

Variabilité et origine des apports détritiques dans le secteur indien de l’océan Austral au cours des derniers 30 000 ans

Sandrine MANTHÉ ^{a*}, Gilles BAREILLE ^a, Marie-Ève SALVIGNAC ^a, Monique LABRACHERIE ^a,
Flavien LEMOINE ^b, Laurent LABEYRIE ^{b,c}

^a Département de géologie et océanographie, UMR-CNRS 5805, Epec, université de Bordeaux-I,
avenue des facultés, 33405 Talence cedex, France

^b Laboratoire des sciences du climat et de l’environnement, unité mixte CEA-CNRS,
91198 Gif-sur-Yvette cedex, France

^c Université de Paris-Sud, 91405 Orsay cedex, France

Reçu le 8 janvier 1999, reçu en forme révisée le 16 août 1999, accepté le 30 août 1999

Abstract – Variability and origin of detrital fluxes in the Indian sector of the Southern Ocean during the past 30 000 years. The surface water circulation variability in the southeastern Indian Sector has been investigated using micropalaeontological and isotopic analysis in a deep-sea core located near the Subantarctic Front. The frequency and intensity of iceberg and meltwater discharges have been studied by counting detrital grains $>45 \mu\text{m}$, by determining their mineralogical composition, and by measuring $\delta^{18}\text{O}$ in the planktonic foraminifera *Neogloboquadrina pachyderma sinistral*. The variability of hydrologic fronts was determined by estimating the sea surface temperatures (SST) using the Imbrie and Kipp foraminifera transfer function. Four iceberg discharge events were determined between 24 and 12 ka ^{14}C BP during the last glacial stage. Distinct but low magnitude increases in lithic grain concentrations probably indicate little-modified surface hydrology. There is no evidence of significant variation in $\delta^{18}\text{O}$ isotopic anomalies. A comparison of southern iceberg discharges with North Atlantic Heinrich events shows that these events occur more or less synchronously but depict differences in the dynamics of deposition. © 2000 Ifremer/CNRS/IRD/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Southern Ocean / ice-rafted-detritus / mineralogy / icebergs

Résumé – La variabilité des caractéristiques des eaux de surface du secteur est-indien de l’océan Austral a été examinée à partir de marqueurs micropaléontologiques et isotopiques dans une carotte de sédiments marins profonds, située actuellement dans la zone du front subantarctique. La fréquence et l’intensité des décharges d’icebergs et d’eau de fonte ont été étudiés à partir des comptages et de la minéralogie des particules détritiques dans les fractions 45–150 μm et $> 150 \mu\text{m}$ et à l’aide du $\delta^{18}\text{O}$ mesuré sur les tests du foraminifère planctonique *Neogloboquadrina pachyderma* forme senestre. Les variations de la position des fronts hydrologiques ont été établies par la reconstitution des paléotempératures de surface, basée sur des techniques de fonctions de transfert qui utilisent la distribution des assemblages de foraminifères planctoniques. Quatre événements de décharges d’icebergs sont mis en évidence au cours du dernier stade glaciaire, entre 24 et 12 ka ^{14}C BP. Ces événements sont bien individualisés mais ne créent pas d’importants flux de détritiques ou d’anomalie isotopique significative. Ils sont associés à des températures de surface qui soulignent la proximité du front polaire. La comparaison des événements de décharges d’icebergs enregistrés dans l’océan Austral avec ceux de l’Atlantique Nord (événements dits d’Heinrich) montre que les décharges d’icebergs se déroulent dans les deux hémisphères au

* Correspondance et tirés à part : s.manthe@geocean.u-bordeaux.fr

cours de périodes de temps très voisines, mais qu'ils présentent des caractéristiques de dépôt différentes. © 2000 Ifremer/CNRS/IRD/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

océan Austral / particules détritiques / minéralogie / icebergs

1. INTRODUCTION

L'océan Atlantique Nord et l'océan Austral sont des lieux privilégiés de formation d'eau profonde. Ils jouent ainsi un rôle capital dans la circulation thermohaline de l'océan mondial. De nombreux auteurs ont mis en évidence des variations à haute fréquence de la circulation océanique de l'Atlantique Nord réglée par les caractéristiques des eaux de surface. Ruddiman [51] a, le premier, démontré l'existence dans l'Atlantique Nord d'une bande latitudinale où la fonte et le délestage des icebergs s'effectuaient de façon privilégiée. Située entre 55° et 40° N, cette bande dite de Ruddiman, marquerait le contact entre les eaux froides et les eaux chaudes. Heinrich [28] a découvert des événements de décharges d'icebergs catastrophiques « Heinrich Events » dont la période est de l'ordre de 7 000 ans et qui se caractérisent par une sédimentation grossière mal classée, par une population monospécifique de l'espèce polaire *Neogloboquadrina pachyderma* forme senestre (s.) et par de faibles flux de foraminifères planctoniques [12, 13]. Les arrivées massives de détritiques grossiers sont accompagnées de façon simultanée par un signal isotopique de dessalure des eaux de surface [12, 31, 36].

À l'opposé des études intensives menées dans l'océan Atlantique Nord, sur les événements de décharges d'icebergs, les recherches dans le domaine austral sont restées très modestes. Cooke et Hays [16] ont démontré les apports importants de matériaux détritiques transportés par les glaces en périodes glaciaires dans le secteur atlantique de l'océan Austral avec un gradient décroissant des apports de la mer de Weddell vers le bassin indien. Dans le secteur ouest-indien, Labeyrie et al. [35] ont montré que des anomalies légères dans les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans l'espèce *N. pachyderma* (s.) étaient liées à des décharges massives d'icebergs.

Cette étude examine à haute résolution la variabilité de ces apports. Son objectif est, grâce à un modèle d'âge ^{14}C (SMA), de suivre l'évolution chronologique des concentrations en éléments détritiques grossiers

dans une carotte marine de l'océan Austral Indien, afin de préciser si, au cours des derniers 30 000 ans, il y aurait eu des décharges pulsées de matériel détritiques liées à la fonte d'icebergs, telles qu'elles ont été observées dans l'Atlantique Nord. L'étude qualitative des grains lithiques a été entreprise afin d'obtenir des informations sur l'origine de ces apports. Dans l'océan Austral, trois sources émettent des particules minérales : le continent Antarctique pour lequel les éléments sont issus de l'érosion glaciaire, les continents avoisinants (Australie, Afrique du Sud et Amérique du Sud) fournisseurs de particules minérales par l'intermédiaire des vents, et les îles australes volcaniques à l'origine d'apports de minéraux volcaniques [8].

L'analyse simultanée du signal isotopique $\delta^{18}\text{O}$ mesuré sur les tests de foraminifères planctoniques et des estimations des températures superficielles obtenues à partir de la distribution de ces organismes permettra de mettre en évidence l'influence des événements de décharges d'icebergs sur les conditions hydrologiques de surface du secteur indien de l'océan Austral. Enfin, une comparaison avec l'océan Atlantique Nord a établi si les événements de débâcles d'icebergs enregistrés dans le secteur indien de l'océan Austral étaient synchrones ou non de ceux repérés entre 40° et 55° de latitude N et connus sous le nom d'événements d'Heinrich.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. La carotte MD 88-769

Le site sélectionné pour cette étude est la carotte MD 88-769 (46° 04' S, 90° 06' E, 3 420 m). Elle a été prélevée sur le flanc ouest de la dorsale indienne centrale, au-dessus de la profondeur de compensation des carbonates et n'est pas affectée par des phénomènes de dissolution importants. Elle se trouve à l'heure actuelle dans la zone subantarctique, à la limite du front polaire Subantarctique (SAF) (*figure 1*). Son

taux de sédimentation suffisamment élevé (de l'ordre de 7 cm/ka) permet une bonne résolution temporelle pour l'étude des signaux climatiques. Entre le front polaire Subantarctique et le front polaire Antarctique (PF), les sédiments du Quaternaire terminal présentent une alternance entre des dépôts carbonatés pendant les interglaciaires (> 50 % de carbonates) et des boues siliceuses (à diatomées et radiolaires) pendant les glaciaires (contenant environ 20 % de carbonates).

Le cadre chronostratigraphique de la carotte MD 88-769 est basé, d'une part sur 13 âges ^{14}C répartis entre 0 et 242 cm et correspondant à une échelle d'âge ^{14}C allant de 5,8 à 33,75 ka et, d'autre part sur le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques [52]. Les âges ^{14}C

ont été obtenus au laboratoire des sciences de l'environnement et du climat (LSCE, Gif-sur-Yvette) à partir du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en spectrométrie de masse par accélérateur (SMA). Ce rapport provient de quelques milligrammes de carbonates provenant du tri de plusieurs milliers de tests de foraminifères planctoniques de deux espèces différentes *Neogloboquadrina pachyderma* (s.) et *Globigerina bulloides* (tableau I). Les tris ont été réalisés dans les pics d'abondance de ces deux espèces de manière à pallier les phénomènes de bioturbation [6]. Les datations SMA obtenues à partir des tests de foraminifères planctoniques ne peuvent être utilisées directement comme chronologie absolue. Les âges ^{14}C marins doivent être corrigés de l'âge apparent actuel moyen

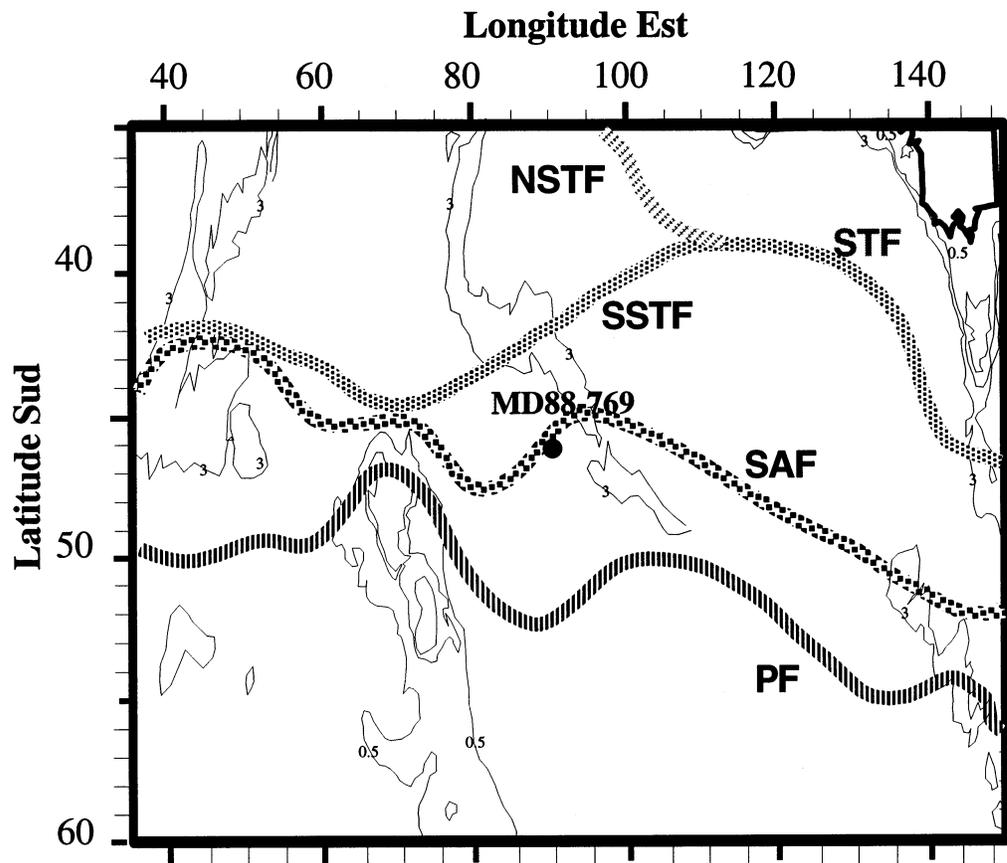


Figure 1. Localisation de la carotte MD 88-769 et caractéristiques hydrologiques du secteur indien de l'océan Austral. PF : front polaire Antarctique ; SAF : front polaire Subantarctique ; SSTF : front Subtropical Sud ; STF : front Subtropical ; NSTF : front Subtropical Nord [10].

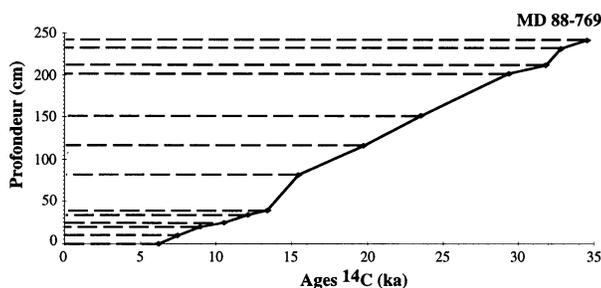
Figure 1. Location of core MD 88-769 and Indian sector hydrology of the Southern Ocean. PF: Antarctic Polar Front; SAF: Subantarctic Polar Front; SSTF: South Subtropical Front; STF: Subtropical Front; NSTF: North Subtropical Front [10].

Tableau I. Les datations ^{14}C de la carotte MD 88-769, corrigées de l'effet réservoir.**Table I.** ^{14}C datings of core MD 88-769 corrected for a surface water reservoir age.

Prof (cm)	Foraminifères Planctoniques	Âges ^{14}C corrigés (ka)	Erreur (1 sigma)
0	<i>G. bulloides</i>	6,18	$\pm 0,07$
10	<i>G. bulloides</i>	7,46	$\pm 0,08$
20	<i>G. bulloides</i>	8,92	$\pm 0,08$
25	<i>G. bulloides</i>	10,49	$\pm 0,09$
35	<i>G. bulloides</i>	12,09	$\pm 0,09$
40	<i>G. bulloides</i>	13,35	$\pm 0,12$
82	<i>N. pachyderma</i> s.	15,40	$\pm 0,14$
117	<i>N. pachyderma</i> s.	19,76	$\pm 0,18$
152	<i>N. pachyderma</i> s.	23,52	$\pm 0,21$
202	<i>N. pachyderma</i> s.	29,34	$\pm 0,31$
212	<i>G. bulloides</i>	31,77	$\pm 0,42$
232	<i>G. bulloides</i>	32,80	$\pm 0,47$
242	<i>G. bulloides</i>	34,50	$\pm 0,50$

de la surface des eaux ou âge réservoir [5]. L'âge réservoir est très sensible au gradient latitudinal dans l'océan Austral [5]. À la latitude du site MD 88-769, il est estimé à 580 ans à l'Holocène et pour des âges postérieurs à 15 ka il est de l'ordre de 750 ans.

Le modèle d'âge de la carotte MD 88-769 a ensuite été établi par interpolation linéaire entre les niveaux datés. L'erreur est comprise entre 70 et 500 ans. Au cours des derniers 30 000 ans, le taux de sédimentation ne varie que de 8,6 cm/ka au dernier Glaciaire et de 6 cm/ka à l'Holocène (figure 2).

**Figure 2.** Modèle d'âge de la carotte MD 88-769 établi à partir de datations ^{14}C SMA.**Figure 2.** Age scale of core MD 88-769 established from the AMS ^{14}C datings.

2.2. Méthodes

La variabilité temporelle des apports de grains détritiques grossiers sur la ride sud-est indienne a été étudiée sur des échantillons de carottes tous les 5 ou 10 cm, et la minéralogie de la fraction détritique a été analysée dans chaque prélèvement c'est-à-dire tous les 600 ans environ.

La nature minéralogique des grains détritiques a été déterminée au microscope polarisant, séparément sur la fraction $> 150 \mu\text{m}$ et sur la fraction comprise entre 45 et $150 \mu\text{m}$. Nous avons choisi ces deux fractions de manière à faciliter le montage des minéraux entre lames et lamelles, à partir d'un milieu de montage, le baume du Canada. La détermination des différents minéraux en grains repose sur le manuel de Parfenoff et al. [46]. Les éléments détritiques comptés dans la carotte MD 88-769 sont exprimés en nombre de grains par gramme de sédiment sec.

Un enregistrement isotopique détaillé (tous les 2 cm) est obtenu à partir des tests du foraminifère planctonique *Neogloboquadrina pachyderma* (s.). Les mesures isotopiques ont été réalisées au LSCE en utilisant un spectromètre de masse Finnigan MAT 251. L'ensemble des mesures se réfère au standard PDB (Pee Dee Belemnite).

Pour mieux contraindre la position du site étudié par rapport aux zones frontales au cours du stade isotopique 2, les paléotempératures de surface ont été estimées à partir des associations de foraminifères planctoniques et de la fonction de transfert d'Imbrie et Kipp [30]. L'hypothèse de départ de cette méthode est de considérer que la distribution des foraminifères planctoniques dépend directement des caractéristiques des eaux de surface et que cette relation reste inchangée sur la période concernée. La mise en place d'une base de référence définie par les associations de foraminifères planctoniques recueillies dans les sédiments marins récents et par un atlas de températures océaniques actuelles de la surface [37] représente l'étape de validation de cette méthode sur une zone océanique précise. Dans les secteurs indien et atlantique de l'océan Austral, le référentiel se compose de 170 sites, répartis entre 20° et 55° de latitude Sud [52].

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Quantification des apports de détritiques

3.1.1. Dans le secteur indien de l’océan Austral

Si la fraction $< 45 \mu\text{m}$ peut provenir d’apports d’origines variées (transport éolien, par courant de fond et par les glaces), on peut considérer que la fraction $> 45 \mu\text{m}$ est principalement liée aux apports par les glaces. Les sédiments de la carotte MD 88-769 contiennent une proportion élevée de matériaux $< 45 \mu\text{m}$, qui varie de 95 % pendant la dernière période glaciaire à 85 % pendant l’Holocène. Les apports de grains détritiques silto-sableux ont donc été très limités au dernier maximum glaciaire dans le bassin est-indien. Cette observation est en accord avec les premières investigations faites par Cooke et Hays [16] et Howard et Prell [29]. La faible quantité d’éléments détritiques silto-sableux suggère une alimentation très modérée des eaux de surface en icebergs. Cependant la quantité d’éléments détritiques sédimentés n’est pas linéairement corrélée au nombre d’icebergs; en effet, les icebergs observés aujourd’hui autour de l’Antarctique sont caractérisés par une faible charge détritique [59]. En revanche, les variations du $\delta^{18}\text{O}$ mesuré sur l’espèce *Neogloboquadrina pachyderma* (s.) montrent de façon plus précise l’intensité de la dilution des eaux de surface par les apports d’eau de fonte [35].

L’étude haute résolution sur la fraction détritique montre que les apports de grains détritiques par les glaces se sont déroulés principalement entre 24 et 12 ka (stade isotopique 2) (figure 3). Quatre épisodes s’individualisent au cours de cette période; nous les désignons, du plus ancien au plus récent, par les lettres z, y, x, et w (tableau II). Ces quatre événements sont clairement identifiés dans la fraction 45–150 μm (figure 3e) mais ils sont moins bien individualisés dans la fraction $> 150 \mu\text{m}$ (figure 3d) où seul un épisode important apparaît lors de la déglaciation entre $14,4 \pm 0,11$ ka et $13 \pm 0,13$ ka (figure 3d). Au dernier Glaciaire, la fraction $> 150 \mu\text{m}$ ne représente qu’une très faible partie du stock de terrigène $> 45 \mu\text{m}$, soit environ 5 % du nombre de grains (< 100 grains·g⁻¹ de sédiment) et 25 à 30 % en poids.

À l’époque actuelle, les masses d’eaux de surface entre le front polaire Antarctique et le front polaire Sub-

antarctique sont caractérisées par un fort gradient thermique entre les isothermes de surface 5 °C et 9 °C [39]. La carotte MD 88-769 a été prélevée dans la zone subantarctique, à la limite nord du front polaire Subantarctique (figure 1). La température d’été actuelle à la position de la carotte est de 10 °C environ [37]. Pendant le stade isotopique 2, en particulier au cours des deux événements z et y, les températures de surface sont estimées autour de 4 °C en été (figure 3e, 3b). Rencontrée actuellement au sud de la carotte MD 88-769, et représentative des eaux situées au sud du front polaire Antarctique, cette isotherme était alors située au nord du site de la carotte qui se trouvait donc dans la zone marginale de forts gradients thermiques, favorable à la décharge des débris transportés par les icebergs. Les événements les plus récents (x et w) se sont produits lors de l’augmentation rapide des températures de surface jusqu’aux valeurs actuelles marquant le passage du front polaire Antarctique au-dessus du site.

Seuls les événements w et z sont corrélés à des valeurs plus faibles du $\delta^{18}\text{O}$ de *N. pachyderma* (s.) (figures 3e, 3c). Au cours de l’événement z, les températures de surface, basses et peu variables, ne sont pas responsables de la diminution du $\delta^{18}\text{O}$ (figure 3b). En revanche, au cours de l’événement w, les variations du $\delta^{18}\text{O}$ de *N. pachyderma* (s.) pourraient être influencées par un réchauffement des eaux superficielles. Toutefois, l’amplitude des variations des SST d’été (± 2 °C) ne peuvent pas induire une variation du $\delta^{18}\text{O}$ de l’ordre de 1,3. Il semble donc que les oscillations du signal isotopique soient liées à la conjonction de deux phénomènes, l’arrivée d’eau dessalée et l’augmentation des températures (figures 3c, 3b). Dans les deux

Tableau II. Âges ¹⁴C, erreur sur l’âge (1σ) et profondeur des événements de décharges d’icebergs z, y, x et w enregistrés dans la carotte MD 88-769.

Table II. ¹⁴C datings, error range on the ¹⁴C datings (1σ) and depth of the iceberg discharge events z, y, x and w recorded in the core MD 88-769.

	Fin des événements			Début des événements		
	Prof (cm)	Âge (ka)	Erreur (1σ)	Prof (cm)	Âge (ka)	Erreur (1σ)
z	136	21	±0,19	158	23,6	±0,21
y	100	17	±0,16	116	18,6	±0,17
x	74	14,6	±0,14	94	16,2	±0,15
w	50	13,2	±0,12	66	14,2	±0,13

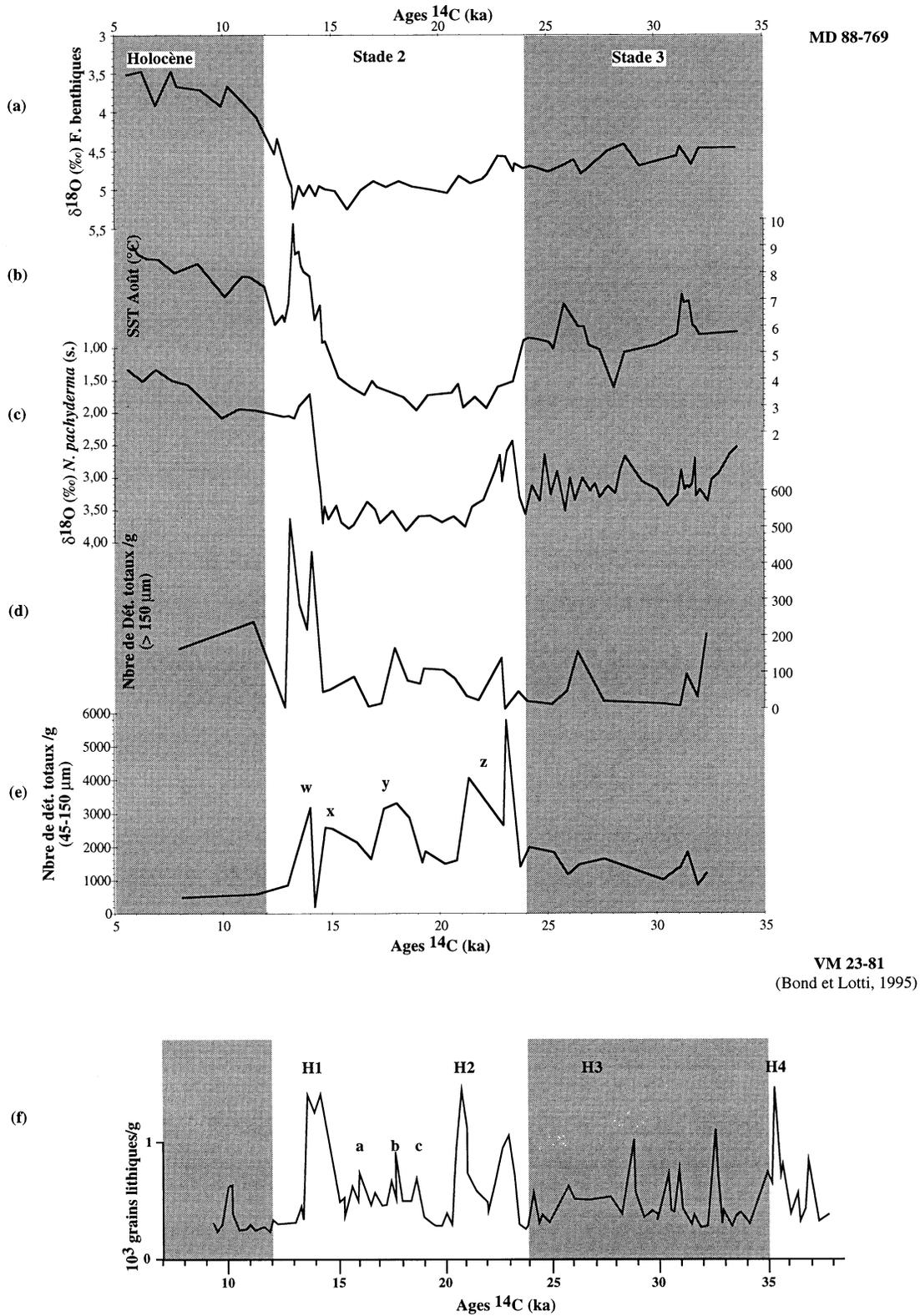


Fig. 3.

cas, la diminution du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de surface peut être liée à des arrivées d'eau de fonte d'icebergs dans les eaux océaniques.

Plus à l'ouest, au nord du plateau de Crozet, Labeyrie et al. [35] ont trouvé entre 35 et 17 ka, plusieurs périodes de fortes anomalies isotopiques des eaux de surface en relation avec le vèlage d'icebergs. Contrairement au secteur ouest de l'océan Indien, les événements de décharges d'icebergs, enregistrés sur la ride sud-est indienne, n'ont pas engendré de grandes perturbations des conditions hydrologiques de surface.

3.1.2. Comparaison des décharges d'icebergs aux moyennes latitudes des deux hémisphères

Dans l'océan Atlantique Nord, plusieurs auteurs ont démontré que les concentrations en grains détritiques grossiers, au cours de la période glaciaire, étaient caractérisées par deux augmentations majeures, H1 et H2 [13, 17, 28] datées de 14 et 21 ka [12, 13] et trois augmentations de moindre importance a, b et c, comprises entre H1 et H2 [11] (*figure 3f*).

Dans le secteur est-indien de l'océan Austral plusieurs apports de détritiques grossiers $> 45 \mu\text{m}$, assimilés à des événements de décharges d'icebergs, ont été aussi repérés entre 21 et 13 ka (âges ^{14}C) dans la carotte MD 88-769. Contrairement à l'Atlantique Nord où les événements de décharges d'icebergs sont quantitativement très importants et interviennent de façon significative sur le taux de sédimentation [14], dans le secteur indien de l'océan Austral, le taux de sédimentation est peu modifié et les événements de débâcles d'icebergs sont dilués dans une sédimentation gouvernée par la production biologique siliceuse des eaux de surface et surtout par l'advection de matériel fin par les courants de fond dans le secteur atlantique ou indien [8, 48, 49]. Les faibles concentrations en grains détritiques grossiers des icebergs de l'Antarctique [2] sont probablement aussi, pour une partie, responsables des différences dans la masse de matériel transporté par les glaces dans les deux hémisphères.

Dans l'océan Austral, les deux pics majeurs de détritiques z et w dont la relation avec des débâcles d'icebergs a été enregistrée par la baisse de $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères planctoniques, se produiraient respectivement entre 23,5 et 21 ka et entre 14 et 13 ka (*figure 3e*). Aux incertitudes de datation près, ces deux épisodes de fonte d'icebergs semblent quasiment synchrones avec les événements H1 et H2 enregistrés dans l'océan Atlantique Nord (*figure 3e*). Dans l'océan Austral, nous observons également deux épisodes secondaires, y et x, qui pourraient rappeler la variabilité haute fréquence des décharges d'icebergs de l'océan Atlantique Nord [11] (*figure 3e*). Il est difficile de conclure sur un synchronisme inter-hémisphérique en raison du cumul des incertitudes de datations des séries au sein de chaque océan et de la plus faible résolution dans l'océan Austral. Un lien semble exister entre les deux hémisphères mais il est difficile de se prononcer sur l'avance ou le retard des phénomènes de fonte des calottes de glace observés dans l'un ou l'autre des océans.

3.2. Caractérisation des minéraux

La nature pétrographique des minéraux présents dans les sédiments de la carotte MD 88-769 a été déterminée au microscope polarisant et a permis d'obtenir des informations spécifiques sur les roches mères qui auraient participé à la sédimentation détritique grossière du bassin sud-est indien de l'océan Austral (*tableau III*). Il s'agit tout d'abord de définir les sources potentielles et le contexte géologique.

3.2.1. Les sources potentielles de grains détritiques et leurs caractéristiques minéralogiques

– Les îles et plateaux de Kerguelen et Crozet
Les magmas éruptifs de Kerguelen sont caractérisés par deux séries principales de roches (*figure 4, tableau IV*): une série ancienne constituée de basaltes tholéïtiques à transitionnels d'âge Éocène, suivie de

Figure 3. Variations du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques (a), des températures d'été (b), du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères planctoniques (c), de la quantité de détritiques totaux/g de sédiment sec pour la fraction $> 150 \mu\text{m}$ (d) et la fraction comprise entre 45 et 150 μm (e) en fonction de la profondeur. Comparaison des événements de décharges d'icebergs enregistrés dans l'océan Austral avec les événements d'Heinrich de l'Atlantique Nord (f).

Figure 3. Variations of the benthic $\delta^{18}\text{O}$ (a), the summer SST (b), the planktonic $\delta^{18}\text{O}$ (c), the ice-rafted-detritus concentrations per gram of dry sediment in the fraction $> 150 \mu\text{m}$ (d) and in the fraction comprised between 45–150 μm (e) with depth. Comparison of the iceberg discharge events recorded in the Southern Ocean with the North Atlantic Heinrich events (f).

Tableau III. Minéralogie des fractions 45–150 µm et >150 µm des sédiments de la carotte MD 88-769.**Table III.** Mineralogy of the 45–150 µm and >150 µm fractions in the MD 88-769 cored sediments.

Prof (cm)	Âges (ka)	Mx Opaques	Verres Volc.	Pyroxènes	Plagioclases	Quartz	Grains Oxydés	Basalte	Indéterminés	Dét. totaux
Fraction 45–150 µm										
18,5	8,12	89	11	0	0	0	0	0	0	100
35	11,51	67	21	8	3	0	2	0	0	100
44,25	12,98	42	37	5	14	0	0	0	0	100
49,25	13,22	44	16	10	15	9	5	0	2	100
65	13,99	57	23	8	4	3	1	0	1	100
69,25	14,20	45	23	7	12	5	3	2	1	100
79,25	14,9	31	28	10	17	10	1	1	1	100
83,5	15,00	42	30	7	13	6	2	0	1	100
93	16,14	33	35	8	12	6	3	1	1	100
98,5	16,80	38	44	7	11	1	5	2	1	100
103,5	17,39	60	22	12	19	13	5	2	1	100
108,5	17,99	29	24	11	17	11	5	1	1	100
113,5	18,59	40	26	8	16	7	2	1	0	100
118,5	19,17	22	35	7	14	5	13	1	2	100
120	19,33	33	35	7	13	4	4	2	3	100
128,5	20,25	38	28	8	10	4	9	1	3	100
133,5	20,78	60	25	11	2	2	0	0	0	100
138,5	21,32	31	29	9	17	7	4	1	1	100
143,5	21,86	35	29	9	13	8	4	1	0	100
153,5	22,94	39	28	8	11	10	2	1	1	100
154,5	23,06	48	28	4	8	11	1	0	0	100
160	23,70	28	49	6	9	2	4	0	1	100
163,5	24,11	52	32	6	3	5	1	0	0	100
173,5	25,27	38	43	4	7	6	1	1	1	100
179	25,91	23	57	6	6	3	3	0	2	100
183,5	26,44	41	48	2	6	2	0	0	1	100
193,5	27,60	63	22	10	2	1	0	1	0	100
209	30,29	42	21	7	11	9	6	2	2	100
213,5	31,10	63	22	4	5	6	1	0	0	100
220	31,43	34	34	8	8	4	8	1	4	100
229	31,90	10	56	2	6	7	9	1	2	100
233,5	32,31	51	31	2	5	6	2	1	0	100
Fraction >150 µm										
18,5	8,12	100	0	0	0	0	0	0	0	100
35	11,51	57	22	4	9	0	9	0	0	100
44,25	12,98	80	10	10	0	6	0	0	0	100
49,25	13,22	69	16	5	5	2	3	1	0	100
57,75	13,64	60	39	1	0	0	0	0	1	100
65	13,99	78	19	1	1	0	1	0	0	100
69,25	14,20	86	7	1	4	1	1	0	0	100
79,25	14,69	51	32	2	5	6	2	0	1	100
83,5	15,00	46	37	3	5	7	0	0	1	100
93	16,14	43	40	3	7	4	1	0	2	100
98,5	16,80	58	5	10	13	5	5	0	0	100
103,5	17,39	32	32	3	19	11	3	0	0	100
108,5	17,99	36	39	3	10	11	4	0	0	100
113,5	18,59	44	42	1	9	1	1	0	2	100
118,5	19,17	57	31	2	8	2	3	0	0	100
120	19,33	50	45	0	2	0	2	0	0	100
128,5	20,25	69	19	0	7	1	3	0	0	100
133,5	20,78	59	25	2	8	3	1	0	1	100
138,5	21,32	40	34	6	11	4	4	0	0	100
143,5	21,86	42	33	9	7	6	0	3	1	100
153,5	22,94	38	44	3	12	2	0	0	0	100
160	23,70	41	18	9	18	5	9	0	0	100
163,5	24,11	39	22	1	27	8	1	0	2	100
173,5	25,27	59	31	2	3	5	0	0	0	100
179	25,91	59	16	0	14	2	9	0	0	100
183,5	26,44	81	18	1	0	0	0	0	0	100
193,5	27,60	74	21	0	1	4	0	0	0	100
209	30,29	75	17	0	0	8	0	0	0	100
213,5	31,10	71	29	0	0	0	0	0	0	100
220	31,43	39	17	0	22	22	0	0	0	100
229	31,90	38	24	0	5	29	5	0	0	100
233,5	32,31	55	35	2	4	4	0	0	0	100

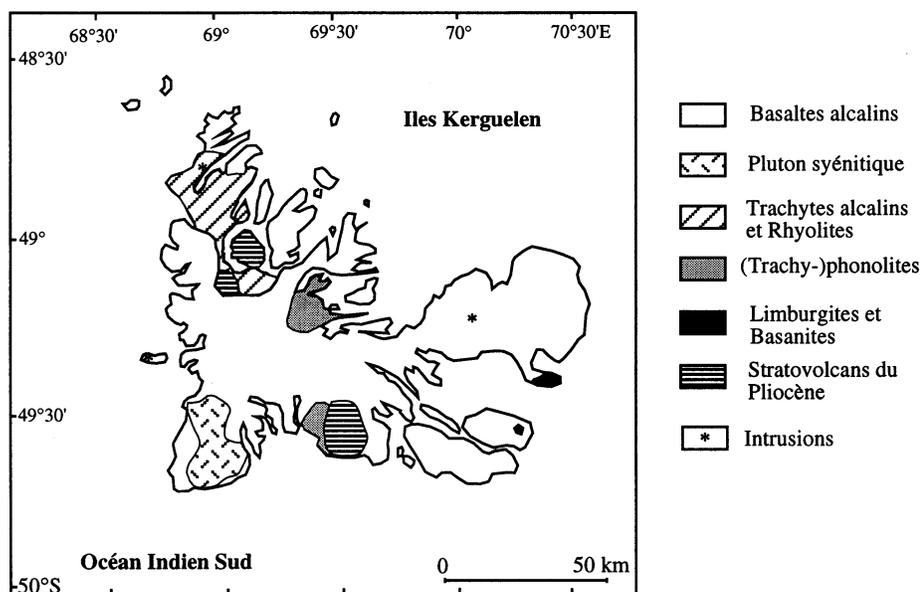


Figure 4. Carte pétrographique simplifiée des îles Kerguelen [44].

Figure 4. Simplified petrographic map of the Kerguelen Islands after Nougier [44].

basaltes alcalins et d'une série plus jeune à trachytes et phonolites qui serait apparue à l'Oligocène [22–24, 43–45, 61]. Nougier [42] a également mis en évidence la présence d'un grand massif de roches magmatiques plutoniques (syénite) au sud-ouest des îles Kerguelen, ainsi que des intrusions plutoniques de plus petites tailles, incluant des gabbros, des syénites et des syénites néphéliniques, au centre et au nord-ouest des îles Kerguelen. Des trachytes alcalins et des rhyolites peuvent également se rencontrer au nord-ouest des îles, sur le bouclier volcanique du Loranchet [44].

Les roches volcaniques de Crozet, au contraire, sont issues d'une série de roches basaltiques dont la composition chimique est peu variable [15, 26]. Ces roches volcaniques sont des basaltes alcalins d'âge Quaternaire (*tableau IV*) [15, 26].

Enfin, Morche et al. [40] montrent que les roches des îles Kerguelen et Crozet sont essentiellement représentées par des basaltes alcalins dont la composition minéralogique est la suivante : plagioclase, augite et olivine en phénocristaux.

– La péninsule Antarctique et le continent Antarctique

La péninsule Antarctique correspond à un vestige

d'arc magmatique linéaire qui serait issu de la subduction du plancher océanique de l'océan Pacifique [58]. Elle est divisée en deux zones géologiques [21].

a) La première zone est constituée de formations sédimentaires et de roches volcaniques (rhyolites, dacites et andésites), intrudées par un batholite massif (ou intrusion andéenne) qui se prolonge vers le nord-est le long de la portion submergée de la ride de Scotia et des îles Sud Shetland [3]. L'intrusion andéenne englobe 80 % de la péninsule Antarctique et correspond à une diorite quartzique dont la composition minéralogique est la suivante : 55 % de plagioclases, 20 % de quartz, 10 % de biotites, 10 % de hornblendes vertes, 4 % de magnétite et 1 % de feldspaths alcalins [1].

b) La deuxième zone recouvrant la partie est de la péninsule, est formée de schistes, de grès et de graywackes du Tertiaire et Mésozoïque [21]. Au nord de cette zone, les sédiments sont recouverts de basaltes et de tufs volcaniques [3] (*tableau IV*).

Plus récemment, Parra et Pons [47] ont montré que la péninsule Antarctique était fondamentalement formée d'orthogneiss et de schistes et également de métado

Tableau IV. Nature pétrographique et minéralogie des roches mères à l'origine des grains détritiques dans la carotte MD 88-769.**Table IV.** Petrographic nature and mineralogy of the parent rocks participating in the mineral associations recorded in the MD 88-769 cored sediments.

Origine continentale Sources potentielles	Nature		Minéraux
<i>Péninsule Antarctique</i> (Anderson, 1965)	Diorite quartzique	(Adie, 1955)	Plagioclase Quartz Biotite Hornblende verte Magnétite Feldspaths alcalins
(Edwards et Goodell, 1969)	Andésites	(Edwards et Goodell, 1969)	Plagioclase Biotite Hypersthène Hornblende
	Dacites Rhyolites Schistes Grès		
(Parra et Pons, 1990)	Orthogneiss Schistes Métadolérites Amphibolites	(Warnke et al., 1973)	Quartz Feldspaths potassiques Plagioclase Hornblende
<i>Continent Antarctique</i> (Long, 1986)	Gneiss Roches métamorphiques		
(Craddock, 1982 ; Ravich et Fedorov, 1982)	Gneiss Schistes Charnokites		
Origine volcanique (océanique)			
<i>Îles Kerguelen</i> (point chaud) (Morche et al., 1991)	Basaltes tholéïtiques à transitionnels Basaltes alcalins		Hypersthène ? Plagioclase Augite Olivine en phénocristaux
	Trachytes		Oxydes de fer et titane Augite aegyrinique Plagioclase Feldspath alcalin Apatite
(Nougier, 1969)	Phonolites Roches Rhyolithiques Gabbros Syénites Syénites néphéliniques		Quartz

Tableau IV. (Suite)**Table IV.** (Continued)

<i>Îles Crozet</i> (point chaud) (Chevallier et al., 1983; Gunn et al., 1972)	Basaltes alcalins	
<i>Arc des îles Sandwich</i> (Parra et Pons, 1990)	Basaltes Andésites basaltiques Dacites Rhyolites	
<i>Îles Sud Shetland</i> (morceau de continent) (Anderson, 1965)	Andésites Basaltes à Olivine	Olivine Augite Plagioclase Titanomagnétite Minéraux opaques
(Parra et Pons, 1990)	Quartzites Gneiss à biotites et hornblendes Plutons granitiques	

lérites et amphibolites.

Dans sa partie est, le continent Antarctique est un vieux socle de gneiss et roches métamorphiques plissées, recouvert par la série Beacon constituée de grès et datée de 400 à 135 Ma. À l'ouest, se trouvent des dépôts sédimentaires épais alternant avec des laves, datées de 300 Ma, issues des cassures qui ont provoqué la surrection des chaînes antarctiques [38].

Craddock [18] et Ravich et Fedorov [50] ont montré que la partie est du continent Antarctique est essentiellement dominée par des gneiss et schistes du Précambrien. Quelques corps de charnokites (roche magmatique métasomatique à faciès de granite ou de granite gneissique avec quartz, microcline ou orthose, plagioclase, hypersthène, et grenat fréquent) sont également présents dans cette zone géographique du continent.

– L'arc des îles Sandwich

Les îles Sandwich (Pliocène et Pléistocène) et leurs précurseurs (Miocène supérieur) sont associés à un magma d'une série tholéiitique d'arc moins différencié que le magma de la péninsule Antarctique, avec une transition vers des compositions calco-alcalines [4, 9].

Les basaltes et andésites basaltiques représentent plus de 95 % des laves. Les dacites et les rhyolites constituent les 5 % restant (*tableau IV*) [47].

– Les îles Sud Shetland

Les îles Sud Shetland sont caractérisées par des séries calco-alcalines de subduction datées du Miocène-Pliocène qui se seraient différenciées, au cours du Quaternaire, en séries magmatiques enrichies en alcalins en liaison avec un contexte d'arrière arc volcanique [20, 25, 32, 53–57, 62, 63].

Parra et Pons [47] ont montré que les terrains des îles Sud Shetland pouvaient être composés de quartzites, de gneiss à biotites et hornblendes associés à des plutons granitiques, composition pétrographique caractéristique d'une croûte continentale (*tableau IV*).

3.2.2. Cortège minéralogique des sédiments de la carotte MD 88-769

Le cortège minéralogique de la fraction > 150 µm et de la fraction comprise entre 45 et 150 µm est constitué de particules opaques, de verres volcaniques, de feldspaths plagioclases, d'augites titanifères, d'augites brunes à tendance aegyrienne, de quartz, de morceaux de basalte, et de quelques hypersthènes. Quantitativement, les grains d'origine volcanique et

les grains opaques constituent parfois plus de 90 % de la fraction $> 45 \mu\text{m}$ des sédiments glaciaires (24–12 ka) (*tableau III*). Dans le cortège des minéraux transparents (plagioclase, pyroxène et quartz), la teneur en quartz est souvent similaire à la teneur en pyroxène et peut être très importante, jusqu'à 50 ou 80 % (niveau 220 et 229 cm de la fraction $> 150 \mu\text{m}$) de l'association plagioclase, pyroxène, quartz.

3.2.3. Les sources possibles à l'origine du cortège minéralogique des sédiments de la carotte MD 88-769

L'étude minéralogique de la carotte MD 88-769 montre que les éléments détritiques transportés par les glaces sont issus de roches variées dont la chimie s'étend d'un pôle acide vers un pôle basique. Cette double origine apparaît dans la nature des grains détritiques.

En tenant compte de l'environnement géologique, nous avons comparé le cortège minéralogique des sédiments étudiés avec les caractéristiques minéralogiques des différentes sources potentielles que nous avons préalablement définies (*tableau IV*).

Les travaux de pétrographie sur les îles Kerguelen et Crozet [15, 26, 40] montrent que les roches de ces deux régions volcaniques sont essentiellement représentées par des basaltes alcalins. Des intrusions magmatiques à gabbros, syénites et syénites néphéliniques sont également présentes ainsi que des trachytes alcalins et des rhyolites [44]. Les différentes roches de Kerguelen justifieraient donc le cortège minéralogique (minéraux opaques, plagioclase, augite, quelques hypersthènes et quartz) des éléments détritiques trouvés dans la carotte MD 88-769. Les augites, les plagioclases et les minéraux opaques pourraient également provenir des basaltes alcalins présents sur Crozet. Toutefois, compte tenu de la faible superficie des zones géographiques de Kerguelen susceptibles de fournir quartz et hypersthènes (*figure 4*) et des teneurs en quartz qui peuvent être parfois très fortes (*tableau III*), ne pourrait-on pas faire appel à des sources plus lointaines telles que la péninsule Antarctique, le continent Antarctique, les îles Sandwich et enfin les îles Sud Shetland ?

Dans l'océan Austral, parmi les sources d'icebergs figurent actuellement la baie de Prydz et le sud de la mer de Weddell. Les roches présentes dans les secteurs du continent Antarctique et de la péninsule

Antarctique renferment des quartz et feldspaths susceptibles d'être libérés dans l'océan et d'expliquer les teneurs en quartz enregistrées dans la carotte MD 88-769. Les îles Sandwich, la péninsule Antarctique et les îles Sud Shetland sont caractéristiques d'une série calco-alcaline de subduction appelée série à hypersthènes [34]. Les hypersthènes présents dans les sédiments de la carotte MD 88-769, pourraient aussi provenir de ces trois sources potentielles. Les faibles apports témoigneraient alors de la position terminale de la ride sud-est indienne dans le gradient de dispersion (*figure 5*).

Replaçons maintenant les résultats dans un contexte climatique. Hall [27] suggère la présence d'une calotte glaciaire sur les îles Kerguelen pendant le dernier Glaciaire, large calotte qui recouvrait la totalité des îles et qui pouvait libérer des icebergs. Cette hypothèse est renforcée par la mise en évidence sur l'île Marion d'une calotte glaciaire de plus petite taille et localisée au nord du front polaire Antarctique (*figure 5*). Dans l'hémisphère Sud, au dernier maximum glaciaire (autour de 18 ka), la calotte glaciaire antarctique était plus étendue qu'aujourd'hui [41]. Son extension était moindre que celle des glaces de l'hémisphère Nord. Les plus grands changements se sont traduits par une augmentation importante de la couverture de glace de mer pendant l'hiver. En effet, pendant le dernier maximum glaciaire, la limite de la glace de mer était située 5 à 8° de latitude plus au nord qu'à l'heure actuelle [19]. Loin d'être une couverture de glace compacte et immuable dans l'espace et le temps, la banquise présentait, au dernier maximum glaciaire, une variabilité interannuelle qui pouvait atteindre plus de 10° de latitude [19], laissant aux icebergs la possibilité de dériver. Aujourd'hui, la circulation océanique superficielle favorise le transport des icebergs vers l'ouest autour du continent Antarctique. Déviés vers le nord par les gyres de Weddell et de Ross, ils sont ensuite repris par le courant circum-polaire Antarctique pour aller fondre dans la zone du front polaire. Salvignac [52] a mis en évidence les mouvements du système frontal dans le secteur indien de l'océan Austral au cours du dernier cycle climatique. À partir de l'étude des associations de foraminifères planctoniques dans la carotte MD 88-769, elle a montré le déplacement du front polaire Antarctique de 6° vers le nord pendant le Glaciaire de sorte que la carotte MD 88-769 était proche du front polaire Antarctique à cette époque. Klinck et Smith

[33] ont prouvé que l'intensification des vents d'ouest, pendant le dernier maximum glaciaire, augmentait le débit du courant circumpolaire Antarctique. Ces résultats confortent l'hypothèse du transport des particules détritiques par les icebergs d'ouest en est et celle d'une zone de fonte et de dépôts des détritiques au niveau du site de la carotte MD 88-769, localisée au Glaciaire dans la zone du front polaire.

Compte tenu de la minéralogie et des conditions hydrologiques superficielles, nous suggérons que les îles de Kerguelen et de Crozet constituaient la source principale de particules détritiques, la péninsule Antarctique, le continent Antarctique, les îles Sandwich et Sud Shetland n'ayant qu'un rôle secondaire dans l'apport de matériaux par les glaces.

4. CONCLUSION

L'évolution des caractéristiques des masses d'eaux de surface (températures estimées et $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères planctoniques) et des concentrations en détritiques grossiers dans une carotte du secteur est-indien de l'océan Austral révèle que la dernière période glaciaire était ponctuée de délestages d'icebergs localisés dans le front polaire Antarctique. Bien que le matériel détritique transporté par les glaces soit de faible abondance, quatre épisodes de dépôts plus importants sont nettement mis en évidence entre 24 et 12 ka. La minéralogie des matériaux $> 45 \mu\text{m}$ suggère la dominance de sources volcanogéniques et d'apports continentaux plus modérés. Il est fort pro-

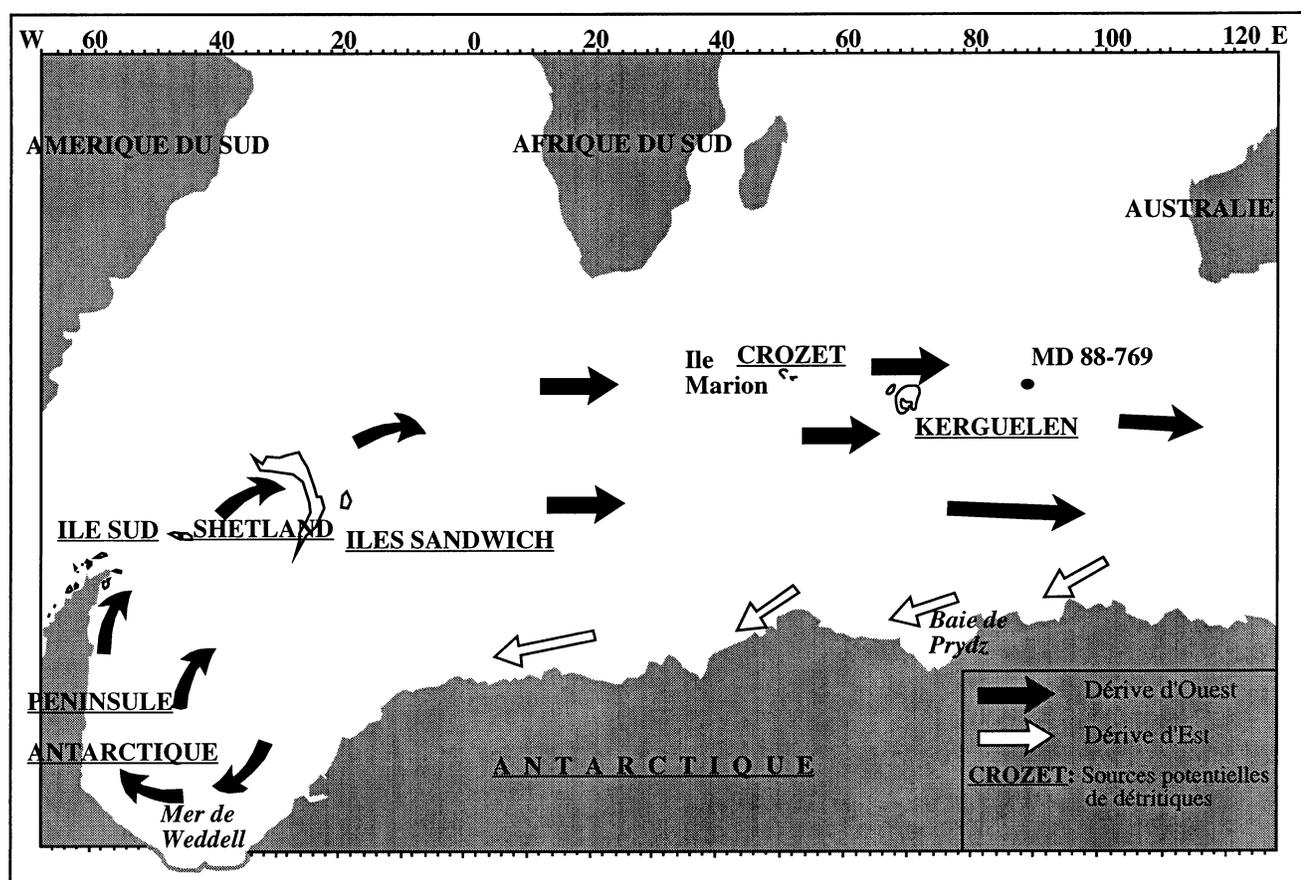


Figure 5. Schéma de la circulation superficielle [7] et carte de localisation des différentes sources susceptibles d'être à l'origine de la minéralogie des éléments détritiques rencontrés dans la carotte MD 88-769.

Figure 5. Superficial circulation map [7] and location of the different sources which may contribute to the mineralogy recorded in the MD 88-769 core sediments.

bable que les îles Kerguelen et Crozet sont les sources volcaniques majeures, les îles Sandwich et Sud Shetland n'étant que des fournisseurs secondaires. Le continent Antarctique et la péninsule Antarctique pourraient être les sources d'origine continentale. La position distale du bassin sud-est indien par rapport aux zones de vélages d'icebergs (Atlantique Sud) est probablement la cause des faibles apports.

Une comparaison des événements de décharges d'icebergs de l'océan Austral avec les événements d'Heinrich de l'Atlantique Nord suggère que les événements de débâcles d'icebergs, enregistrés dans les deux océans, se déroulent à peu près aux mêmes périodes. Des études à plus haute résolution seraient nécessaires dans d'autres secteurs de l'océan Austral pour confirmer cette constatation très préliminaire.

Remerciements

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre du programme PNEDC. Ce travail a été financé par le PNEDC et géosciences marines. Les auteurs remercient chaleureusement IFRTP/TAAF, le commandant et les marins du *Marion Dufresne*, pour le support logistique, ainsi que J. Duprat, et N. Maillat pour leur participation aux développements analytiques et leurs remarques constructives. Un grand merci à J.-C. Pons pour son aide lors de l'analyse minéralogique et pour ses critiques scientifiques. Cet article est la contribution n°1314 du DGO, UMR 5805 de l'université de Bordeaux-I.

RÉFÉRENCES

- [1] Adie R.J., The petrology of Graham Land, 2, The Andean granite-gabbro intrusive suite, Falkland Islands Dependencies Surv. Sci. Rept. 12 (1955) 39.
- [2] Anderson J.B., Domack E.W., Kurtz D.D., Observation of sediment-laden icebergs in Antarctic waters: implications to glacial erosion and transport, *J. Glaciol.* 25 (93) (1980) 387–396.
- [3] Anderson J.J., Bedrock geology of Antarctica: A summary of exploration, 1831–1962, in: Hadley J.B. (éd.), *Geology and Paleontology of the Antarctic-Antarctic Res. Ser.*, Am. Geophys. Union 6 (1965) 1–17.
- [4] Baker P.E., The South Sandwich Islands: III Petrol. Volcanic Rocks: *Sci Rept. Br. Antarct. Surv.*, 1978, 93 p.
- [5] Bard E., Calibration of the ^{14}C timescale over the past 30 000 years using mass spectrometric U-Th ages from the Barbados corals, *Nature* 345 (1990) 405–410.
- [6] Bard E., Labeyrie L., Pichon J.-J., Labracherie M., Arnold M., Duprat J., Moyes J., Duplessy J.-C., The last deglaciation in the southern and northern hemispheres: A comparison based on oxygen isotopes, sea surface temperature estimates, and accelerator ^{14}C dating from deep-sea sediments, in: Tiede UBAJ (Ed.), *Geological History of the Polar oceans: Arctic versus Antarctic*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1990.
- [7] Bareille G., Flux sédimentaires: paléoproduktivité et paléocirculation de l'océan Austral au cours des dernières 150 000 années, thèse, univ. Bordeaux-I, 604, 1991, 241 p.
- [8] Bareille G., Grousset F.E., Labracherie M., Origin of detrital fluxes in the southeast Indian Ocean during the last climatic cycles, *Paleoceanography* 9 (6) (1994) 799–819.
- [9] Barker P.F., Hill A., Weaver S., Pankhurst R., The origin of the eastern South Scotia Ridge as an intra-oceanic island-arc, in: Craddock C. (éd.), *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982, pp. 203–211.
- [10] Belkin I.M., Gordon A.L., Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania, *J. Geophys. Res.* 101 (C2) (1996) 3675–3696.
- [11] Bond G., Lotti R., Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation, *Science* 267 (1995) 1005–1010.
- [12] Bond G., Broecker W.S., Johnsen S., McManus J., Labeyrie L.D., Jouzel J., Bonani J., Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland Ice, *Nature* 365 (1993) 143–145.
- [13] Bond G., Heinrich H., Broecker W., Labeyrie L., McManus J., Andrews J., Huon S., Jantschik R., Clasen S., Simet C., Tedesco K., Klas M., Bonani G., Ivy S., Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period, *Nature* 360 (1992) 245–249.
- [14] Broecker W.S., Massive iceberg discharges as triggers for global climate change, *Nature* 372 (1994) 421–424.
- [15] Chevallier L., Nougier J., Cantagrel J.M., Volcanology of Possession Island, Crozet Archipelago (TAAF), in: Oliver R.L., James P.R., Jago J.B. (éds.), *Antarctic Earth Science*, Cambridge Univ. Press, 1983, pp. 652–658.
- [16] Cooke D.W., Hays J.D., Estimates of Antarctic ocean seasonal sea ice during glacial interval, in: Craddock C. (éd.), *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982, pp. 1017–1026.
- [17] Cortijo E., La variabilité climatique rapide dans l'Atlantique Nord depuis 128 000 ans : relation entre les carottes de glace et l'océan de surface, thèse, univ. Paris-XI-Orsay, 3863, 1995, 235 p.
- [18] Craddock C., Geological map of Antarctica, in: Craddock C. (éd.), *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982.
- [19] Crosta X., Océan austral: reconstruction quantitatives des températures superficielles et du couvert de banquise au cours des deux derniers cycles climatiques – Cartographie au dernier maximum glaciaire, thèse, univ. Bordeaux-I, 2027, 1998, 258 p.

- [20] Dalziel I.W.D., The evolution of the Scotia arc: a review, in: Oliver R.L., James P.R., Jago J.B. (éd.), *Antarctic Earth Science*: Canberra, Austral. Acad. Sci., 1983, pp. 283–288.
- [21] Edwards D.S., Goodell H.G., The detrital mineralogy of ocean floor surface sediments adjacent to the Antarctic Peninsula, *Antarctica. Mar. Geol.* 7 (1969) 207–234.
- [22] Giret A., Lameyre J., A study of Kerguelen plutonism: petrology, geochronology and geological implications, in: Olgiver R.L., James P.R., Jago J.B. (éds.), *Antarctic Earth Science*, Cambridge Univ. Press, 1983, pp. 646–651.
- [23] Giret A., Le plutonisme océanique intraplaque, exemple des îles Kerguelen, *Com. Nat. Fr. Rech. Antarct.*, 1983, 54 p.
- [24] Giret A., Lameyre J., Beaux J.-F., Gautier I., Verdier O., Chotin P., Cantagrel J.-M., *Géologie, deux siècles de recherche dans les îles Kerguelen*, actes Collq. Rech. Fr. Terres Australes, 1987, pp. 345–355.
- [25] Gonzalez-Ferran O., The Antarctic Cenozoic tectonic process, in: Craddock C. (éd.), *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982, pp. 687–694.
- [26] Gunn B.M., Abranson E.C., Watkins N.D., Nougier J., Petrology and geochemistry of îles Crozet: a summary, in: Adie R.J. (éd.), *Antarctic Geology and Geophysics*, Oslo, Universitets-forlaget, 1972, pp. 825–829.
- [27] Hall K., Evidence in favour of an extensive ice cover on sub-Antarctic Kerguelen Island during the Last Glacial, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 47 (1984) 225–232.
- [28] Heinrich R., Origin and consequences of cyclic ice-rafting in the North-East Atlantic Ocean during the past 130 000 years, *Quat. Res.* 29 (1988) 142–152.
- [29] Howard W.R., Prell W.L., Late Quaternary surface circulation of the southern Indian Ocean and its relation to orbital variations, *Paleoceanography* 7 (1994) 79–117.
- [30] Imbrie J., Kipp N.G., A new micropaleontology method for quantitative paleoclimatology: Application to a Late Pleistocene Caribbean core, in the late Cenozoic glacial ages (éd.), Turekian K.K., Yale Univ. Press, New Haven, 1971, 71–181.
- [31] Keigwin L.D., Lehman S.J., Deep circulation change linked to Heinrich event 1 and Younger Dryas in a mid-depth North Atlantic core, *Paleoceanography* 9 (1994) 185–194.
- [32] Keller R.A., Fisk M.R., White W.M., Birkenmajer K., Late Tertiary-Quaternary transition from arc to back-arc volcanism, south Shetland Islands and Bransfield Strait, Antarctica, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 44 (1988) 14–71.
- [33] Klinck J.M., Smith D.A., Effect of wind changes during the Last Glacial Maximum on the circulation in the Southern Ocean, *Paleoceanography* 8 (1993) 427–433.
- [34] Kuno H., Differentiation of basaltic magma, in: Hess H.H., Poldervaart A. (éd.), *Intersciences Publ. New York, Basalts* 2, 1968, 623–688.
- [35] Labeyrie L., Pichon J.J., Labracherie M., Ippolito P., Duprat J., Duplessy J.C., Melting history of Antarctica during the past 60 000 years, *Nature* 322 (1986) 701–706.
- [36] Labeyrie L.D., Vidal L., Cortijo E., Paterne M., Arnold M., Duplessy J.C., Vautravers M., Labracherie M., Duprat J., Turon J.L., Grousset F., Van Weering T., Surface and deep hydrology of northern Atlantic Ocean during the past 150 000 years, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 348B (1995) 255–264.
- [37] Levitus S., *World Ocean Atlas*, disc 1, Objective: Analyses temperature Fields, US Dep. Comm., Washington DC, 1994.
- [38] Long T., Les flux de silice détritique et d'opale biogène dans le secteur ouest-indien de l'océan Austral: application aux 40 000 dernières années, rapp. Dueso, univ. Bordeaux-I, UER géol., 1986, 72 p.
- [39] Lutjeharms J.R., Valentine H.R., Southern Ocean thermal fronts south of Africa, *Deep-Sea Res.* 31 (1984) 1461–1475.
- [40] Morche W., Hubberten H.-W., Ehrmann W.U., Keller J., Geochemical investigations of volcanic ash layers from Leg 119, Kerguelen Plateau, *Proc. Ocean Drill. Program Initial Rep.*, 119, 1991, pp. 323–344.
- [41] Nelson C.S., Cooke P.J., Henty C.H., Cuthbertson A.M., Oceanographic and climatic changes over the last 160 000 years at Deep Sea Drilling Project Site 594 off Southeastern New Zealand, Southwest Pacific Ocean, *Paleoceanography* 8 (4) (1993) 435–458.
- [42] Nougier J., Contribution à l'étude géologique et géomorphologique des îles de Kerguelen (territoires des Terres Australes et Antarctiques françaises), *Com. Nat. Fr. Rech. Antarct.* 27 (1969) 440 p.
- [43] Nougier J., Geochronology of the volcanic activity in îles Kerguelen, in: Adie R.J. (éd.), *Antarctic Geology and Geophysics*: Oslo, Universitets-forlaget (1972a) 803–808.
- [44] Nougier J., Volcanic associations in îles Kerguelen, in: Adie R.J. (éd.), *Antarctic Geology and Geophysics*, Oslo, Universitets-forlaget (1972b) 809–815.
- [45] Nougier J., Pawlowski D., Cantagrel J.M., Chrono-spatial evolution of the volcanic activity in southeastern Kerguelen (TAAF), in: Olgiver R.L., James P.R., Jago J.B. (éds.), *Antarctic Earth Science*, Cambridge Univ. Press, 1983, pp. 640–645.
- [46] Parfenoff A., Pomerol C., Tourenq J., *Les minéraux en grains, méthodes d'étude et détermination*, Masson, Paris, 1970, p. 550.
- [47] Parra M., Pons C., Nature and origin of recent sediments in the Scotia sea (N.E. Antarctica Peninsula), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 7 (1990) 1–33.
- [48] Pudsey C.J., Late Quaternary changes in Antarctic Bottom Water velocity inferred from sediment grain size in the northern Weddell Sea, *Mar. Geol.* 107 (1992) 9–33.
- [49] Pudsey C.I., Barker P.F., Hamilton N., Weddell Sea abyssal sediments: record of antarctica bottom water flow, *Mar. Geol.* 81 (1988) 289–314.
- [50] Ravich M.G., Fedorov L.V., Geologic Structure of MacRobertson Land and Princess Elizabeth Land, East Antarctica, in: Craddock C. (éd.), *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982, pp. 499–504.
- [51] Ruddiman W.H., Late Quaternary deposition of ice-rafted sand in the polar North Atlantic (lat. 40° to 65° N), *Geol. Soc. America Bull.* 88 (1977) 1813–1827.

- [52] Salvignac M.-E., Variabilité hydrologique et climatique de l'océan Austral (secteur indien) au cours du Quaternaire terminal, essai de corrélation inter-hémisphérique, thèse, univ. Bordeaux-I, 1880, 1998, 353 p.
- [53] Saunders A.D., Tarney J., Weaver S.D., Transverse geochemical variations across the Antarctic Peninsula: implication for the genesis of calc-alkaline magmas, *Earth Planet. Sci. Lett.* 46 (1980) 344–360.
- [54] Smellie J.L., A geochemical overview of subduction-related igneous activity in the South Shetland Islands, Lesser Antarctica, in: Oliver R.L., James P.R., Jago J.B. (éd.), *Antarctic Earth Science*, Canberra, Austral. Acad. Sci., 1983, 352–356.
- [55] Smellie J.L., Pankhurst J., Hole M.J., Thomson J.W., Age, distribution and eruptive conditions of late Cenozoic alkaline volcanism in the Antarctic Peninsula and Eastern Ellsworth Land, a review, *Bull. Br. Antarct. Surv.* 80 (1988) 21–49.
- [56] Smellie J.L., Pankhurst R.J., Thomson M.R.A., Davies R.E.S., The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution, *Sci. Rept. Br. Antarct. Surv.*, 1984, 87 p.
- [57] Tarney J., Weaver S.D., Saunders A.D., Pankhurst R.J., Barker P.F., Volcanic evolution of the northern Antarctic Peninsula and the Scotia Arc, in: Thorpe R.S. (éd.), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, Wiley, Chichester, 1982, pp. 371–400.
- [58] Thomson M.R.A., Parkhurst R.J., Clarkson P.D., The Antarctic Peninsula, a late Mesozoic-Cenozoic Arc (Review), in: Olgiver R.L., James P.R., Jago J.B. (éds.), *Antarctic Earth Science*, Cambridge Univ. Press, 1983, pp. 289–294.
- [59] Warnke D.A., Glacial erosion, ice-rafting and glacial-marine sediments: Antarctica and Southern Ocean, *J. Sci.* 269 (1970) 276–294.
- [60] Warnke D.A., Richter J., Oppenheimer C.H., Characteristic off nearshore environment off the south coast of Anvers Island, Antarctic Peninsula, *Limnol. Oceanogr.* 1973, pp. 131–142.
- [61] Watkins N.D., Gunn B.M., Nougier J., Baksi A.K., Kerguelen: continental fragment or oceanic island, *Geol. Soc. Am. Bull.* 85 (1974) 201–212.
- [62] Weaver S.D., Saunders A.D., Tarney J., Mesozoic-Cenozoic volcanism in the South Shetland Islands and the Antarctic Peninsula: geochemical nature and plate-tectonic significance, in: Craddock C. (éd.), *Antarctic Geoscience*, Univ. Wisconsin Press, Madison, 1982, pp. 263–273.
- [63] Weaver S.D., Saunders A.D., Pankhurst R.J., Tarney J., A geochemical study of magmatism associated with the initial stages of back-arc spreading: the Quaternary rocks of Bransfield Strait, South Shetland Islands, *Contrib. Mineral. Petrol.* 68 (1979) 151–169.