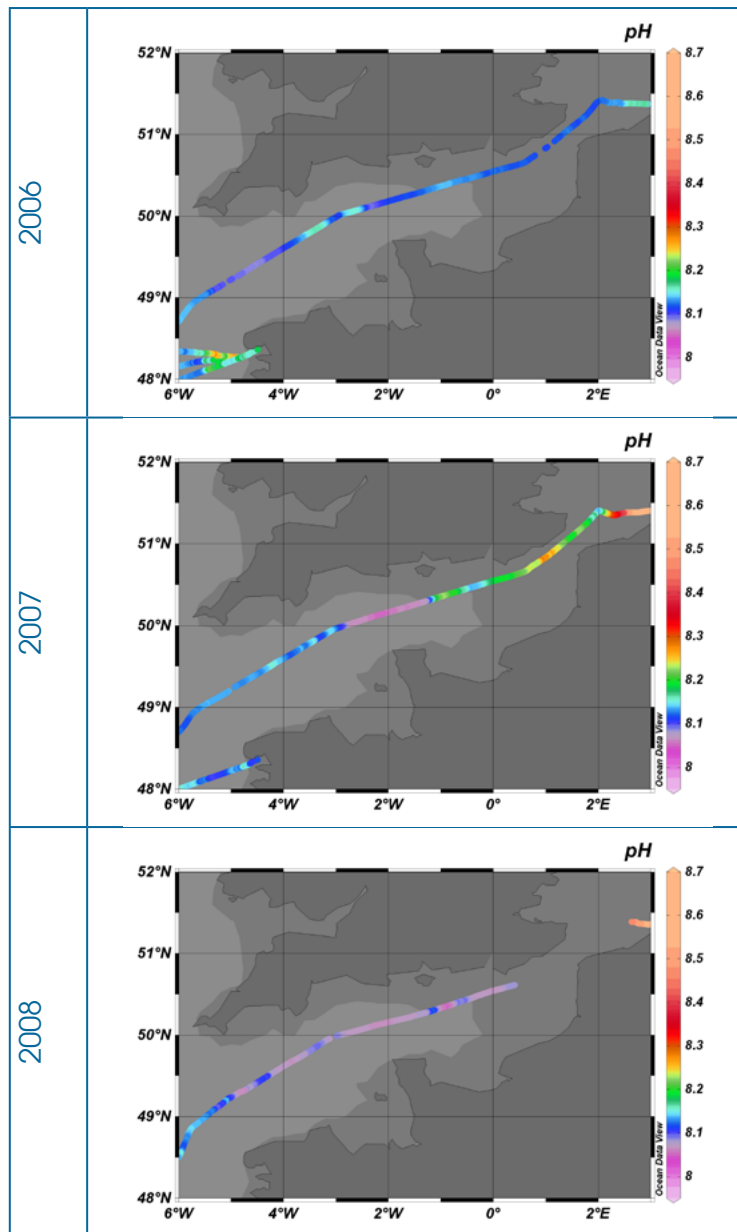


Figure 1 : Distribution du pH en surface dans la Manche et le sud de la mer du Nord pour les trois années consécutives 2006, 2007 et 2008 (Sources : UPVD/IMAGES, 2011).

3. CONCLUSION

De manière générale, cette sous-région marine se comporte comme une source de CO_2 atmosphérique en été et en automne et comme un puits en hiver et au printemps. À l'échelle annuelle, elle semble avoir un comportement relativement neutre vis à vis des échanges de CO_2 à travers l'interface air-mer.

Le peu d'études menées dans ces régions ne permet pas encore d'évaluer le carbone anthropique séquestré dans ces eaux et de faire le bilan précis de l'acidification dans ces régions océaniques. De nouvelles campagnes de mesures sont indispensables pour quantifier précisément l'évolution de l'acidification dans cette région.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Gypens N., Lacroix G., Lancelot C., Borges A.V., 2011. Seasonal and inter-annual variability of air-sea CO₂ fluxes and seawater carbonate chemistry in the Southern North Sea. *Progress in Oceanography*, 88 (1-4), 59-77.
- [2] Prowe A.E.F., Thomas H., Pätsch J., Kühn W., Bozec Y., Schiettecatte L.-S., Borges A.V., de Baar H.J.W., 2009. Mechanisms controlling the air-sea CO₂ flux in the North Sea. *Continental Shelf Research*, 29, 1801-1808.
- [3] Kühn W., Pätsch J., Thomas H., Borges A.V., Schiettecatte L.-S., Bozec Y., Prowe A.E.F., 2010. Nitrogen and carbon cycling in the North Sea and exchange with the North Atlantic – a model study, part II : carbon budget and fluxes. *Continental Shelf Research*, 30, 1701-1716.
- [4] Frankignoulle M., Bourge I., Canon C., Dauby P., 1996a. Distribution of surface seawater partial CO₂ pressure in the English Channel and in the Southern Bight of the North Sea. *Continental Shelf Research*, 16 (3), 381-395.
- [5] Borges A.V., Frankignoulle M., 2003. Distribution of surface carbon dioxide and air-sea exchange in the English Channel and adjacent areas. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C5).
- [6] Bozec Y., Thomas H., Elkalay K., de Baar H.J.W., 2005. The continental shelf pump for CO₂ in the North Sea – evidence from summer observation. *Marine Chemistry*, 93 (2-4), 131-147.
- [7] Chen C.T.A., Borges A.V., 2009. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean : continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep-Sea Research Part II*, 56, 578-590.
- [8] Frankignoulle M., Borges A.V., 2001. European continental shelf as a significant sink for atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochemical Cycles*, 15 (3), 569-576.
- [9] Borges A.V., Frankignoulle M., 1999. Daily and seasonal variations of the partial pressure of CO₂ in surface seawater along Belgian and southern Dutch coastal areas. *Journal of Marine Systems*, 19, 251-266.
- [10] Borges A.V., Frankignoulle M., 2002. Distribution and air-water exchange of carbon dioxide in the Scheldt plume off the Belgian coast. *Biogeochemistry*, 59 (1-2), 41-67.
- [11] Borges A.V., Delille B., Frankignoulle M., 2005. Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean : Diversity of ecosystems counts. *Geophysical Research Letters*, 32 (14), doi : 10.1029/2005GL023053.
- [12] Cai W.J., Dai M., Wang Y., 2006. Air-sea exchange of carbon dioxide in ocean margins : a province-based synthesis. *Geophysical Research Letters*, 33, doi : 10.1029/2006GL026219.
- [13] Frankignoulle M., Abril G., Borges A.V., Bourge I., Canon C., Delille B., Libert E., Théate J.-M., 1998. Carbon dioxide emission from European estuaries. *Science*, 282, 434-436.
- [14] Schiettecatte L.-S., Thomas H., Bozec Y., Borges A.V., 2007. High temporal coverage of carbon dioxide measurements in the Southern Bight of the North Sea. *Marine Chemistry*, 106.
- [15] Frankignoulle M., Elskens M., Biondo R., Bourge I., Canon C., Desgain S., Dauby P., 1996b. Distribution of inorganic carbon and related parameters in surface seawater of the English Channel during spring 1994. *Journal of Marine Systems*, 7 (2-4), 427-434.
- [16] Thomas H., Prowe F., van Heuve S., Bozec Y., de Baar H.J.W., Schiettecatte L.-S., Suykens K., Koné M., Borges A.V., Lima I.D., Doney S.C., 2007. Rapid decline of the CO₂ buffering capacity in the North Sea and implications for the North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB4001.