

PROPOSITION DU LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE
ET GÉOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

I - MOTIVATIONS

Les caractéristiques des puits de chaleur que sont les régions polaires sont fortement dépendantes, entre autres, de l'étendue et de l'état de la glace de mer ; celle-ci constitue en effet une barrière déformable qui isole l'atmosphère de l'océan. Il en résulte une interdépendance du climat et de l'état d'englacement de la mer. (cf. par ex. ICEX 1979).

La nécessité d'une paramétrisation des processus régissant l'évolution de la glace de mer aux diverses échelles, dans les modèles climatiques est désormais universellement admise (WMO 1977).

Bien que l'Arctique et l'Antarctique présentent des caractéristiques très différentes quant à l'évolution de la glace de mer, une meilleure compréhension des processus qui contrôlent les variations annuelles de la frontière mer-glace dans les zones marginales de MIZEX devrait permettre selon Allison (1982) une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine du cycle annuel de la banquise antarctique dont la superficie varie de 2,5 Mkm² en été à 20 Mkm² en hiver.

En dépit des travaux réalisés ces dernières années, dans le cadre d'AIDJEX notamment, mais aussi en Antarctique (Allison 1982, Guillemier 1982), il n'en demeure pas moins qu'un certain nombre de processus restent mal connus, notamment :

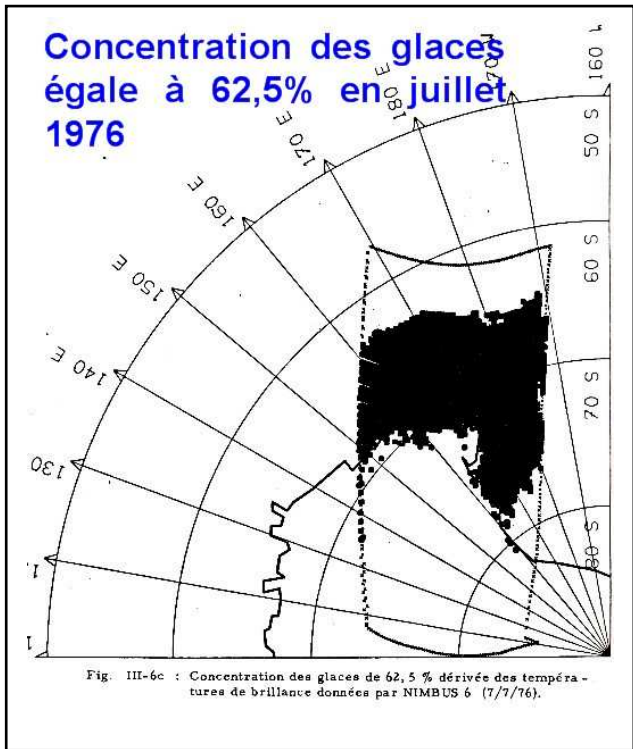
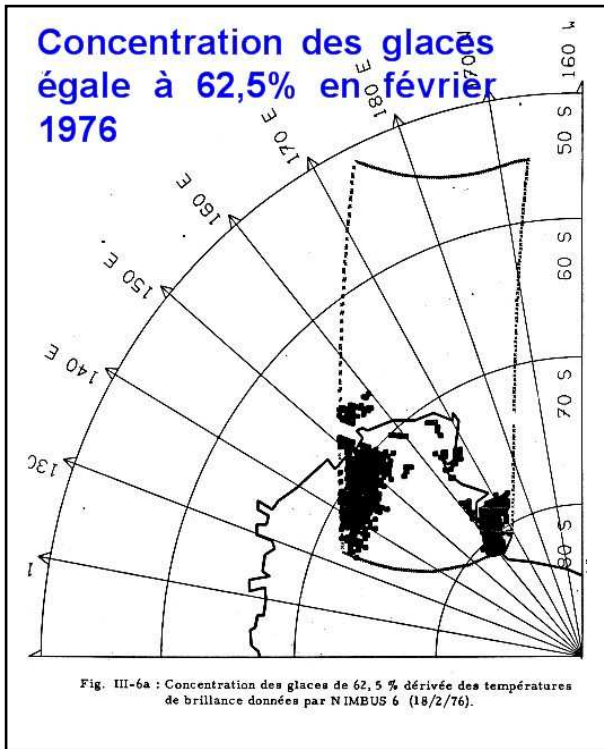
- les interactions complexes entre les divers milieux dans les zones marginales.
- la structure de la couche limite de surface atmosphérique (CLSA) qui se développe sur une telle surface non homogène.

Indépendamment du lieu, par sa face supérieure la glace de mer réagit aux sollicitations de l'atmosphère, que celles-ci soient d'origine dynamique ou thermodynamique. Par sa face inférieure elle est soumise aux effets de l'océan. En contrepartie elle réagit à son tour sur les deux milieux environnants.

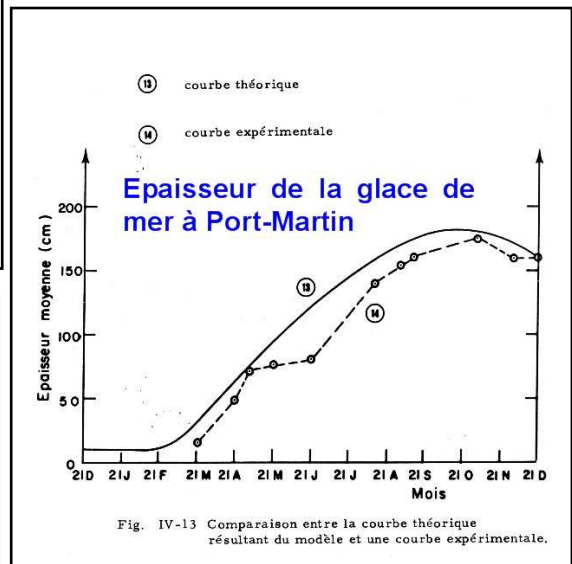
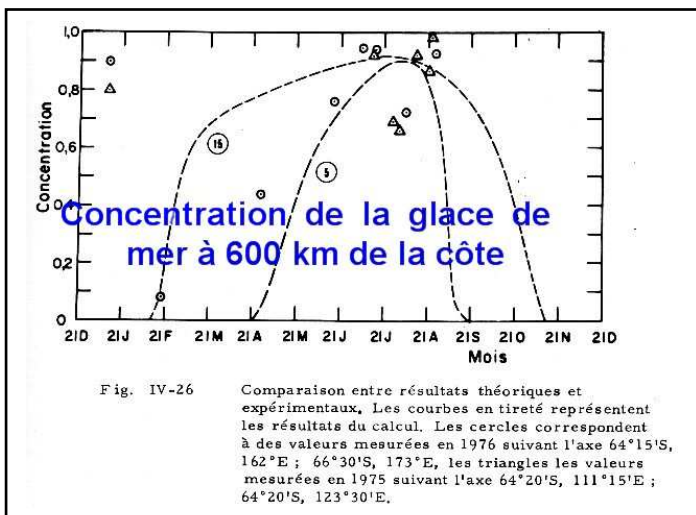
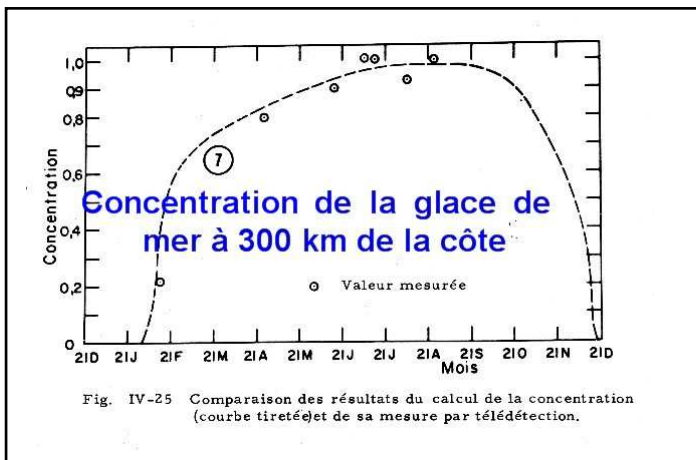
En zone marginale la situation se complique du fait de la discontinuité brutale des caractéristiques topographiques et physiques de la surface de part et d'autre de la frontière séparant les deux milieux, ainsi que de l'hétérogénéité de la surface de la glace. En outre aux échanges verticaux se superposent des échanges horizontaux.

II - INTERET DE MIZEX POUR LE LGGE

Le L.G.G.E. a entrepris depuis plusieurs années l'étude des variations de la banquise Antarctique en faisant appel à la télédétection spatiale. (Guillemier 1980).



Un modèle numérique du cycle annuel de la glace de mer dans le secteur de la Terre Adélie a été développé par Guillemier (1982).



Or en zone marginales les processus d'échanges glace-atmosphère océan à petite et moyenne échelle ne doivent pas être fondamentalement différents au nord et au sud ainsi que le souligne Allison. Donc des résultats obtenus dans le cadre de MIZEX sont probablement susceptibles de s'appliquer à une étendue non négligeable de la banquise antarctique qui présente, selon Guillemier (1982) une certaine homogénéité zonale. On pense, en particulier, à la paramétrisation des échanges d'énergie et éventuellement de masse entre les trois milieux en fonction notamment du vent, de la température et de l'humidité de l'air en surface d'une part, des températures superficielles de l'océan et de la glace d'autre part. Ceci est possible dans MIZEX mais paraît utopique en Antarctique à moins de disposer d'un porte avions. Les formes paramétriques ainsi obtenues pourraient être introduites dans le modèle Guillemier tandis que les données de bases seraient obtenues à partir des divers moyens de télédétection spatiale et de cartes établies quotidiennement pour l'hémisphère sud, par le Service de Météorologie Australien.

La télédétection spatiale est actuellement le seul moyen pour obtenir les caractéristiques de la glace de mer en Antarctique, donc des opérations de « vérité glace » en collaboration avec M. Lannelongue du CNES dans le cadre de MIZEX présenteraient un intérêt inestimable pour une application ultérieure. Nous pensons essentiellement à la possibilité d'une détermination de l'épaisseur de la glace.

Le L.G.G.E possède en outre, une grande expérience dans les mesures de la CLSA au dessus des surfaces englacées. C'est ainsi par exemple que pour les besoins du programme IAGO (Interactions Atmosphère-glace-océan en Antarctique), vaste programme réunissant plusieurs laboratoires français et américains, le LGGE a développé des plateformes de mesure à faible consommation et fonctionnant aux basses températures.

III - PROGRAMME PROPOSE PAR LE LGGE DANS LE CADRE DE MIZEX

L'objectif scientifique reste la modélisation numérique de l'évolution de la glace de mer à meso-échelle.

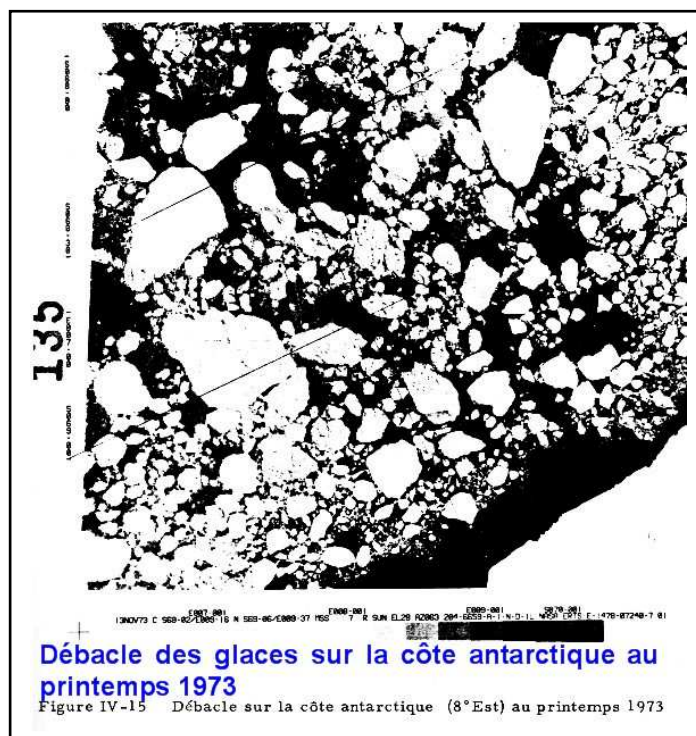
Au modèle Guillemier, essentiellement thermodynamique, on se propose d'adjoindre des termes complémentaires d'advection de la glace qui sont probablement non négligeables dans les zones marginales.

La phase expérimentale de ce programme implique :

- la détermination des caractéristiques de la CLSA à proximité immédiate de la glace en vue du calcul des flux turbulents.
- la détermination des caractéristiques de la surface de la glace rugosité, température, couverture neigeuse, albédo, etc.
- la mesure de la concentration et de l'épaisseur de la glace, du profil de température, et corrélativement de la croissance et de l'ablation.
- la mesure du rayonnement.

L'ensemble de ces données permettrait :

- de préciser les lois d'évolution des caractéristiques de la CLSA et de la glace en fonction de la distance à la frontière glace-mer.
- de calculer le bilan thermique à la surface de la glace en fonction de cette même distance.
- de paramétrer les flux turbulents en fonction du vent, de la température et de l'humidité de l'air au niveau standard de 10 m, et des températures superficielles de la glace.
- de fournir des mesures des caractéristiques de la surface, et de la glace pouvant servir de « vérité-glace » pour la télédétection.



Les caractéristiques de la CLSA sont essentiellement la nature de la stratification, les flux turbulents ainsi que les propriétés radiatives des divers milieux auxquelles la turbulence qui se développe sur une surface englacée est particulièrement sensible.

IV - REFERENCES

Les références ont été volontairement très limitées. On trouvera une liste particulièrement exhaustive dans Allison 1982.

Allison, I. 1982. The role of sea-ice in climate variations. Rapport pour WMO/CAS-JSE-CCCO joint meeting - Genève 24-29 juin 1982.

Guillemier, R. 1980. Contribution à l'étude des fluctuations de la banquise antarctique par télédétection, spatiale. Thèse de 3^{ème} Cycle USMG. Pub. L.G.G.E 317

Guillemier, R. 1982. Simulation numérique du cycle annuel de la banquise antarctique. Thèse d'Etat USMG. Sous presses.

ICEX 1979. Ice and climate experiment. Report of sciences and applications Working Group. NASA.

WMO. 1977. Report of the informal meeting of experts on the role of sea-ice in the climate system - Commission for Atmospheric Sciences.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES FLUCTUATIONS DE LA BANQUISE ANTARCTIQUE PAR TELEDETECTION SPATIALE (Thèse de 3^{ème} Cycle - 1980)

I - INTRODUCTION

Le puits de chaleur sensible, constitué par le continent antarctique et la banquise, est un facteur particulièrement important du système thermodynamique global (soleil-espace-océan).

La banquise, en particulier, est un facteur spécifique et primordial du climat. A l'époque de sa plus grande extension, elle couvre, en effet, une superficie supérieure à celle du continent, respectivement de l'ordre de 14 à 20 millions de Km².

Sa formation, sa modification et sa disparition résultent de l'action du climat, mais d'un autre côté la banquise réagit à son tour sur le temps et le climat. Aussi bien l'action des facteurs climatiques sur la banquise que la réaction de la banquise sur le climat sont encore imparfaitement connues. La formation de la banquise, qui n'est pas progressive, montre qualitativement que la glace de mer réagit à des fluctuations d'une certaine période, mais les données quantitatives font encore défaut.

Depuis une décennie, la télédétection spatiale joue un rôle considérable dans l'acquisition des données nécessaires à l'étude de la banquise et de ses différents paramètres physiques. Le but de cette étude est de montrer quels sont les moyens adaptés à la fourniture de valeurs significatives de ces paramètres. Pour cela, nous étudierons successivement certains modèles d'évolution de la glace de mer avec les paramètres extérieurs nécessaires et les résultats qu'on peut en attendre. Puis nous examinerons en détail les moyens embarqués sur les satellites américains des dernières générations qui sont susceptibles de donner des évaluations correctes des données concernant la banquise.

Les régions polaires sont généralement des régions où le rayonnement net au sol est négatif. Ainsi le maintien de leur équilibre climatique est dû à un apport d'énergie des latitudes les plus basses des océans bordant ces régions. Alors les variations thermiques de leur équilibre peuvent affecter la circulation atmosphérique globale. En particulier, la météorologie antarctique dépend de deux phénomènes qui ont certainement des relations de cause à effet mais encore peu et mal connues actuellement. C'est d'abord un mécanisme d'interaction entre les bilans des transferts radiatifs et ceux de la turbulence, appelé « vent catabatique ». Enfin les fluctuations de la banquise sont liées aux fluctuations du climat antarctique et réciproquement. L'apparition de surfaces d'eau libre à l'intérieur de la

glace de mer, appelées « polynies », constitue pour l'atmosphère une source de chaleur et d'humidité. (réf. World Meteorological Organisation, 1977; Poley, 1976; Gloersen, 1974; Godron, 1974; Romanov, 1972).

II - CONCLUSION

On peut dire qu'en 1976, la quasi-totalité de la banquise s'est formée entre le 18/02 et le 29/04, soit en 2 mois 1/2. On assiste ensuite à une fluctuation permanente de la frontière glace-océan ainsi qu'à l'apparition et à la disparition des polynies.

La carte 52, établie à partir des données du 18/02, peut être comparée, par exemple, à la carte 54 qui représente l'état de la banquise le 29/04. La partie septentrionale de l'est du shelf de Ross y apparaît en noir le 18/02 et en blanc le 29/04. Le satellite passe approximativement à 10 heures locales à la verticale du shelf. On peut supposer qu'à cette heure, et à la mi-février, la surface du shelf est en partie saturée d'eau. Ceci a pour effet d'accroître l'émissivité de la glace et sa température de brillance, d'où sa représentation en noir sur la carte. Par contre, à la même heure, le 29/04, la température est probablement très en dessous de 0°C et la surface du shelf est totalement englacée. L'émissivité de la glace est plus faible ainsi que sa température de brillance, et le shelf apparaît en blanc sur la carte 54.

Sur cette même carte 52, une partie du continent apparaît en noir. Le névé aurait donc, dans cette région, une émissivité plus grande que sur le reste du continent. Il semble difficile d'admettre que cet accroissement de l'émissivité est provoqué par la présence d'eau. Toutefois, on peut, peut-être, supposer qu'à cette époque de l'année, par suite d'un effet de serre, le névé est à la température de fusion au dessous de la surface. Seules des opérations de vérité-terrain devraient permettre d'expliquer ces anomalies de même que celles de moindre importance qu'on décèle sur les autres cartes.

Les cartes proposées ne sont qu'une visualisation des résultats du calcul de la concentration C.

A partir des résultats portants sur plusieurs années normales, on peut espérer, dans un premier temps, pouvoir paramétrer C en fonction du temps et de la latitude dans une région concernée. En effet, la connaissance de C à un instant donné permet, moyennant un certain nombre d'hypothèses, de calculer l'épaisseur de la glace et sa vitesse de déformation. Ici encore, un modèle statistique peut être envisagé, mais il ne rendrait compte que des caractéristiques moyennes. Or l'observation montre que les cas ne sont pas rares où la banquise hivernale est encore épaisse en décembre, dans les secteurs de la Terre Adélie.

La confrontation des paramètres caractéristiques de la banquise (concentration, épaisseur, température de la glace, vitesse) et des paramètres caractéristiques de l'atmosphère déterminés notamment à partir du système HIRS de Nimbus 6 devrait permettre de paramétrer les caractéristiques de la banquise pour leur prise en compte par un modèle d'évolution du temps en Terre Adélie. C'est dans cette direction que nous allons orienter ce travail qui se poursuivra en liaison avec l'Institut de Géophysique de l'Université d'Alaska.

SIMULATION DU CYCLE ANNUEL DE LA BANQUISE ANTARCTIQUE (Thèse d'Etat - 1982)

I - INTRODUCTION

Les interactions entre une surface englacée comme la banquise antarctique et l'atmosphère, où interviennent les propriétés radiatives des deux milieux et la turbulence atmosphérique, sont encore mal connues.

La banquise antarctique, à l'inverse du pack arctique, présente une fluctuation annuelle importante. Au maximum de son extension en hiver, elle peut couvrir une superficie de 20 millions de kilomètres carrés, tandis qu'en été la surface englacée peut se réduire au dixième de cette valeur. Ces fluctuations saisonnières réagissent sur l'ensemble du climat en modifiant notamment le bilan énergétique en surface.

Un modèle théorique, à l'échelle de l'année, de l'évolution du climat antarctique comprend nécessairement un ensemble d'équations permettant de simuler l'évolution des phénomènes physiques. Pour que le modèle soit fermé, il doit comprendre un certain nombre de conditions initiales et de conditions aux limites. Parmi ces dernières, on peut inclure les phénomènes qui interviennent à la surface de l'océan.

Le but de notre étude est de créer un modèle d'évolution de la banquise antarctique dans le secteur de la Terre Adélie. Les grandeurs physiques qui caractérisent essentiellement la glace de mer sont sa température de surface, son épaisseur moyenne et sa densité d'englacement sur une surface déterminée de l'océan. L'évolution de ces grandeurs physiques caractérisant la banquise est naturellement fonction de paramètres qui sont des flux de chaleur extérieurs à l'interface atmosphère-glace de mer et à l'interface glace de mer-océan, ainsi que l'importance de la couche de neige recouvrant éventuellement la banquise.

Le courant catabatique en provenance du continent participe au refroidissement de la surface océanique à travers les échanges turbulents de chaleur et d'humidité d'une part et par la masse de neige qu'il enlève au continent pour la déposer sur l'océan d'autre part.

L'arrivée d'une masse d'air froid sur la surface océanique relativement chaude provoque la formation de courants de convection dans la couche limite atmosphérique. Les échanges turbulents atmosphère-océan s'intensifient, l'océan est alors une source de chaleur et d'humidité pour l'atmosphère.

Mais la compensation du déficit en air drainé par l'écoulement en surface du centre vers la périphérie suppose l'existence d'un contre courant chaud surmontant la couche catabatique et tendant à compenser le refroidissement radiatif de la troposphère ou d'une partie tout au moins. La turbulence de grande échelle liée aux perturbations et une composante méridienne de la circulation générale assurent cette compensation en altitude.

Le refroidissement de la surface océanique provoque dans l'océan, la formation d'une couche convective qui transporte au fond de l'océan l'eau la plus froide et en surface de l'eau plus chaude. Ce mouvement convectif est donc aussi à l'origine d'échanges de chaleur à long terme entre hautes et basses latitudes par l'intermédiaire de la circulation océanique profonde.

Cette couche convective s'oppose on l'a vu au gel de la banquise jusqu'à ce que le refroidissement de la couche superficielle soit suffisant pour permettre la congélation.

Le vent par la contrainte qu'il exerce à la surface de l'océan est aussi élément perturbateur, en début de glaciation il fragmente la glace et la repousse vers le nord. La banquise en place peut être déformée par les contraintes tangentielles exercées par les vents parfois violents en provenance du continent. Il se forme alors dans la région côtière, où l'influence de ces vents est active, des étendues d'eau libre appelées chenaux ou polynies.

Selon Lliboutry (1964) la formation de la banquise passe par les états suivants : au début la mer est recouverte de fraïsil plus ou moins abondant, dans ce cas l'eau prend une teinte plombée et ne se ride plus sous les effets de la brise. C'est le slush ou sludge. Si l'eau est calme le slush donne une croûte de glace qui peut être brisée par la houle. Les fragments prennent une forme circulaire au bord relevé sous l'effet des chocs. Ces disques de 0,30 à 3 m de diamètre sont les crêpes. La cimentation des crêpes par du slush, ou la croissance de la croûte de glace, forme une surface unie. A partir d'une épaisseur de l'ordre de 15 cm, cette croûte peut être utilisée pour la circulation, son épaisseur maximale peut atteindre 2 mètres.

La distribution générale la glace dépend de la circulation océanique. On distingue deux composantes, l'une zonale en surface de loin la plus importante et l'autre méridienne en profondeur. Ce courant circumpolaire d'ouest qui intéresse la surface est un courant de dérive engendré par les grands vents d'ouest dont l'axe se situe entre 40 et 45 degrés sud dans l'Atlantique, et entre 50 et 55 degrés dans le S.E. du Pacifique (Guilcher, 1965). Aux approches du continent, le grand courant des vents d'ouest est remplacé par un courant d'est (cf. Queney 1974). Il en est de même du courant de dérive d'est qui consiste le plus souvent en tourbillons plus ou moins individualisés. La circulation méridienne est plus complexe et intervient surtout dans les échanges de chaleur, à long terme, entre les régions polaires et les basses latitudes.

II - CONCLUSION

Le modèle simplifié de simulation du cycle annuel de la banquise antarctique présenté dans ce mémoire permet de calculer chaque jour et au sommet de chaque maille de 20 km de côté d'une grille d'environ 600 km :

- la concentration et l'épaisseur de la glace.
- la température de surface
- les coefficients de croissance thermodynamiques à la face supérieure de la banquise que celle-ci soit ou non couverte de neige.

Les essais de sensibilité montrent l'importance des flux de chaleur dans l'atmosphère et l'océan, de la couverture neigeuse, ainsi que celle d'un décalage dans le temps de la répartition des températures de l'air surface. C'est ainsi que suivant que le minimum de la température de l'air en surface intervient 15 jours plus tôt ou 15 jours plus tard, l'épaisseur en décembre peut varier du simple au double, toutes choses égales d'ailleurs. Il faut peut-être voir dans ce résultat l'explication du fait que

certaines années l'épaisseur de la banquise interdit en décembre l'accès au continent antarctique dans le secteur de la Terre Adélie, sans que par ailleurs on observe des phénomènes climatiques particuliers. L'épaisseur de la couche de neige déposée est un facteur important. Par contre le modèle n'est pas sensible à une faible variation de l'albédo.

Malgré toutes les simplifications qui ont été faites, notamment qui entraînent la nullité du terme d'advection, les résultats sont réalistes. On constate un bon accord entre les valeurs de la concentration, obtenues par télédétection spatiale et celles qui sont calculées par le modèle. On a pu vérifier en outre qu'il y a un très bon accord entre les valeurs de l'épaisseur calculée et les mesures in situ effectuées à proximité de l'ancienne station française de Port Martin.

Un intérêt majeur de ce modèle, de moyenne échelle spatiale, dans la possibilité de calculer les coefficients de croissance thermodynamique tout en ne nécessitant pas des temps de calcul prohibitifs. A notre connaissance la quasi totalité des modèles actuels, de beaucoup plus grande échelle d'espace que le nôtre, utilisent une table de ces coefficients construite sur une année à partir du modèle thermodynamique d'Untersteiner, et l'utilisation des données extraites de cette table ne peut représenter localement l'évolution de la glace de mer.

Le point faible du modèle est représenté par l'ensemble des hypothèses sur la vitesse de la glace entraînant la nullité du terme d'advection, et des processus dynamiques. On a pu vérifier que ces hypothèses étaient néanmoins vérifiées en moyenne, mais on constate, aussi, que notre modèle ne peut rendre compte des effets dynamiques du vent. En effet, au cours de deux années consécutives et en deux sites différents, la concentration en glace obtenue par télédétection spatiale présente un minimum relatif de l'ordre de 0,6 à 0,7, en août, par contre les valeurs calculées sont de l'ordre de 0,9. Si l'on rejette l'hypothèse d'une erreur de mesure, ce minimum relatif de la concentration peut correspondre à une débâcle liée aux tempêtes qui peuvent se produire au cœur de l'hiver. Dans cette hypothèse, notre modèle montre son insuffisance.

Ce modèle, pour prendre toute sa signification, devrait être couplé avec un modèle d'évolution de la couche limite de surface dans le secteur considéré. En effet, en schématisant à l'extrême, les modèles de circulation atmosphérique permettent de calculer l'évolution du vent, de la température, de l'humidité, etc., en un ou plusieurs niveaux, tandis qu'une paramétrisation appropriée de la couche limite de surface permet sa prise en compte par le modèle. A chaque instant, un tel modèle permet donc de calculer en particulier les caractéristiques de la couche de surface et donc celles de la glace de mer qui représentent en fait les conditions à la limite inférieure, caractéristiques qui réagissent sur la structure de la couche limite. Ces conditions ne peuvent donc être ignorées par un modèle de circulation générale qui se veut réaliste.

En conclusion, le modèle simple présenté permet une bonne simulation du cycle annuel de la banquise contrôlé essentiellement par les processus thermodynamiques. Toutefois, pour une simulation plus fine, il conviendrait de le compléter par une prise en compte des processus dynamiques. Ce modèle devrait alors fournir les conditions à la limite inférieure pour tout modèle atmosphérique.

Un problème reste entier, c'est celui de l'obtention des données collectées par les satellites du type Nimbus. On peut espérer qu'il trouvera une solution avec la mise sur orbite des satellites SPOT et ERS.



00045364