

CARAC

TERIS

TIQUES ET

GOLFE DE GASCOGNE

ÉTAT

ÉCOLO

GIQUE

CARACTÉRISTIQUES ET ÉTAT ÉCOLOGIQUE

GOLFE DE GASCOGNE

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,

Annick Fabre.



Dans le golfe de Gascogne, les mesures des paramètres du système des carbonates indiquent que le nord de l'océan Atlantique séquestre de plus en plus de carbone inorganique total (C_T).

Le système des carbonates dans l'eau de mer est défini par les équilibres chimiques suivants :

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
- $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$
- $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

Avec $C_T = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$.

Lorsque le dioxyde de carbone de l'atmosphère pénètre dans l'océan à travers l'interface océan-atmosphère, il réagit avec l'eau pour former l'acide carbonique (H_2CO_3) et par conséquent augmente l'acidité (diminution du pH) des océans.

L'étude biogéochimique des efflorescences des coccolithophoridés dans le nord du golfe de Gascogne (à la limite avec le plateau Celtique), en juin 2004 [1] et en juin 2006 [2], indique une grande absorption de carbone total par le phytoplancton. Cette région est un fort puits de CO_2 , et une zone où la calcification est importante.

Relativement récemment, Padin *et al.* [3] [4] [5] ont entrepris l'étude des flux air-mer de CO_2 basée sur des relations

empiriques d'extrapolation et des observations par télédétection de la température des eaux de surface ainsi que de la concentration en chlorophylle. Les résultats indiquent une nette absorption de CO₂ par les eaux de surface, avec un flux annuel moyen air-mer de CO₂ estimé à $-2,5 \pm 0,3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ entre septembre 1997 et décembre 2004.

Les données de trois campagnes océanographiques successives ont permis à Suykens *et al.* [6] de confirmer que le nord du golfe de Gascogne est un puits de CO₂ relativement important, et ce durant toute la période d'efflorescence des coccolithophoridés.

Suykens *et al.* [6] puis Harlay *et al.* [2] rapportent que la calcification liée à l'efflorescence des coccolithophoridés, en augmentant la pression partielle de CO₂ dans l'eau, peut provoquer une diminution de l'absorption de CO₂ mais que ce phénomène n'est pas suffisant pour renverser la direction du flux.

Enfin, l'estimation des concentrations de carbone anthropique (dû à l'activité humaine et non à la production naturelle de CO₂) dans les différentes masses d'eau [7] souligne le rôle important (et peut être à l'heure actuelle encore sous-estimé) de cette région comme un puits de CO₂.

Le projet ECO – évolution de l'augmentation du CO₂ – a été planifié et développé pour agrandir la banque de données de mesures de fugacité $f\text{CO}_2$ ¹ dans le golfe de Gascogne [5]. Les mesures ont été effectuées à bord de navires d'opportunité, le long de la route commerciale entre Vigo en Espagne et Saint-Nazaire en France, entre décembre 2002 et décembre 2004.

¹ La fugacité est proportionnelle à la pression partielle ; elle serait égale à la pression partielle si le CO₂ était un gaz parfait. $f\text{CO}_2 = \beta[\text{CO}_2]$ où β est une fonction de la température et salinité de l'eau.

Le calcul des flux air-mer de CO₂ peut être effectué soit par la méthode « *in situ* » soit par la méthode « d'extrapolation », certainement moins précise.

Dans le cadre du projet VACLAN – VARIabilidad CLimática en el Atlántico Norte², les mesures d'alcalinité totale et de pH sont disponibles le long d'une section traversant le golfe depuis le cap Ortegal (Espagne) jusqu'à Concarneau (France) en septembre 2005 [7].

Des mesures similaires sont aussi disponibles pour d'autres périodes entre 1977 et 2010, mais pour des zones aux extrémités sud et sud-ouest du golfe. On peut les trouver dans la base de données CARINA³ ; ou sur le site des campagnes RADPROF réalisées dans le cadre de VACLAN⁴.

² <http://www.vaclan-ieo.es/index.html>

³ http://cdiac.ornl.gov/oceans/CARINA/Carina_table.html

⁴ <http://www.vaclan-ieo.es/index.html>

1. MÉTHODE D'ESTIMATION DES FLUX AIR-MER DE CO₂ DANS LE GOLFE DE GASCOGNE

Le cycle du carbone dans les océans est principalement contrôlé par la circulation océanique et par l'activité biologique (photosynthèse et reminéralisation) qui a lieu principalement dans les eaux de surface.

Les flux à travers l'interface air-mer de CO₂ sont généralement calculés à partir de deux méthodes empiriques [5] :

- 1) La première, que l'on peut appeler méthode « *in situ* », nécessite des mesures de température de l'eau de mer de surface, des vitesses du vent, et de la différence des pressions partielles entre l'atmosphère et l'eau de mer de surface ;
- 2) La deuxième, que l'on peut appeler méthode « par extrapolation » (souvent utilisée lorsque les données nécessaires pour utiliser la méthode « *in situ* » ne sont pas disponibles) nécessite uniquement des mesures de la température des eaux superficielles et de leur concentration en chlorophylle *a* estimées par télédétection.

1.1. MÉTHODE « IN SITU »

Le flux d'échange de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan, FCO₂ en mol·m⁻²·an⁻¹, est calculé selon l'équation suivante :

$$FCO_2 = \alpha k s \Delta fCO_2 \quad (1)$$

où :

- *s* est la solubilité du gaz (dépendant de la température de l'eau et de la salinité), en mol·kg⁻¹·atm⁻¹ ;
- *k* est la vitesse moyenne mensuelle de transfert du gaz, en cm·h⁻¹, calculée avec les coefficients de Wanninkhof [9] et avec l'estimation de la vitesse moyenne du vent donnée par le NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center ;
- α est un facteur de conversion ;
- ΔfCO_2 est la différence entre la fugacité du CO₂ dans l'eau et celle dans l'air :

$$\Delta fCO_2 = fCO_2^{eau} - fCO_2^{air}$$

Il est à noter que cette expression ne tient pas compte du gradient possible de température entre la surface de l'eau et la limite inférieure de la couche de mélange.

1.2. MÉTHODE « PAR EXTRAPOLATION »

Les mesures par télédétection de la température de la surface de la mer (SST) et de la concentration en chlorophylle *a* (*chl_a*) sont couplées pour estimer la fugacité du CO₂ dans l'eau de mer fCO_2^{eau} via une équation non linéaire (équation du second degré) :

$$fCO_2^{eau} = A SST + B SST^2 + C chl_a + D chl_a^2 + E \quad (2)$$

où les coefficients (de A à E) sont calculés à partir de l'algorithme de Marquard-Levenberg.

La principale manière de déterminer la concentration en chlorophylle *a* est de mesurer la quantité de lumière absorbée pour une longueur d'onde particulière, par exemple 443 nm. Des algorithmes analytiques permettent ensuite de convertir ces mesures en données de concentration de chlorophylle *a*.

L'équation (2) est construite à partir de relations empiriques. Elle permet l'extrapolation des mesures dans une région comprise entre 44° N - 46° N et 9° W - 3° W pour l'étude de la variabilité spatiale de la fugacité fCO_2^{eau} à l'intérieur du golfe de Gascogne.

La variabilité temporelle a elle aussi été étudiée à partir de l'extrapolation spatio-temporelle de mesures satellitaires (SeaWiFS : septembre 1997 – décembre 2004) de la température de surface SST et de la concentration en chlorophylle *a*.

Lors d'un cycle saisonnier, les températures mesurées par télédétection montrent un écart de $-0,2 \pm 0,6$ °C avec celles mesurées *in situ*. Cela s'explique par le fait que la télédétection ne mesure qu'une fine couche des eaux de surface et n'atteint pas 3 mètres de profondeur.

De même les mesures de la concentration en chlorophylle *a in situ* et par télédétection affichent un écart d'environ $0,15 \pm 0,33$ mg·m⁻³. Les différences maximales (2 mg·m⁻³) ont été observées de mars à juin au moment d'une forte croissance du phytoplancton.

2. RÉSULTATS

Des cartes climatiques montrent la distribution des flux air-mer de CO₂, en janvier, avril, juillet et octobre [5].

2.1. VARIABILITÉ SAISONNIÈRE

À partir des valeurs de SST (température de surface) et de la concentration en chlorophylle *a* mesurées par télédétection, les résultats des calculs de ΔfCO_2 sont les suivants :

HIVER	Forte homogénéisation des paramètres biogéochimiques due à l'intense mélange vertical	$\Delta fCO_2 = -37 \pm 1 \mu\text{atm}$	Puits de CO ₂
PRINTEMPS	Forte productivité de phytoplancton qui entraîne une disparité dans la distribution des flux air-mer de CO ₂ : absorption nette de CO ₂ .	$\Delta fCO_2 = -56 \pm 4 \mu\text{atm}$	Puits important de CO ₂
ÉTÉ	La température contrôle la distribution des flux air-mer de CO ₂ . Les concentrations en chlorophylle <i>a</i> sont négligeables, dues à la consommation totale des sels nutritifs dans la couche de mélange.	Juillet : $\Delta fCO_2 = -8 \pm 6 \mu\text{atm}$	Puits de CO ₂
		Août : $\Delta fCO_2 = 11 \pm 9 \mu\text{atm}$	Source de CO ₂
AUTOMNE	Marque la transition entre l'été et l'hiver.	$\Delta fCO_2 = -18,5 \pm 2,6 \mu\text{atm}$	Puits de CO ₂

Tableau 1 : Distribution saisonnière des ΔfCO_2 dans le golfe de Gascogne (5)

En moyenne annuelle, le golfe de Gascogne se comporte comme un puits de CO₂.

2.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE À LONG TERME

La variabilité inter-annuelle a été étudiée de septembre 1997 à décembre 2004 : la distribution temporelle des paramètres SST, ΔfCO_2 , vitesse du vent et FCO₂, calculée par la méthode des moindres carrés, montre des variabilités semestrielles, trimestrielles et annuelles.

ΔfCO_2	CONCENTRATION	PÉRIODE
+ 26 μatm	Maximum	1997-2004
- 61 μatm	Minimum	1997-2004
+ 11 \pm 9 μatm	Moyennes mensuelles maximales	Août (coïncident avec SST maximum)
- 55 \pm 6 μatm	Moyennes mensuelles minimales	Avril (coïncident avec le bloom du phytoplancton)

Tableau 2 : Distribution temporelle des ΔfCO_2 (1997-2004), d'après Padin *et al* (5)

3. ESTIMATIONS DU FLUX DE CO₂

L'estimation du flux de CO₂ (FCO₂), à travers l'interface air-mer dans le golfe de Gascogne, à partir des $\Delta f\text{CO}_2$ calculés par Padin *et al.* [5], est de $-2,5 \pm 0,3 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Ceci correspond à une absorption de $2,9 \text{ Tg C}\cdot\text{an}^{-1}$. Les moyennes annuelles vont de $-2,0 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ à $-2,9 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$.

C'est donc un flux relativement important puisque, pour comparaison, Borges *et al.* [8] indiquent que le flux moyen annuel des mers marginales européennes (entre 32° N et 57° N) est de l'ordre de seulement $-1,84 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$.

Les estimations réalisées dans le golfe de Gascogne suggèrent ainsi que ce dernier se comporte comme un puits important de CO₂ atmosphérique, dû principalement à la subduction des eaux modales⁵ qui est importante dans cette région [7] [10].

4. ESTIMATION DU CARBONE ANTHROPIQUE

Dans le cadre du projet VACLAN, une estimation du carbone anthropique dans le golfe de Gascogne a été réalisée [7], en lien avec l'étude de la distribution des différentes masses d'eau.

Cette estimation amène à un inventaire du carbone anthropique dans la colonne d'eau compris, pour septembre 2005, entre $87 \pm 5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}$ et $95 \pm 5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}$ (selon la méthode d'estimation utilisée), soit une capture entre 3 et 5 Tg C $\cdot\text{an}^{-1}$.

Ces chiffres correspondent à une séquestration égale à entre 6 et 10 % de la séquestration totale estimée pour l'océan Atlantique Nord.

Ils sont cohérents avec les estimations moyennes annuelles données par Padin *et al.* [5] pour la période 1997-2004 ($2,9 \text{ TgC}\cdot\text{an}^{-1}$) et indiquent une augmentation de l'accumulation de carbone anthropique (l'inventaire du carbone anthropique dans l'océan Atlantique pour 1994 est égal à $75 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}$).

5. CONCLUSION

Plusieurs études récentes, faisant appel à des périodes, des mesures et des méthodes différentes, confirment toutes aujourd'hui le rôle important du golfe de Gascogne comme puits de CO₂ atmosphérique. Elles soulignent l'augmentation de carbone inorganique total (C_T) dans cette zone, ainsi que le caractère peut-être sous-évalué de l'importance relative du golfe de Gascogne par rapport à d'autres régions de l'Atlantique Nord.

Il serait donc judicieux de mesurer périodiquement – au moins 2 fois (été et hiver) par an sur 10 ans – les concentrations de carbone inorganique total (C_T) dans le golfe de Gascogne afin de quantifier précisément l'acidification de cette région océanique.

⁵ Transport d'eaux hivernales homogènes de la couche de mélange vers le fond.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Harlay J., Borges A.V., Van Der Zee C., Delille B., Godoi R.H.M., Schiettecatte L.-S., Røevros N., Aerts K., Lapernat P.-E., Rebreanu L., Groom S., Daro M.-H., Van Grieken R., Chou L., 2010. Biogeochemical study of a coccolithophore bloom in the northern Bay of Biscay (NE Atlantic Ocean) in June 2004. *Progress In Oceanography*, 86 (3-4), 317-336.
- [2] Harlay J., Chou L., De Bodt C., Van Oostende N., Piontek J., Suykens K., Engel A., Sabbe K., Groom S., Delille B., Borges A.V., 2011. Biogeochemistry and carbon mass balance of a coccolithophore bloom in the northern Bay of Biscay (June 2006). *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 58 (2), 111-127.
- [3] Padin X.A., Vázquez-Rodríguez M., Rios A.F., Pérez F.F., 2007. Atmospheric CO₂ measurements and error analysis on seasonal air-sea CO₂ fluxes in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, 66 (1-4), 285-296.
- [4] Padin X.A., Castro C.G., Rios A.F., Pérez F.F., 2008. fCO₂^{sw} variability in the Bay of Biscay during ECO cruises. *Continental Shelf Research*, 28 (7), 904-914.
- [5] Padin X.A., Navarro G., Gilcoto M., Rios A.F., Pérez F.F., 2009. Estimation of air-sea CO₂ fluxes in the Bay of Biscay based on empirical relationships and remotely sensed observations. *Journal of Marine Systems*, 75 (1-2), 280-289.
- [6] Suykens K., Delille B., Chou L., De Bodt C., Harlay J., Borges A.V., 2010. Dissolved inorganic carbon dynamics and air-sea dioxide fluxes during coccolithophore blooms in the northwest European continental margin (northern Bay of Biscay). *Global Biogeochemical cycles*, 24, GB3022, doi : 10.1029/2009GB003730.
- [7] Castaño-Carrera M., Pardo P.C., Alvarez M., Lavin A., Rodriguez C., Carballo C., Rios A.F., Pérez F.F., 2012. Anthropogenic carbon and water masses in the Bay of Biscay. *Scientia Marina* 38(1B) : 191-207.
- [8] 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.
- [9] Wanninkhof R., 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research*, 97(C5), 7373-7382, doi : 10.1029/92JC00188.
- [10] Paillet J., Mercier H., 1997. An inverse model of the eastern North Atlantic general circulation and thermocline ventilation. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 44 (8), 1293-1328.