



## L'Ile Amsterdam : site de référence pour la compréhension du rôle de l'océan dans les changements climatiques à l'échelle de la planète.

Yves Frenot, Directeur-adjoint de l'IPEV

avec les contributions de **Michel Ramonet** et **Jean Sciare**

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, IPSL, unité mixte CNRS-CEA, Gif/Yvette

L'Ile Amsterdam (Figures 1 et 4), située dans l'Océan Indien par 77°32' de longitude Est et 37°50' de latitude Sud, compte parmi les îles les plus isolées au monde, à plus de 3000 km de tout continent. Elle constitue un point singulier extrêmement important dans le maillage des observatoires de la planète, dans une région du monde très pauvre en sites instrumentalisés, comparativement à l'hémisphère nord. Les données scientifiques recueillies dans de tels sites isolés ont de ce fait une valeur inestimable pour comprendre le fonctionnement du système Terre, que ce soit dans les domaines de géophysique interne ou externe, ou bien encore dans les sciences de l'atmosphère et du climat.



Figure 1 - Ile Amsterdam vue d'hélicoptère (Photo H. Pérau/IPEV)

Située sur la route des Indes, l'Ile Amsterdam fut très tôt fréquentée par les marins de toutes nationalités. C'est en 1843 qu'elle fut revendiquée par la France et occupée de manière permanente depuis 1951, avec l'ouverture de la base météorologique « Martin de Viviers ». Depuis cette époque, des programmes scientifiques, et notamment des programmes d'observations pérennes (magnétisme, sismologie, chimie atmosphérique, suivi des populations d'oiseaux etc...) se sont progressivement mis en place. Ils sont actuellement mis en œuvre par l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (IPEV) grâce à la logistique déployée par les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) qui ont également la charge de la base Martin de Viviers.

Parmi les observatoires présents sur l'île, deux sont plus particulièrement au cœur de la problématique générale des changements climatiques et contribuent fortement à la fourniture de données de valeurs exceptionnelles reconnues par des réseaux internationaux et des experts sur le climat (GIEC<sup>1</sup> notamment). Il s'agit des programmes menés par le Laboratoire CEA/CNRS des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) : RAMCES « Réseau Atmosphérique de Mesure des Composés à Effet de Serre » (responsable M. Ramonet – démarrage en 1988) et AEROTRACES « Observatoire sur les Aérosols et Traceurs Atmosphériques dans l'océan Austral », (responsable J. Sciare – démarrage en 1998). Figure 2.



Figure 2 – Observatoire de Pointe Bénédicte, sur l'Ile Amsterdam, où sont réunis les programmes RAMCES et AEROTRACES

<sup>1</sup> Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat

Depuis sa création, l'IPEV a assuré la mise en œuvre de ces deux programmes en fournissant 53 personnels hivernants, 25 personnels en campagne d'été et en contribuant au fonctionnement et équipement à hauteur de 1,6 millions d'euros, en complément du soutien accordé à la fois par le CEA (personnels permanents) et le CNRS. Ces nombres illustrent l'importance portée à ces deux programmes par les organismes scientifiques.

## Le programme RAMCES 27 ans de suivi des concentrations de CO<sub>2</sub> à l'île Amsterdam

### Contexte

La concentration moyenne de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans notre atmosphère ne cesse d'augmenter et a désormais dépassé le seuil des 380 ppm, soit 100 ppm de plus (+35%) que la teneur moyenne préindustrielle (Figure 3). Le plus inquiétant dans la tendance des dernières années est l'accélération observée du taux de croissance: de 1.5 ppm/an dans les années 80, on est passé à 2.0 ppm/an au début des années 2000. Le moteur de cette accélération de la croissance du CO<sub>2</sub> est clairement l'augmentation de l'activité économique mondiale, qui s'appuie sur la consommation de combustibles fossiles. Les émissions de CO<sub>2</sub> par l'utilisation des énergies fossiles ont atteint un record en 2008: 8.7 GtC/an.

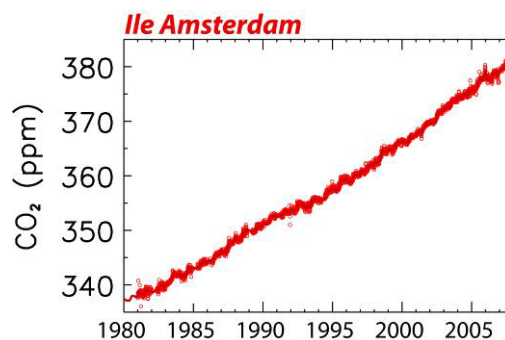


Figure 3 - Suivi des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> à l'île Amsterdam (LSCE/IPEV).

Entre 2000 et 2008 les émissions de CO<sub>2</sub> résultant des activités humaines ont augmenté de 3.4% par an alors que la tendance était de 1% par an dans les années 1990. L'une des raisons de cette accélération est la part de plus en plus importante du charbon comme source d'énergie.

Une injection de 8.7 GtC dans l'atmosphère devrait correspondre à une augmentation moyenne des concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> de l'ordre de 4 ppm. Or les observations donnent une tendance de l'ordre de 2 ppm/an, ce qui ne correspond qu'à environ la moitié de la quantité émise par les activités humaines. C'est la preuve indiscutable qu'à l'échelle globale les océans et les écosystèmes terrestres jouent un rôle de puits de carbone en absorbant chaque année la moitié de nos émissions. Toute perturbation de ces puits naturels, par exemple en réponse au changement climatique, peut donc potentiellement annihiler les efforts de réduction des émissions anthropogéniques. Le suivi et la compréhension des processus mis en jeu dans ces puits de carbone sont donc essentiels pour la prédiction des concentrations futures de CO<sub>2</sub>.

Si le puits de carbone terrestre ne montre pas d'évolution sur les dernières décennies, en dépit d'une forte variabilité interannuelle, le puits océanique semble donner des signes de faiblesse à la fois dans l'océan subantarctique et l'Océan Atlantique Nord. Ces deux régions représentent les principales zones d'absorption du carbone par les océans (Figure 4). Leur rôle de puits de carbone n'est pas remis en cause, mais leur efficacité semble diminuer. Les dernières études indiquent qu'au cours des 50 dernières années la quantité de carbone absorbé par les puits naturels (océans et écosystèmes terrestres) est passée de 60 à 55% des émissions globales. L'estimation de cette tendance reste encore très incertaine, en particulier parce que nous ne disposons que de très peu de séries de mesures longues. Un effet de saturation des puits de carbone aurait un impact majeur sur l'évolution future du CO<sub>2</sub> dans notre atmosphère ; dans ce contexte il est donc essentiel de se donner les moyens de réduire les incertitudes. Seules des mesures de CO<sub>2</sub> précises et de longue durée (à la fois dans l'atmosphère, les océans et les écosystèmes terrestres), associées à des modèles mathématiques de pointe, peuvent nous renseigner sur les mécanismes en jeux et leur tendance à moyen et long termes. C'est pour répondre à ce besoin de séries longues dans les trois réservoirs de carbone (atmosphère, océans, écosystèmes) que le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement met en place l'infrastructure de recherche (TGIR) ICOS (<http://www.icos-infrastructure.eu/>).

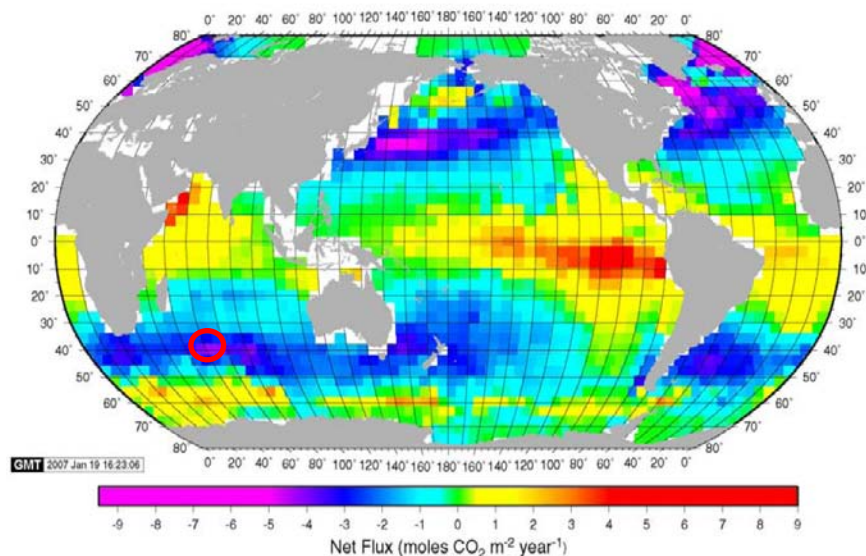


Figure 4 - Carte des échanges de CO<sub>2</sub> moyens entre l'atmosphère et la surface des océans. Les valeurs positives indiquent une émission de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, alors que les valeurs négatives représentent les zones d'absorption du carbone. Le cercle rouge, dans l'Océan Indien, correspond à la région de l'île Amsterdam.

### Le suivi du CO<sub>2</sub> sur l'île Amsterdam

A l'heure actuelle la teneur moyenne du CO<sub>2</sub> atmosphérique et son taux de croissance, sont connus avec précision grâce à un réseau de mesures d'une centaine de sites répartis sur la planète (Figure 5) Cependant la plupart des stations de mesure ont été installées dans le courant des années 2000, et la répartition géographique des points de mesure est très inégale. **Aux réseaux denses en Europe et Amérique du Nord, répondent des « quasi déserts » en Afrique, Sibérie et sur plusieurs bassins océaniques dont les mers du Sud** où la logistique d'observation est complexe à mettre en place.

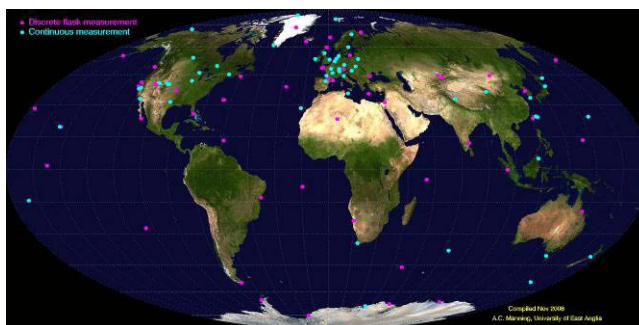


Figure 5 – Réseaux d'observatoires permanents de mesures du CO<sub>2</sub> atmosphérique (points en bleu)

L'observatoire de l'île Amsterdam (Figure 6) présente un rôle privilégié pour plusieurs raisons:



Figure 6 - Observatoire de l'île Amsterdam.

- parmi les déjà rares observatoires de l'hémisphère sud, il est le seul situé dans l'Océan Indien ;
- les mesures de CO<sub>2</sub> y ont été initiées en 1981 ce qui permet d'avoir **l'une des séries de mesure les plus longues**, toutes régions confondues (Figures 3 et 7) ;
- l'observatoire est éloignée des sources de contamination locale et régionale ce qui permet d'avoir une **mesure des concentrations de fond représentative de l'hémisphère Sud** ;
- enfin l'île Amsterdam est située **au cœur de l'une des principales zones d'absorption du CO<sub>2</sub>** (Figure 4). Cette partie de l'océan absorbe en moyenne 15% des émissions d'origine fossile de CO<sub>2</sub>.

L'étude de Le Quéré et al. en 2007<sup>2</sup>, qui s'appuie directement sur les mesures de CO<sub>2</sub> à l'île Amsterdam, indique que depuis le début des années 1980, le puits de CO<sub>2</sub> atmosphérique dans l'Océan Austral a cessé d'augmenter alors que dans le même temps les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> ont très rapidement augmenté. C'est le changement climatique lui-même qui semble être responsable de cette stabilisation. Dans l'hémisphère sud, l'accroissement du trou d'ozone et le réchauffement climatique induisent des variations sur les échanges de chaleur, la température, et en conséquence les vents sont devenus plus forts. L'intensité des vents change la circulation des océans, impliquant des apports d'eau profonde enrichie en CO<sub>2</sub> vers les couches de surface, ce qui limite le pompage de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique.

**Les mesures de CO<sub>2</sub> à l'île Amsterdam sont largement utilisées par la communauté scientifique internationale** dans toutes les études sur les puits de carbone basées sur les inversions atmosphériques ou sur l'approche océanographique **Les mesures sont transmises à la base de données internationale de l'Organisation Mondiale de la Météorologie sur les gaz à effet de serre (OMM/WDCGG).**



Figure 7 - 25 ans de mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'île Amsterdam.

## Le programme AEROTRACE 20 ans de suivi des particules atmosphériques dans l'océan austral

### Contexte

**Les aérosols atmosphériques jouent un rôle important dans le bilan radiatif de la terre mais leurs mécanismes d'influence sur notre climat sont extrêmement complexes et mal appréhendés.** Les effets directs et indirects des aérosols restent la source principale d'incertitude sur le forçage radiatif induit par l'activité humaine (GIEC, 2007). Les études récentes sur le forçage radiatif produit par l'activité humaine au cours des 20 dernières années montrent que, sur cette période de temps, l'impact des aérosols peut être supérieur globalement à celui des gaz à effet de serre. Les scénarii de mitigation du changement climatique commencent à intégrer cette composante « aérosols » dont la réduction des émissions pour certaines espèces (carbone suie) pourrait, sur le court et moyen terme, se révéler plus économique et tout aussi efficace que des réductions de GES.

**Les aérosols ont un temps de vie limité** à quelques jours et **restent donc localisés à proximité de leurs sources.** L'observation des aérosols ne peut donc se satisfaire de quelques stations de mesures de fond à l'échelle globale et nécessite la mise en œuvre d'une stratégie adaptée à chaque région du globe. Les océans recouvrent près des 2/3 de la surface du globe (75% des précipitations) et l'étude des aérosols dans ces régions reste limitée en raison du **nombre très faible de stations atmosphériques marines représentatives à l'échelle du globe.** La connaissance des interactions aérosols – climat au dessus des océans s'en trouve donc plus réduite.

**L'océan Austral** joue dans ce contexte un rôle très particulier, d'abord de par sa taille (plus d'une dizaine de fois la superficie de l'Europe) mais aussi parce qu'il se trouve à la croisée d'un grand nombre de sources marines d'aérosols (sels de mer, aérosols soufrés et carbonés issus de l'activité biologique marine). Cette région du globe, éloignée des émissions anthropiques, **est l'endroit idéal pour 1) étudier l'impact de ces sources naturelles marines d'aérosols sur le climat et 2) mieux appréhender l'impact du changement climatique sur les régions marines et leurs émissions naturelles.** La Figure 8 ci-dessous résume bien ce système « océan - atmosphère » et montre à quel point ces systèmes sont interdépendants.

<sup>2</sup> Le Quéré C. et al. 2007. Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> Sink Due to Recent Climate Change, *Science*, **316**, 1735-1738.

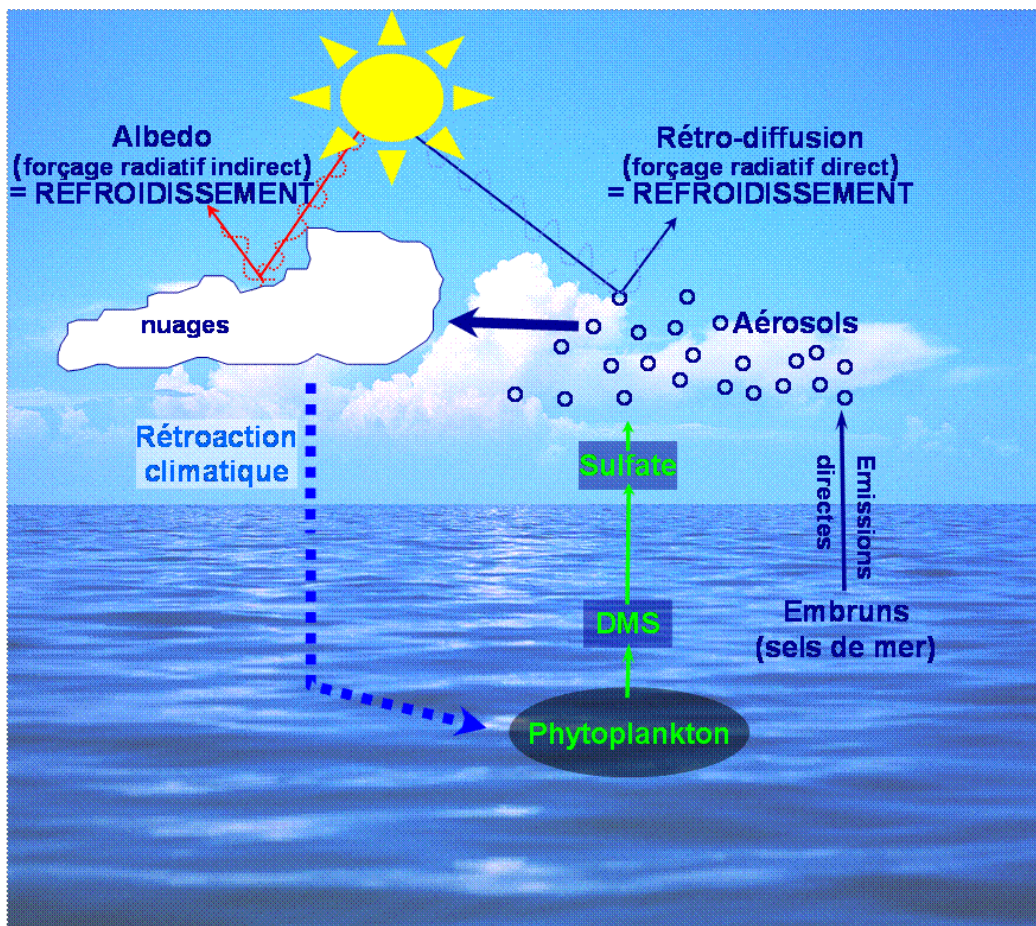


Figure 8 - L'impact du cycle biogéochimique du DMS (sulfure de diméthyle) et des embruns (sels de mer) sur le climat. Voir texte ci-dessous.

### ***Les observations « Aérosols » sur l'île Amsterdam***

La position géographique stratégique de cette station en fait une des 25 stations atmosphériques de référence à l'échelle du globe (station du réseau international GAW – Global Atmospheric Watch - dirigé par l'Organisation Mondiale de la Météorologie). C'est la **seule station française qui possède ce label qui garantit une grande qualité des mesures** ainsi qu'une forte visibilité à l'international de celles-ci (bases de données accessibles aux modélisateurs du GIEC).

Les aérosols soufrés naturels et leur impact sur la couverture nuageuse : Le DMS (pour sulfure de diméthyle) est un gaz produit par l'activité biologique marine. Ce composé, en s'oxydant dans l'atmosphère, représente la première source naturelle d'aérosols soufrés à l'échelle du globe. **Ces aérosols soufrés jouent un rôle majeur dans la formation et la durée de vie des nuages au dessus des océans** induisant un net refroidissement de l'atmosphère.

Les observations faites à l'île Amsterdam ont permis de montrer que **l'océan Austral représente une des toutes premières sources au monde d'aérosols soufrés naturels issus du DMS**. Ces émissions de DMS sont particulièrement importantes dans la région voisine de la latitudes 40°S ; or c'est précisément dans cette zone que l'impact du changement climatique est attendu comme le plus fort. Les fortes variations du cycle atmosphérique du DMS observées à l'île Amsterdam d'une année sur l'autre (parfois jusqu'à 300%) restent encore mal comprises même s'il est désormais bien établi que c'est l'activité biologique marine qui est responsable de ces fortes variations. L'impact de ces fortes variations du cycle du DMS sur le climat de l'océan Austral reste encore à évaluer.

Les embruns et leur impact sur le bilan radiatif de l'océan Austral : Les conditions climatiques particulières de l'océan Austral (zone de tempêtes permanentes) font de cette région océanique la

**première source de sels de mer (embruns) à l'échelle du globe.** Le refroidissement atmosphérique généré par la **rétrodiffusion des rayons du soleil sur ces embruns** est très important. Les changements climatiques futurs prévoient une augmentation de la vitesse du vent dans cette région du globe (*i.e.* plus d'embruns et donc augmentation nette du refroidissement de l'atmosphère). **La couverture nuageuse quasi permanente au dessus de l'océan Austral ne permet pas aux satellites d'évaluer proprement l'impact radiatif de ces embruns et seules les mesures *in situ* offrent la possibilité de le contraindre.** La NASA – en partenariat avec les équipes de recherche françaises - a donc entrepris d'instrumenter depuis près de 10 ans la station d'Amsterdam d'un **photomètre solaire** capable d'évaluer proprement l'impact des embruns sur le climat de l'océan Austral (réseau AERONET-PHOTON, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> ). **Ces mesures sont les seules disponibles dans l'océan Austral et servent aujourd'hui de point de contrainte aux modèles climatiques globaux utilisés par le GIEC.**

## Conclusions

---

La station atmosphérique de l'île Amsterdam a su s'imposer au fil des ans comme station internationale de référence pour l'étude de la composition atmosphérique de notre planète. Elle permet à la communauté française de disposer des séries de mesures parmi les plus longues existantes, tant pour le CO<sub>2</sub> que pour les aérosols, et de fournir à la communauté internationale des données fondamentales pour la compréhension des mécanismes climatiques à l'échelle mondiale.

A l'écart des sources de pollution usuelles, les mesures réalisées à Amsterdam offrent à la fois une image représentative d'une grande partie de l'hémisphère sud (où les points d'observation sont extrêmement rares) et permettent de préciser le rôle de l'océan Austral, tant en termes de puits de CO<sub>2</sub> qu'en termes de production d'aérosols naturels marins dont les effets sur le climat, sans doute sous-évalués par le passé, sont aujourd'hui avérés.

Les mesures atmosphériques obtenues à l'île Amsterdam (Aérosols et Gaz à effet de serre) sont aujourd'hui intégrées dans les banques de données internationales qui servent aux acteurs du GIEC pour valider les modèles climatiques globaux.