

# Chapitre 6. L'Application du Modèle 1 D à l'Etude de l'Ecosystème Planctonique de la Mer de Ross

Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle 1D, que nous avons développé, pour simuler les processus physiques de stabilisation verticale de la colonne d'eau au niveau des zones marginales des glaces de la Mer de Ross, et leur influence sur la dynamique du système planctonique.

## 6.1. La simulation de l'état standard de l'écosystème planctonique de la Mer de Ross

Dans le but de simuler une situation moyenne, représentative de l'écosystème planctonique de la Mer de Ross, le modèle a été testé avec des conditions initiales et des contraintes atmosphériques qui correspondent à des valeurs moyennes pour la région (tab. 6.1) C'est en comparaison avec les résultats de cette "simulation standard" que l'on testera la variabilité résultant de modifications des contraintes externes.

Tab. 6.1. Forçage atmosphériques du modèle standard. D'après <sup>1</sup>Savage et Stearns (1985) et Creazzo (1992); <sup>2</sup>Andreas et Ackley (1981); <sup>3</sup>Comiso *et al.* (1993) et Parkinson et Washington (1979).

	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jul	sep	oct	nov	dec
Vitesse du vent (m/s) <sup>1</sup>	5.0	5.5	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.0	5.5	5.0	4.0
Température de l'air(°c) <sup>1</sup>	-1.0	-6.5	-14.5	-17.5	-21.5	-20.5	-18.5	-18.5	-15.5	-7.5	-2.0
Humidité relative <sup>2</sup>	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Couverture nuageuse <sup>3</sup>	0.60	0.64	0.70	0.70	0.70	0.65	0.60	0.54	0.55	0.55	0.55
neige [cm mois <sup>-1</sup> ]	0.0	1.0	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.2	0.0	0.0	0.0

Les résultats des simulations sont représentés dans les figures suivantes qui montrent l'évolution de la distribution verticale des variables, à midi, sur les 200 premiers mètres de la colonne d'eau, en fonction du temps exprimé en jours juliens. La simulation démarre le 1<sup>er</sup> janvier. Les graphiques montrent que le modèle est stable sur plusieurs années et qu'il simule la formation de la glace et les processus biologiques, dans la glace et dans la colonne d'eau, dans des limites correspondant aux résultats expérimentaux, observés au niveau de la zone marginales des glaces, en Mer de Ross.

Cette simulation standard représente correctement: (i) la formation de la zone marginale et le retrait et la fonte des glaces; (ii) la stabilisation verticale de la colonne d'eau (fig. 4.20), dans les zones de glace marginale, pendant la période de fonte; (iii) la structuration biologique des couches superficielles, en relation avec celle de la physique; (iv) la stimulation de la production primaire par la présence des glaces; (v) la succession des

communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques; (vi) le contrôle de la distribution verticale du zooplancton; (vii) le flux alimentaire vers niveaux trophiques supérieurs; (viii) le forçage de la pression de broutage (par le Krill, les Copépodes et les Mollusques pélagiques) et le contrôle sur les variables phytoplanctoniques; (ix) la production de pelotes fécales; et (x) l'excrétion d'ammonium qui stimule la production régénérée.

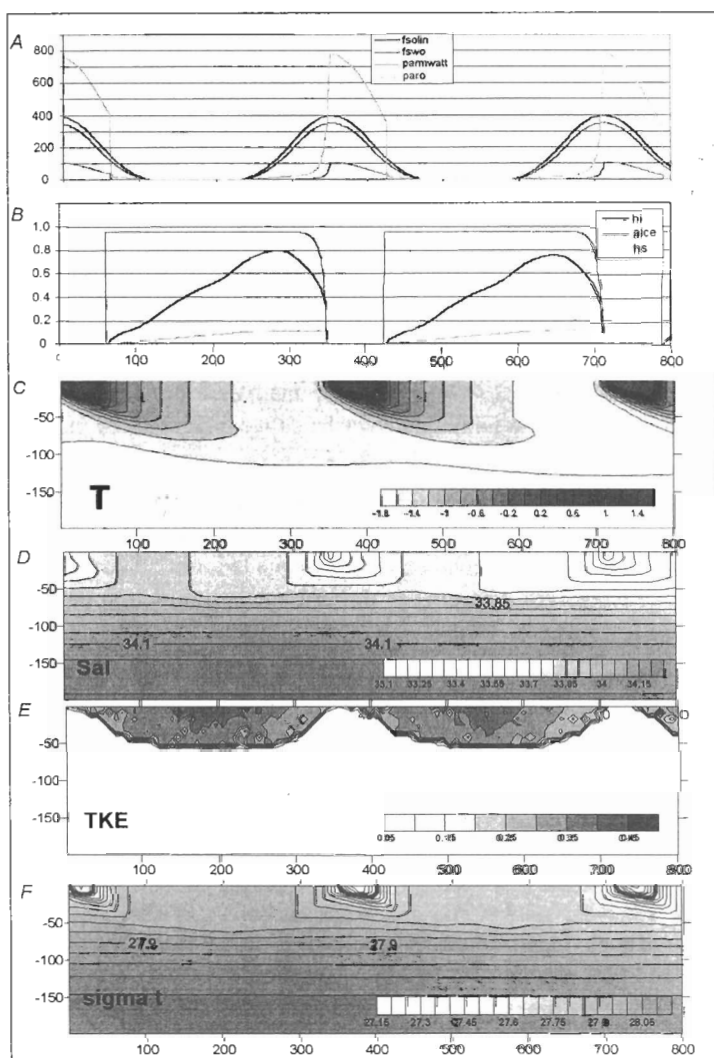


Fig. 6.1. (A) Simulation, en conditions standard, de la variation des flux de radiation solaire, au dessus des nuages (fsolin) et au dessus de la surface de la mer (fswo) [ $\text{w m}^{-2}$ ]. L'éclairement photosynthétiquement actif sous la surface de l'eau est exprimé par sa valeur moyenne journalière (parmwatt [ $\text{w m}^{-2}$ ]) et sa valeur maximum à midi (paro [ $\mu\text{Ein m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ ]). (B) Variation de la hauteur de glace (hi [m]), de neige (hs [m]) et de l'aire relative des glaces (aice [s.d.]). (C à F) Variation des profils verticaux de température (T [ $^{\circ}\text{C}$ ]), de salinité (Sal), d'énergie cinétique turbulente (TKE [ $\text{m}^2 \text{sec}^{-2}$ ]) et de densité (sigma t). La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.

La figure 6.1 représente la simulation, en conditions standard, de la variation des flux de radiation solaire [ $w m^{-2}$ ] au dessus des nuages (fsoin) et au dessus de la surface de la mer (fsw). L'éclairement photosynthétiquement actif, sous la surface de l'eau, n'atteint des valeurs significatives qu'à partir de la période de fonte des glaces, tant pour la valeur moyenne (parmwatt [ $w m^{-2}$ ]) que la pour valeur maximum à midi (paro [ $\mu Ein m^{-2} sec^{-1}$ ]).

La figure 6.1 reproduit la formation de glace (hi [m]), l'accumulation de neige (hs [m]) et la répartition de l'aire relative des glaces (aice [s.d.]), dès le début mars. Ceci se traduit par un refroidissement des couches de surface visible sur le profil de température (T [ $^{\circ}C$ ]), une libération de sel dans la couche de surface, un fort mélange des 100 premiers mètres de la colonne d'eau et une homogénéisation de la température, de la salinité (Sal) et de la densité (sigma t). L'énergie cinétique turbulente (TKE), partiellement responsable de ce mélange, s'élève jusqu'à des valeurs de  $0.4 m^2 s^{-2}$  (valeur moyenne).

Au début du printemps, le modèle simule la fonte de la couche de neige. Celle ci est suivie par une augmentation brusque de la pénétration du rayonnement solaire dans la glace, par une rapide croissance des algues dans cette dernière et par une accélération des processus de fonte de la glace, tant en épaisseur que latéralement. La fonte de la glace se traduit par une libération d'eau dessalée (S = 7) en surface, une baisse de salinité dans les premiers mètres de la colonne d'eau et la formation d'une halocline marquée à 25 m.

En été, quand toute la glace est fondue, l'eau de surface commence à se réchauffer et la thermocline se forme d'abord à 25 m et s'approfondit à 40 m en fin d'été. A cette époque, la colonne d'eau atteint un maximum de stabilité et l'énergie cinétique turbulente se réduit à des valeurs de  $0.02 m^2 s^{-2}$ . Il est donc remarquable que la formation de la pycnocline passe par deux phases successives déterminées d'abord par la diminution de salinité puis par l'augmentation de température.

Ces diverses phases physiques s'accompagnent d'une séquence des événements phytoplanctoniques (fig 6.2). En fin d'été, dès le début de la formation de la glace qui recouvre 90% de la surface, les algues de la couche superficielle sont emprisonnées dans la glace (ce qui explique la brusque augmentation de la concentration en algues dans la glace) et la couche de mélange est rapidement vidée de son contenu en algues. Au début du printemps, pendant la fonte, le contenu en algues est progressivement libéré par la glace et ce n'est qu'en été que la croissance a lieu dans la couche de mélange après la libération des glaces.

La biomasse du nanophytoplancton dans la colonne d'eau est maximale pendant la phase de fonte et est réduite pendant la phase d'augmentation de température, suite au développement des organismes mésozooplanctoniques qui atteignent, en été, leur biomasse maximale et qui exercent une forte pression de broutage. Pendant cette période, l'ammonium, excrété par les herbivores, est en excès par rapport aux possibilités d'utilisation par le phytoplancton et il apparaît en quantité significative entre 25 et 50 m. Les nitrates et les silicates ne montrent jamais de déplétion pendant l'été et reviennent à des concentrations initiales lors du mélange hivernal (fig. 6.3). La diminution progressive des concentrations, sur une période de trois ans, qu'on observe dans les graphiques, provient

probablement de l'absence d'un terme de régénération de ces éléments dans les équations de ces variables.

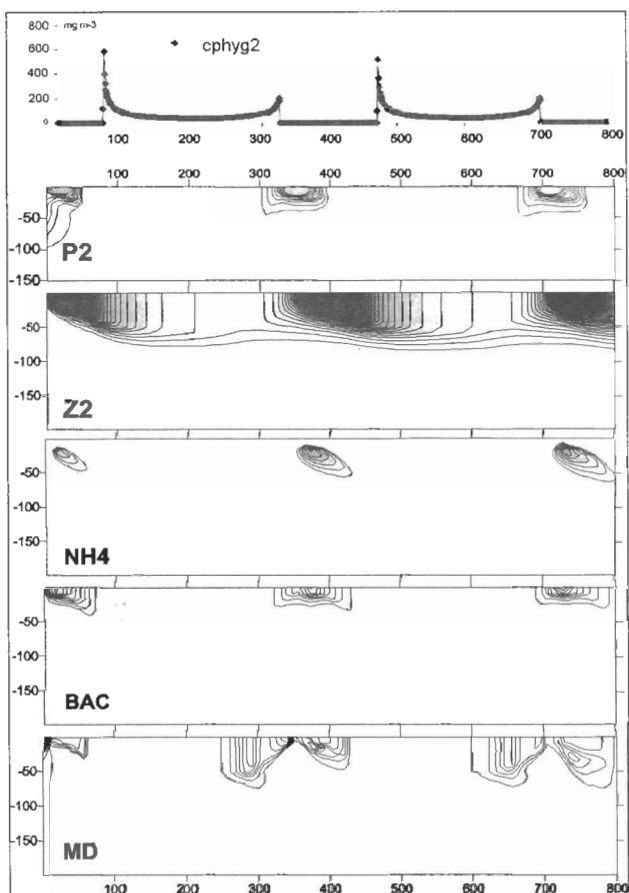


Fig. 6.2. Simulation, en conditions standard, de la variation de la concentration en nanophytoplancton (cphyg2) dans la glace [ $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ] et de la variation des profils verticaux des concentrations en nanophytoplancton (P2) [ $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ], en mésozooplancton (Z2) [ $\text{mg C m}^{-3}$ ], en ammonium (NH4) [ $\text{mg N-NH}_4 \text{ m}^{-3}$ ], en bactéries (BAC) [ $\text{mg N-Bact m}^{-3}$ ] et en matière organique dissoute (MD) [ $\text{mg N-MD m}^{-3}$ ]. La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.

Un schéma semblable s'observe pour l'évolution temporelle des autres variables phytoplanctoniques. La figure 6.4 rapporte les résultats de la simulation des quatre variables phytoplanctoniques en conditions standard. Le développement du picophytoplancton est précoce et peu abondant. Des valeurs comparables pour P2 à P4 sont observées dans la littérature mais pas pour le picoplancton (Carrada *et al.*, 1999). Une meilleure paramétrisation de la variable picoplanctonique et une meilleure définition de la limite de taille entre pico et nanoplancton doivent être envisagées. Le nanophytoplancton (P2) et microphytoplancton (Diatomées P3) qui sédimentent plus rapidement s'étendent en

profondeur et sont consommés activement (par les Copépodes et les *Limacina* dans la simulation standard).

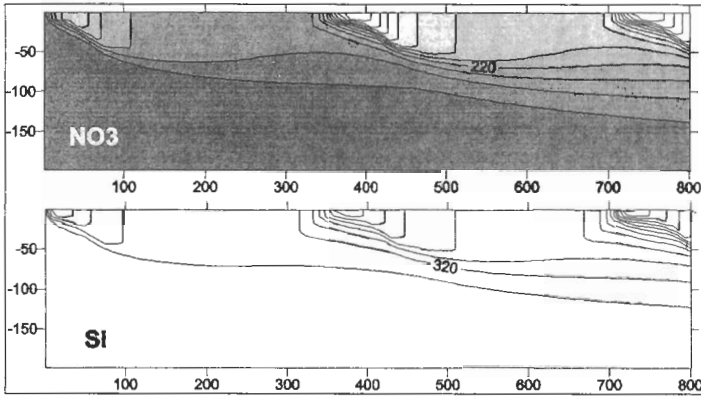


Fig. 6.3. Simulation, en conditions standard, de la variation des profils verticaux des concentrations en nitrates ( $\text{NO}_3$ ) [ $\text{mg N-NO}_3 \text{ m}^{-3}$ ] et en silicates (Si) [ $\text{mg Si m}^{-3}$ ]. La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.

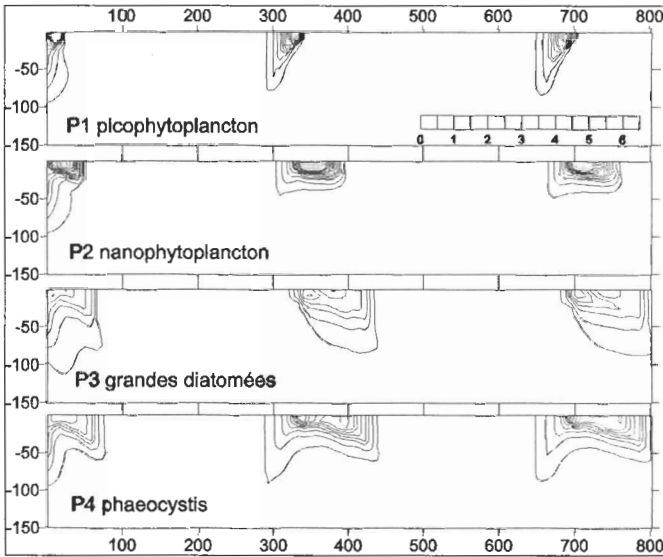


Fig. 6.4. Simulation, en conditions standard, de la variation des profils verticaux des concentrations des quatre variables phytoplanctoniques (P1 à P4) [ $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ]. La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.

Comme nous l'avons observé en Mer de Ross (Goffart *et al.*, 2000), les *Phaeocystis* se développent dans la colonne d'eau après la fonte des glaces et présentent une seconde poussée en période estivale (fig. 6.5). La simulation met en évidence la succession des poussées de ces principales variables planctoniques.

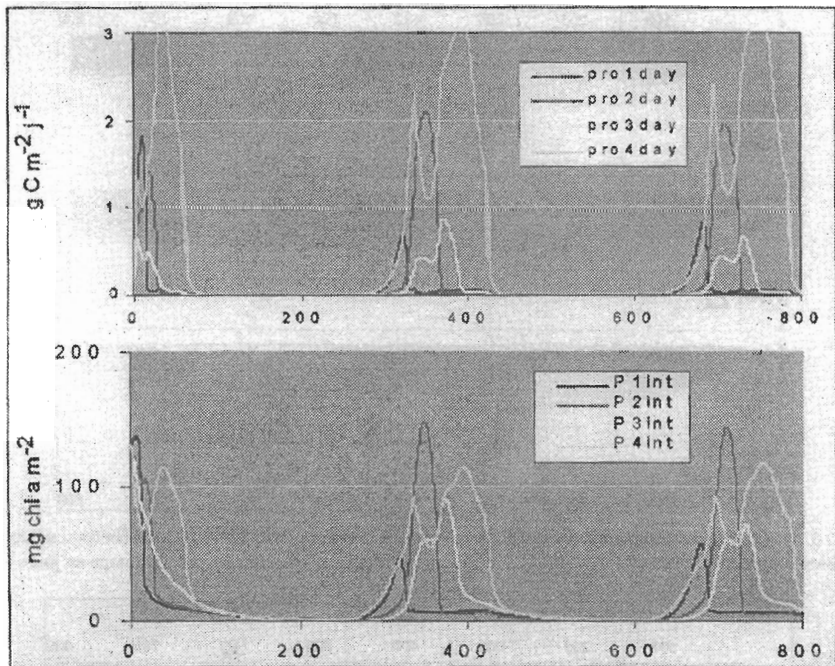


Fig. 6.5. Simulation, en conditions standard, de la variation de la production primaire journalière intégrée (proday) [ $\text{g C m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ] et de la biomasse intégrée sur la profondeur (Pint) [ $\text{mg chl a m}^{-2}$ ] pour les quatre variables phytoplanktoniques (P1 à P4). Le temps est exprimé en jours Julien.

La simulation de la distribution des variables zooplanctoniques montre une disparition du microzooplancton (Z1) pendant l'hiver alors que le méso (Z2) et le macrozooplancton (Z3) subsistent sous la glace (fig. 6.6).

La simulation standard ne tient pas compte de la présence de Krill qui est absent dans la majeure part de la partie sud de la Mer de Ross. Le Krill ne peut pas être introduit dans le modèle en tant que variable d'état car son échelle de temps (6 à 7 ans) est supérieur à celle du modèle. Il sort de l'espace du modèle pendant une grande partie de sa vie larvaire (jusqu'à 600 m de profondeur). On force donc cette variable en imposant sa présence, de 0 à 40 m de profondeur, sous la condition de fonte de la glace (fig. 6.7), comme cela a été observé dans la réalité (Azzali *et al.*, 1999). Pendant cette période, le Krill consomme le microphytoplancton sous la glace et dans la colonne d'eau. Sa présence ne limite guère la biomasse du microphytoplancton mais, par contre, le Krill entre en compétition avec les autres espèces macrozooplanctoniques.

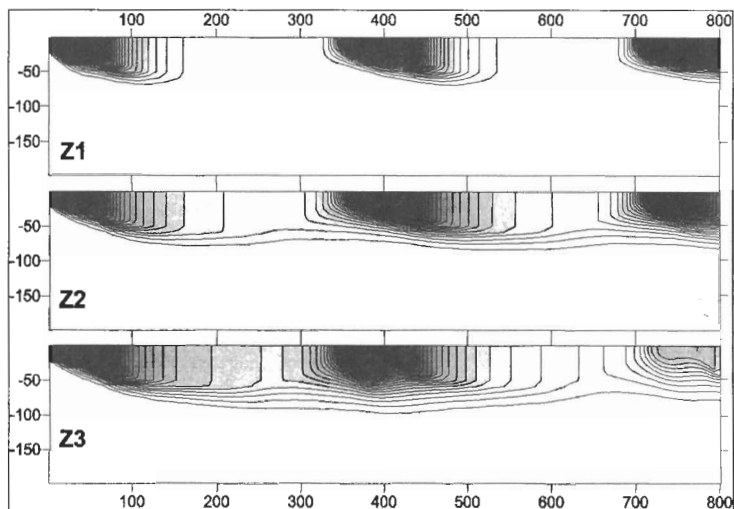


Fig. 6.6. Simulation, en conditions standard, de la variation des profils verticaux des concentrations des trois variables zooplanctoniques (Z1-Z3) [ $\text{mg C m}^{-3}$ ]. La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.

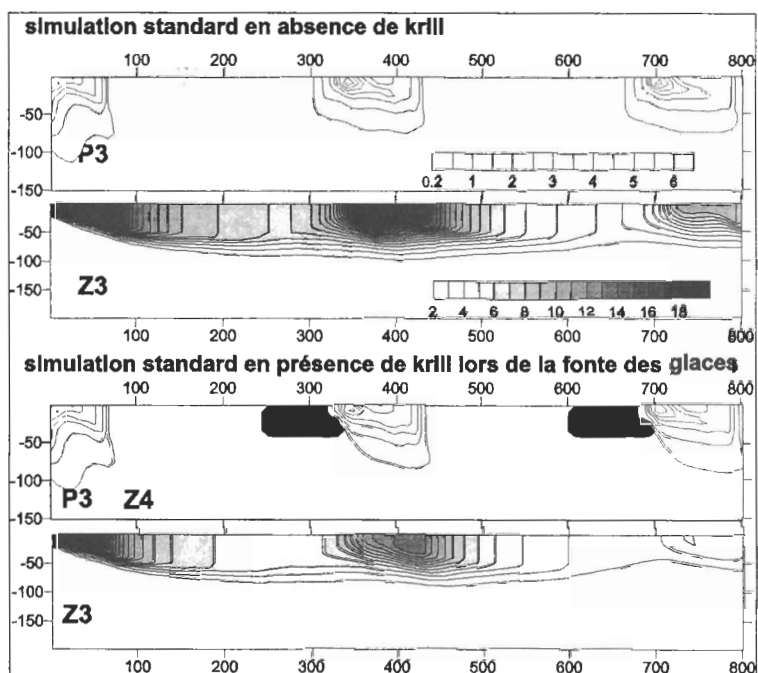


Fig. 6.7. Simulation, en conditions standard de la variation des profils verticaux des concentrations de la variable microphytoplanktonique (P3) [ $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ], de la variables macrozooplanctonique (Z3) et du Krill (Z4) [ $\text{mg C m}^{-3}$ ], en absence et en présence de ce dernier. La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.

## 6.2. L'application du modèle à des conditions spécifiques de la Mer de Ross

Le modèle, testé pour différentes régions de la Mer de Ross en imposant des forçages caractéristiques, simule de manière significative la variabilité de la zone marginale en fonction de la latitude, l'épaisseur de la glace et de la neige, la surface des chenaux, le taux de divergence des glaces, le forçage atmosphérique, les concentration initiales en algues dans la glace et la présence ou l'absence de Krill.

Si on applique les conditions, de vent et de température observées du 20 novembre au 26 novembre 1994 pendant la campagne ROSSMIZE dans le sud de la Polynie de la Mer de Ross, la simulation (fig. 6.8) concorde avec la simulation standard et reproduit la situation observée (fig 3.16, stations 8 à 13). Par contre, si on augmente le vent de 20% pendant la saison estivale et si on impose un coefficient de divergence des glaces de  $0.8 \text{ mois}^{-1}$  (80% de la glace formée est exportée par mois), la glace qui subsiste en fin d'hiver ainsi que son contenu en algues sont réduits. Ceci impose une dessalure plus faible des couches de surface et une stratification réduite. La couche de mélange s'approfondit en été jusqu'à 100 m et la croissance phytoplanctonique est réduite. Cette simulation reproduit les résultats observés dans le nord de la Polynie pendant la seconde partie de la campagne ROSSMIZE (fig 3.16 stations 20 à 25).

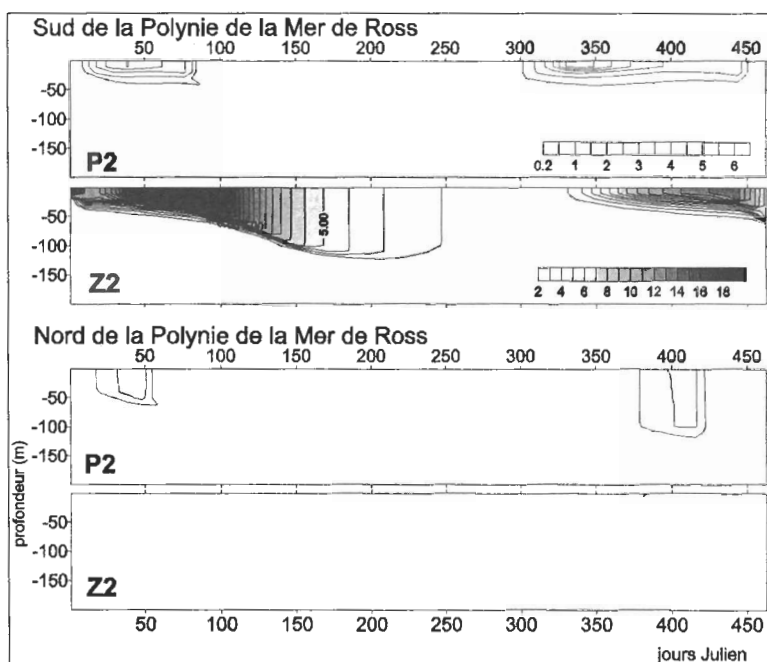


Fig. 6.8. Simulation, en conditions locales observées lors de la campagne ROSSMIZE (nov déc 1994), de la variation des profils verticaux de nanophytoplancton (P2) [ $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ] et de mésozooplancton (Z2) [ $\text{mg C m}^{-3}$ ] dans le sud et dans le nord de la Polynie de la Mer de Ross. La profondeur est exprimée en m et le temps en jours Julien.



Le modèle permet de tester la situation en Baie de Terra Nova, où des coups de vent fort, de type catabatique, surviennent certaines années au mois de novembre. Une augmentation de la vitesse du vent de 40% en novembre a pour effet un abaissement de la température de surface, un retard dans la fonte de la glace, une légère augmentation de l'épaisseur de la couche de mélange et par conséquent un retard et une diminution de la production phytoplanctonique par rapport aux conditions normales pour ce site (fig. 6.9).

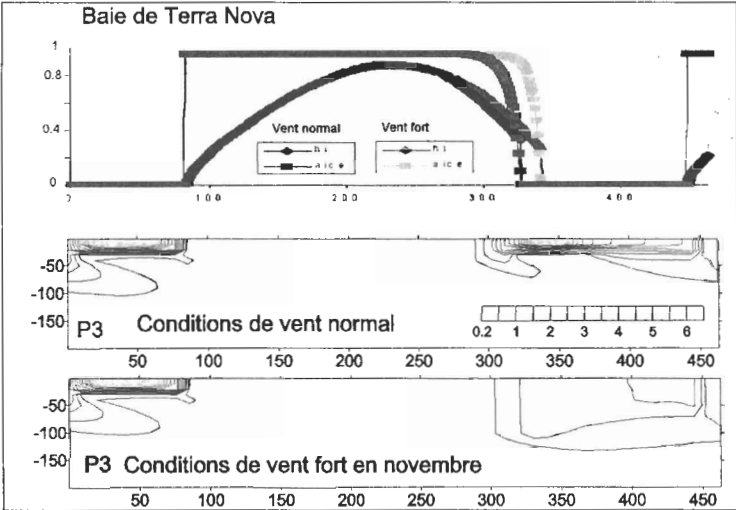


Fig. 6.6. Simulation de la hauteur de glace ( $h_i$ ) [m] de l'aire relative de glace ( $a_{ice}$ ) [s.d.] et des concentrations en microphytoplancton (P3) [ $mg\ chl\ a\ m^{-3}$ ] dans la région de Terra Nova: d'une part, en conditions de vent normal et d'autre part, en injectant une augmentation du vent de 40% pendant le mois de novembre.