

Evolution des propriétés physico-chimiques de l'eau de mer dans les détroits de Géorgie et de Juan de Fuca

(Colombie-Britannique, Canada)

Emilie Davenne¹ et Diane Masson²

1. Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var

2. Institut des sciences de la mer, Sidney, CB, Canada

Août 2001

-Table des matières-

I - INTRODUCTION.....	4
II - INFLUENCES EXTERNES RÉGISSANT LA CIRCULATION DES MASSES D'EAU	5
II.1 - Géographie et bathymétrie.....	5
II.2 - Climat	7
II.3 - Régime de marées.....	8
II.4 - Apports d'eau douce	8
II.5 - Courants.....	9
II.5.1 - Courants de marée.....	9
II.5.2 - Courants résiduels	9
II.5.3 - Courants océaniques.....	10
II.6 - Remontées d'eau.....	11
II.7 - El Niño.....	11
III - CAMPAGNES DE MESURE À LA MER	12
III.1 - Type de données récoltées.....	12
III.2 - Acquisition des données.....	14
III.3 - Récupération des données	15
IV - PHÉNOMÈNES REMARQUABLES	16
IV.1 - Le renouvellement de l'eau profonde dans le détroit de Géorgie.....	16
IV.1.1 - Théorie existante : comparaison aux données récentes	16
IV.1.2 - L'eau de fond de 1999 à 2001	19
IV.2 - Intrusions en profondeur intermédiaire dans le détroit de Géorgie.....	21
IV.2.1 - Mise en évidence	21
IV.2.2 - Relation avec le cycle de marée	25
IV.3 - L'eau de fond du détroit de Juan de Fuca	27
IV.4 - Le panache du fleuve Fraser.....	32
IV.5 - Changement de régime surface - fond.....	37
V - CONCLUSION.....	39
BIBLIOGRAPHIE	40
ANNEXES	41

-Table des figures-

Figure 1 – Géographie de la zone d'étude.....	5
Figure 2 – Bathymétrie de la zone d'étude.....	6
Figure 3 – Configuration des vents.....	7
Figure 4 – Amplitude moyenne de la marée.....	8
Figure 5 – Variations saisonnières du débit du Fraser (2000).....	9
Figure 6 – Schéma des courants de marée dans Juan de Fuca et Géorgie.....	9
Figure 7 – Principe de la circulation estuarienne.....	10
Figure 8 – Schéma des courants résiduels dans Juan de Fuca.....	10
Figure 9 – Courants océaniques au large de l'île de Vancouver.....	10
Figure 10 – Courant de l'île de Vancouver.....	11
Figure 11 – Fonctionnement de l'upwelling côtier.....	11
Figure 12 – Conditions imposées par un El Niño.....	11
Figure 13 – Campagnes de mesure.....	13
Figure 14 – Localisation des stations de mesure.....	13
Figure 15 – Le Vector.....	14
Figure 16 – Rosette et CTD.....	14
Figure 17 – Evolution de la température et de la salinité de l'eau profonde du détroit de Géorgie de juin 1989 à juillet 1990 (large de Nanaimo).....	16
Figure 18 – Propriétés de l'eau de fond du détroit de Géorgie (station 39).....	17
Figure 19 – Profil de température avril et juillet 2000, station 39.....	18
Figure 20 – Moyennes de température et salinité dans le fond du détroit de Géorgie.....	19
Figure 21 – Moyennes d'oxygène dissous et de nutriments de l'eau de fond du détroit de Géorgie.....	19
Figure 22 – Mise en évidence du renouvellement d'eau de printemps en 1999.....	20
Figure 23 – Intrusions en profondeur intermédiaire, printemps 1999.....	21
Figure 24 – Coupe à 200 m, printemps 1999.....	22
Figure 25 – Intrusions en profondeur intermédiaire, printemps 2000.....	22
Figure 26 – Intrusions en profondeur intermédiaire, printemps 2001.....	22
Figure 27 – Intrusion en profondeur intermédiaire, été 1999.....	23
Figure 28 – Intrusions en profondeur intermédiaire, hiver 2000.....	24
Figure 29 – Diagramme température – oxygène dissous de l'intrusion 1 de Janvier 2001.....	24

Figure 30 – Stratification au dessus du seuil de Boundary Pass en période de mortes-eaux.....	25
Figure 31 – Position typique de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (avril 1999).....	28
Figure 32 – Moyennes de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (1999-2001).....	28
Figure 33 – Diagramme TS de l'eau de fond de Juan de Fuca (9 campagnes)	29
Figure 34 – Diagramme TS de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (avril 1999).....	30
Figure 35 – Mélange de l'eau de fond de Juan de Fuca, de l'océan au seuil de Victoria (avril 1999).....	30
Figure 36 – Diagrammes oxygène-nutriments et oxygène-salinité de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (avril 1999).....	31
Figure 37 – Débit du fleuve Fraser (1999-2001)	32
Figure 38 – Moyennes des eaux du panache du Fraser (1999-2001).....	33
Figure 39 – Oxygène dissous et nutriments (station 42).....	34
Figure 40 – Diagramme TS du panache du Fraser (1999-2001).....	34
Figure 41 – Diagramme TS du panache du Fraser (juin 1999).....	35
Figure 42 – Taux de mélange de l'eau estuarienne dans les détroits de Juan de Fuca et de Haro (juin 1999).....	35
Figure 43 – Diagrammes oxygène-salinité et oxygène-nutriments, panache du Fraser (juin 1999)	36
Figure 44 – Moyennes de température dans les détroits de Juan de Fuca et de Géorgie (juillet 2000, janvier 2001).....	37

- I -

Introduction



L'IOS (Institute of Ocean Sciences), situé sur l'île de Vancouver (côte Pacifique canadienne) et placé sous la tutelle du gouvernement fédéral canadien, a pour mission d'améliorer la connaissance et la compréhension des événements océaniques pour la région Pacifique. Une autre unité basée à Halifax (Nouvelle Ecosse) a en charge les mêmes attributions pour la zone atlantique.

Les activités développées couvrent des domaines aussi variés que la sédimentologie, la télédétection, la biologie, la modélisation, l'hydrographie, etc., dans le but de posséder une vision globale de l'océan.



Accueillie 2 mois au sein de la division océanographie physique de l'IOS, sous la direction du Dr. Diane Masson, ma tâche est de synthétiser des données acquises dans les détroits de Géorgie et de Juan de Fuca, séparant l'île de Vancouver du continent.

Le programme d'étude détaillée de cette zone débute en 1999 et veut mettre en évidence les mécanismes de circulation d'eau et les variations d'année en année, en observant l'eau des détroits toujours aux mêmes saisons. Il est motivé par une meilleure connaissance du climat océanique de la région côtière qui aiderait à une gestion des pêches plus

adaptée et à une évaluation d'impact de l'activité humaine sur l'écosystème.

Mon travail consiste à récupérer toutes les données disponibles de 1999 à aujourd'hui pour leur exploitation et leur visualisation, et construire une base de données permettant un accès pratique et facilitant la sélection de n'importe quel paramètre (je m'appuie pour cela sur un logiciel déjà existant). Il constitue un outil pratique et une base de réflexion pour les études futures. Je participe à une campagne de mesure en mer durant une semaine, prenant conscience des difficultés et des aléas de l'acquisition de données. Enfin en m'appuyant sur des études précédentes et grâce aux conseils avisés de Diane Masson, je tente également de mettre en lumière quelques phénomènes qui me semblent remarquables.

Afin de prendre connaissance de la zone étudiée, sont présentés les facteurs externes pouvant influencer la circulation des masses d'eau : le climat, les marées, les courants, l'apport d'eau douce, etc. Puis je dresse un récapitulatif du genre de données disponibles, de leur localisation, de leur acquisition et du traitement que je leur apporte. Certains phénomènes marqués sont ensuite mis en évidence afin de tenter de comprendre certains aspects du fonctionnement des détroits.

-II-

Influences externes régissant la circulation des masses d'eau

II.1 - Géographie et bathymétrie

L'étude concerne les détroits séparant l'île de Vancouver de la côte Ouest du Canada continental. Juan de Fuca constitue la frontière entre les USA et le Canada. Le petit détroit de Haro fait la jonction avec le détroit de Géorgie, au Nord.

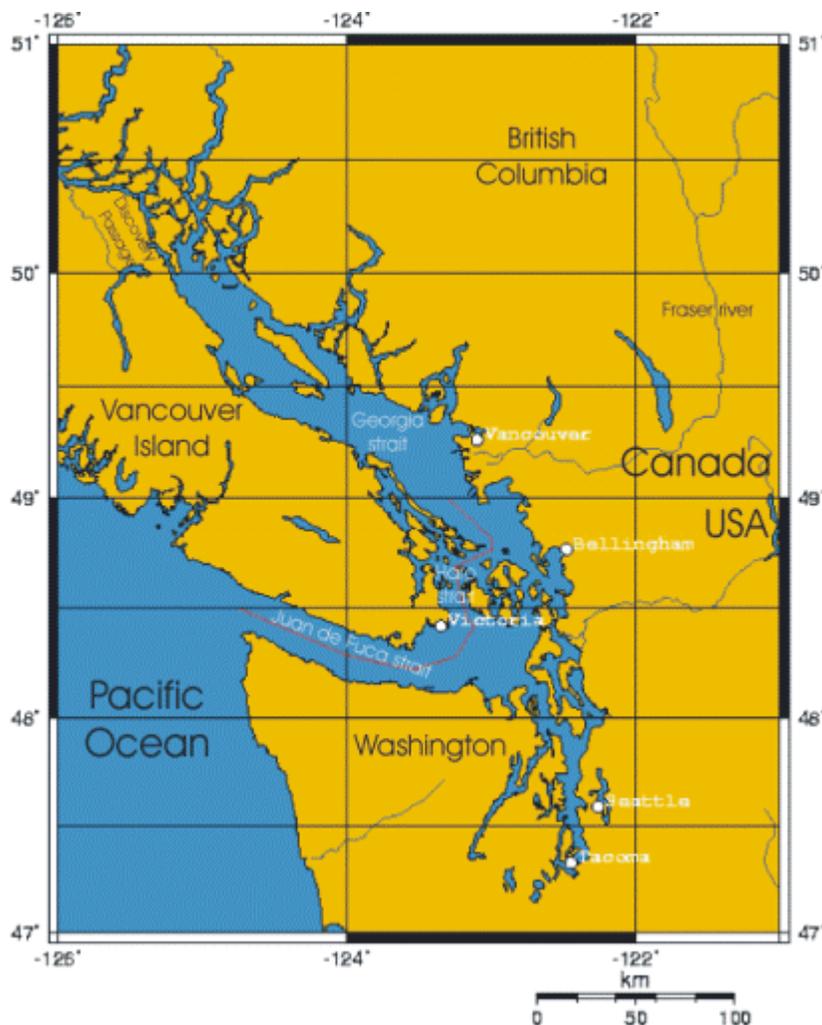


Figure 1 – Géographie de la zone d'étude

La zone présente 2 ouvertures sur l'océan : une au Sud par le détroit de Juan de Fuca et une au Nord par le détroit de Géorgie, beaucoup plus complexe, constituée par des chenaux étroits et relativement longs dont le passage Discovery.

Deux seuils séparent la zone en 3 bassins :

- Le seuil de Victoria situé au Sud de la ville de Victoria caractérisé par une profondeur entre 55 et 100 m,
- Boundary Pass situé au Nord du groupe insulaire, entre 150 et 175 m de profondeur.

Les 3 bassins ainsi définis sont :

- Le détroit de Juan de Fuca, long d'une centaine de kilomètres et large d'environ 25 km, possède des profondeurs entre 250 et 180 m du côté pacifique et 55 m au niveau du seuil de Victoria,
- Le détroit de Haro mesure 50 km de long, 5 km de large et présente une profondeur maximale de 300 m environ,
- Le détroit de Géorgie, long de plus de 200 km et large de 28 km en moyenne ; la profondeur moyenne est de 155 m et des profondeurs maximales supérieures à 400 m sont atteintes dans la partie centrale du bassin, au Sud de l'île de Texada.



Figure 2 – Bathymétrie de la zone d'étude

II.2 - Climat



La zone côtière et maritime qui s'étend de l'île de Vancouver jusqu'aux îles de la reine Charlotte constitue une 'écozone' présentant une unité de climat, de relief, de faune et de végétation. Cette écozone présente un des climats les plus chauds et les plus humides du Canada. Le climat est maritime, mais les précipitations n'atteignent que 600 millimètres par an dans le bas du détroit de Géorgie. Les régions plus au Nord sont généralement beaucoup plus humides, recevant jusqu'à 3 000 millimètres de précipitations. Par rapport au reste du Canada, il y a peu de variation dans les températures mensuelles. En juillet, la température moyenne se situe entre 12 et 18 °C ; en janvier, elle se situe entre 4 et 6 °C. On ne trouve généralement pas de glace de mer : la barrière terrestre imposée par la péninsule de l'Alaska empêche le passage d'une grande partie des courants froids arctiques vers le Sud le long de la côte ouest. À l'intérieur des frontières canadiennes de l'écozone, du Sud au Nord, la température de la surface de l'océan ne varie jamais, à tout moment donné, de plus de 3 °C environ ; la variation saisonnière de la température de l'océan varie dans les limites d'une plage étroite de quelque 7 °C, un vif contraste en regard des écarts de 20 °C mesurés sur la côte est. Cette zone constitue une transition entre les mers polaires de l'Arctique et les eaux tempérées de l'océan Pacifique aux latitudes moyennes

Les vents dominants viennent surtout du Nord-Ouest en été (associés à l'anticyclone centré à l'Ouest de la Californie) et du Sud-Est en hiver (associés à la dépression développée au Sud de l'Alaska).

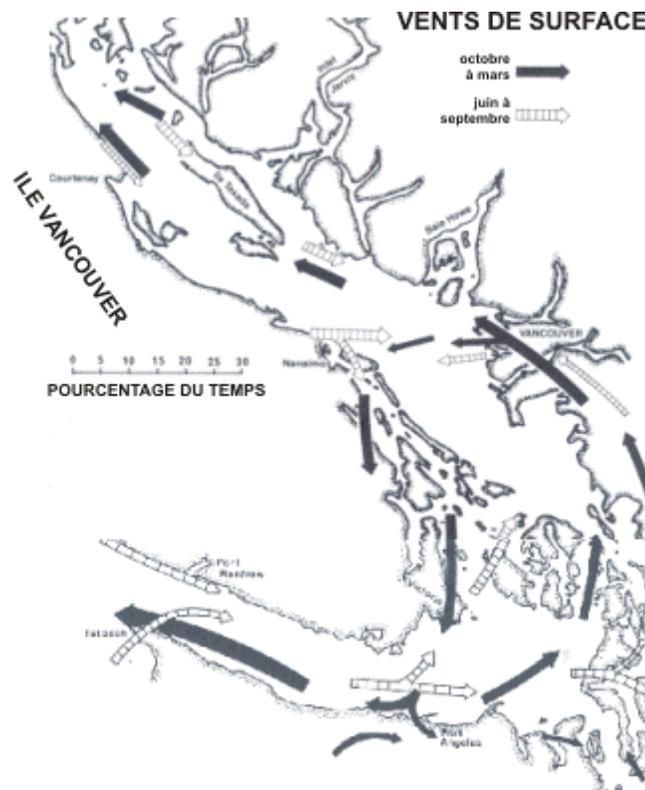


Figure 3 – Configuration des vents

II.3 - Régime de marées

La zone étudiée est soumise à un régime de marées mixte : les composantes diurnes et semi-diurnes se combinent différemment le long du détroit. Lorsque la composante semi-diurne est dominante, deux pleines mers et deux basses mers d'importances sensiblement égales par jour sont observables, contre seulement une pleine mer et une basse mer lorsque la composante diurne devient dominante.

La zone située au large de la ville de Victoria constitue un point amphidromique pour la marée semi-diurne ; seul le marnage dû à la marée diurne existe alors.

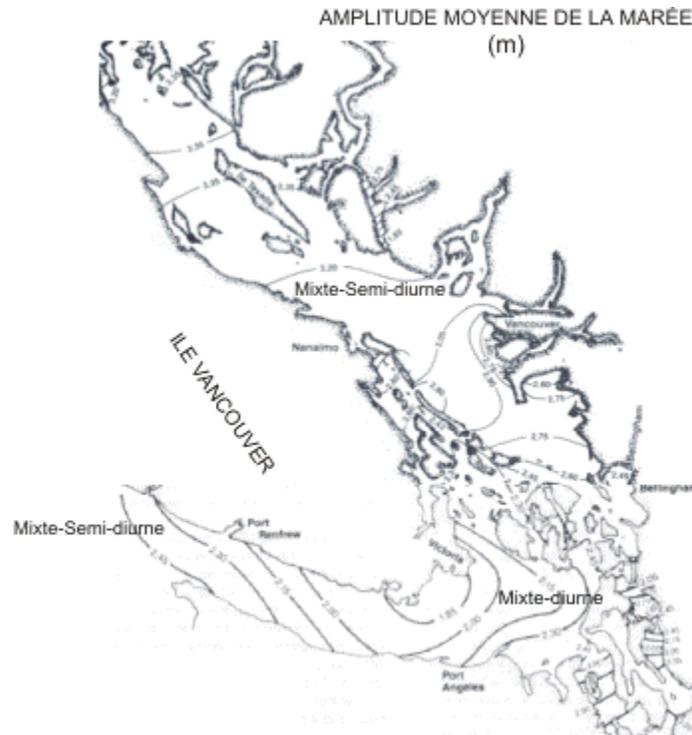


Figure 4 – Amplitude moyenne de la marée

II.4 - Apports d'eau douce

Plusieurs cours d'eau se jettent dans les détroits de Juan de Fuca et Géorgie ; parmi ceux-ci, le fleuve Fraser, qui rejoint l'océan au niveau de Vancouver, possède de loin le plus fort débit et influence majoritairement les propriétés de l'eau de surface. Il est soumis à un régime de crue et d'étiage très marqué : son débit est maximum au début de l'été (mai-juin), correspondant au maximum de la fonte des neiges, et diminue à partir du mois d'août pour atteindre un minimum durant l'hiver (décembre-mars). Le débit du fleuve est également soumis à des variations annuelles considérables.

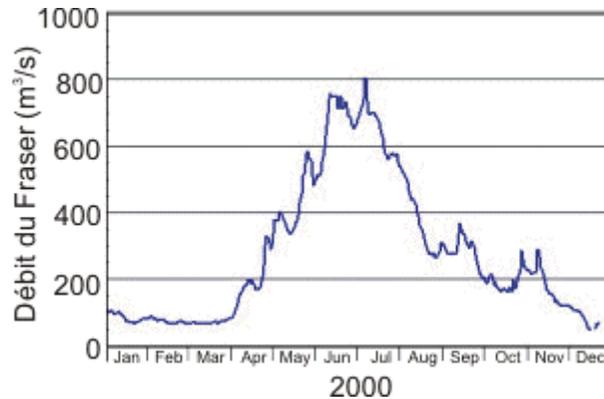


Figure 5 – Variations saisonnières du débit du Fraser (2000)

Contrairement à la pleine mer, la densité dans un estuaire est presque uniquement déterminée par la salinité ; la température joue un rôle minime.

II.5 - Courants

II.5.1 - Courants de marée

Les courants de marée sont très vigoureux dans les passages étroits et jouent un rôle important dans les échanges de masse d'eau par le mélange qu'ils impliquent.

Dans le détroit de Géorgie, les courants de marée observés présentent les caractéristiques d'une onde stationnaire dont le flux et le reflux maximal se produisent respectivement 3h avant la pleine mer et 3h avant la basse mer. Ils sont généralement faibles, sauf dans les passes et les goulets, et leur présence est souvent masquée dans les eaux de surface par les courants dus au vent et à l'écoulement du Fraser. La direction principale d'écoulement du flux est vers le Nord-Ouest, plus ou moins parallèlement à la côte, et légèrement dévié vers la droite par Coriolis ; l'écoulement est plus rapide du côté du continent que du côté de l'île de Vancouver.

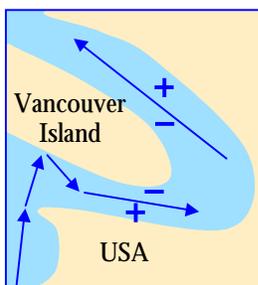


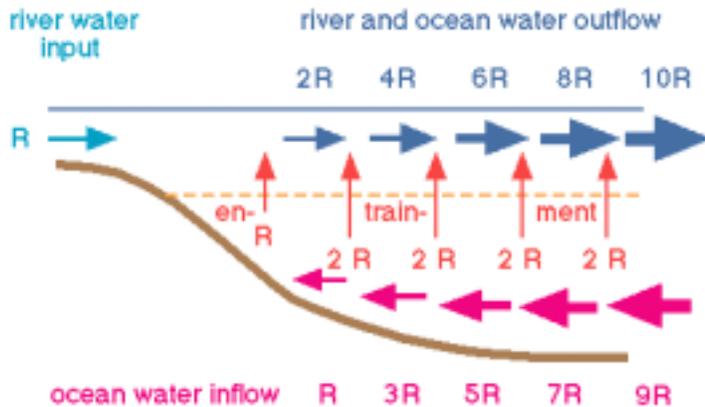
Figure 6 – Schéma des courants de marées dans le détroit de Juan de Fuca et Géorgie

Les courants de flux entrent dans le détroit de Juan de Fuca vers le Nord, suivant la côte de l'état de Washington, se dirigent vers l'île de Vancouver pour ensuite suivre la direction du Sud-Est selon l'axe du détroit. L'onde est la combinaison d'une onde stationnaire et d'une onde progressive variant avec la distance à l'entrée du détroit. Une faible accélération du courant due à Coriolis est observable le long de la côte américaine. Des vitesses allant de 75 à 130 cm/s sont atteintes lors des marées de vives-eaux. Ces vitesses sont largement dépassées lorsque le flux est étranglé dans les chenaux.

Les courants de marée dans le détroit de Haro sont toujours forts et confus.

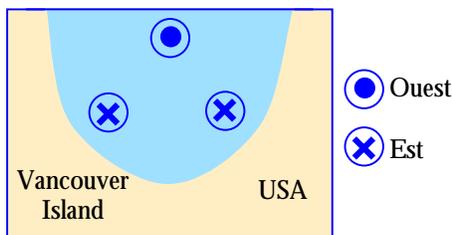
II.5.2 - Courants résiduels

La circulation entraînée par les courants résiduels suit un schéma identique dans les 2 détroits : le fleuve Fraser apporte une quantité importante d'eau douce qui induit un écoulement de surface vers l'Ouest dans le détroit Juan de Fuca et vers le Nord-Ouest dans celui de Géorgie. Celui-ci force un courant de retour de direction opposée en profondeur.



Schématisée ci-contre, la circulation d'eau forcée par un fleuve se caractérise par un écoulement de plus en plus fort vers l'océan en surface, et par un courant de retour en profondeur qui s'affaiblit en approchant l'embouchure du fleuve. Un mélange turbulent, dont le taux varie avec l'importance du flux, s'opère entre les 2 transports d'eau de directions opposées.

Figure 7 – Principe de la circulation estuarienne



Dans le détroit de Juan de Fuca, les courants sont essentiellement parallèles à l'axe du chenal. Près de la surface, le courant résiduel a une vitesse type de 10 à 20 cm/s (40 cm/s au début de l'été) vers l'océan, concentré au milieu du chenal ; en profondeur, le courant résiduel est plus fort sur les côtés du chenal, avance vers l'Est et a une vitesse type de 10 cm/s.

Figure 8 – Schéma des courants résiduels dans Juan de Fuca

La circulation résiduelle suit le même schéma dans le détroit de Géorgie, mais de façon moins évidente que dans le détroit de Juan de Fuca car elle est soumise à plus d'influences parasites, comme la bathymétrie complexe ou les forts courants de marée. Elle s'établit plus ou moins en fonction de l'importance relative de ces facteurs.

II.5.3 - Courants océaniques

La zone au large de l'île de Vancouver est soumise en été au courant de Californie se dirigeant vers l'Est puis vers le Sud en tournant sur la côte à une vitesse de 20 cm/s environ. Vers le début de l'hiver, le courant de Californie est repoussé vers le large par le courant de Davidson qui circule vers le Nord jusqu'au début du printemps. Il existe également un courant sous-marin de Californie qui naît au large de la Californie et remonte vers le Nord. Il atteint une vitesse maximale de 10 cm/s et est centré autour d'une profondeur de 200 à 300 m, sur la zone de talus continental.

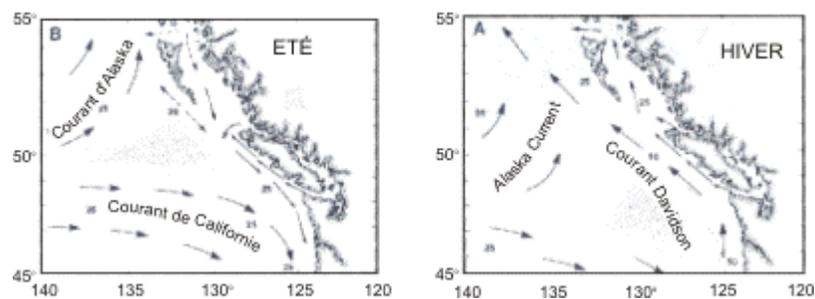


Figure 9 – Courants océaniques au large de l'île de Vancouver

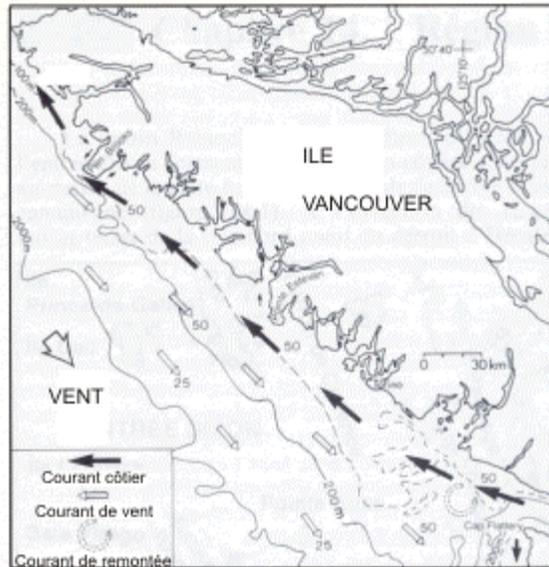
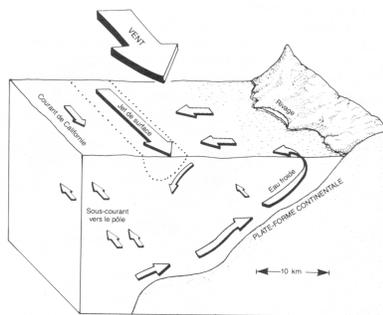


Figure 10 – Courant de l'île de Vancouver

La côte Ouest de l'île de Vancouver est soumise à un contre-courant côtier remontant vers le Nord-Ouest (le courant côtier de l'île de Vancouver). Il est confiné en été à moins de 15 ou 20 km du rivage et se développe sur toute la côte Ouest de l'île en atteignant des vitesses de 50 cm/s en surface et 15 cm/s près du fond. En été, le courant côtier et le courant de vent sont inversés, alors qu'en hiver, l'écoulement côtier se joint au courant de vent. Le courant côtier est causé par l'écoulement d'eau douce en provenance du détroit de Juan de Fuca.

II.6 – Remontées d'eau



Le vent de Nord-Ouest en été souffle le long de la côte de l'île de Vancouver, entraînant les eaux côtières vers le large et créant un déficit en eau ; de l'eau profonde, plus froide et plus riche en éléments nutritifs remonte, c'est l'upwelling d'été. En hiver, le vent a une direction opposée, et rabat les eaux vers la côte créant une accumulation ; un downwelling apparaît pour rétablir l'équilibre.

Ce cycle annuel joue un rôle très important dans les propriétés de l'eau qui entre dans le détroit de Juan de Fuca.

Figure 11 – Fonctionnement de l'upwelling côtier

II.7 – El Niño

Tous les 7 ans en moyenne, le système d'alizés s'effondre au dessus de l'océan Pacifique équatorial entraînant une diminution des remontées d'eau froide et donc un réchauffement des eaux côtières. Ce phénomène est plus fort dans les régions équatoriales,

mais il peut avoir une influence autour de l'île de Vancouver ; la conséquence essentielle est un réchauffement global de l'eau, dû à de l'eau chaude qui remonte du Sud ou à un changement des vents, qui modifie les caractéristiques de l'eau qui entre dans le détroit de Juan de Fuca.

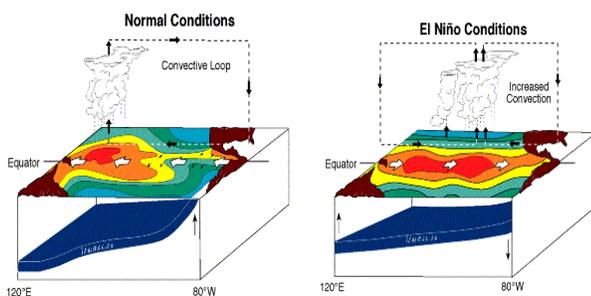


Figure 12 – Conditions imposées par un El Niño

-III-

Campagnes de mesure à la mer

III.1 - Type de données récoltées

Plusieurs paramètres sont intéressants à mesurer pour caractériser les masses d'eau et pouvoir ainsi connaître leur origine et suivre leur progression : la température et la salinité, d'après lesquels on peut calculer la densité. Les études entreprises sur cette zone se sont attachées à mesurer ces paramètres classiques dans l'analyse océanographique. Mais de part sa géographie, cette zone offre d'autres possibilités pour caractériser les masses d'eau ; en effet, la circulation dans les 2 détroits est très rapide et des propriétés comme la quantité d'éléments nutritifs ou le volume d'oxygène dissous peuvent se révéler des traceurs passifs performants : la biologie ne dispose que de peu de temps pour venir modifier leur concentration.

C'est pourquoi pour cette étude 6 types de données sont disponibles :

- la température en °C,
- la salinité en psu (échelle pratique de salinité),
- le volume d'oxygène dissous en ml/l,
- la quantité de matière pour les nitrates (NO₃),
- les silicates (Si),
- et les phosphates (PO₄) en µmol/l.

La récolte systématique de données entreprise par Diane Masson sur la zone des détroits de Juan de Fuca et de Géorgie débute en 1999 ; elle établit un quadrillage de la zone en fixant des stations où les mesures devront être effectuées lors des campagnes en mer.

Les données sont disponibles pour 9 campagnes : 3 par an pendant 3 ans (1999, 2000 et 2001). Le choix des dates des mesures est lié au débit du fleuve Fraser. En général, les campagnes pour une année se situent au printemps (avril), avant la crue du Fraser, en été (juin ou juillet), pendant la crue et à la fin de l'été (août, septembre) lorsque le flux du fleuve diminue fortement. Cependant, des informations relatives aux processus intervenant durant l'hiver étant intéressantes, une campagne a été effectuée en janvier 2001.

Les campagnes en mer organisées à l'Institut des Sciences de l'Océan étant nombreuses, elles se voient attribuer un numéro ; voici celles qui seront utilisées lors de cette étude :

	1999	2000	2001
Printemps	Avril : 1999-09	Avril : 2000-07	Avril : 2001-10
Été	Juin : 1999-16	Juillet : 2000-17	Juin : 2001-19
Automne	Août : 1999-20	Août : 2000-27	
Hiver			Janvier : 2001-01

Figure 13 – Campagnes de mesure

Les paramètres mesurés ne sont pas identiques pour toutes les stations : suivant l'axe des 2 détroits, les mesures concernent les 6 paramètres étudiés (stations 'rosette'), alors que seules la température et la salinité seront mesurées aux autres stations (stations 'CTD'). Environ 75 stations sont prédéfinies :


Figure 14 – Localisation des stations de mesure

III.2 - Acquisition des données

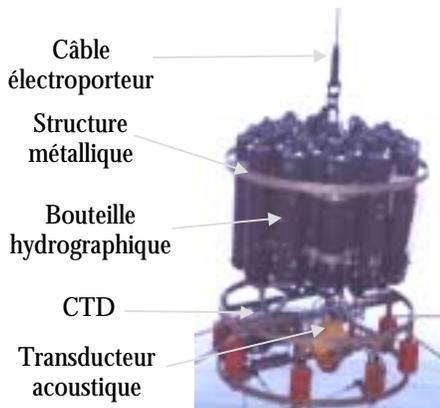
L'IOS dispose de plusieurs navires océanographiques pour les campagnes ; Le Tully est dédié aux études en plein océan ; le Vector, plus petit, est utilisé pour les études en milieu côtier et enfin plusieurs autres petites unités destinées aux zones d'étude plus restreintes. Ces navires font partie de la flotte de la Garde Côtière Canadienne. Ils assurent plusieurs fonctions : lorsqu'ils ne sont pas armés pour l'océanographie, ils sont utilisés pour effectuer des missions de surveillance, d'aide aux navires en difficulté par exemple.



Le bateau habituellement utilisé pour effectuer les mesures de cette étude est le Vector.

Figure 15 – Le Vector

Les appareils mis en oeuvre lors des campagnes sont les suivants :



- Une sonde CTD permettant de mesurer la température et la salinité en continu, via l'enregistrement en numérique par un PC,
- Une rosette de 25 bouteilles hydrographiques permettant le prélèvement d'échantillons d'eau à des profondeurs fixées.

Figure 16 – Rosette et CTD

Tous les appareils sont installés sur une même structure métallique et sont mis à l'eau en même temps. Le capteur de pression de la sonde CTD permet de suivre en direct la progression du système et de savoir à tout instant à quelle profondeur il se trouve ; la liaison avec la surface se fait par un câble électroporteur. Celui-ci est déroulé jusqu'à environ 5 m du fond ; le sondeur bathymétrique permet de comparer la position du système par rapport au fond grâce au transducteur installé sur la cage métallique. La température et la salinité sont acquises lors de la descente. Puis la rosette est remontée : de façon continue si les mesures concernent seulement la température et la salinité, ou en s'arrêtant aux profondeurs prédéfinies pour prélever un échantillon d'eau en fermant une bouteille (l'ordre est envoyé à la rosette via le câble électroporteur). Le déclenchement des bouteilles se fait à intervalles de 50 m jusqu'à 200 m, puis tous les 25 m jusqu'à 50 m et enfin tous les 10 m.

Les fichiers contenant les données de profondeur, de température et de salinité sont stockés et 2 sortes d'échantillons sont prélevés sur chacune des bouteilles utilisées : une fiole dans laquelle sont introduits des produits chimiques visant à faire réagir l'oxygène dissous, et 2 éprouvettes qui seront congelées pour un dosage ultérieur des nutriments en laboratoire. Le dosage de l'oxygène dissous se fait sur le bateau.

Les données ainsi acquises sont réorganisées sous une forme standard de fichier pour l'Institut, appelé format IOS. Les fichiers contiennent toutes les informations relatives au contexte de la mesure : date, heure, nom de la station, latitude, longitude. Les fichiers sont ensuite archivés dans une bibliothèque

informatique accessible à tous. Deux types de fichiers IOS sont alors disponibles : ceux dont l'extension est '.ctd', renfermant les informations de température et salinité et ceux dont l'extension est '.che' qui contiennent les informations de volume d'oxygène dissous. Les données concernant les nutriments ne sont disponibles que sous la forme de fichiers Excel contenant la profondeur, et la quantité de matière en mol/l pour les 3 éléments (NO₃, Si, et PO₄).

III.3 - Récupération des données

Le but est de pouvoir visualiser les données de façon simple afin de détecter les phénomènes relatifs à la circulation des masses d'eau dans les détroits de Juan de Fuca et de Géorgie.

Pour cela l'Institut dispose d'un logiciel inventé par un scientifique allemand, Reiner Schlitzer, dédié entièrement aux données océanographiques et offrant des modules spécifiques permettant de les manipuler et de les visualiser facilement : Ocean Data View (ODV). Il fonctionne comme un système d'informations géographiques (SIG) permettant de localiser des informations dans l'espace, et autorise la production de graphiques variés. Il offre un module de sélection des données par critère (domaine, date, intervalle d'un paramètre) très utile et bien pensé.

Les différents types de données sont disponibles dans des fichiers séparés ; les profondeurs auxquelles les mesures sont effectuées ne sont pas forcément les mêmes. Par exemple, les données de température et de salinité sont beaucoup plus abondantes que celle d'oxygène ou de nutriments. L'objectif est alors de construire des fichiers dont le format est accepté par ODV et qui synthétisent toutes les informations pour chaque profondeur. Plusieurs standards de fichiers peuvent être importés ; mais la difficulté réside dans le fait que tous les types de données (température, salinité, oxygène dissous et nutriments) doivent être compilés dans un même fichier pour permettre au logiciel d'effectuer une correspondance spatiale entre les données.

La première partie de mon stage a donc été consacrée à l'élaboration d'un programme, implémenté grâce au logiciel IDL (équivalent à Matlab), qui permet de récupérer proprement les données et de les exploiter sous ODV.

Le format des fichiers de sortie pour lequel j'ai opté est le plus simple à manipuler : le fichier texte. ODV impose un format de ligne : inscrire dans l'ordre en colonne les informations de campagne, station, latitude, longitude, profondeur puis de toutes les données souhaitées ; dans notre cas, seront renseignées les données de température, salinité, σ_t (calculé à partir de la température et de la salinité grâce à l'équation d'état de l'eau de mer), oxygène dissous, NO₃, Si, et PO₄.

Le programme, permet de lire les fichiers .ctd, .che et de nutriments et d'écrire dans un fichier .txt les données existantes relatives à chaque profondeur. La difficulté était de faire correspondre les données d'oxygène et de nutriments à celle de température et salinité, pour que ODV autorise à construire des diagrammes faisant intervenir n'importe quel paramètre. En effet, si les données pour une certaine profondeur ne sont pas écrites sur la même ligne dans le fichier '.txt', ODV n'établit pas la correspondance entre les données et l'exploitation des données est rendue impossible.

Le programme réalisé produit 1 fichier pour chaque station et chaque campagne ; une fois que toutes les stations d'une campagne sont traitées, il est possible, par un autre programme de joindre dans un seul fichier les informations concernant toutes les stations d'une campagne. Ces fichiers peuvent ainsi être importés dans ODV. La visualisation des données et la production de graphiques permet alors de mettre en évidence les phénomènes décrits dans la partie suivante.

Le fonctionnement général du programme principal est détaillé en annexe 1.

-IV-

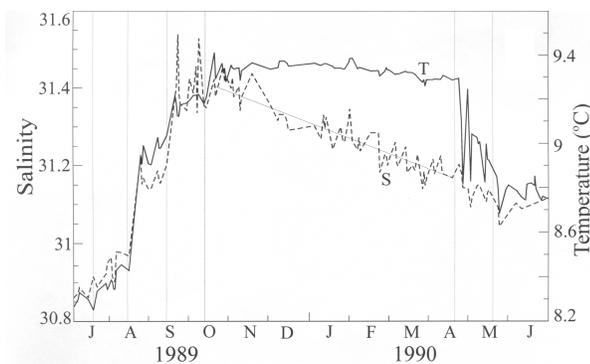
Phénomènes remarquables

La circulation des masses d'eau intervenant dans les détroits de Juan de Fuca et de Géorgie sont régis par de nombreux facteurs résultant de la géographie très particulière de cette zone. Le débit du fleuve Fraser présente un cycle annuel très marqué et intervient donc plus ou moins au cours de l'année, mais il constitue toujours le forçage principal dans la circulation des eaux de surface. Les courants de marée ainsi que le vent influencent également les mouvements des masses d'eau. Les seuils de Victoria et de Boundary Pass rendent la circulation plus difficile. Comprendre en globalité la circulation dans les 2 détroits serait trop complexe ; je m'efforcerai ici de mettre en évidence certains phénomènes clairement identifiables et pouvant participer à la construction d'une réflexion plus poussée sur les mécanismes généraux régissant la circulation des masses d'eau.

IV.1 - Le renouvellement de l'eau profonde dans le détroit de Géorgie

La masse d'eau profonde s'étend à des profondeurs supérieures à 300 m, bien en dessous du seuil de Boundary Pass. Elle se forme par l'intrusion d'eau dense qui coule sur le fond du seuil, générant un courant de gravité qui suit la bathymétrie et pénètre le bassin profond du détroit en y changeant les propriétés. Elle est le sujet de plusieurs études et différentes séries de données existent sur les zones de profondeur extrême, où les caractéristiques de l'eau profonde sont accessibles.

IV.1.1 - Théorie existante : comparaison aux données récentes



L'article de Diane Masson datant de Février 2001 fournit les variations de la température et de la salinité des eaux de fond sur une année complète (juillet 1989-juin 1990) pour une station de mesure située au large de Nanaimo et dont la profondeur maximale avoisine 400 m.

Figure 17 – Evolution de la température et de la salinité de l'eau profonde du détroit de Géorgie de juin 1989 à juillet 1990 (large de Nanaimo)

Mêlé aux informations de nutriments et d'oxygène dissous, ce graphique permet de formuler les conclusions suivantes :

- Deux saisons de renouvellement d'eau sont identifiées :
 - la fin de l'été apporte de l'eau chaude, salée, riche en nutriments, et pauvre en oxygène dissous ; la salinité et la température atteignent un maximum en Octobre,
 - le printemps (avril-mai) apporte de l'eau plus froide, de salinité équivalente, relativement pauvre en nutriments mais plus riche en O₂.
- La température varie en marches (brusque hausse à l'automne et forte baisse au printemps), alors que la salinité augmente fortement à la fin de l'été pour ensuite décroître progressivement.
- La plupart de l'eau qui entre dans le bassin arrive au printemps ; le reste de l'année, l'eau profonde diffuse lentement dans la couche supérieure.

Comparons maintenant ces conclusions avec les données disponibles de 1999 à 2001. La station la plus profonde, et qui possède également des renseignements sur l'oxygène dissous et les nutriments, est la station 39 : les mesures peuvent atteindre jusqu'à 380 m.

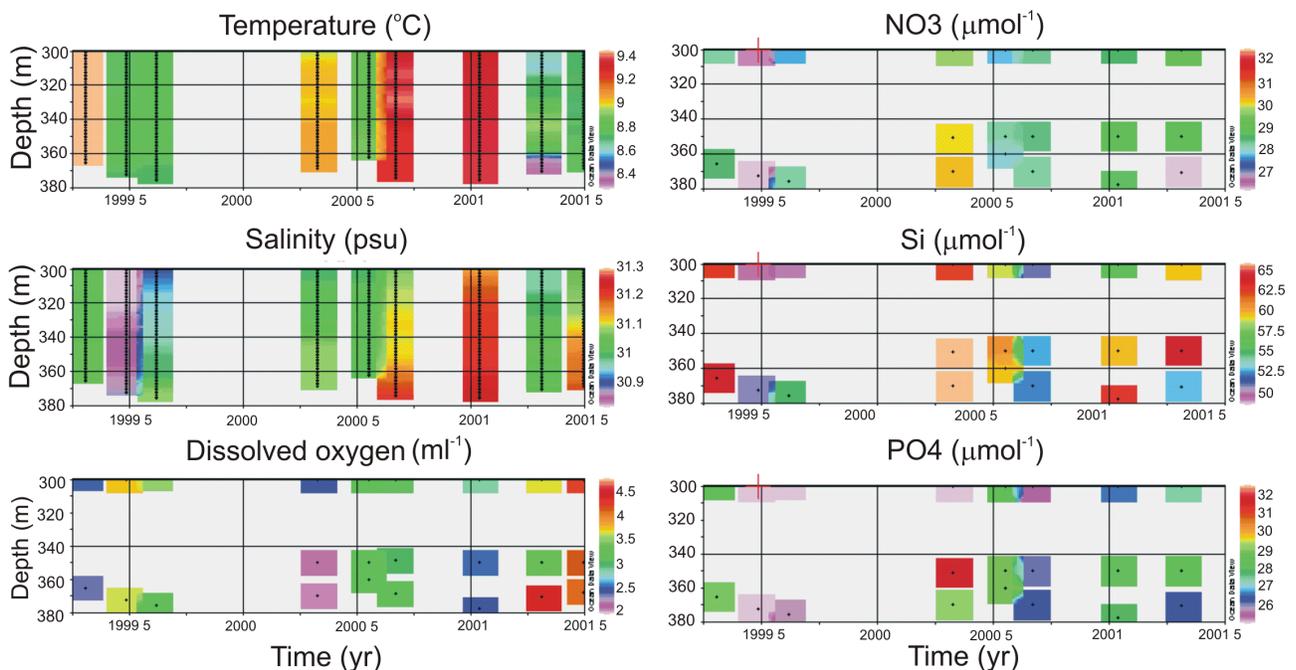


Figure 18 – Propriétés de l'eau de fond du détroit de Géorgie (station 39)

La figure ci-dessus présente les données disponibles à la station 39 de 300 m au fond : chaque barre verticale symbolise une campagne. Les données d'oxygène et de nutriments étant moins nombreuses le long de la colonne d'eau, il n'y a que 2 ou 3 mesures correspondant à la zone profonde.

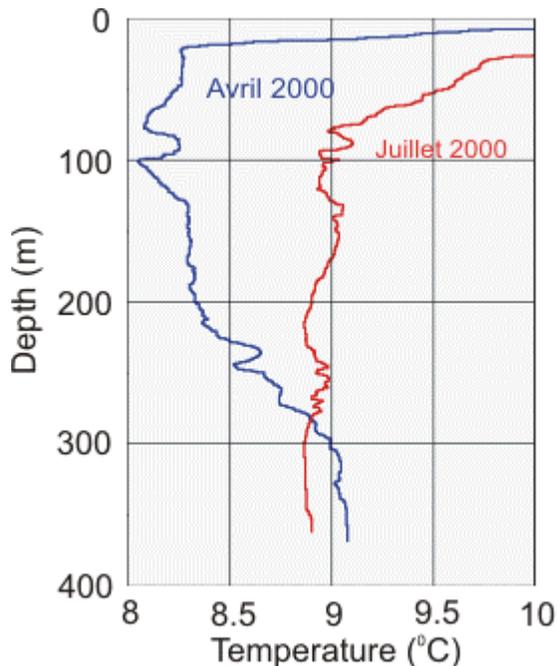
La résolution des mesures ne permet pas d'accéder aux détails, tels que les dates et les durées exactes des phénomènes, mais permet une visualisation sur plusieurs années des variations des différents paramètres.

Plusieurs évènements sont remarquables :

Entre Avril et Juin 1999-2000 :

Une masse d'eau plus froide est amenée par le printemps entre les mois d'avril et de juin ou juillet pour les années 1999 et 2000 ; la différence de température observée entre les mois d'avril et de juin est beaucoup plus importante pour l'année 1999 : 1,1°C en 1999 contre seulement 0,3°C en 2000. L'anomalie très marquée présente en 1999 résulte des températures imposées aux eaux côtières par l'El Niño de 1998 qui constitue l'évènement le plus fort jamais enregistré sur cette partie de la côte canadienne. La différence de température observée pour l'année 2000 est faible mais correspond plus typiquement aux variations normalement observées, dans leur frange inférieure.

La représentation du profil complet de température pour la station 39 permet de faire apparaître de façon plus évidente la présence d'une masse d'eau plus froide dans le fond en avril 2000.



Il est très net qu'une masse d'eau plus chaude est présente en avril dans le fond du détroit, à partir de 300 m environ ; le profil est largement dévié vers les plus fortes températures. Cette masse d'eau a disparu en juillet, remplacée par une eau plus froide : le profil est rectiligne à partir de 100 m de profondeur.

La différence de température de l'eau de fond observée entre les 2 mesures est effectivement faible devant celles du reste de la colonne d'eau, mais l'allure du profil de température permet de vérifier l'existence d'une intrusion d'eau froide en profondeur.

Figure 19 – Profil de température avril et juillet 2000, station 39

La masse d'eau plus froide est également plus riche en oxygène dissous et plus faible en nutriments.

Entre Janvier et Avril 2001 :

L'intrusion d'eau plus froide ne se passe pas entre avril et juin comme en 1999 et 2000, mais elle est déjà présente en avril 2001 : à partir de 360 m, une couche d'eau plus froide se distingue nettement. Ceci indique que pour l'année 2001, l'intrusion d'eau de printemps s'est fait plus tôt que d'habitude.

Entre Août 2000 et Janvier 2001 :

L'eau plus chaude et plus salée amenée par la fin de l'été (octobre) décrite par les études précédentes est bien marquée en janvier 2001.

IV.1.2 - L'eau de fond de 1999 à 2001

Les campagnes menées de 1999 à 2001 permettent d'avoir une vision plus globale de l'eau de fond du détroit de Géorgie. La figure suivante présente les moyennes de température et salinité calculées sur l'épaisseur d'eau de 300 m au fond du détroit de Géorgie. Un écart-type des données est reporté afin d'évaluer quelle est la dispersion des paramètres.

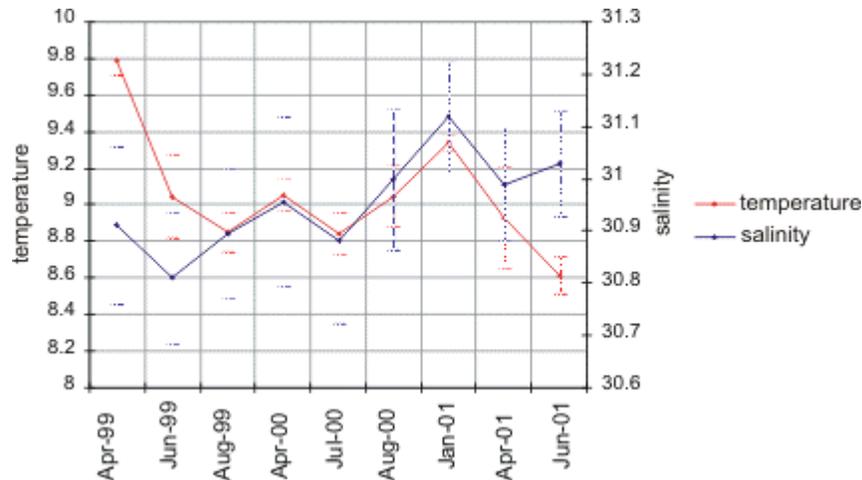


Figure 20 – Moyennes de température et salinité dans le fond du détroit de Géorgie

Quelques points sont remarquables :

- La chute de température est beaucoup plus importante entre avril et juin 1999 que 2000 ainsi qu'il avait été remarqué à la station 39 ; mais la chute de salinité est presque équivalente pour les 2 années. L'eau résultant du phénomène El Niño ne serait donc pas significativement plus salée que l'eau normalement présente dans le détroit.
- Les différences de température et de salinité, pour des années 'normales' (2000 et 2001) sont beaucoup plus marquées entre l'hiver et le printemps qu'entre le printemps et l'été.
- Si l'on considère que le cycle de l'eau de fond est en avance en 2001, que les tendances d'avril à juin 2001 correspondent à celles de juin ou juillet à août 1999 et 2000, il est étonnant de remarquer que la température augmente entre juillet et août 2000.

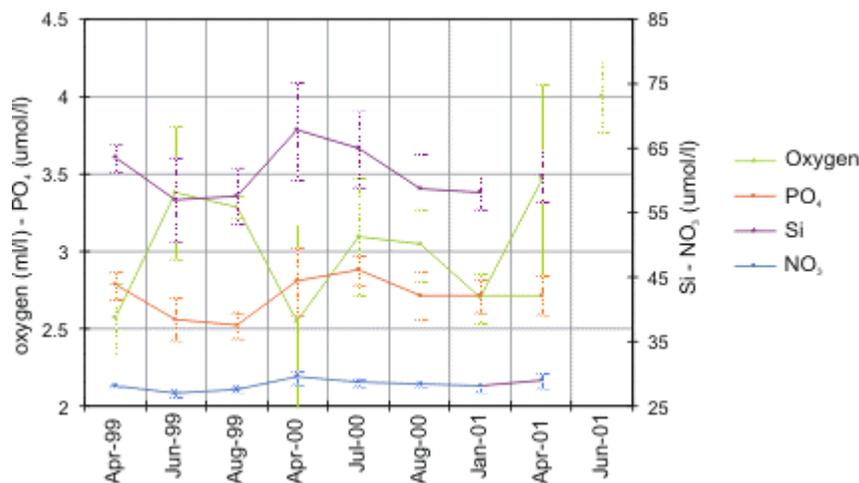
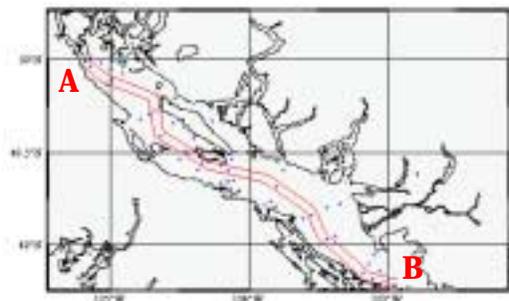


Figure 21 – Moyennes d'oxygène dissous et de nutriments de l'eau de fond du détroit de Géorgie

Les 3 nutriments évoluent de manière semblable. Ils présentent un minimum bien marqué pour l'arrivée de l'eau du printemps 1999, mais cette remarque n'est pas aussi évidente pour le printemps 2000 : ils montrent seulement une tendance à la baisse. L'oxygène quant à lui montre des valeurs maximales en juin ou juillet 1999 et 2000, marquant l'intrusion de l'eau de printemps plus riche en O₂. L'augmentation du volume d'O₂ dissous entre avril et juin 2001 est innattendue ; en effet, de juin ou juillet à août 1999 et 2000, l'oxygène a tendance à décroître légèrement ; si les saisons d'intrusions sont décalées en 2001, l'oxygène devrait également baisser entre avril et juin 2001. Peut-on émettre l'hypothèse suivante : en 2001, l'intrusion commence plus tôt que d'habitude et dure aussi plus longtemps ?

L'évidence du renouvellement de l'eau profonde du détroit de Géorgie peut être caractérisée en représentant simplement l'état de l'eau de fond à des saisons différentes. Une visualisation de l'ensemble du détroit aide à comprendre l'ampleur du phénomène de renouvellement.



Les figures suivantes présentent les paramètres qui marquent le mieux la présence d'une eau nouvelle : la température et l'oxygène dissous. Les données utilisées sont celles comprises dans la section dessinée ci-contre. Les échelles de couleur sont les mêmes les 2 périodes de l'année afin de pouvoir comparer plus facilement.

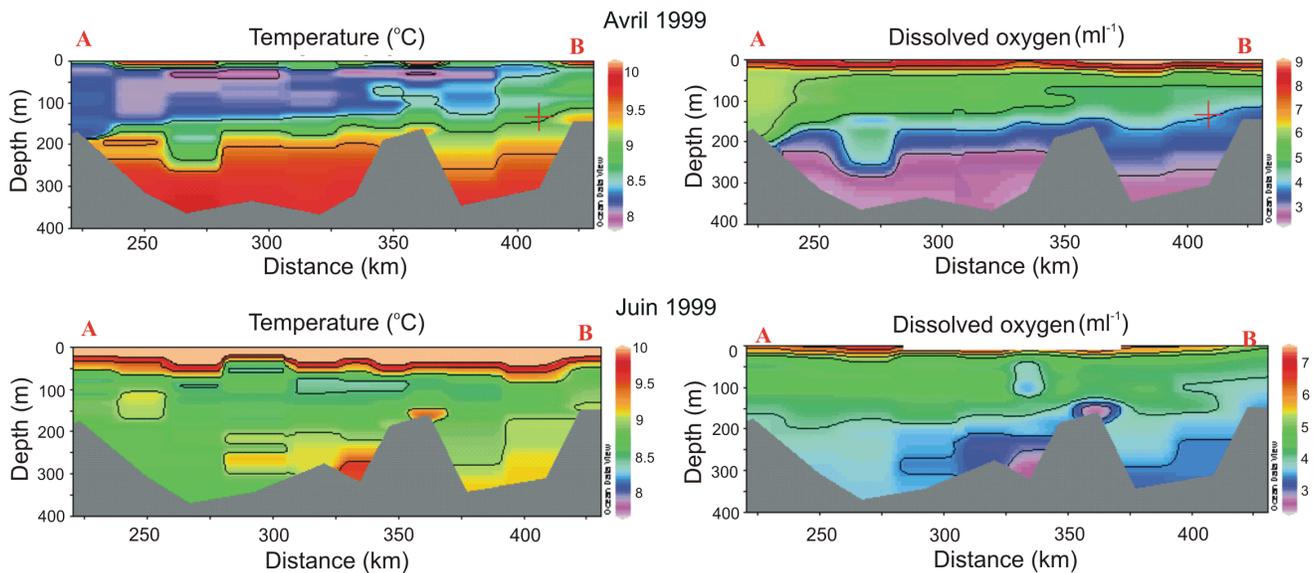


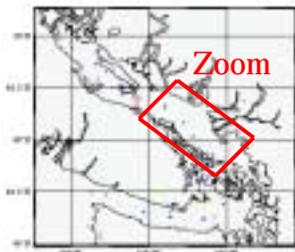
Figure 22 – Mise en évidence du renouvellement d'eau de printemps en 1999

Il est très net que sur tout le fond du détroit de Géorgie une eau chaude et pauvre en O₂ dissous présente en avril 1999 a disparu en juin 1999 au profit d'une eau plus froide et plus riche en O₂.

IV.2 - Intrusions en profondeur intermédiaire dans le détroit de Géorgie

L'observation globale des propriétés physico-chimiques de la masse d'eau dans le détroit de Géorgie conduit à la remarque suivante : à des profondeurs intermédiaires (typiquement entre 50 et 250 m), après le seuil de Boundary Pass, des unités de dimensions réduites et très localisées présentent des caractéristiques différentes de la masse d'eau qui les entoure, suggérant des intrusions d'eau ayant des propriétés différentes.

IV.2.1 - Mise en évidence



Les figures suivantes effectuent un zoom sur la zone où ces intrusions sont détectées : 100 km à partir de Boundary Pass sur une épaisseur de 300 m (50-350m). Seules les propriétés permettant de mettre clairement en évidence le phénomène sont représentées : classiquement, la température, le volume d'oxygène dissous et un des 3 nutriments car ils se comportent de façon identique. L'observation de la salinité ne permet pas de distinguer clairement les intrusions ; en effet, les masses intrusives ont tendance à ajuster leur position dans la colonne d'eau : leur densité propre et la densité ambiante doivent être en accord. Or la densité étant majoritairement influencée par la salinité, il n'est pas possible de voir dans le signal de salinité des anomalies marquées. La température ne fournit pas toujours un signal très clair, mais constitue tout-de-même un bon traceur passif au même titre que l'oxygène dissous ou les nutriments.

Les intrusions sont visibles à plusieurs époques de l'année, mais certaines saisons semblent être plus propices que d'autres à leur apparition ; en effet, le printemps (avril) est la période où on peut les voir clairement et systématiquement, alors que les campagnes menées en juin, juillet ou août ne révèlent pas, ou peu, leur présence. On observe également sur la seule campagne de mesure disponible en hiver des intrusions à des profondeurs intermédiaires.

Printemps 1999-2000-2001 :

Avril 1999

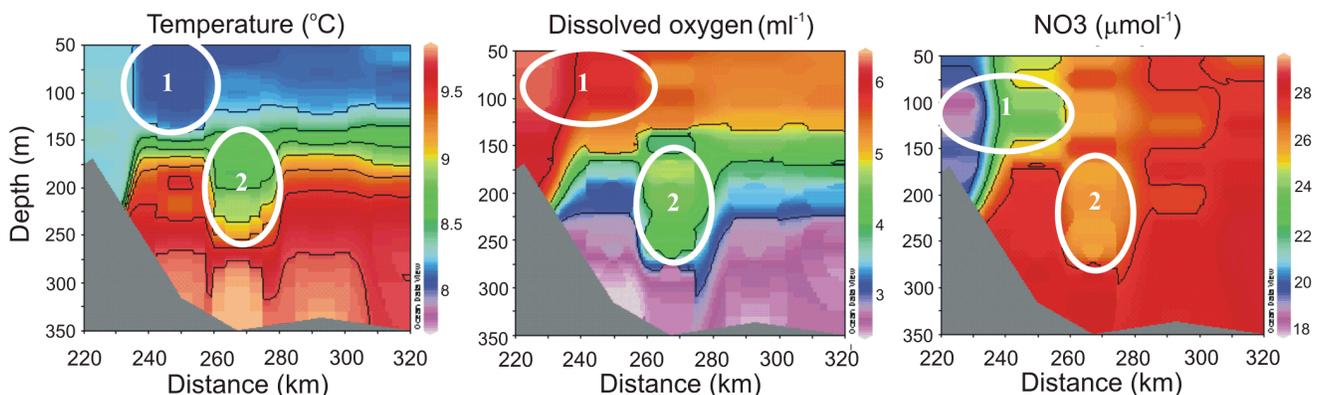
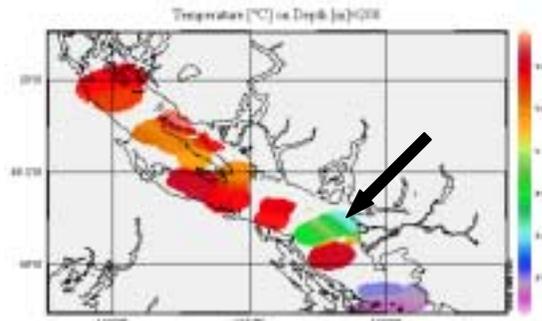


Figure 23 – Intrusions en profondeur intermédiaire, printemps 1999

Deux intrusions distinctes sont identifiables : une masse d'eau qui semble s'avancer du seuil vers le Nord du détroit constitue la première. Le signal donné par la température n'est pas très clair, mais l'oxygène dissous et les nutriments permettent de bien identifier cette masse d'eau : l'eau est légèrement plus froide, plus riche en O₂ dissous et moins chargée en nutriments que son environnement. Elle se

trouve à une profondeur correspondante à celle du seuil. Mais la deuxième intrusion identifiable, visible clairement avec les 3 paramètres, occupe une profondeur nettement supérieure. Cette remarque indiquerait que la deuxième intrusion a une densité plus forte que la première ; elle ajusterait alors sa profondeur avec la masse d'eau présentant une densité analogue.



La figure ci-contre présente l'état de la température en avril 1999 et à 200 m de profondeur. Il apparaît très nettement que l'intrusion 2 observée précédemment occupe toute la largeur du détroit : la différence de température est flagrante.

Figure 24 – Coupe à 200 m, printemps 1999

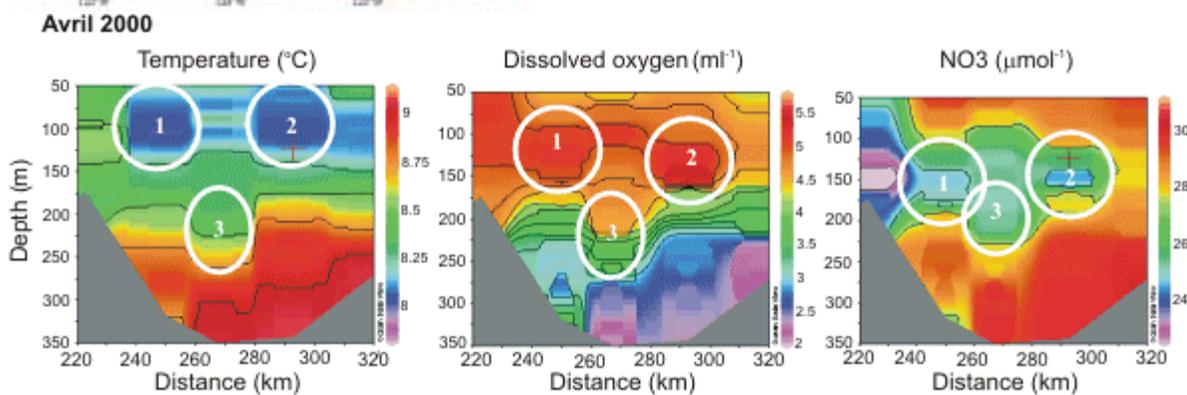


Figure 25 – Intrusions en profondeur intermédiaire, printemps 2000

Les signaux d'intrusion pour avril 2000 sont beaucoup plus forts que pour le printemps précédent : les différences observées pour les 3 paramètres sont plus nettes qu'auparavant. Des intrusions à des profondeurs différentes sont observables comme au printemps précédent ; mais ici il existe 2 intrusions distinctes à la profondeur la plus faible (1 et 2) : la plus ancienne (2) a dérivé vers le Nord du détroit. On voit nettement que l'intrusion 3 est placée au milieu des intrusions 1 et 2 : cela signifierait que dans l'ordre chronologique a eu lieu l'intrusion 2, puis 3, puis 1. 1 et 2 seraient restées à leur profondeur initiale et 3 aurait plongé pour s'équilibrer avec le reste de la masse d'eau.

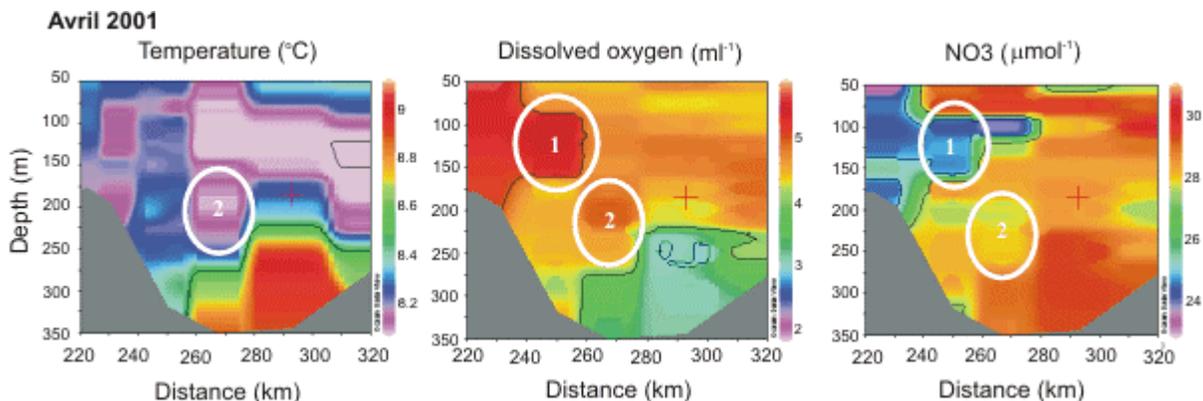


Figure 26 – Intrusions en profondeur intermédiaire, printemps 2001

Plusieurs intrusions à des profondeurs différentes sont visibles ; la première ne possède pas de signal défini dans la température, mais on observe qu'une masse d'eau plus chargée en O_2 et moins riche en nutriments s'avance dans le détroit. La deuxième intrusion n'est pas très marquée, mais sa présence est confirmée par les 3 paramètres.

Finalement, l'eau intrusive au printemps est plus froide, plus riche en O_2 dissous et moins chargée en nutriments que la masse d'eau environnante. Ces caractéristiques correspondent à celles qui décrivent le renouvellement d'eau de fond du détroit de Géorgie exposé précédemment. Suivant sa densité, l'eau passant Boundary Pass ajuste donc sa profondeur : suivant le fond pour l'eau la plus dense, à une profondeur d'environ 200 m pour une eau moins dense et enfin restant à la profondeur du seuil (150 m environ) pour l'eau la moins dense. Les intrusions constituent des unités plus ou moins indépendantes du reste de la colonne d'eau, dépendantes du niveau de mélange au cours de leur transport.

Eté 1999 :

Si l'observation des intrusions est évidente au printemps quelle que soit l'année, il est également possible à l'été 1999 de remarquer la présence d'une masse d'eau intrusive ; elle n'apparaît pas clairement avec l'oxygène dissous, seuls la température et les nutriments indiquent son existence. Mais contrairement aux caractéristiques des intrusions du printemps, l'eau intrusive est plus chaude que son environnement (et toujours plus pauvre en nutriments).

Juin 1999

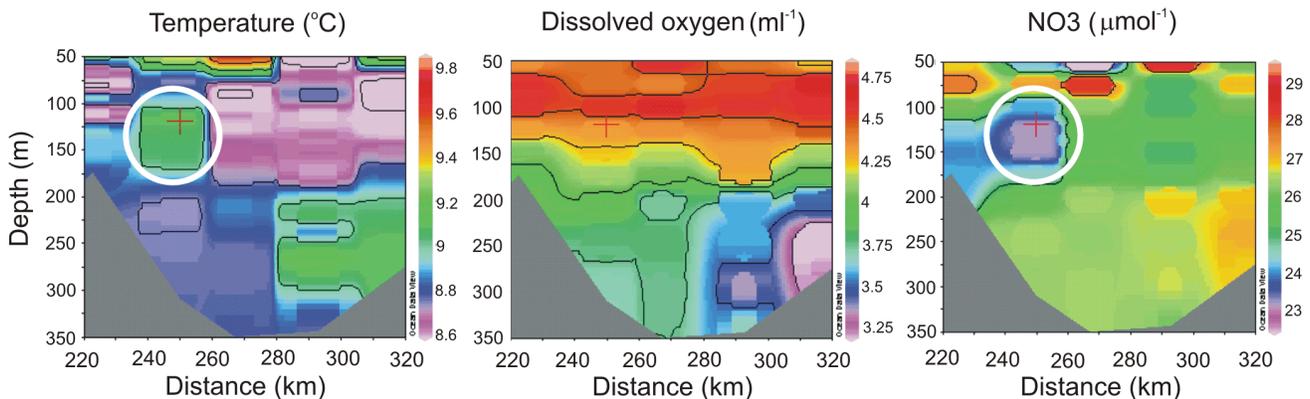


Figure 27 – Intrusion en profondeur intermédiaire, été 1999

Hiver 2001 :

Il semble que les intrusions à des profondeurs intermédiaires en hiver soient plus fortement marquées que celles du printemps. Ce phénomène est sans doute lié au fait qu'en hiver, l'eau présente dans le détroit de Géorgie est globalement (de 50 au fond) très chaude et très pauvre en O_2 dissous : les différences observées avec l'eau intrusive paraissent alors beaucoup plus grandes, mais ne signifient pas forcément que le phénomène d'intrusion est plus important en terme de volume d'eau impliqué.

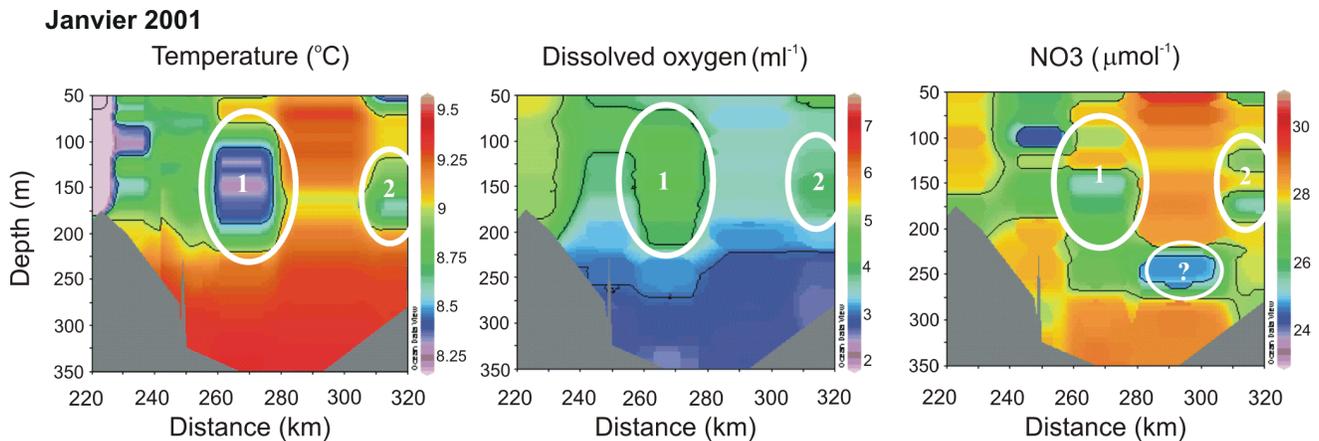
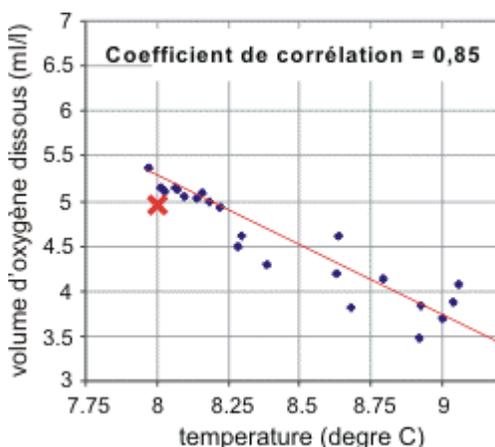


Figure 28 – Intrusions en profondeur intermédiaire, hiver 2000

Deux intrusions successives sont identifiables à la même profondeur. Cependant le signal des nutriments est plus flou que celui de température ou d'oxygène. Mais ils indiquent tout-de-même la présence d'une eau moins riche vers 250 m de profondeur (?); cet évènement est absent de la température et de l'oxygène. Cela révèle-t-il la présence d'une intrusion qui aurait perdu ses caractéristiques de température et d'oxygène mais gardé celles de nutriments? Ou que les propriétés de l'eau qui pénètre ne présentent un contraste que pour les nutriments?

Il est réaliste de penser que les intrusions existent tout au long de l'année; elles sont plus ou moins visibles selon le contraste entre leurs propriétés et celles de l'eau ambiante. Selon les saisons, les caractéristiques de l'eau du détroit de Géorgie changent avec l'upwelling, El Niño, le vent, etc., et les propriétés de l'eau intruse s'en rapprochent plus ou moins. Les intrusions sont susceptibles de jouer un rôle essentiel dans la survie de l'écosystème par l'apport continu d'éléments nutritifs dans le détroit de Géorgie.

Suivi d'une intrusion :



Il est possible de vérifier qu'une masse d'eau observée comme une intrusion en est bien une. Si l'on considère l'intrusion 1 de janvier 2001, les caractéristiques de l'eau de départ, au niveau du seuil sont typiquement 8°C et 5 ml/l d'oxygène. Si l'on représente le diagramme température-oxygène (qui sont les 2 caractères les plus marqués pour cette intrusion), des données comprises entre 50 et 200 m de profondeur, du seuil de Boundary Pass jusqu'au niveau de la station 39, le nuage de points présente sans aucun doute une direction d'allongement privilégiée (le coefficient de corrélation des 2 séries de mesure est élevé). Les 2 paramètres évoluent donc de la même façon, ce qui prouve que l'eau ayant passé le seuil s'est déplacée vers le Nord du détroit de Géorgie en se mélangeant progressivement à la masse d'eau environnante.

Figure 29 – Diagramme température – oxygène dissous de l'intrusion 1 de Janvier 2001

IV.2.2- Relation avec le cycle de marée

Ouverture et fermeture du seuil de Boundary Pass :

Une hypothèse pourrait expliquer la formation de ces pulsations d'eau localisée dans le temps et dans l'espace : le seuil de Boundary Pass est sujet à de très forts courants de marée spécialement lors des périodes de vives-eaux. Il s'opère alors un vif mélange de la colonne d'eau. En période de plus faibles marées, les mortes-eaux, les courants sont moins importants ; une stratification plus forte devient possible autorisant l'eau dense en provenance du détroit de Juan de Fuca à passer le seuil de Boundary Pass et à progresser dans le détroit de Géorgie sans trop se mélanger. Le seuil fonctionnerait donc comme une porte, laissant passer l'eau venant de Juan de Fuca presque intacte avec un minimum de mélange aux périodes de mortes-eaux, et diluée aux périodes de vives-eaux.

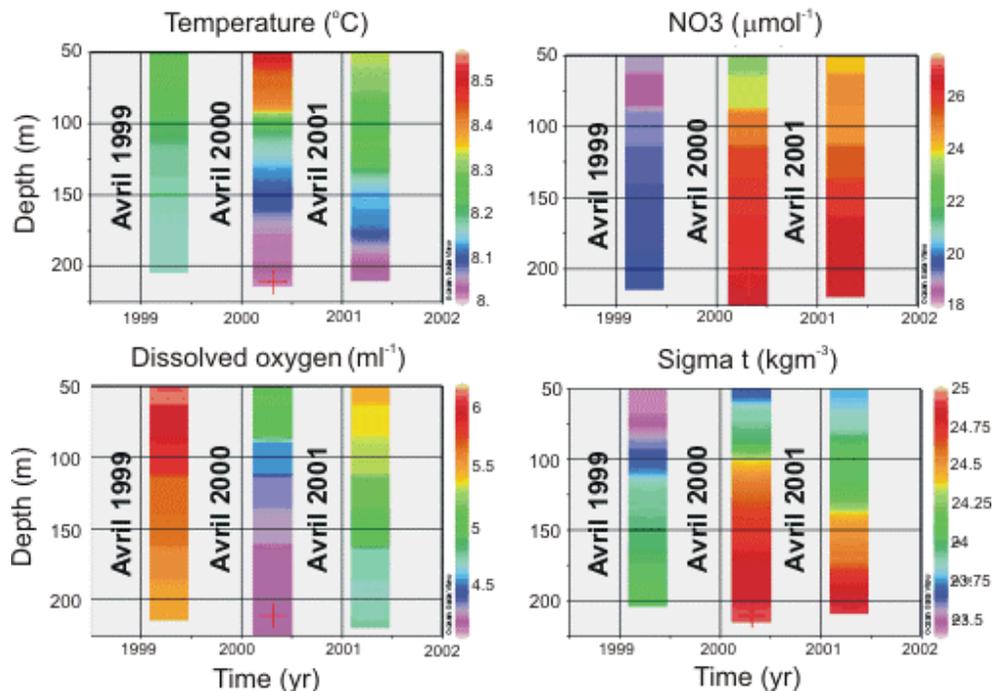


Figure 30 – Stratification au-dessus du seuil de Boundary Pass en période de mortes-eaux

La stratification qui s'opère au-dessus du seuil en période de mortes-eaux est illustrée par la figure ci-dessus ; différents paramètres de la station 56 sont représentés pour la même période de l'année (avril) et durant 2 stades de marée : les vives-eaux pour 1999 et les mortes-eaux pour 2000 et 2001.

Il est évident que la colonne d'eau est plus homogène pour avril 1999 que pour 2000 et 2001. De plus, on observe qu'en période de mortes-eaux, l'eau sur le fond du seuil est beaucoup plus dense qu'en période de vives-eaux. Masson (2002) mentionne que l'apparition des intrusions pourrait être rendue possible en période de mortes-eaux lorsque suffisamment d'eau dense est disponible au-dessus du seuil.

Calcul de la vitesse d'advection des intrusions :

Le cycle des marées s'étale typiquement sur 15 jours : c'est le laps de temps qui sépare 2 mortes-eaux ou 2 vives-eaux. Si l'on considère que les intrusions sont produites lors de périodes de mortes-eaux, il est possible de calculer une vitesse d'advection de l'eau lorsque 2 intrusions consécutives sont observées. Précédemment, 4 campagnes avaient permis l'identification de plusieurs intrusions : avril 1999, 2000 et 2001 et janvier 2001.

En consultant les tables de marée (les hauteurs d'eau sont disponibles pour chaque campagne en annexe 2), il est possible de déterminer le temps qui sépare 2 périodes de mortes-eaux ; en mesurant la distance séparant 2 intrusions, on peut alors obtenir une évaluation de la vitesse à laquelle se déplacent ces masses d'eau.

Campagne	Dates de l'amplitude minimale de marée des mortes-eaux	Intervalle de temps entre 2 mortes-eaux consécutives	Distance séparant 2 intrusions consécutives	Vitesse d'advection
Avril 1999	01/04 – 13/04	12 jours	35 km	3,4 cm/s
Avril 2000	23/03 – 05/04 – 17/04	13 jours – 12 jours	45 km – 35 km	4 cm/s – 3,4 cm/s
Janvier 2001	05/12 – 19/12 – 03/01	14 jours – 15 jours	30 km – 25 km	2,5 cm/s – 1,9 cm/s
Avril 2001	25/03 – 08/04	14 jours	30 km	2,5 cm/s

Le calcul de la vitesse à laquelle se déplaceraient les intrusions donne un ordre de grandeur d'environ 3 cm/s. Ce résultat est cohérent avec des mesures de courant effectuées dans le détroit de Géorgie, dans la région des intrusions (Chang et al., 1976) : aux environs des stations 39 et 40, à 200 m de profondeur, des mesures moyennées sur le long terme font apparaître une vitesse de 3,56 cm/s vers le Nord du détroit.

Relation entre densité et période de marée :

Se pose la question de savoir pourquoi certaines intrusions demeurent à la profondeur à laquelle elles ont été créées et d'autres ont une densité telle qu'elles s'enfoncent plus profondément dans la colonne d'eau. Le passage de l'eau est possible aux périodes de mortes-eaux grâce à une stratification de la colonne d'eau : c'est l'eau dense de fond qui passe le seuil que l'on retrouve aux profondeurs intermédiaires. Plus les marées sont faibles et plus la stratification est importante, autorisant de l'eau d'autant plus dense à entrer dans le détroit de Géorgie.

Pour tenter d'établir un lien entre le niveau de marée qui induit le taux de mélange de la colonne d'eau et les intrusions observées, je procède de la façon suivante :

- Je relève les dates auxquelles l'amplitude de marées est minimale dans la période de mortes-eaux (autant que d'intrusions observées),
- Je calcule l'amplitude maximale durant la période de mortes-eaux (avec les données de hauteurs d'eau 3 jours avant et après le minimum de la mortes-eaux), et l'amplitude maximale durant la période de vives-eaux (avec les données des 15 jours avant la campagne),
- J'établis un classement (A) de 1 à 9 des campagnes ayant des conditions de marées de moins en moins importantes et un classement (B) de 1 à 15 des intrusions ayant des conditions de marées de moins en moins importantes.

Ainsi, plus les classement A et B sont élevés, plus l'eau présente au fond du détroit doit être dense ; plus l'intrusion doit être observée profondément.

Campagnes	Nombre d'intrusions observées	Dates de l'amplitude minimale de marée de mortes-eaux	Amplitude maximale des mortes-eaux (en m)	Amplitude maximale des vives-eaux (en m)	Classement	
					A	B
Avril 1999	2	1/04 - 13/04	3,021 – 2,734	3,301	6	7-13
Juin 1999	1	22/06	2,893	3,966	4	9
Août 1999	0	4/08	2,962	2,962	8	8
Avril 2000	3	23/03 – 5/04 – 17/04	2,7 – 3,078 – 2,955	2,955	9	14-4-10
Juillet 2000	0	9/07	3,17	4,003	3	3
Août 2000	0	21/08	2,771	3,546	5	12
Janvier 2001	3	5/12 – 19/12 – 03/01	2,865 – 3,934 – 3,068	4,121	1	11-1-6
Avril 2001	2	25/03 – 8/04	2,671 – 3,196	3,196	7	15-2
Juin 2001	0	15/06	3,069	4,073	2	5

Plusieurs remarques s'imposent :

- Juillet 2000 et Juin 2001 présentent des niveaux élevés de marée (A et B faibles) et aucune intrusion n'a été observée.
- Il ne semble pas y avoir de relation directe entre le niveau de marée lors des intrusions et la profondeur à laquelle elles ont été observées : les intrusions 3 et 2 d'avril 2000 et 2001 ont des conditions plus fortes de marée que les intrusions observées à plus faible profondeur.
- En janvier 2001, où les conditions les plus fortes de marées sont observées, des intrusions marquées ont été identifiées

L'essai réalisé pour tenter d'illustrer les théories avancées quant à l'explication de l'existence d'intrusion à profondeur intermédiaire dans le détroit de Géorgie n'est pas très concluant ; beaucoup d'autres paramètres doivent intervenir dans la formation des eaux denses qui passent le seuil de Boundary Pass, et réduire ce phénomène aux amplitudes de marée est trop simpliste.

Les intrusions doivent apparaître de manière continue durant l'année à chaque mortes-eaux. Ce qui va alors décider de leur visibilité n'est certainement pas les différences entre les amplitudes de marée de mortes-eaux qui sont très faibles, mais plutôt les caractéristiques de l'eau dense qui pénètre et du taux de mélange au dessus du seuil.

IV.3 - L'eau de fond du détroit de Juan de Fuca

Caractéristiques générales :

L'eau présente au fond du détroit de Juan de Fuca occupe une centaine de mètres de profondeur au niveau de l'ouverture sur le Pacifique ; son épaisseur diminue le long du détroit jusqu'à n'occuper que quelques mètres au seuil de Victoria. Elle constitue le courant de retour en profondeur de la circulation estuarienne forcé par l'eau douce du fleuve Fraser.

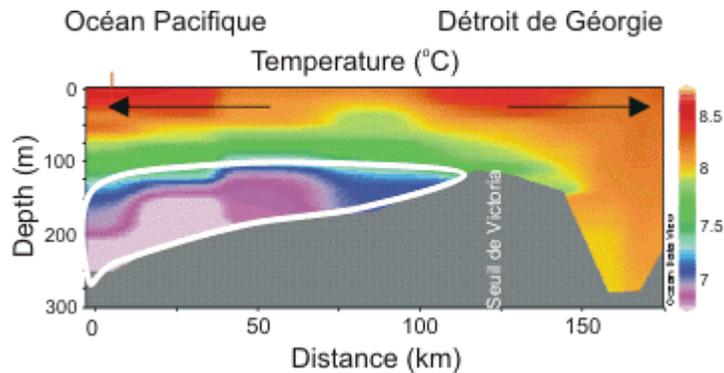


Figure 31 – Position typique de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (avril 1999)

Le cycle annuel de l'eau de fond est influencé par les événements qui interviennent sur la côte Ouest de l'île de Vancouver et qui se répercutent dans le détroit : l'inversion des vents provoquant un upwelling l'été et un downwelling l'hiver induit un cycle annuel des propriétés de l'eau assez marqué : l'upwelling apporte une eau froide, salée, riche en nutriments, et pauvre en O_2 , et inversement pour le downwelling.

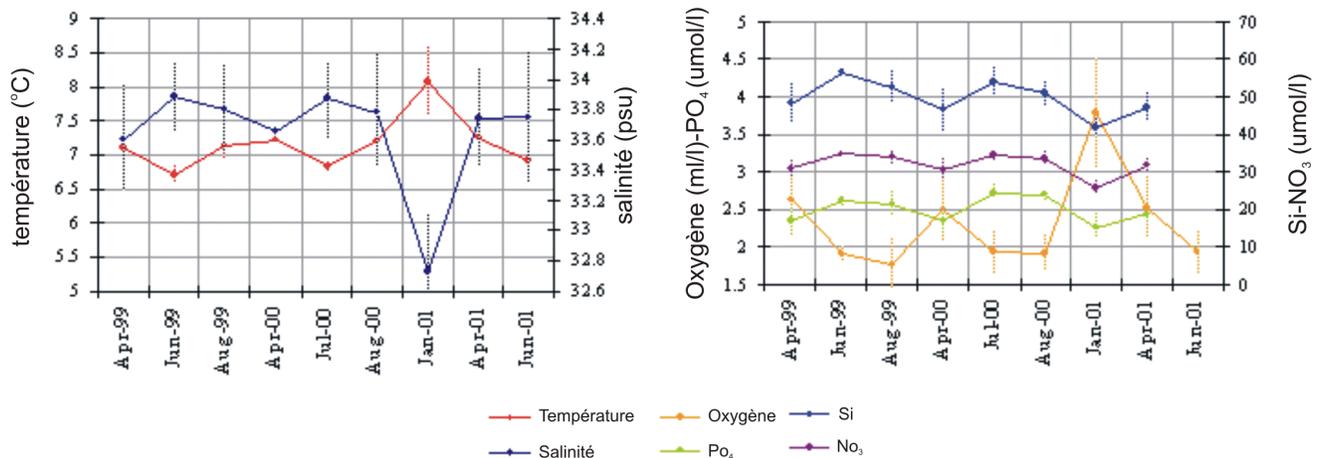


Figure 32 – Moyennes de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (1999-2001)

Les moyennes sont calculées sur les données disponibles à partir de 100 m de profondeur jusqu'au fond.

Les 6 paramètres évoluent de manière similaire : les périodes d'inversement des tendances sont les mêmes, quel que soit le caractère considéré. Il est facile d'observer une eau plus chaude et moins salée en hiver (janvier 2001) : l'upwelling ayant cessé de fonctionner, l'eau froide et chargée en nutriments amené à la côte par celui-ci est remplacé par une eau plus chaude, moins salée, plus riche en O_2 dissous et plus pauvre en nutriments. L'arrivée de l'upwelling est bien marquée en été par un minimum de température et d'oxygène dissous, ainsi qu'un maximum de salinité et de nutriments aux alentours du mois de juin ou juillet.

On ne remarque pas de températures anormalement élevées en 1999 comme il avait été mentionné pour l'eau de fond du détroit de Géorgie, les moyennes sont équivalentes pour les 3 années aux mêmes

périodes : les effets de l'El Niño de 1998 ont déjà été annulés dans le détroit de Juan de Fuca ; en effet, la circulation dans le détroit de Juan de Fuca, beaucoup plus ouverte sur l'océan, permet des échanges plus rapides et l'inertie de l'eau est moins importante que dans le détroit de Géorgie.

La variabilité des propriétés de l'eau de fond de Juan de Fuca est faible devant celle d'une eau de surface, mais elle est très forte pour une eau profonde : le cycle saisonnier est très marqué. Il demeure tout de même difficile d'identifier clairement sur le diagramme TS ci-dessous les différentes saisons.

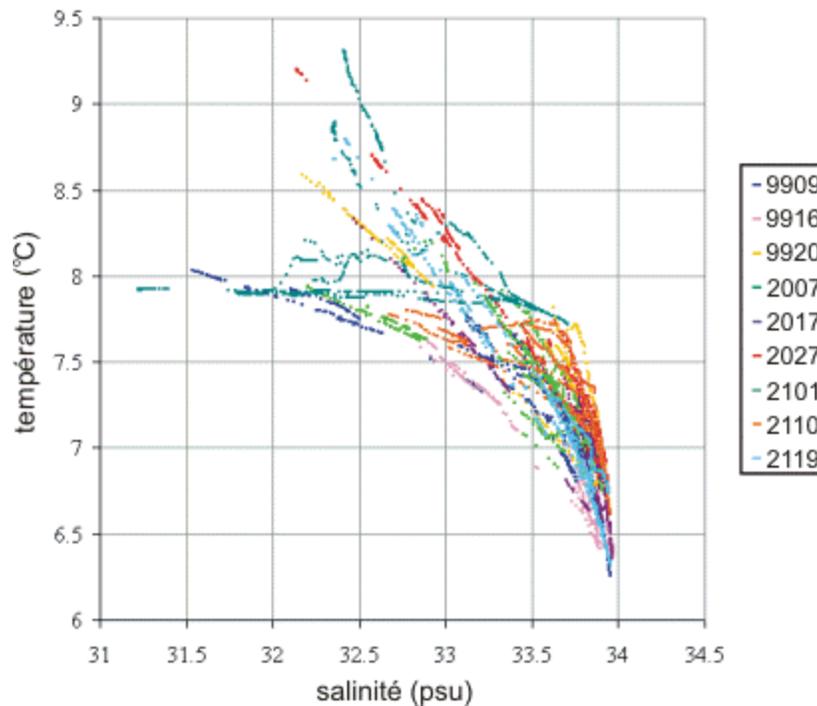
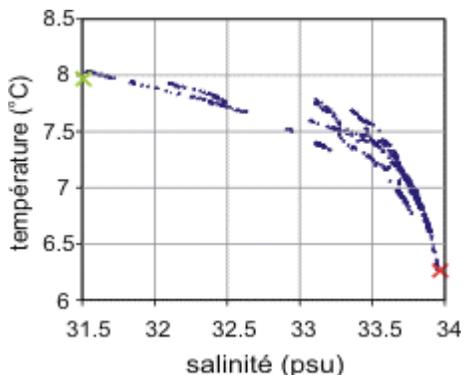


Figure 33 – Diagramme TS de l'eau de fond de Juan de Fuca (9 campagnes)

Suivi de la masse d'eau, de l'océan au seuil de Victoria :

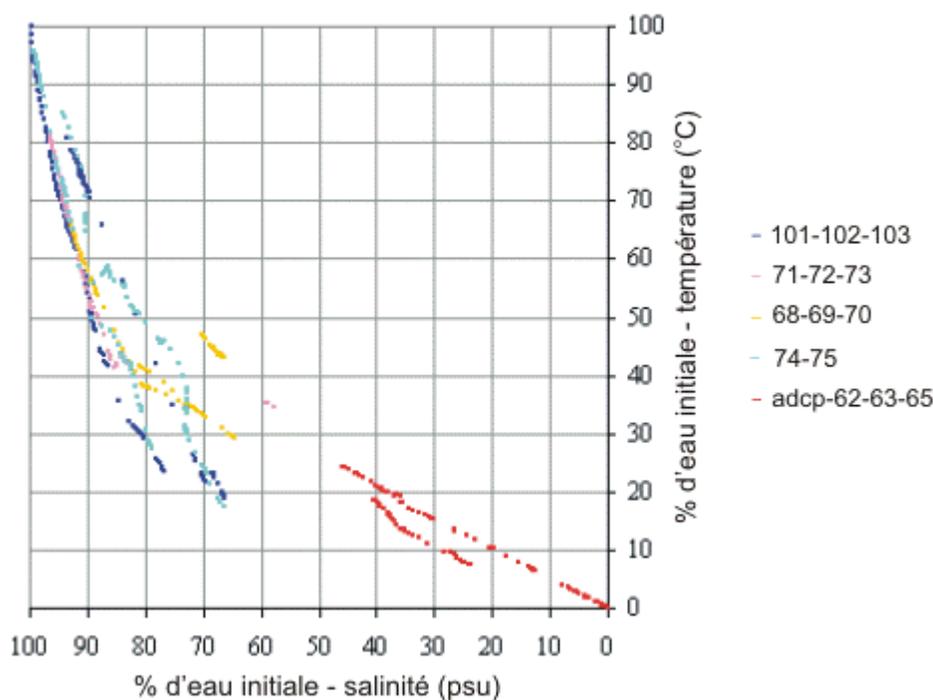


Pour visualiser l'évolution des propriétés de la masse d'eau dans sa progression le long du détroit, considérons les données d'avril 1999, car elles constituent un exemple marquant.

Le diagramme TS de l'eau de fond de Juan de Fuca représenté ci-contre (avril 1999, de 100 m au fond) fait apparaître le mélange qui s'opère le long du détroit à partir de l'eau initiale venant de l'océan. Les caractéristiques primitives de l'eau peuvent être déterminées : environ 34 psu et 6,25°C. L'eau initiale est marquée d'une croix rouge.

Figure 34 – Diagramme TS de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (avril 1999)

En utilisant la méthodologie explicitée par G.Pickard et W. Emery, appelée la 'core method', il est possible de représenter la concentration, en pourcentage d'eau initiale, de la masse d'eau le long du détroit. Le noyau (core) est considéré comme une région où les propriétés de l'eau atteignent un minimum (ou un maximum) le long d'une distribution croissante (ou décroissante). Le noyau s'affaiblit graduellement au cours de sa progression, résultat du mélange opéré avec l'eau environnante. Les références de concentration sont prises de la façon suivante : 100% pour les caractéristiques du noyau (ici 6,25°C et 34 psu) et 0% pour l'état des propriétés au seuil de Victoria, considéré comme étant la frontière ultime de l'eau de fond du détroit (8°C et 31,5 psu, marqué d'une croix verte sur la figure précédente). En convertissant les données de température et salinité en pourcentage, la position d'un point sur le diagramme TS représente alors la proportion d'eau initiale restante par sa distance au point de départ.


Figure 35 – Mélange de l'eau de fond de Juan de Fuca, de l'océan au seuil de Victoria (avril 1999)

Les lignes transversales au détroit, constituées de 2 à 4 stations, sont représentées avec différentes couleurs afin de visualiser le mélange progressif le long du détroit.

Groupe de stations	Position / entrée du détroit	Fourchette de %	
		Température	Salinité
101-102-103	0 km	100-20%	100-65%
71-72-73	20 km	100-35%	100-55%
71-72-73	60 km	80-40%	95-85%
68-69-70	85 km	65-30%	90-65%
ADCP-62-63-65	130 km	25-0%	50-0%

Le groupe 101-102-103 représente l'ouverture sur l'océan et le noyau initial : la concentration est de 100%. Le groupe 74-75, placé juste en arrière ne présente pas de différences majeures ; mais la décroissance des propriétés de l'eau au cours de son trajet est évidente avec les 3 autres groupes de stations. La température constitue un meilleur traceur passif que la salinité ; celle-ci, régissant la densité, s'ajuste différemment avec l'eau environnante.

Les diagrammes faisant intervenir l'oxygène dissous et les nutriments confirment que l'eau de fond de Juan de Fuca est originaire de l'océan et se déplace vers le seuil de Victoria.

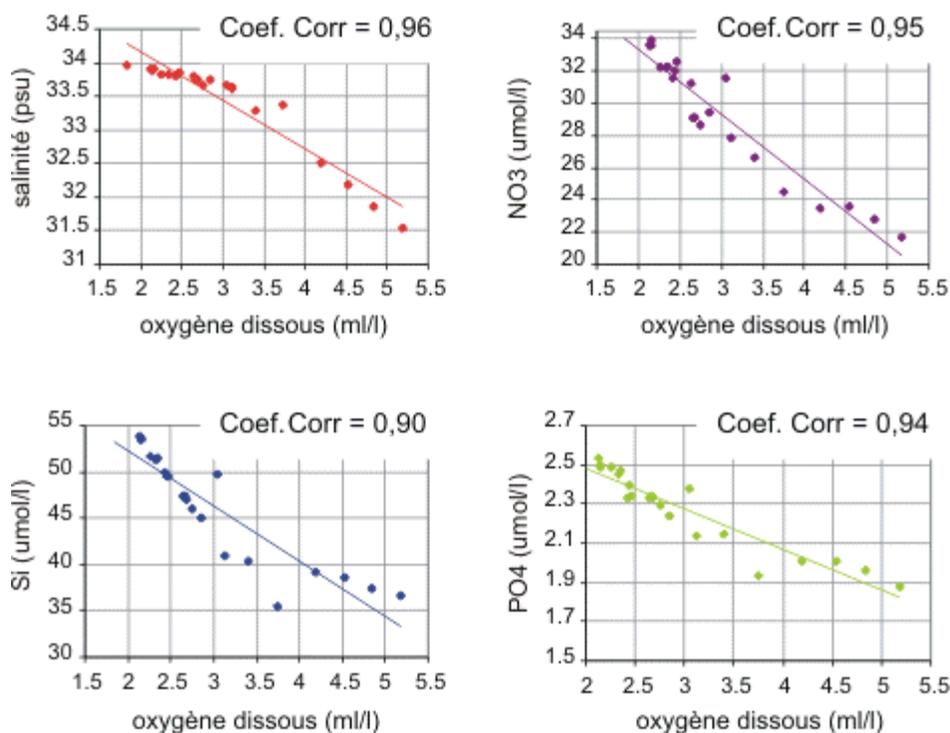


Figure 36 – Diagrammes oxygène-nutriments et oxygène-salinité de l'eau de fond du détroit de Juan de Fuca (avril 1999)

Les différents paramètres représentés évoluent de la même façon (les coefficients de corrélation sont très élevés) : ils sont donc tous issus de la même masse d'eau originelle et se dissolvent progressivement. Les changements de concentration observés sont liés en majeure partie au mélange opéré avec l'eau ambiante au cours du transport ; la biologie, déjà peu développée aux profondeurs étudiées ici, ne modifie peu les paramètres mesurés car l'évolution générale est très rapide.

IV.4 - Le panache du fleuve Fraser

Le fleuve Fraser se jette dans le détroit de Géorgie au niveau de la ville de Vancouver. Deux chenaux arrivent jusqu'à la mer, mais 87% du flux emprunte le bras le plus Sud.

Son débit est soumis à d'importantes fluctuations saisonnières : le maximum se situe en été, lors de la fonte des neiges. Les périodes de crue et d'étiage ont environ la même durée. Mais il existe également des variations annuelles très marquées ; on remarque sur la figure suivante que 1999 a été une année de très forte crue comparée à 2000.

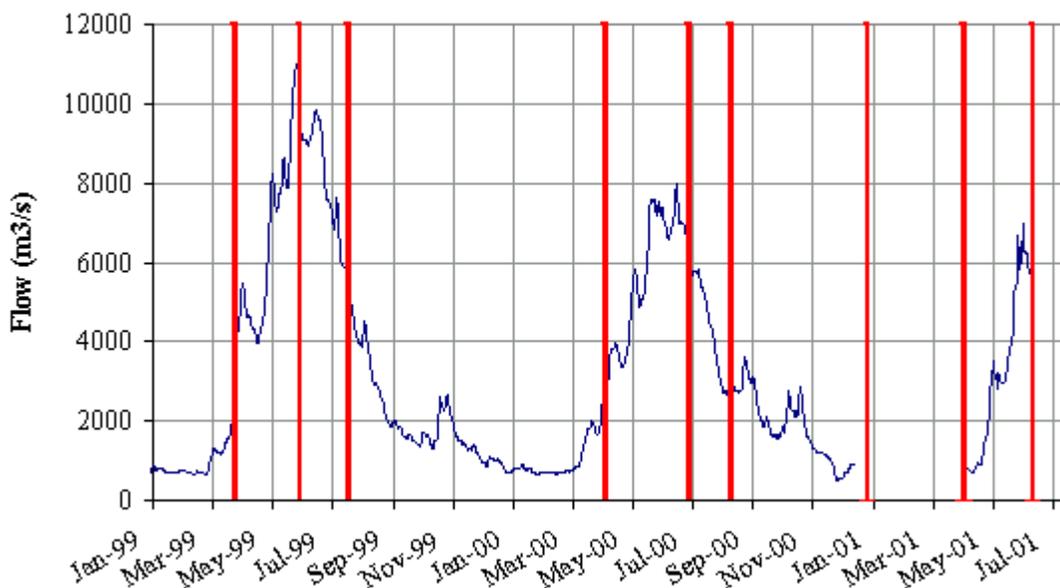


Figure 37 – Débit du fleuve Fraser (1999-2001)

Les dates des campagnes sont marquées d'un trait rouge.

Les données entre décembre 2000 et avril 2001 sont manquantes ; ce n'est pas gênant puisqu'il ne s'agit pas d'une période de crue et que les valeurs doivent par conséquent être faibles et relativement constantes.

Les campagnes de mesure ont été réalisées de telles sortes à collecter des informations sur l'état de la masse d'eau au début de la crue, pendant la crue et enfin à la fin de la crue. Une campagne en janvier 2001 apporte des données lorsque le débit du Fraser est minimum.

Caractéristiques générales :

Des moyennes sont calculées sur les 10 premiers mètres de la colonne d'eau pour les données des stations proches de l'estuaire du Fraser : 37 à 46.

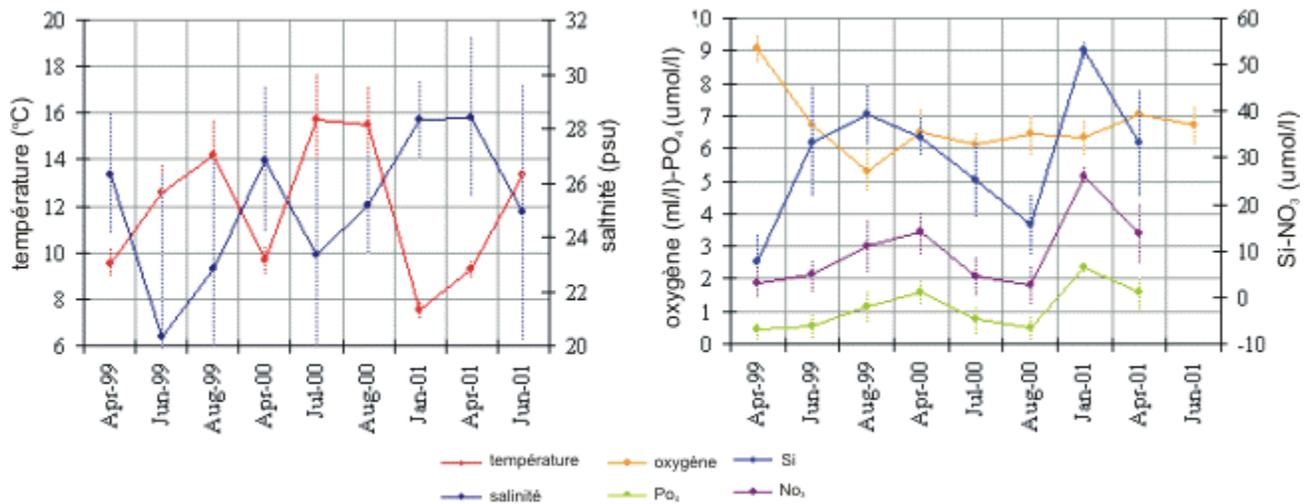


Figure 38 – Moyennes des eaux du panache du Fraser (1999-2001)

Les plages de variation des différents paramètres sont beaucoup plus importantes que pour les autres masses d'eau déjà étudiées : plus de 8°C pour la température et 8 psu pour la salinité. De plus les écarts-types ont des valeurs très élevées, les données sont assez dispersées ; en effet, l'eau de surface est beaucoup plus sujette aux influences extérieures telles que le vent, l'ensoleillement, l'apport d'eau douce, la biologie, etc. Il existe également un problème d'échantillonnage dû aux mesures : les gradients horizontaux et verticaux sont très forts dans le panache et leur position est très sensible aux vents et marées ; il n'est donc pas évident de mesurer les réelles caractéristiques du panache puisque celui-ci ne s'étend pas toujours sur la même aire. Ce gradient spatial ajoute donc une variabilité supplémentaire aux propriétés.

De façon logique, la température est supérieure en été : elle augmente jusqu'à atteindre un maximum en août. La salinité suit le schéma inverse : elle est minimale en été, résultat du déversement important d'eau douce. On remarque que la salinité a baissé de façon plus conséquente à l'été 1999 lorsque la crue du Fraser était plus importante. Les nutriments montrent entre eux la même progression, mais leur évolution ne semble pas être régulière d'une année sur l'autre : la mesure de janvier 2001 nous indique que les nutriments seraient maximum en hiver, état logique vis-à-vis de la biologie qui est peu présente en cette saison. Mais les étés 1999 et 2000 montrent des tendances différentes : de fortes valeurs pour 1999 et faibles pour 2000. L'oxygène quant à lui semble montrer un maximum en avril des 3 années.

Il est difficile de séparer les effets de la biologie des réelles valeurs de départ dans cette région de surface car la biologie y est active. Afin de visualiser plus précisément les événements, regardons l'état de la station 42 (située au Sud de l'estuaire, mais l'eau de surface prend également la direction du sud du détroit). Les propriétés sont visualisées jusqu'à 40 m afin de distinguer le panache du reste de l'eau du détroit.

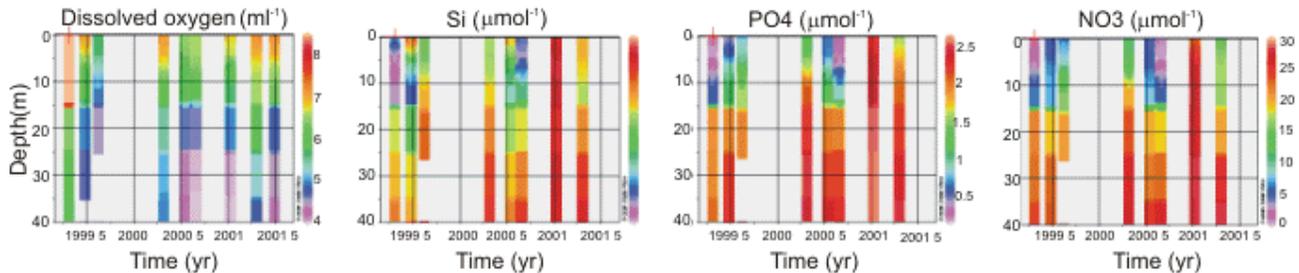


Figure 39 – Oxygène dissous et nutriments (station 42)

Le fleuve apporte de l'eau toujours plus riche en oxygène dissous et moins chargée en nutriments que l'eau du détroit. Les valeurs extrêmes pour l'hiver apparaissent nettement, mais de grandes tendances ne se dégagent pas clairement.

Si l'on trace le diagramme TS pour les différentes campagnes, les propriétés apparaissent plus dispersées dans l'année que pour le fond de Juan de Fuca, mais on retrouve une certaine unité de la masse d'eau selon les saisons.

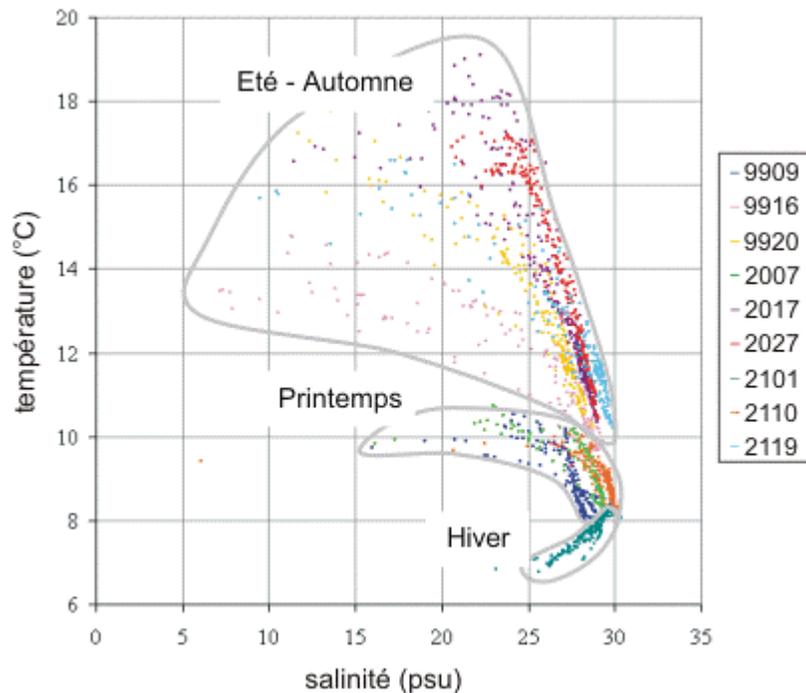
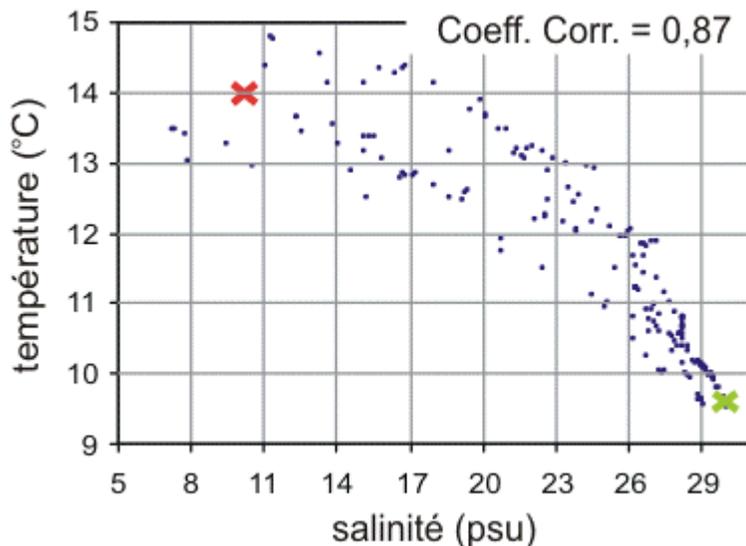


Figure 40 – Diagramme TS du panache du Fraser (1999-2001)

Suivi de l'eau originaire du fleuve :

Visualiser la dissolution de l'eau originaire de l'estuaire dans le détroit peut se faire de la même façon dont nous avons fait apparaître le taux de mélange de l'eau de fond de Juan de Fuca.



Considérons l'été 1999 (juin 1999) pendant la plus forte crue du Fraser ; les événements seront plus marqués. Le diagramme TS fait apparaître une répartition assez linéaire (le coefficient de corrélation est relativement élevé). La masse d'eau initiale provenant de l'estuaire (marquée d'une croix rouge) a des caractéristiques un peu diffuses, mais on peut évaluer la température à environ 14°C et la salinité à 10 psu. On considère que cette eau n'est plus caractéristique à partir de la station 61 : 9,5°C et 30 psu (marqué d'une croix verte).

Figure 41 – Diagramme TS du panache du Fraser (juin 1999)

Les données de température et salinité sont ensuite converties en pourcentages d'eau initiale.

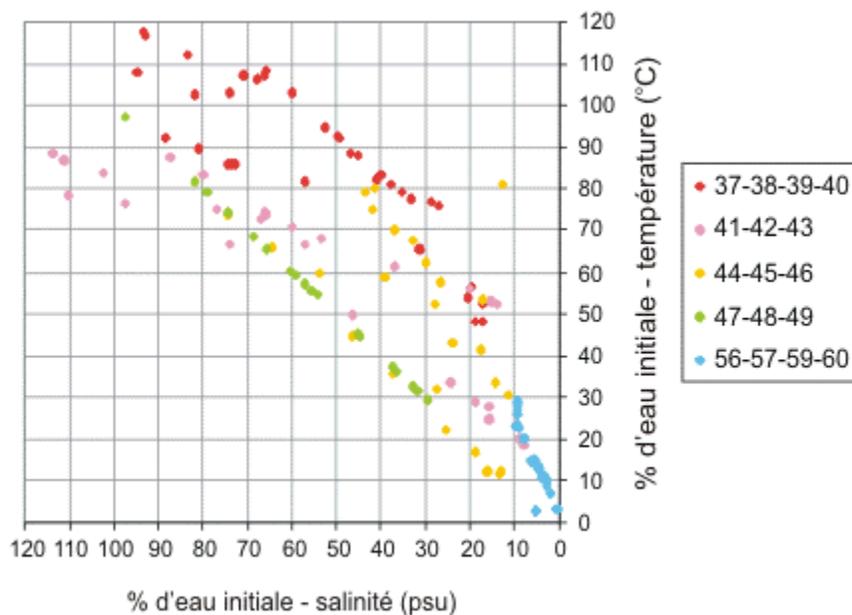


Figure 42 – Taux de mélange de l'eau estuarienne dans les détroits de Juan de Fuca et de Haro (juin 1999)

Les pourcentages s'élèvent à plus de 100, car les caractéristiques de l'eau initiale sont moyennées.

Les résultats sont moins frappants que pour l'eau de fond de Juan de Fuca :

Groupe de stations	Position / estuaire (bras nord)	Fourchette de %	
		Température	Salinité
37-38-39-40	10-40 km	120-50 %	100-20 %
41-42-43	25-40 km	90-20 %	115-10 %
44-45-46	40-50 km	80-10 %	65-15 %
47-48-49	60 km	100-30 %	100-30 %
56-57-59-61	70-110 km	30-0 %	10-0 %

Les résultats sont assez dispersés, mais la position des stations par rapport à l'estuaire du Fraser l'est aussi. On remarque néanmoins une tendance générale à la décroissance lorsque l'on s'éloigne de l'estuaire. La salinité et la température semble diminuer de la même façon, contrairement à l'eau de fond de Juan de Fuca : dans ce cas les évolutions sont si rapides et les différences si marquées que la salinité constitue un bon traceur.

Peu de données d'oxygène et de nutriments sont disponibles, puisque les stations où s'effectuent ces mesures sont réduites ainsi que la profondeur d'eau considérée ici. Mais ces diagrammes mettent bien en évidence que les paramètres évoluent en même temps et donc que l'eau a une origine, l'estuaire et se dissout progressivement au cours de son transport vers le détroit de Juan de Fuca. Une anomalie existe pour les silicates ; peut-être est-ce la biologie dans ce cas qui vient en modifier la concentration ou est-ce la conséquence du gradient spatial du panache ?

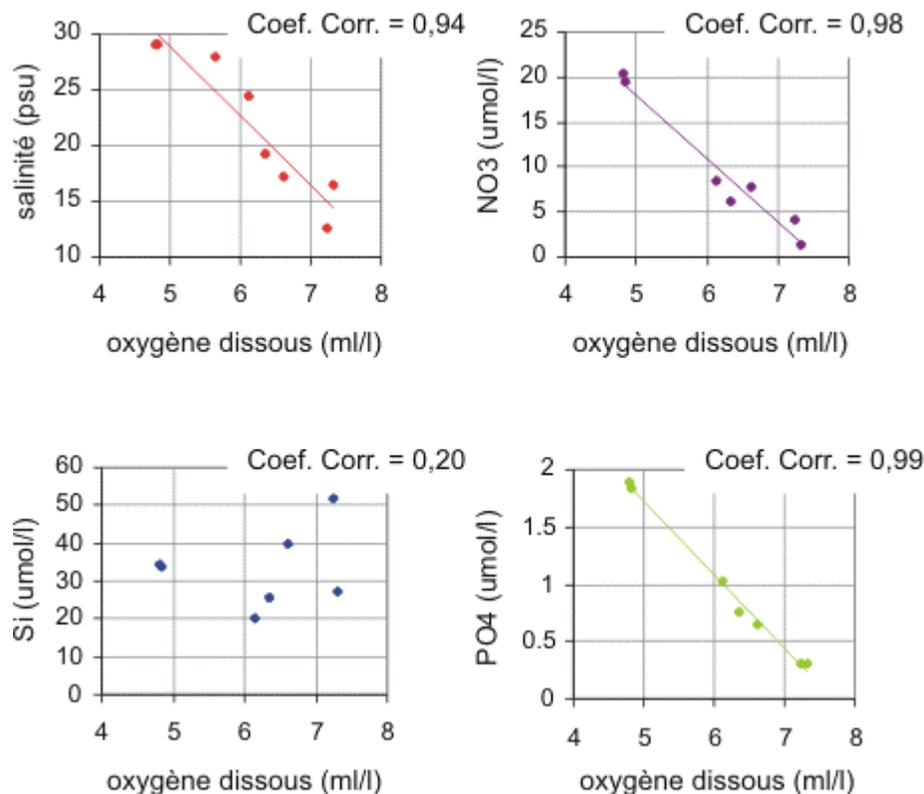


Figure 43 – Diagrammes oxygène-salinité et oxygène-nutriments, panache du Fraser (juin 1999)

IV.5 - Changement de régime surface - fond

L'étude des différentes masses d'eau a permis de mettre en avant que les cycles concernant la température de l'eau profonde et de l'eau de surface sont inversés : l'eau profonde atteint son maximum en hiver alors que l'eau de surface est la plus froide. Il est intéressant de déterminer à quelle profondeur les tendances s'inversent.

On considère les campagnes de juillet 2000 et de janvier 2001 pour représenter l'été et l'hiver dans la zone. On calcule les moyennes de température par tranche de 25 m pour les 2 saisons, globalement sur les 2 détroits, puis pour chaque détroit.

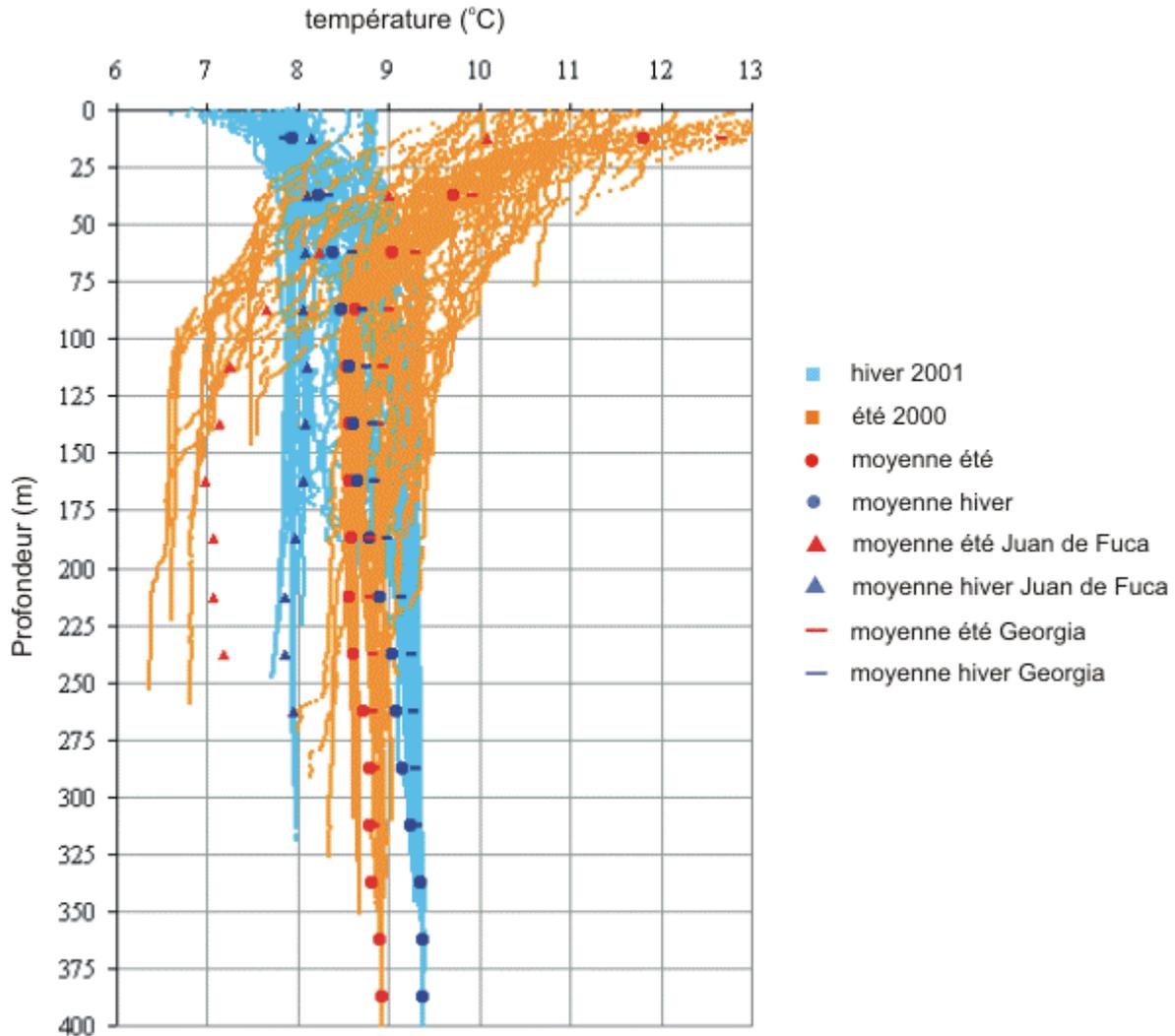


Figure 44 – Moyennes de température dans les détroits de Juan de Fuca et de Géorgie (juillet 2000, janvier 2001)

La profondeur qui caractérise le changement de régime d'eau profonde à eau de surface est à l'intersection des courbes de température moyenne de l'hiver et de l'été.

Globalement pour les 2 détroits, la couche 0-75 m est clairement plus chaude en été qu'en hiver ; vient ensuite une couche intermédiaire de 75 à 175 m dont la moyenne de température est équivalente pour les 2 saisons : c'est une zone de transition. Enfin de 175 m au fond (400 m), l'eau est manifestement plus chaude en hiver qu'en été.

Considérons maintenant les détroits indépendamment. Pour le détroit de Juan de Fuca, il n'existe pas de zone intermédiaire : à partir de 75 m et jusqu'au fond (250 m), la masse d'eau passe nettement d'un régime de surface à un régime de fond. Dans le détroit de Géorgie, la couche intermédiaire est comprise entre 125 et 200 m : entre 0 et 125 m, l'eau est plus chaude en été qu'en hiver et inversement à partir de 200 m.

Il ne semble pas exister de zone de transition dans le détroit de Juan de Fuca, alors qu'elle est très marquée dans celui de Géorgie ; cette différence peut être liée à l'existence des intrusions en profondeur intermédiaire (les profondeurs d'observation des intrusions et de la zone de transition correspondent) : elles créent un brassage des propriétés de l'eau qui ne suivent alors pas clairement, sur des moyennes, un régime de fond ou de surface.

-V-

Conclusion

Le sujet de l'étude que m'a proposé Diane Masson a la grande qualité d'être complet et de regrouper de nombreux domaines. J'ai appréhendé tous les aspects de la problématique posée. La récolte des données en mer, m'a fait prendre conscience des difficultés induites. Le post-traitement pour lequel j'ai implémenté, sous un logiciel nouveau pour moi (IDL), un programme permettant la synthèse des données et leur import dans un logiciel dédié aux informations océaniques (ODV) m'a donné l'occasion de constituer une petite base de données. Enfin, guidée par les intuitions et les connaissances de Diane, j'ai pu observer certains phénomènes intéressants. Toutes les phases de ce travail étaient très stimulantes : les données sont très récentes et il était gratifiant de traiter des données acquises par mes propres soins. Mais plus que tout, la découverte ou la mise en évidence de certains mécanismes étaient valorisantes ; des rapports antérieurs ayant déjà été publiés sur l'eau de fond du détroit de Géorgie, il m'a fallu intégrer ces renseignements à ma propre réflexion ; mais aucun article scientifique n'a encore été écrit sur les intrusions d'eau en profondeur intermédiaire, et c'était une tâche agréable d'être pionnière.

J'ai pu mettre en oeuvre des techniques simples permettant d'illustrer de façon indiscutable des théories comme la dilution progressive de la masse d'eau profonde de Juan de Fuca de l'océan jusqu'au seuil de Victoria, ou la mise en évidence du changement de régime d'eau de surface à eau de fond dans les 2 détroits. Les commentaires et encouragements de Diane m'ont été d'une aide précieuse pendant tout le déroulement de mon stage.

Le dépaysement m'a permis d'apprendre à connaître les environs de l'île de Vancouver et ses subtilités, d'un point de vue scientifique bien sûr, mais aussi en partant à la découverte de la nature très sauvage dans cette zone. J'ai pu vivre pendant 2 mois dans ce pays mythique qu'est le Canada, conscient que l'environnement et les océans sont essentiels et qu'il est impératif de mieux les connaître pour mieux les protéger.

-Bibliographie-

CHANG P. et al., 1976. Subsurface Currents in the Strait of Georgia, West of Sturgeon Bank. J. Fish. Res. Board Can. vol. 33, 2218-2241.

MASSON D., 2001. Deep Water Renewal in the Strait of Georgia. Estuarine, Coastal and Shelf Science (2001), 56.

PICKARD G. et EMERY W., 1982. Descriptive physical oceanography An introduction. Pergamon Press, Willowdale, 249p.

THOMSON R., 1984. Océanographie de la côte de la Colombie-Britannique. Publication spéciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques 56, Ottawa, 317p.