## APPLICATIONS DES DESEQUILIBRES DU THORIUM DANS LE SECTEUR INDIEN DE L'OCEAN AUSTRAL

## A- La campagne Antares 4 dans le programme ANTARES

## A-1 Intérêt et stratégie d'Antares 4

Contribution française du programme International JGOFS (" Joint Global Ocean Flux Studies "), le projet ANTARES, initié en 1992, a pour objectif de décrire et de modéliser le cycle du carbone et des éléments biogènes associés dans le secteur Indien de l'océan Austral. L'objectif international est de parvenir à une quantification de la part de l'océan Austral dans les stocks et les flux planétaires de matière biogène (C, N, Si) et principalement dans le cycle du carbone en relation avec les échanges de  $CO_2$  entre l'océan et l'atmosphère et avec la séquestration d'une fraction du carbone biogène dans les eaux profondes ou les sédiments.

La campagne Antares 1 (1993) s'est intéressée aux flux de matière dans l'interface eausédiment dans une bande latitudinale du secteur Indien (40-52°S) regroupant plusieurs structures frontales majeures. Les autres programmes Antares 2 et 3 (1994 pendant l'été austral et 1995 pendant le printemps austral, respectivement) ont concerné l'étude et la modélisation des stocks et des flux de matière biogène dans la couche euphotique et en subsurface dans trois zones : la zone du Front Polaire (PFZ), la zone océanique ouverte en permanence (POOZ) et la zone saisonnière des glaces.

La dernière campagne d'ANTARES a eu lieu dans la région du Front Subantarctique lors de la mission Antares 4 caractérisée aux saisons biologiquement actives par :

- une dynamique intense à grande échelle et la présence de structures secondaires bien marquées à méso-échelle ;
- de fortes biomasses phytoplanctoniques associées à la fois à ces structures physiques et à un puits majeurs de CO<sub>2</sub> (1 GTC/an dans la zone Subantarctique; Metzl et al., 1999);
- des flux annuels importants de matériel particulaire au niveau du fond (résultats d'Antares 1)

L'objectif général d'Antares 4 est la description, la quantification et la modélisation des stocks et des flux de matière biogène (C, N, Si) produite dans la couche euphotique et exportée, en relation avec la pompe biologique de CO<sub>2</sub>. La campagne s'est déroulée du 4/01/99 au 23/02/99 à 42-47°S de latitude et à 60-66°E de longitude à bord du N.O. Marion-Dufresne II. La zone d'étude est comprise entre les fronts Subantarctique (SAF) et Subtropical (STF), dans le bassin Kerguelen-Crozet. Les études de paramétrisation des flux de matière dans la colonne d'eau soulignent que certains processus sont mal caractérisés. Pour cela, mon travail de thèse propose d'étudier le devenir du flux vertical des particules marines et les étapes importantes de la chaîne d'échange entre la solution et les particules en se basant sur les déséquilibres des isotopes du thorium. L'intérêt d'une telle étude dans le cadre du programme Antares 4 est d'analyser la variabilité spatiale de la production exportée (estimée à partir du <sup>234</sup>Th) en réponse à celle de la productivité des eaux de surface et de la communauté phytoplanctonique. La présence de trois fronts hydrologiques resserrés dans le secteur Indien de l'océan Austral rend complexe l'étude des mouvements de masse d'eaux profondes, affectant le flux vertical de matière, à partir de

données de <sup>230</sup>Th. Enfin, nous montrerons qu'un couplage entre le <sup>234</sup>Th et le <sup>230</sup>Th peut apporter des informations nouvelles au sujet de la chute des particules marines et des paramètres contrôlant les échanges dissous-particules.

Au cours de la mission Antares 4, les structures physiques à méso-échelle ont fait l'objet d'une reconnaissance à l'aide de moyens de mesure en continu (XBT, CTD, TOWYO) déployés selon différents transects (XBT) pour une identification rapide des structures frontales ou parallèlement aux traces d'orbites du satellite TOPEX-POSEIDON (CTD, TOWYO) suivant une grille avec résolution spatiale très fine (20 km). La structure hydrologique des zones frontales adjacentes a été étudiée de façon plus détaillée (grille de transects CTD et TOWYO). En outre, la distribution associée des propriétés biologiques a été mesurée en parallèle (cartographie multiparamétrique des eaux de surface, profils multiples dans les différentes zones). Enfin, l'obtention d'images SeaWifs avec très peu de différé a conforté le choix de la zone d'étude et révèle une décroissance continue du signal chlorophyllien depuis le début de la campagne, permettant de situer la période de l'efflorescence avant le début des opérations.

La connaissance ainsi acquise des structures à méso-échelle a permis de positionner trois stations longues (durée unitaire de 4 jours) conduites sur le mode lagrangien en suivant une bouée dérivante instrumentée, équipée d'un piège à particules situé à 200 m de profondeur. Ces stations, reportées sur la Figure 1 ont été consacrées à l'étude des processus de production et d'exportation de la matière biogène. La première de ces stations (station 3), la plus au sud, a été placée dans les eaux Subantarctiques (fortes teneurs en N, P et faibles teneurs en Si), la deuxième (station 7), dans la zone frontale comprise entre la veine du courant principal et le courant de retour des Aiguilles et enfin la troisième (station 8), la plus au nord, a été choisie dans les eaux oligotrophes Subtropicales (faibles teneurs en N, P et Si) sous influence du courant de retour des Aiguilles. Pour les stations 3 et 7, les échantillons ont été prélevés sur deux jours, notés respectivement St3J1 et St3J4 (pour 1<sup>er</sup> et 4<sup>ème</sup> jour) et St7J2 et St7J5 (pour 2<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> jour). Pour la station 8, le prélèvement d'échantillons s'est fait sur une seule journée. Entre temps, trois stations de courte durée (4 h) ont été placées sur la grille de transects CTD et TOWYO (G1, G2, G4) afin de mesurer la production exportée au-delà de la couche euphotique.

Pour les stations 3J4, 7J5 et 8J4, la colonne d'eau (dissous et petites particules) a été échantillonnée de 0 à 3500 m en 8-9 profondeurs : 10 m, 30 m (et/ou la profondeur de la fluorescence maximale), 100 m, 200 m, 500 m, 1500 m, 2500 m, 3500 m. Pour les stations 3J1, G1, G2, G4, et 7J2, les échantillons ont été prélevés de 0 à 500 m en 5 profondeurs : 10 m, 50 m, 100 m, 200 m et 500 m. Dans le cas des grosses particules marines, la colonne d'eau a été échantillonnée aux stations 3, 7 et 8 de la surface jusqu'à 2400 m de profondeur.



Figure 1 : Carte des fronts et stations pendant Antares 4 (SAF: Front Subantarctique; STF: Front Subtropical; AF: Front associé au courant de Retour des Aiguilles)

## A-2 Description de la zone d'étude

La zone d'échantillonnage Antares 4 est caractérisée par la confluence de trois fronts hydrographiques présents sur une largeur de 100 à 200 km. Ces fronts sont caractérisés par des critères de température et de salinité à 200 m de profondeur et délimitent des régions hydrologiques distinctes :

- le front Subantarctique (SAF) est défini par une température et une salinité de 6°C et 34,3 ‰ respectivement. Il se situe entre le front Polaire (PF) et le front Subtropical. Il coïncide

également avec la subduction de l'eau Antarctique Intermédiaire (AAIW) vers le nord. Il marque la limite nord de la zone du Front Polaire (PFZ)

- le front Subtropical (STF) est caractérisé par une température moyenne de 10°C et une salinité de 34,8 ‰. Dans le bassin de Crozet, le rapprochement du STF avec le SAF est lié à un effet d'obstacle du plateau de Kerguelen. Entre ces deux fronts se trouve la zone Subantarctique (SAZ). Au nord du STF commence la zone Subtropicale (STZ)
- le front associé au courant de retour des Aiguilles (AF) est repéré par une température supérieure à 12°C et une salinité variant de 35,1 à 35,5 ‰ (Park et al., 1993; Park and Gamberoni, 1995)

1- Les stations 3 et G1 (46-45 °S et 63°E)

Ces stations sont situées dans la PFZ (Figure 2a). Dans cette zone, les eaux de surface sont essentiellement composées d'eau Subantarctique de Surface (SASW). Ces eaux recouvrent l'AAIW qui elle-même se superpose à l'eau profonde Nord Atlantique (NADW). La NADW se caractérise au niveau de l'Atlantique Sud par une température comprise entre 3 et 4°C et une salinité de 34.9‰. Plus froide et plus salée que la NADW, l'eau profonde Circumpolaire (CDW) circule avec l'ACC tout autour du continent Antarctique et se sépare vers le nord en deux branches lorsqu'elle rencontre la NADW. L'une circule sous cette dernière (LCDW) et l'autre au-dessus (UCDW) (Machu, 2000). Enfin, au fond, on note la présence de l'eau Antarctique de Fond (AABW).

A la station 3, selon les profils de température, de salinité, de densité ( $\theta$ , S,  $\sigma$ ) et de fluorescence, la couche de mélange se situe entre 0 et 45 m et la couche euphotique entre 0 et 138 m. En surface, la concentration des nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) est modérée (~ 20 µM) alors que celle des silicates (SiO<sub>2</sub>) est faible (1-2 µM; Sedwick et al., Submitted). Toutefois, ces valeurs de sels nutritifs sont parmi les plus élevées de la zone Antares 4 : il s'agit réellement d'une région HNLC (High Nutrients and Low Chlorophyll). La quantité de fer dissous mesurée dans la PFZ semble être forte comparé à l'ensemble de l'océan Austral. En effet, un enrichissement en fer dissous et total est visible au niveau de la base de la couche de mélange. Ceci peut-être lié à un apport de sédiments provenant du plateau de Crozet (Bucciarelli, 2001).

En ce qui concerne le phytoplancton, la PFZ est dominée par le nanophytoplancton alors que les diatomées sont relativement peu présentes. On observe également une accumulation importante de coccolithophores *Michaelsaisia sp.* (Leblanc et al., Submitted).

#### 2- Les stations 7, G2 et G4 (45-44 °S et 63,5-62,5°E)

Dans la région située entre les fronts STF et AF (Figure 2b), les eaux de surface sont un mélange d'eau de surface Subtropicale (STSW) et de SASW (Read and Pollard, 1993) avec une température supérieure à 12°C. Sous ces eaux, on note la présence d'eau Modale Subantarctique (SAMW) caractérisée par une concentration en oxygène maximale. Cette masse d'eau épaisse de

400 à 600 m est formée par la convection profonde hivernale au nord de l'ACC. Au niveau des eaux intermédiaires, on observe une salinité minimale qui met en évidence l'intrusion de l'AAIW à environ 1000 m de profondeur (Park and Gamberoni, 1997). Enfin, plus au fond, on retrouve les eaux NADW et AABW.

A la station 7, la colonne d'eau est marquée par une forte pycnocline entre 60 et 100 m. D'après les données de  $\theta$ , S,  $\sigma$  et de fluorescence, on observe que les bases de la couche de mélange et euphotique sont très proches (70 et 76 m, respectivement). Dans la confluence Subantarctique/Subtropicale, les stations 7, G2 et G4 présentent des valeurs comparables en sels nutritifs et en fer. Dans la couche de surface, on observe des concentrations faibles en SiO<sub>2</sub> (0,1-0,2  $\mu$ M) et en fer dissous (0,08-0,14 nM; Bucciarelli, 2001; Leblanc et al., Submitted). Bien que située au nord du STF, les eaux de surface de la station 7 sont typiques de la SAZ (faible SiO<sub>2</sub> et faible salinité). Ainsi, ces eaux ont sans doute été advectées depuis le sud du STF (Sedwick et al., Submitted). Dans ce cas, les nutriments provenant des eaux profondes et froides de la SAZ (et/ou PFZ) enrichiraient les eaux situées plus au nord où ils sont consommés.

A la station 7, les coccolithophores sont majoritaires et les flagellées sont dominés par les dinoflagellés (> 10  $\mu$ m). Quant aux diatomées, leurs concentrations augmentent mais elles sont à la fin de leur période de production (fin de bloom).

3- La station 8 (43°S et 62,5°E)

La station 8 est caractérisée, en surface, par la STSW avec une température de 18°C. En dessous, on retrouve la même configuration que les autres stations situées en STZ (voir ci-dessus) (Figure 2c).

La station 8 est une station située en zone oligotrophe. Dans la colonne d'eau, on observe une forte thermocline et pycnocline entre 75 et 100 m. Elle est marquée par une couche euphotique plus profonde que la couche de mélange (95 et 75 m, respectivement). Les concentrations en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont inférieures à la limite de détection (< 0,1  $\mu$ M). Les concentrations des silicates et du fer dissous sont faibles (~ 1,4  $\mu$ M et ~ 0,1-0,2  $\mu$ M, respectivement ; Sedwick et al., Submitted). Dans ces eaux, les nitrates et les phosphates sont le premier facteur limitant, le fer étant un facteur co-limitant (Bucciarelli, 2001).

Comme pour les stations précédentes, on retrouve à la station 8 une prédominance des dinoflagellés et des diatomées en fin de bloom (Leblanc et al., Submitted).



Figure 2 : Diagrammes Θ-S des stations suivant les régions hydrologiques (SASW: Eau de Surface Subantarctique; STSW: Eau de Surface Subtropicale; SAMW: Eau Modale Subantarctique; AAIW: Eau Antarctique Intermédiaire; UCDW: Eau Circumpolaire Supérieure; NADW: Eau Nord Atlantique de Fond ; AABW: Eau Antarctique de Fond )

### B- Estimation de la production exportée à Antares 4

## B- 1 Les profils de <sup>234</sup>Th dans la colonne d'eau (voir Tableau 1)

Les activités de <sup>234</sup>Th des échantillons (dissous et petites particules) ont été mesurées en fonction de la profondeur. En parallèle, nous avons déterminé l'activité de l'<sup>238</sup>U à partir de la salinité en utilisant la relation <sup>238</sup>U (dpm/l) = 0,071×S(‰) avec une précision de  $\pm 5 \%$  (2 $\sigma$ ) (Chen et al., 1986). Lorsque l'activité du <sup>234</sup>Th total de l'échantillon (la somme des activités dissous et particules) est égale à celle de l'<sup>238</sup>U, le <sup>234</sup>Th total est en équilibre séculaire avec l'<sup>238</sup>U c'est-à-dire que tout le <sup>234</sup>Th produit par désintégration alpha de l'<sup>238</sup>U est éliminé de la colonne d'eau par désintégration bêta du <sup>234</sup>Th. A partir de la base de la couche euphotique, cet équilibre est, en général, atteint jusqu'au fond de la colonne d'eau. Dans le cas où les activités de <sup>234</sup>Th total sont différentes de celles de l'<sup>238</sup>U, il s'agit d'un déséquilibre <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U. Un déficit en <sup>234</sup>Th est souvent lié au processus de " scavenging " : c'est un indicateur de l'export de matière particulaire vers le fond. Dans le cas inverse (excès <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U), la reminéralisation des particules rentre en jeu (Coale and Bruland, 1985; Coale and Bruland, 1987). Cependant, d'autres mécanismes peuvent expliquer ces variations par rapport à l'équilibre séculaire et seront vus dans la partie -3.

## 1- La fraction particulaire

Pour les petites particules (> 0,6  $\mu$ m et < 60  $\mu$ m), toutes les activités de <sup>234</sup>Th mesurées dans la zone d'étude Antares 4 diminuent avec la profondeur. Cependant, on remarque que les valeurs de la couche de surface diffèrent entre elles : l'activité de <sup>234</sup>Th est relativement faible pour les stations localisées dans la PFZ (de l'ordre 0,4-0,5 dpm/l) et plus élevée dans la STZ (entre 1 et 1,3 dpm/l). En surface, l'activité du <sup>234</sup>Th pour la station 8 est légèrement inférieure aux précédentes (0,7 à 0,8 dpm/l). Enfin, pour toutes les stations, on note que les profondeurs des activités de <sup>234</sup>Th maximales sont identiques aux profondeurs de fluorescence maximales (30 à 50 m suivant les zones). Pour les grosses particules marines (> 60  $\mu$ m), les profils de <sup>234</sup>Th montrent des valeurs d'activités bien inférieures à celles des petites particules (5 à 60 fois plus faibles). Comme dans le cas des petites particules, les activités du <sup>234</sup>Th dans les grosses particules sont plus faibles à la station 3 qu'aux stations 7 et 8.

Station	$^{234}Th_{d}\pm1\sigma$	$^{234}$ Th <sub>2</sub> ± 1 $\sigma$	$^{234}$ Th <sub>t</sub> $\pm 1\sigma$	<sup>238</sup> U	$^{234}$ Th/ $^{238}$ U $\pm 1\sigma$	
(m)	<0.6 µm (dnm/l)	>0.6  um  (dnm/l)	(dnm/l)	(dnm/l)	(dnm/dnm)	
(upin/upin/upin/upin/upin/upin/upin/upin/						
10	$0.3 \pm 0.2$	$0.379 \pm 0.009$	$0.6 \pm 0.2$	2.4	$0.3 \pm 0.1$	
50	$0,3 \pm 0,2$ 1 4 + 0 2	$0,379 \pm 0,009$ 0 378 + 0 011	$0,0 \pm 0,2$ 1 8 ± 0 2	2,4	$0,3 \pm 0,1$ 0.7 ± 0.1	
100	$1, 4 \pm 0, 2$ 2 3 + 0 2	$0,378 \pm 0,011$ 0.141 + 0.005	$1,0 \pm 0,2$ 2 4 + 0 2	2,4	$0,7 \pm 0,1$ 1 0 + 0 1	
200	$2,3 \pm 0,2$ 2,3 + 0,2	$0,104 \pm 0,003$	$2,1 \pm 0,2$ 2,4 + 0,2	2.4	$1,0 \pm 0,1$ 1 0 + 0 1	
500	$2,3 \pm 0,2$ $2,2 \pm 0,2$	$0,086 \pm 0,004$	$2,3 \pm 0,2$	2,4	$0.9 \pm 0.1$	
St3J4 (#OPA077, 45,66°S, 63,11°E, 4320m)						
10	$1,0 \pm 0,2$	0,413 ± 0,013	$1,4 \pm 0,2$	2,4	$0,6 \pm 0,1$	
30	$1,5 \pm 0,2$	$0,517 \pm 0,031$	$2,0 \pm 0,2$	2,4	$0,9 \pm 0,1$	
50	$1,4 \pm 0,2$	$0,367 \pm 0,013$	$1,7 \pm 0,2$	2,4	$0,7 \pm 0,1$	
100	$2,8 \pm 0,2$	$0,149 \pm 0,006$	$2,9 \pm 0,2$	2,4	$1,2 \pm 0,1$	
200	$1,9 \pm 0,2$	$0,390 \pm 0,017$	$2,3 \pm 0,2$	2,4	$1,0 \pm 0,1$	
500	$2,4 \pm 0,2$	$0,094 \pm 0,005$	$2,5 \pm 0,2$	2,4	$1,0 \pm 0,1$	
1500	$1,7 \pm 0,2$	$0,085 \pm 0,004$	$1,8 \pm 0,2$	2,5	$0,7 \pm 0,1$	
2500	$1,7 \pm 0,2$	$0,052 \pm 0,004$	$1,7 \pm 0,2$	2,5	$0,7 \pm 0,1$	
3000	-	$0,133 \pm 0,010$	-	2,5	-	
3500	$1,7 \pm 0,2$	$0,069 \pm 0,004$	$1,8 \pm 0,2$	2,5	$0,7 \pm 0,1$	
GI (#OPA097, 45,19°S	5, 63,08°E, 4731m)	0.000	1.5 . 0.0	2.4	0.0.1	
10	$1,4 \pm 0,2$	$0,323 \pm 0,020$	$1,7 \pm 0,2$	2,4	$0,2 \pm 0,1$	
50	$1,2 \pm 0,2$	$0,33/\pm 0,018$	$1,5 \pm 0,2$	2,4	$0,6 \pm 0,1$	
200	$1,2 \pm 0,2$	$0,2/0 \pm 0,015$	$1,5 \pm 0,2$	2,4	$0,6 \pm 0,1$	
200	$1,9 \pm 0,2$ 2.0 ± 0.2	$0,114 \pm 0,008$ 0.162 ± 0.011	$2,0 \pm 0,2$ $2,2 \pm 0,2$	2,4	$0,8 \pm 0,1$ 0.0 ± 0.1	
<b>500</b> 2,0 $\pm$ 0,2 0,162 $\pm$ 0,011 2,2 $\pm$ 0,2 2,4 0,9 $\pm$ 0,1						
10	$1.0 \pm 0.2$	$1 138 \pm 0.056$	$21 \pm 0.2$	2.4	$0.9 \pm 0.1$	
35	$1,0 \pm 0,2$ 1 3 ± 0 2	$1,138 \pm 0,050$ 1 218 ± 0.060	$2,1 \pm 0,2$ 2.6 ± 0.2	2,4	$0,9 \pm 0,1$ 1 1 + 0 1	
50	$1,5 \pm 0,2$ 1 1 + 0 2	$1,210 \pm 0,000$ $1,016 \pm 0.049$	$2,0 \pm 0,2$ 2 1 + 0 2	2.4	$1,1 \pm 0,1$ 0.9 + 0.1	
200	$2.7 \pm 0.2$	$0.186 \pm 0.012$	$2,1 \pm 0,2$ 2.9 ± 0.2	2.5	$0,9 \pm 0,1$ 1 2 + 0 1	
500	$2,7 \pm 0,2$	$0,100 \pm 0,012$ 0.148 + 0.010	2,9 = 0,2 2.8 + 0.2	2.4	1,2 = 0,1 1 2 + 0 1	
$\frac{2,7 \pm 0,2}{\text{G4} (\#\text{OPA124}, 44.33^{\circ}\text{S}, 62.53^{\circ}\text{E}, 4928\text{m})}$						
10	$1,3 \pm 0,2$	$1,020 \pm 0,048$	$2,4 \pm 0,2$	2,5	$1,0 \pm 0,1$	
30	$1,0 \pm 0,2$	$0,944 \pm 0,042$	$1,9 \pm 0,2$	2,5	$0,8 \pm 0,1$	
100	$2,5 \pm 0,2$	0,371 ± 0,019	$2,9 \pm 0,2$	2,4	$1,2 \pm 0,1$	
200	$2,4 \pm 0,2$	0,187±0,011	$2,6 \pm 0,2$	2,5	$1,0 \pm 0,1$	
500	$2,2 \pm 0,2$	$0,164 \pm 0,010$	$2,4 \pm 0,2$	2,5	$1,0 \pm 0,1$	
St7J2 (#OPA168, 44,07°S, 63,73°E, 4928m)						
10	$1,0 \pm 0,2$	$1,263 \pm 0,033$	$2,3 \pm 0,2$	2,4	$0,9 \pm 0,1$	
35	$0,8 \pm 0,2$	$1,106 \pm 0,029$	$2,0 \pm 0,2$	2,4	$0,8 \pm 0,1$	
100	$1,8 \pm 0,1$	$0,183 \pm 0,007$	$2,0 \pm 0,1$	2,5	$0,8 \pm 0,1$	
200	$2,2 \pm 0,2$	$0,110 \pm 0,005$	$2,3 \pm 0,1$	2,5	$0,9 \pm 0,1$	
500	$2,2 \pm 0,2$	$0,110 \pm 0,005$	$2,3 \pm 0,2$	2,5	$0,9 \pm 0,1$	
St7J5 (#OPA240/244, 44,01°S, 64,73°E, 4551/4798m)						
10	$0,9 \pm 0,2$	$0,985 \pm 0,028$	$1,9 \pm 0,2$	2,4	$0,8 \pm 0,1$	
40	$0,8 \pm 0,1$	$0,911 \pm 0,022$	$1,7 \pm 0,2$	2,4	$0,7 \pm 0,1$	
200	$2,1 \pm 0,1$	$0,318 \pm 0,007$	$2,4 \pm 0,1$	2,5	$1,0 \pm 0,1$	
200	$2,2 \pm 0,2$ 2,2 ± 0,2	$0,154 \pm 0,006$ 0.107 ± 0.005	$2,3 \pm 0,2$	2,5	$0,9 \pm 0,1$ 1.0 ± 0.1	
1500	$2,5 \pm 0,2$ 2.8 ± 0.2	$0,107 \pm 0,003$	$2,4 \pm 0,2$	2,5	$1,0 \pm 0,1$ 1 2 + 0 1	
2500	$2,8 \pm 0,2$ 2,4 ± 0,2	$0,032 \pm 0,004$ 0.074 ± 0.004	$2,9 \pm 0,2$ 2,5 ± 0,2	2,5	$1,2 \pm 0,1$ 1 0 + 0 1	
3500	$2,4 \pm 0,2$ 2 1 + 0 2	$0.091 \pm 0.004$	$2,3 \pm 0,2$ 2 2 + 0 2	2,5	$1,0 \pm 0,1$ 0.9 + 0.1	
St8J4 (#OPA324, 42.91°S, 63.08°E, 4998m)						
10	1.4 + 0.1	$0.799 \pm 0.015$	$2.2 \pm 0.1$	2.5	$0.9 \pm 0.1$	
46	$1.2 \pm 0.2$	$0,726 \pm 0.020$	$1.9 \pm 0.2$	2,5	$0.8 \pm 0.1$	
100	$1.9 \pm 0.2$	$0,334 \pm 0.008$	$2,3 \pm 0.2$	2,5	$0.9 \pm 0.1$	
200	$2,2 \pm 0.2$	$0,152 \pm 0.006$	$2,4 \pm 0.2$	2,5	$0.9 \pm 0.1$	
500	$2,3 \pm 0.2$	$0,077 \pm 0.005$	$2,4 \pm 0.2$	2,5	$1,0 \pm 0,1$	
1500	$2,8 \pm 0,2$	$0,098 \pm 0,004$	$2,9 \pm 0,2$	2,4	$1,2 \pm 0,1$	
2500	$2,5 \pm 0,2$	$0,085 \pm 0,005$	$2,6 \pm 0,2$	2,5	$1,1 \pm 0,1$	
3500	$2,4 \pm 0,2$	$0,086 \pm 0,005$	$2,5 \pm 0,2$	2,5	$1,0 \pm 0,1$	

# Tableau 1a : Activités du <sup>234</sup>Th dans la phase dissoute (d), petites particules (p) en dpm/l pendant la mission Antares 4

Station (m)	<sup>234</sup> Th <sub>g</sub> ±1σ >60 μm (dpm/10 <sup>3</sup> l)			
St3 (#OPA029-45, 46°S, 62.8°E, 4227 m)				
100	$8,4 \pm 0,1$			
1000	$0,5 \pm 0,1$			
1500	$5,1 \pm 0,5$			
2400	$0,8 \pm 0,3$			
St7 (#OPA164-184, 44°S, 63.8°E, 4769 m)				
30	$30,4 \pm 0,3$			
100	$6,7 \pm 0,1$			
200	$31,1 \pm 1,0$			
500	$5,4 \pm 0,1$			
1500	$1,9 \pm 0,1$			
2400	$2,1 \pm 0,1$			
St8 (#OPA324-340, 42.9°S, 63.1°E, 4998 m)				
100	$29,8 \pm 0,2$			
200	$21,8 \pm 0,1$			
500	$5,8 \pm 0,1$			
1000	$28,9 \pm 0,5$			
1500	$11,4 \pm 0,1$			
2400	$2,5 \pm 0,1$			

Tableau 1b : Activités du <sup>234</sup>Th dans les grosses particules (g) en (dpm/10<sup>3</sup>l) pendant la mission Antares 4 (pompes *in situ*)

2- Le déséquilibre <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U

Pour les stations localisées dans la PFZ, les rapports <sup>234</sup>Th(total)/<sup>238</sup>U dans la couche de surface (0-500 m) sont compris entre 0,26 et 1 avec un excès de 1,22 à 100 m de profondeur pour la station 3J4 (Figure 3a). Au-delà de la couche photique (100 m), les activités du <sup>234</sup>Th atteignent l'équilibre séculaire aux stations 3J1 et G1. Bien que situés à la même position géographique, les profils observés aux stations 3J1 et 3J4 montrent des activités en <sup>234</sup>Th bien différentes. Ceci peut s'expliquer, en partie, par le passage d'une dépression dans la zone d'étude entre le 1<sup>er</sup> et le 4<sup>ème</sup> jour d'échantillonnage. De ce fait, les eaux de surface ont pu être mélangées et perturbées ainsi les activités initiales du <sup>234</sup>Th. Au-delà de 500 m de profondeur on observe un déséquilibre constant (<sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U = 0,7) dans la couche profonde (500-3500 m) dans la station 3J4 (Figure 3c). Ceci sera explicité ultérieurement dans le paragraphe 3. Dans la région STZ, les profils de <sup>234</sup>Th montrent un équilibre séculaire quasi permanent le long de la colonne d'eau (Figure 3b). Un faible excès de l'ordre de 1,15 est observé aux stations G2, G4 et 7J5 à 500 m, 100 m et 1500 m respectivement. Enfin, pour la station 8J4, on retrouve un profil de <sup>234</sup>Th identique à celui de la station 7J5 avec aussi un excès du rapport <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U égal à 1,15 à 1500 m de profondeur (Figure 3c).



Figure 3a: Profils des activités du <sup>234</sup>Th (en dpm/l) et de fluorescence dans la PFZ (0-500 m)



Figure 3b: Profils des activités du <sup>234</sup>Th (en dpm/l) et de fluorescence dans la STZ (0-500 m)



Figure 3c: Profils des activités du <sup>234</sup>Th (en dpm/l) aux stations 3, 7 et 8 (0-3500 m)

## 3- Discussion qualitative des résultats

Etant donné que le <sup>234</sup>Th est un élément réactif aux particules et de courte demi-vie, sa concentration dans les particules est proportionnelle à la quantité de particules présentes dans la colonne d'eau. En effet, les petites particules (ou particules en suspension) sont plus importantes en surface car liées à la production biologique (corrélée avec la fluorescence) et diminuent en profondeur notamment à cause de la dégradation bactérienne. L'étude du <sup>234</sup>Th faite en mer de Barents montre une bonne corrélation, en surface, entre la vitesse d'absorption du <sup>234</sup>Th (terme k<sub>1</sub>) et la quantité de carbone contenue dans les flagellés, constituant dans cette zone la majorité des particules en suspension (Coppola et al. Accepted ; Chapitre 3). Le fait que les activités de <sup>234</sup>Th sur les grosses particules soient beaucoup plus faibles s'expliquent par l'abondance de ces dernières. En effet, dans la colonne d'eau, le temps de résidence (et donc l'abondance) des grosses particules

est faible. Ceci est lié à leurs vitesses de chute plus importantes (100 à 1000 m/j) qui dépendent de leurs densités et de leurs tailles. Ainsi, la faible quantité des grosses particules dans la colonne d'eau limite les activités du <sup>234</sup>Th sur ces dernières.

La plupart des valeurs de <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U dans la colonne d'eau, pendant la mission Antares 4, suivent un schéma classique : déséquilibre entre 0 et 100 m lié à l'activité biologique et équilibre séculaire au fond. Cependant, deux points doivent être éclaircis.

Dans le but de mieux cerner les activités du <sup>234</sup>Th dissous (obtenues avec un compteur bêta), d'autres mesures ont été effectuées en parallèle par S. Mulsow et al. (2000) à l'aide d'un compteur gamma (prélèvement à l'aide des cartouches de manganèse montées sur les pompes *in situ* utilisées à Antares 4). Cependant, seuls les échantillons entre 0 et 500 m de profondeur ont été analysés par les deux méthodes aux stations 3, 7 et 8. A ces profondeurs, les activités du <sup>234</sup>Th dissous mesurées en gamma sont, en moyenne, 5 à 10 % plus élevées aux trois stations. Cette différence reste faible et cela suggère que les activités du <sup>234</sup>Th mesurées en bêta sont fiables malgré la faible quantité d'eau de mer utilisée pour le comptage bêta du <sup>234</sup>Th dissous (5 litres) par rapport au comptage gamma (entre 200 et 850 litres).

Dans la couche d'eau profonde (1500 – 3500 m) de la station 3J4, le déséquilibre constant <sup>234</sup>Th/<sup>238</sup>U semble lié à un problème de mesures des activités de <sup>234</sup>Th et pour ces profondeurs seuls les mesures bêta sont disponibles. En effet, malgré la proximité du plateau des îles Kerguelen (650 km) et d'un haut-fond à cet endroit de la zone pouvant apporter par advection des particules lithogènes (resuspension de sédiments), on n'observe aucune augmentation du <sup>234</sup>Th dans les particules au-delà de 1500 m de profondeur (Bacon and Rutgers van der Loeff, 1989 ; Turnewitsch and Springer, 2001). En fait, seules les incertitudes liées aux mesures de volume des échantillons filtrés (voir Chapitre 2) pourraient expliquer l'écart important entre le <sup>234</sup>Th total et <sup>238</sup>U de la station 3J4.

L'autre point concerne le maximum d'activité du <sup>234</sup>Th total (et de dissous) observé à 1500 m de profondeur pour les stations 7J5 et 8J4 dans la STZ. Une hypothèse pourrait expliquer cet excès de <sup>234</sup>Th total par rapport à l'équilibre séculaire. La présence d'activité bactérienne visible en surface dans la STZ (Panagiotopoulos et al., Submitted) pourrait être responsable d'une reminéralisation importante de la matière organique. En outre, si cette matière est constituée, en majorité, de composés labiles "jeunes" (notamment de carbone), cette reminéralisation pourrait alors amenée du <sup>234</sup>Th dissous en quantité non négligeable.

## B- 2 Estimation des flux nets de <sup>234</sup>Th

Pour estimer les flux de <sup>234</sup>Th dissous se fixant sur les particules (terme  $J_{Th}$ ) et de <sup>234</sup>Th particulaire chutant vers le fond de la colonne d'eau (terme  $F_{Th}$ ), on utilise le modèle irréversible décrit dans le chapitre 1 (Eq 1 à 4). Dans ce cas, on suppose un état stationnaire et on néglige les transports advectif et diffusif (supposés petits par rapport à l'export de <sup>234</sup>Th sur les particules et la décroissance radioactive). De même, on peut estimer les temps de résidence pour la fraction dissoute et particulaire du <sup>234</sup>Th ( $\tau_d$  et  $\tau_p$ ) :