

**Université du Québec à Rimouski**

**FJORD DU SAGUENAY :**  
**COURANTOLOGIE ET STRUCTURES DYNAMIQUES**  
**DANS LA RÉGION DE L'EMBOUCHURE**

**Sébastien Cloutier**

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de**  
**Maître ès sciences (M.Sc.) en océanographie**

**Mai 2009**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Directeur de recherche : Jean-François Dumais

Membres du jury :

Claude Bélanger (Institut national de recherche scientifique – Eau, Terre, Environnement)

Yvan Simard (Institut des sciences de la mer de Rimouski – Université du Québec à Rimouski)

Vladimir Koutitonsky (Institut des sciences de la mer de Rimouski – Université du Québec à Rimouski)

## TABLE DES MATIÈRES

Table des matières.....	iii
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des annexes.....	ix
Résumé .....	x
1. Introduction.....	1
1.1. Localisation et rétrospective .....	1
1.2. Problématique .....	6
1.3. Objectifs .....	7
2.1. Matériel .....	8
2.1.1. ADCP .....	8
2.1.2. Échosondeur à faisceau scindé.....	8
2.1.3. CTD.....	9
2.2. Méthodologie .....	9
2.3. Paramètres diagnostiques.....	11
2.3.1. Nombre de Froude densimétrique interne de mode 1 .....	12
2.3.2. Vitesse de friction .....	13
2.3.3. Cisaillement vertical au carré.....	14
2.3.4. Courant verticalement moyenné .....	15
2.3.5. Écart local du courant .....	15
2.3.6. Prisme de marée .....	15
2.3.7. Débit moyen d'eau dense pendant le flot.....	16
2.4. Modélisation numérique .....	16
3. Résultats.....	18
3.1. Paramètres courantologiques propres aux marnages inférieurs.....	45
3.1.1. Fin du jusant précédant le flot (BM-1 à BM).....	45
3.1.2. Basse mer (BM) .....	45
3.1.3. Première heure du flot (BM à BM+1).....	46
3.1.4. Deuxième heure du flot (BM+1 à BM+2) .....	47
3.1.5. Troisième heure du flot (BM+2 à BM+3).....	47
3.1.6. Quatrième heure du flot (BM+3 à PM-2) .....	48

3.1.7. Cinquième heure du flot (PM-2 à PM-1).....	49
3.1.8. Sixième heure du flot (PM-1 à PM).....	49
3.1.9. Pleine mer (PM).....	50
3.1.10. Début du jusant suivant (PM à PM+1).....	50
3.2. Paramètres courantologiques propres aux marnages inférieurs.....	51
3.3. Propriétés physicochimiques des masses d'eau.....	55
3.3.1. Profils CTD à la trôle.....	55
3.3.2. Profils CTD.....	56
3.4. Paramètres du transport tidal.....	59
3.4.1. Prisme de marée.....	59
3.4.2. Advection tidale moyenne d'eau de l'ESL.....	59
3.4.3. Advection de la couche de surface du BE dans le mélange.....	60
3.5. Évolution du nombre de Froude interne lors du flot.....	60
3.6. Évolution de la salinité de surface lors du flot.....	62
4. Interprétation des résultats et discussion.....	63
4.1. Caractéristiques propres à la période du flot sur le seuil.....	65
4.1.1. Variation latérale du courant verticalement moyenné.....	65
4.1.2. Formation de la masse d'eau intrusive initiale.....	65
4.2. Caractéristiques propres à la période du flot dans le haut du talus.....	66
4.2.1. Formation d'un tourbillon associé au front de densité.....	66
4.2.2. Formation d'un rideau de bulles.....	67
4.3. Caractéristiques propres à la période du flot au centre du talus.....	68
4.3.1. Passage de conditions surcritiques à sous-critiques.....	68
4.3.2. Formation d'une masse d'eau mélangée.....	68
4.3.3. Décrochement du talus de la masse d'eau mélangée.....	69
4.4. Caractéristiques propres à la période du flot dans le bassin externe.....	69
4.4.1. Formation d'un mascaret interne stationnaire.....	689
4.4.2. Isolation d'une lentille d'eau saumâtre en surface.....	689
4.4.3. Progression du courant ondulatoire de mi-profondeur et formation d'un second front.....	68
4.4.4. Course du courant de mi-profondeur.....	70
4.4.5. Mouvement de la couche profonde du BE lors du flot.....	71
4.4.6. Circulation cyclonique dans le BE lors du flot.....	72
5. Conclusion.....	74

Remerciements.....	76
Références bibliographiques.....	77

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du fjord du Saguenay et de l'estuaire du Saint-Laurent.....	1
Figure 2. Topographie et bathymétrie de l'embouchure du fjord du Saguenay, aides à la navigation, stations fixes et transect d'étude. ....	2
Figure 3. Bathymétrie et profil longitudinal du Saguenay.....	4
Figure 4. Bathymétrie simplifiée de l'embouchure du fjord du Saguenay et de la région immédiate de l'estuaire du Saint-Laurent.....	4
Figure 5. Front en « V » lors du flot d'une marée de vive-eau, les eaux de l'estuaire du Saint-Laurent (est), plongent sous les eaux plus sombres du fjord du Saguenay (ouest).....	5
Figure 6. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes $u$ , $v$ et $w$ et paramètres dérivés $U$ ; $U_d$ ; $V$ ; $V_d$ ; $u_s$ ; $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m.....	21
Figure 6a. Vitesses observées, échantillonnage no.2, BM-1 à BM. ....	21
Figure 6b. Vitesses observées, échantillonnage no.2, BM.....	22
Figure 6c. Vitesses observées, échantillonnage no.2, BM à BM+1.....	23
Figure 6d. Vitesses observées, échantillonnage no.2, BM+1 à BM+2. ....	24
Figure 6e. Vitesses observées, échantillonnage no.2, BM+ 2 à BM+3. ....	25
Figure 6f. Vitesses observées, échantillonnage no.2, BM+3 à PM-2,5. ....	26
Figure 6g. Vitesses observées, échantillonnage no.2, PM-2,5 à PM-2.....	27
Figure 6h. Vitesses observées, échantillonnage no.2, PM-2 à PM-1,5.....	28
Figure 6i. Vitesses observées, échantillonnage no.2, PM-1,5 à PM-1.....	29
Figure 6j. Vitesses observées, échantillonnage no.2, PM-1 à PM.....	30
Figure 6k. Vitesses observées, échantillonnage no.2, PM.....	31
Figure 6l. Vitesses observées, échantillonnage no.2, PM à PM+1.....	32
Figure 7. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m.....	33
Figure 7a. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, BM-1 à BM. ....	33
Figure 7b. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, BM. ....	34
Figure 7c. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, BM à BM+1. ....	35
Figure 7d. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, BM+1 à BM+2.....	36
Figure 7e. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, BM+2 à BM+3. ....	37
Figure 7f. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM+3 à PM-2,5. ....	38
Figure 7g. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM-2,5 à PM-2. ....	39
Figure 7h. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM-2 à PM-1,5. ....	40

Figure 7i. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM-1,5 à PM-1. ....	41
Figure 7j. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM-1 à PM.....	42
Figure 7k. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM.....	43
Figure 7l. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, PM à PM+1.....	44
Figure 8. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes $u$ , $v$ et $w$ et paramètres dérivés $U$ ; $U_r$ ; $V$ ; $V_r$ ; $u_*$ ; $S^2$ . Échantillonnage no.6, marnage 2,0m, 17h57 à 18h44 le 25-09-05, trajet fjord-seuil, BM+3 à PM-2,25. ....	53
Figure 9. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.6, marnage 2,0m, 17h57 à 18h44 le 25-09-05, BM+3 à PM-2,25. ....	54
Figure 10. Température, salinité et densité échantillonnées par CTD à la trôle, échantillonnage no. 6 (marnage 4,5m), 02h13 à 03h20 le 26-05-05, trajet estuaire - fjord, BM+3 à PM-2.....	56
Figure 11. Diagramme T-S des stations SE et BE, échantillonnage no.12 (marnage 1,2m), 08h44 à 11h10 le 23-08-07, PM-3 à PM. ....	57
Figure 12. Diagramme T-S des stations SE et BE, échantillonnage no.12 (marnage 1,2m), 08h44 à 11h10 le 23-08-07, PM-3 à PM. Pour BE, seules les données comprises entre 35 m et 65 m sont considérées. ....	58
Figure 13. Évolution du nombre de $F_i$ en fonction du temps pour différents marnages.....	61
Figure 14. Évolution de la salinité de surface lors du flot dans la région de l’embouchure du Saguenay. Valeurs extraites d’une solution du modèle numérique STLE 400 .....	62
Figure 15. Schéma – synthèse représentant l’évolution des structures dynamiques et des courants dans la région de l’embouchure du Saguenay pendant un cycle de marée. ....	64
Figure 16. Schéma illustrant le comportement d’attachement à la paroi de la masse d’eau en provenance du chenal nord-est lorsqu’elle atteint le chenal principal. ....	65
Figure 17. Déplacement du front de densité au-dessus du seuil en fonction de la vitesse du courant verticalement moyenné. ....	67
Figure 18. Vitesses observées, composantes $U$ , $V$ et vecteur de composantes $(U, V)$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 00h20 à 01h02 le 25-05-05, trajet fjord-seuil, BM+ 2 à BM+3. ....	73

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Périodes d'échantillonnage, conditions tidales et conditions météorologiques.....	10
Tableau II. Appareils de mesure utilisés lors des périodes d'échantillonnage. ....	10
Tableau III. Position et profondeur des stations d'échantillonnage CTD.....	11
Tableau IV. Heure d'échantillonnage des profils CTD. ....	11
Tableau V. Paramètres physicochimiques des stations SE et BE, issus des profils verticaux CTD, des 17, 21, 22 et 23 août 2007.....	56
Tableau VI. Paramètres du transport tidal. ....	59

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Présentation et description de la routine d’analyses ADCP réalisée à l’aide du logiciel <i>MatLab</i> .....	83
Annexe 2 – Paramètres physicochimiques issus de profils par thermosalinomètre à la trôle, le long du transect d’étude, les 24 et 29 mai 2005.....	92
Annexe 3 – Paramètres physicochimiques issus de profils verticaux par thermosalinomètre (CTD), aux stations SE et BE, les 17, 21, 22 et 23 août 2007.....	95
Annexe 4 – Profils du transect d’étude réalisés par ADCP et échosondeur.....	101

## RÉSUMÉ

Cette étude porte sur la dynamique des courants, principalement associés au flot de marée, dans la région de l'embouchure du fjord du Saguenay, au Québec. Les données sur lesquelles repose cet ouvrage proviennent de profileurs acoustiques à effet Doppler (ADCP), échosondeurs à faisceau scindé et sondes CTD. Ces instruments ont été déployés lors de quatre campagnes d'investigation menées dans la région de confluence du fjord et de l'estuaire du Saint-Laurent. Ont été mis à contribution : le navire Coriolis II, du 23 mai au 1<sup>er</sup> juin 2005, du 16 septembre au 1<sup>er</sup> octobre 2005 et du 22 au 28 septembre 2006; et la vedette l'Alliance, du 17 au 23 août 2007.

L'ensemble des données a été subdivisé en séries temporelles représentatives du flot de marée pour huit marnages, de vive-eau à morte-eau. Les données de l'ADCP ont été traitées à l'aide de routines élaborées à partir du logiciel *MatLab*. Les enregistrements de vitesses instantanées des courants ont été décomposés selon les composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$ . Celles-ci, moyennées dans le temps (sur  $\sim 20$  s, ce qui implique aussi une moyenne spatiale à cause du déplacement du navire), ont été représentées graphiquement et ont permis d'illustrer les propriétés du courant verticalement moyenné et de l'écart local du courant des composantes  $u$  et  $v$ . Ces paramètres courantologiques ont servi aux calculs de la vitesse de friction et du cisaillement vertical au carré, qui ont mis en évidence les patrons généraux de turbulence. Les paramètres physicochimiques de base ( $T$ ,  $S$  et  $\rho$ ) ont servi à identifier les masses d'eau.

Peu importe le marnage, il s'en dégage, qu'un courant verticalement uniforme occupe l'intégralité de la colonne d'eau sur le seuil au cours du flot. Ce courant se transforme en courant de gravité et devient verticalement non uniforme lors de son passage sous l'eau de surface du fjord, une fois arrivé sur le flanc amont du seuil. Ce phénomène de subduction est caractérisé par la formation d'un front de densité, d'une zone de clapot, d'un tourbillon, d'un rideau de bulles et du mélange entre les eaux en place et celles de la masse intrusive. De ce mélange résulte une masse d'eau de densité intermédiaire qui, par entraînement hydrodynamique, crée un second front en isolant une structure lenticulaire en surface, avant de remonter le cours du fjord à mi-profondeur. L'ensemble de ces phénomènes provoque un intense mélange vertical, une circulation au fond vers l'aval, inversée par rapport à la circulation estuarienne typique de cette couche en période de flot, et le remplacement rapide des eaux du bassin externe du fjord.

Les différences notées entre un fort et un faible marnage résident tout d'abord dans l'intensité des phénomènes. Ensuite, il appert que la couche profonde du bassin externe est moins perturbée par l'intrusion en période de morte-eau alors qu'en période de vive-eau, le mélange s'étend à la majeure partie de la colonne d'eau.

*Mots-clés* : Fjord; Saguenay; Saut hydraulique; Courant gravitationnel; Turbulence; Mélange; Intrusion; Circulation  $\Gamma$

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. Localisation et rétrospective

Au Québec, le Parc marin du Saguenay – Saint-Laurent (PMSSL), d’une superficie de 1138 km<sup>2</sup> (PMSSL, 1995), protège et met en valeur un vaste écosystème composé de la majeure partie du fjord du Saguenay (FS) et d’une portion de l’estuaire du Saint-Laurent (ESL) (figure 1). Au cœur de cet ensemble se trouve le seuil de l’embouchure du Saguenay (figure 2). Cet obstacle bathymétrique, de concert avec la marée, induit de nombreux phénomènes dynamiques majeurs dans l’ensemble Saguenay – Saint-Laurent : la dissipation de l’énergie tidale, la modification des masses d’eau et la formation de courants (Forrester, 1972; Ingram 1979, 1983; Mertz et Gratton, 1990). La présente étude porte sur l’incidence de ces phénomènes dans la région spécifique de l’embouchure du FS.

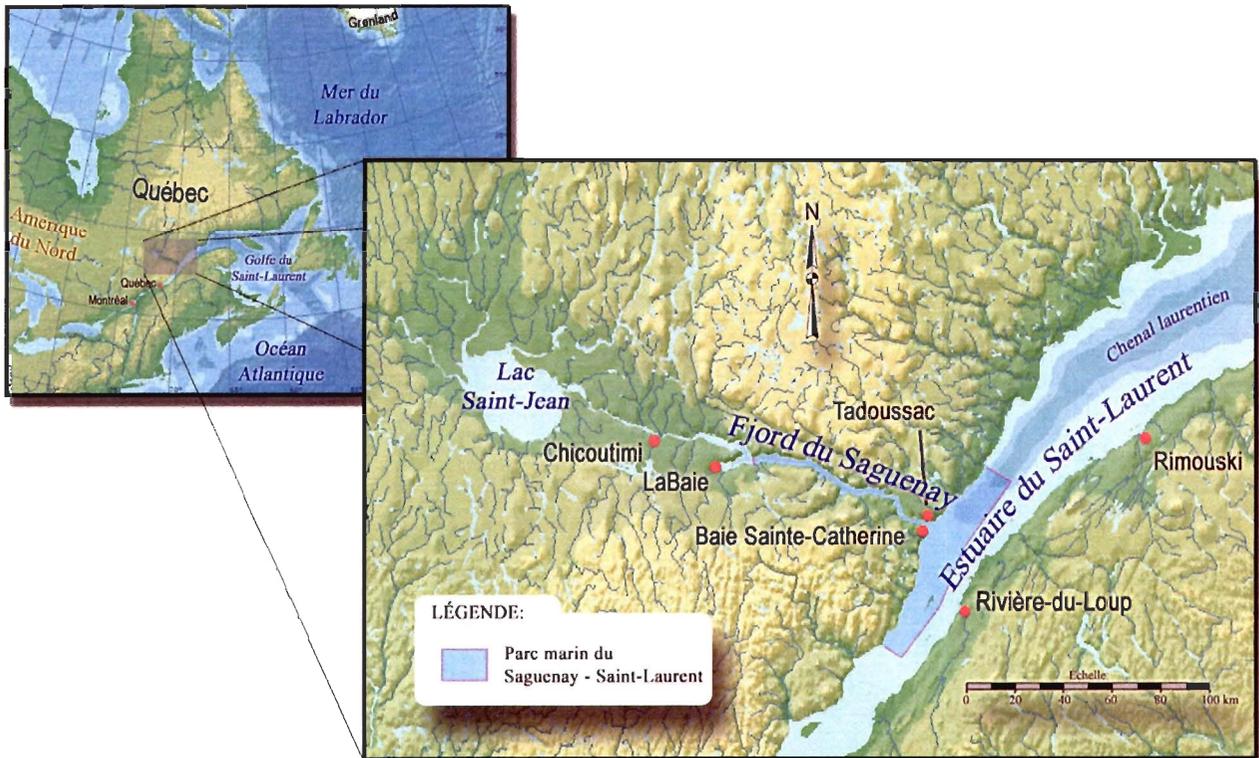


Figure 1. Localisation du fjord du Saguenay et de l’estuaire du Saint-Laurent.

Le FS s’étire sur plus de 120 kilomètres et sied sur un effondrement géologique (graben) du Bouclier Laurentien (Lamontagne, 1993). Il draine le bassin hydrographique du lac Saint-Jean et est le deuxième tributaire en importance de l’ESL, dans lequel il se jette à la hauteur des municipalités de Baie-Sainte-Catherine et de Tadoussac. À l’instar de l’ensemble des fjords, celui-ci est une vallée

surcreusée par le passage des glaciers et envahie par la mer (Drainville, 1968; Schafer *et al.*, 1990). Ses eaux se caractérisent par une forte stratification résultant de l'eau douce introduite (principalement) à sa tête, qui s'écoule sur des eaux aux propriétés marines introduites depuis l'estuaire du Saint-Laurent (Loucks et Smith-Sinclair, 1975; Seibert *et al.*, 1979; Bélanger, 2003). Les caractéristiques bathymétriques du Saguenay permettent de le diviser en trois parties, soit, de l'amont vers l'aval : le bassin supérieur, le bassin intermédiaire et le bassin externe (BE). Ces bassins sont délimités, dans le même ordre, par des seuils de 130, 65 et 20 mètres de profondeur (figure 3). Le secteur étudié dans le cadre de ce travail s'étend de la partie aval du BE à l'ensemble du seuil de l'embouchure (figure 2). La portion du FS présentée à la figure 2 correspond aux derniers cinq kilomètres aval du BE. La figure 4 présente une bathymétrie simplifiée de l'embouchure du FS et de la région immédiate de l'ESL.

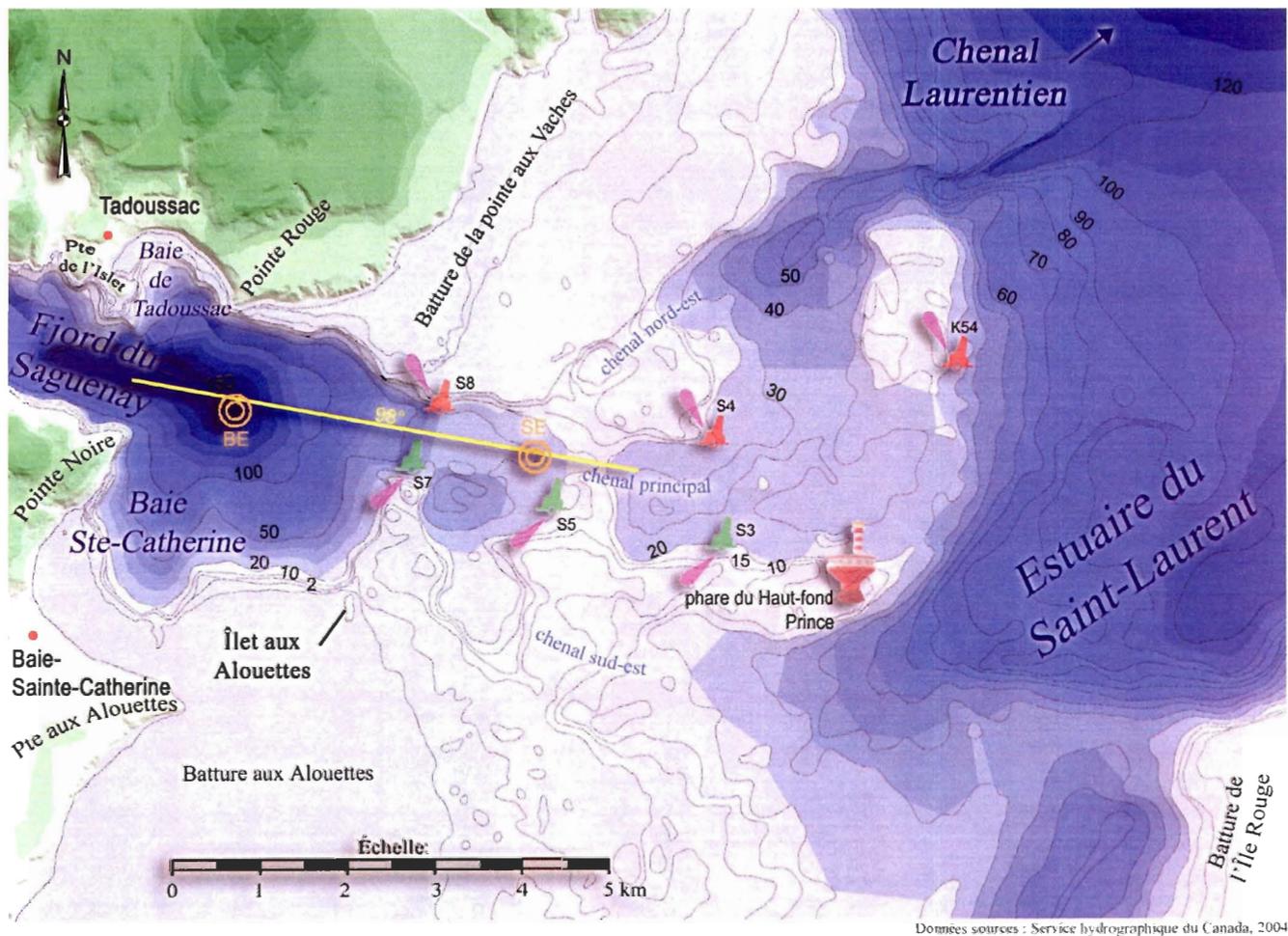


Figure 2. Topographie et bathymétrie de l'embouchure du fjord du Saguenay, aides à la navigation, stations fixes (orange) et transect d'étude (jaune).

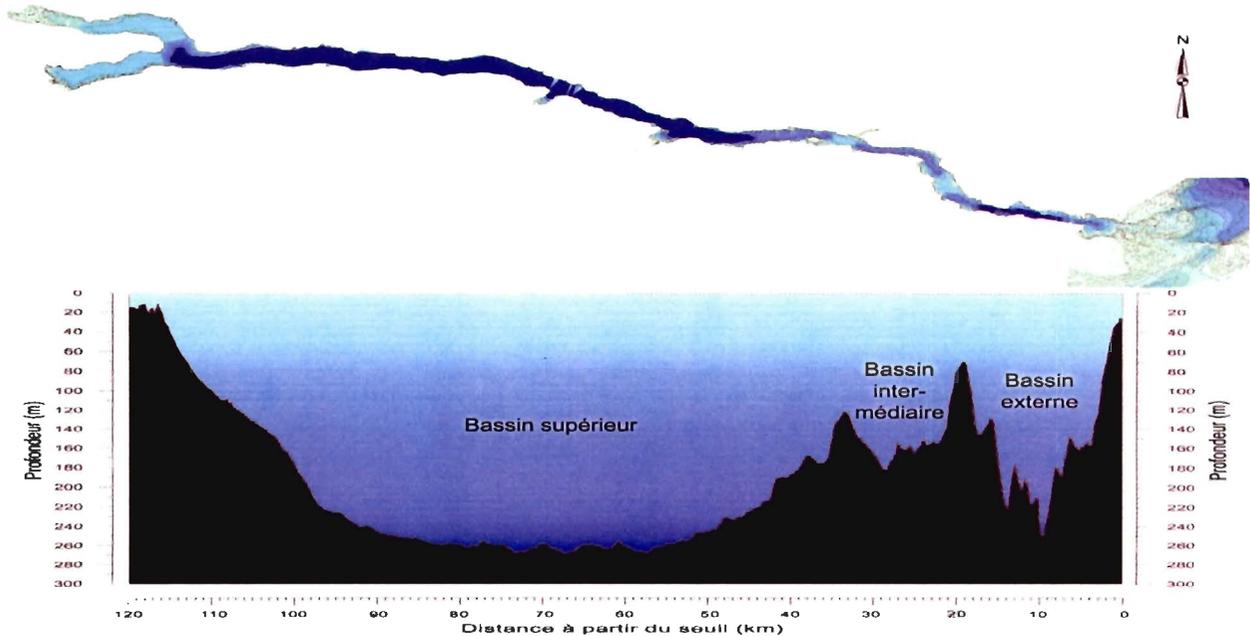
La figure 2, qui représente l'aire d'étude, révèle la complexité des structures bathymétriques de l'embouchure du FS. Le seuil, situé au centre de la figure 2, est peu profond (20 m à sa crête) et est

parsemé de chenaux. Les chenaux sont désignés comme suit : le « chenal principal », axe O-N-O – E-S-E, est le chenal maritime délimité par les bouées de navigation. Les allers-retours, le long du transect d'étude (jaune) lors des campagnes d'échantillonnage à la base du présent travail, suivent ce chenal. Au nord du chenal principal, selon un axe N-E – S-O, se trouve le « chenal nord-est » (10 m à 70 m de profondeur). Il relie directement la tête du chenal Laurentien à la partie amont du chenal principal entre les bouées S5 et S7. Cette jonction correspond à la station SE échantillonnée au cours de l'étude. Au sud du chenal principal, se trouve le « chenal sud-est » (5 m à 70 m de profondeur). Il adopte une forme arquée reliant l'amont du chenal principal, entre les bouées S5 et S7, à la partie sud de la tête du chenal Laurentien. La partie aval du BE, comprenant les baies de Tadoussac et Sainte-Catherine, est caractérisée par une forme en « cuvette » atteignant 155 m de profondeur. La station BE échantillonnée au cours de l'étude correspond à la partie la plus profonde de la cuvette. Cette dernière est jouxtée à l'est par le talweg du chenal principal. On remarquera que le talweg est disposé de manière excentrée, vers le nord, par rapport au centre de la cuvette. Du côté ouest, la cuvette est reliée au FS par les pointes Noire et de l'Islet. Il est pertinent de remarquer que la baie de Tadoussac est plus petite et située en amont par rapport à la baie Sainte-Catherine. La disposition de ces éléments s'avère déterminante pour les processus de circulation dans la région de l'embouchure du FS. Dans le présent document, le relief du SE sera maintes fois considéré de profil. À ce moment, la désignation de « talus » réfèrera à la pente qui joint la partie plane du dessus du seuil à la partie profonde du BE, soit, à la figure 2, la pente comprise entre ~40 m et ~150 m de profondeur sise le long du transect entre les stations SE et BE.

D'après les calculs de Bélanger (2003) basés sur la grille bathymétrique de Saucier *et al.* (1997), le volume du BE est estimé à  $3,43 \times 10^9 \text{ m}^3$ , soit 8,1% du volume total du fjord. Saucier et Chassé (2000) ont établi que le FS contient  $42,56 \times 10^9 \text{ m}^3$  d'eau de mer provenant de l'ESL. Pour pénétrer dans le BE, les eaux du chenal Laurentien doivent impérativement passer par-dessus le seuil de l'embouchure lors de chaque flot de marée. Typiquement, un saut hydraulique interne résulte de ce mouvement gravitationnel (Siebert *et al.*, 1979; Smith et Farmer, 1980; Farmer et Armi, 1986; Holland *et al.*, 2002; Cummins *et al.*, 2006). En période de vive-eau, la puissance de ce phénomène s'exprime en surface par un front en forme de « V » (figure 5), accompagné d'un fort clapot et d'accumulation d'écume et de débris. Selon Largier (1992), de telles observations sont caractéristiques des intrusions denses de grande ampleur. Le saut hydraulique constitue le principal lien dynamique du chenal Laurentien vers le FS.

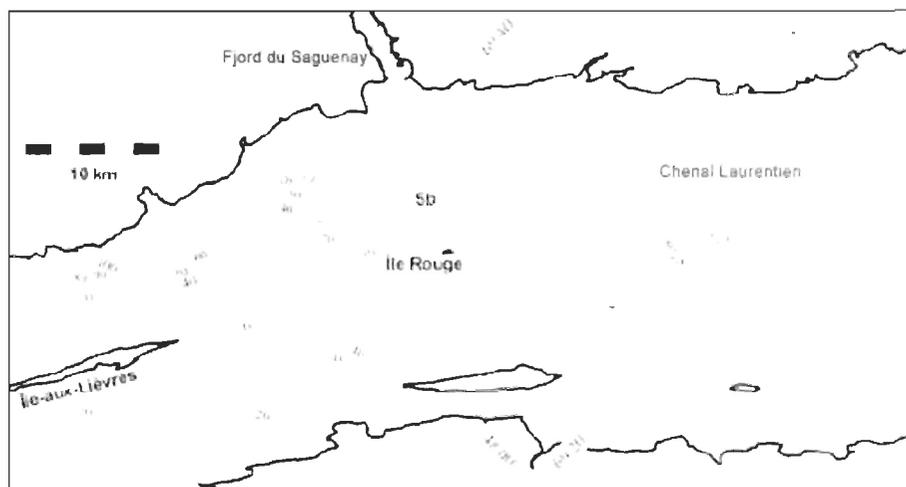
Depuis Drainville (1968), toutes les études concernant le FS confirment l'intrusion d'eau dense de provenance estuarienne dans le BE à chaque flot de marée. À l'instar de Drainville (1968), Therriault et Lacroix (1975) ont soutenu que les eaux de provenance estuarienne étaient issues de la

couche superficielle de l'ESL. Loucks et Smith-Sinclair (1975) furent les premiers à démontrer les similarités physicochimiques existant entre la couche intermédiaire froide de l'estuaire et l'eau du BE. De plus, ces derniers soulevèrent l'hypothèse que l'intensité du mélange provoqué par l'intrusion dans le BE à chaque flot de marée puisse être à l'origine du renouvellement plus rapide des eaux à cet endroit que dans le reste du fjord.



Données sources de la carte : Service hydrographique du Canada, 2004 et 2006; Profil : modifié de : Bélanger, 2003

Figure 3. Bathymétrie et profil longitudinal du Saguenay.



Modifié de : Bélanger, 2003

Figure 4. Bathymétrie simplifiée de l'embouchure du fjord du Saguenay et de la région immédiate de l'estuaire du Saint-Laurent.

Selon Siebert *et al.* (1979), l'ampleur de l'intrusion estuarienne permet le renouvellement de toute l'eau du BE en une période de deux à trois jours. Ils ajoutèrent que plus la vitesse de passage de l'intrusion au-dessus du seuil augmente, plus l'entraînement du côté amont du seuil s'intensifie, ce qui réduit la capacité de pénétration d'eau dense en profondeur. Les observations de Therriault *et al.* (1984) ont par la suite indiqué qu'en période de vive-eau, l'ensemble du BE peut être renouvelé en une période variant de 0,9 à 1,5 jour. Ils constatèrent en outre que les eaux du BE n'atteignent jamais la densité de la masse intrusive telle que mesurée sur le seuil de l'embouchure. Ils en déduisirent que sa densité est réduite par mélange vertical avec les eaux en place lors de sa descente du talus vers l'intérieur du BE ou une fois à l'intérieur du BE.



Photo : Simon Cadieux / François J. Saucier, 1996

Figure 5. Front en « V » lors du flot d'une marée de vive-eau (14 novembre 1996). Les eaux de l'estuaire du Saint-Laurent (est), plongent sous les eaux plus sombres du fjord du Saguenay (ouest). Noter le fort clapot animant la zone ainsi que et l'accumulation d'écume le long du front.

Stacey et Gratton (2001) ont estimé que 25% de l'énergie tidale est dissipée par les processus de mélange et la génération d'ondes internes dans le BE. De plus, leur modèle a montré que le mélange dans la partie aval du fjord est à l'origine de l'écoulement d'eaux denses du bassin intermédiaire par-dessus le second seuil vers les profondeurs du BE. Ils firent remarquer que la compréhension des

phénomènes dynamiques et la précision du modèle numérique du Saguenay sont limités par le manque de connaissances concernant les échanges entre le fjord et l'estuaire du Saint-Laurent.

L'étude de Bélanger (2003), concernant la circulation générale dans le fjord, confirma les observations de Therriault *et al.* (1984) vues plus tôt, ainsi que les conclusions de Stacey et Gratton en ce qui a trait à la dissipation de l'énergie tidale dans le BE par les processus de turbulence. En outre, il démontra que les conditions menant, ou non, au renouvellement des eaux du fjord, sont directement liées aux conditions de mélange dans le BE près du seuil de l'embouchure. Enfin, il recommande une paramétrisation du mélange dans la partie aval du bassin externe ainsi qu'une campagne d'échantillonnage à cette fin, dans le but d'améliorer la compréhension des dynamiques particulières de cette région.

## 1.2. Problématique

Depuis les remarques exprimées par Stacey et Gratton (2001) et Bélanger (2003) quant au manque de connaissances concernant la dynamique de l'embouchure du fjord, aucun travail n'a, à ce jour, été publié sur la question. Les processus de mélange ayant cours entre les eaux du BE et les eaux estuariennes n'ont jamais été caractérisés et l'incidence du mélange sur la circulation des eaux du BE demeure inconnue.

Tel que vu ci-dessus, les auteurs ayant œuvré sur le FS s'accordent pour affirmer que les eaux du chenal Laurentien pénètrent le fjord suite à un saut hydraulique d'origine tidale. Cependant, l'intensité du saut hydraulique et ses conséquences sur les eaux en place dans le BE ne sont pas documentées. En ce sens, plusieurs questions demeurent sans réponses : Comment évolue le saut hydraulique au cours d'un cycle de marée ? Quelle est l'implication du saut hydraulique dans la ventilation des eaux du fjord ? Comment les eaux du chenal Laurentien sont-elles distribuées lorsqu'elles atteignent le BE ? Lors d'un flot de marée, la circulation dans le BE et sur le seuil est-elle verticalement uniforme ou non ? Ce courant de flot varie-t-il latéralement ? Les intrusions denses atteignent-elles le fond du BE ou se trouvent-elles mélangées avant ? Quelle est la relation entre la dynamique imposée par le saut hydraulique et le renouvellement des eaux du BE ou du fjord ? Bélanger (2003) y associe en partie le conditionnement des eaux du BE en vue du renouvellement, ou non, des eaux du fjord. Quels sont les divers processus de mélange et quelle est la fraction du mélange attribuable au saut hydraulique ? Quelle est l'origine du mouvement gravitationnel inversé par rapport à la direction normale du flot observé au 2<sup>e</sup> seuil à la fin du flot par Stacey et Gratton (2001) ?

L'absence de réponses à ces questions ne permet pas, à ce jour, d'établir précisément le rôle du saut hydraulique dans l'ensemble Saguenéen, tant de manière conceptuelle que lors de la paramétrisation des modèles numériques à l'échelle du fjord. De plus, la méconnaissance de la dynamique ayant cours dans le BE et sur le seuil de l'embouchure restreint les horizons de nombreuses autres recherches. L'enrichissement de ce savoir serait utile à la compréhension du comportement alimentaire et de l'utilisation de l'embouchure du fjord par certaines espèces de cétacés, questionnement qui persiste suite aux travaux de Marchand *et al.* (1999) et Lavoie *et al.* (2002). L'amélioration des connaissances permettant d'illustrer les échanges entre l'ESL et le FS permettrait d'approfondir la recherche concernant les origines du zooplancton dans le fjord, telles que celles menées par De Ladurentaye *et al.* (1984), ou plus récemment par Diab (2008). Enfin, selon Émilien Pelletier (titulaire de la Chaire en écotoxicologie marine, ISMER - UQAR, comm. pers.), il serait primordial de mieux comprendre les échanges entre l'ESL et le FS afin de parfaire les études écotoxicologiques et, de manière prioritaire, planifier adéquatement la gestion d'éventuelles catastrophes maritimes dans ce secteur.

### 1.3. Objectifs

L'objectif principal du présent travail est de décrire les conséquences du saut hydraulique sur les eaux en place dans le BE du Saguenay. Pour ce faire, des données ADCP inédites seront utilisées afin d'analyser les phénomènes se produisant dans le BE lors du flot pour différents cycles de marée. Cet effort permettra d'apporter de nouvelles informations en ce qui a trait à la dynamique courantologique et les processus de turbulence sur le seuil de l'embouchure et dans la partie aval du BE.

Les objectifs secondaires sont : 1) extraire la moyenne verticale du courant et l'écart local du courant; 2) caractériser la variabilité longitudinale des courants longitudinal et transverse; 3) identifier les principales zones de mélange vertical à l'aide d'indices de turbulence ; 4) décrire les structures courantologiques à l'aide de profils de rétrodiffusion acoustique par échosondeur à haute fréquence ; 5) décrire l'évolution du nombre de Froude au cours du flot de marée ; 6) étudier la profondeur atteinte par l'intrusion en relation avec le cycle de marée et le marnage ; 7) estimer la quantité d'eau estuarienne admise dans le FS selon le marnage.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les principaux instruments de mesure utilisés sont les suivants : profileurs acoustiques à effet Doppler (ADCP), échosondeurs à faisceau scindé et sondes CTD.

### 2.1. Matériel

#### 2.1.1. ADCP (*acoustic Doppler current profiler* : courantomètre acoustique à effet Doppler)

Premier appareil utilisé : *Teledyne RD Instruments Workhorse Sentinel 307 kHz*

Profondeur de montage : 5 m

Profondeur de début des mesures : 9,1 m

Deuxième appareil utilisé : *Teledyne RD Instruments Ocean Surveyor 154 kHz*

Profondeur de montage : 5 m

Profondeur de début des mesures : 13,2 m

Logiciels : *RDI VMDAS* : communication avec l'appareil et acquisition des données

*RDI WinADCP* : représentation et exportation des données

La profondeur de la première mesure de l'ADCP correspond à la profondeur de montage de l'appareil dans la coque du navire (5 m), à laquelle s'additionne la portée (distance entre l'appareil et la première mesure : 4,1 m (307 kHz) et 8,2 m (154 kHz)). L'épaisseur de la première cellule des deux ADCPs (9,1 m pour le 307 kHz et 13,2 m pour le 154 kHz) a été considérée lors du traçage des composantes courantologiques. De plus, les valeurs de vitesse près du fond sont généralement surestimées. Pour cette raison, les deux cellules les plus rapprochées du fond n'ont pas été considérées et les valeurs extrêmes parfois rencontrées immédiatement près du fond sur les figures ADCP doivent être ignorées. Les explications techniques et les limites des ADCPs sont décrites dans le document de Simpson (2001) et sur le site internet de *Teledyne RD Instruments* : [www.rdinstruments.com](http://www.rdinstruments.com).

#### 2.1.2. Échosondeur à faisceau scindé (*split beam*)

Premier appareil utilisé : *Simrad EK-60*

Transducteur : *Transonics* 3° 120 kHz

Profondeur de montage : 5 m

Champ proche : 2,5 m

Deuxième appareil utilisé : *Simrad EK-60*

Transducteur : *Simrad* 7° 120 kHz

Profondeur de montage : 5 m

Champ proche : 1,4 m

Logiciel : *SIMRAD ER60* : acquisition, représentation et exportation des données

L'utilisation et les réglages des échosondeurs sont inspirés des travaux de Farmer *et al.* (2002) et Baschek (2002) en raison de la similarité des processus étudiés. Les sorties d'image à partir du logiciel *ER60* représentent la variable Sv (« *Volume backscattering strength* », ou index de rétrodiffusion de volume) de -90 dB à -50 dB et ont été tracées avec l'échelle de couleur « *Smooth Echosounder* » et la palette « *Day White* ».

2.1.3. CTD (*Conductivity, Temperature, Depth* : thermosalinomètre)

Premier appareil utilisé : *Sea-Bird Electronics 911plus*

Deuxième appareil utilisé : *Sea-Bird Electronics 19plus*

Logiciels : *SBE SEASAVE* : acquisition, représentation et exportation des données

*SBE Data Processing* : filtre, moyenne et représentation des données

## 2.2. Méthodologie

L'acquisition des données a été effectuée lors de quatre missions : du 24 au 29 mai 2005 (*Dynamique du front du Saguenay et agrégation des proies des baleines*, Simard – Saucier), du 25 au 28 septembre 2005 (*Mission-stage Ismer 2005*, Brêthes), le 24 septembre 2006 (*Mission-stage Ismer 2006*, Brêthes) et du 17 au 23 août 2007 (*Stations CTD SE et BE*, Cloutier – Saucier). Le tableau I présente les campagnes d'échantillonnage et les conditions tidales et météorologiques correspondantes.

Les appareils utilisés aux fins d'échantillonnage sont listés au tableau II. Les périodes d'échantillonnage de 2005 et 2006 ont été réalisées à bord du navire de recherche *Coriolis II*. Les mesures de courant (ADCP et échosondeur) et l'échantillonnage de la colonne d'eau (CTD) se sont effectués par une série d'allers-retours au-dessus du seuil le long du transect d'étude (figure 2). Le transect est d'une longueur approximative de 7 km (parfois davantage lors d'excursions vers l'amont du FS ou dans l'ESL) et le transit le long du transect prend de 25 à 60 minutes, dépendamment des conditions de navigation, des autres appareils d'échantillonnage déployés et de la présence de mammifères marins. Les données brutes de l'ADCP ont été extraites à l'aide du logiciel *WinADCP* et ensuite traitées à l'aide de routines *MatLab*. Les scripts élaborés sous *MatLab* et leur explication se trouvent à l'annexe 1. Trois profilages CTD à la trôle (*tow-yo*) ont aussi été réalisés.

Tableau I. Périodes d'échantillonnage, conditions tidales et conditions météorologiques.

Échantillonnage				Conditions tidales *			Conditions météorologiques **					
no.	Date (jma)	Début (HAE)	Fin (HAE)	Marnage (m)	Basse-mer (HAE)	Pleine-mer (HAE)	Moyenne pendant l'échantillonnage			Moyenne des 24 h précédentes		
							Air (°C)	Vent		Air (°C)	Vent	
								Direction (°)	Vitesse (km h <sup>-1</sup> )		Direction (°)	Vitesse (km h <sup>-1</sup> )
1	240505	14h53	16h24	3,9	10h04	16h05	15,0	50	31,3	11,0	48	20,0
2	24-250505	19h52	05h17	4,5	21h53	04h14	6,6	251	8,1	11,7	60	20,5
3	250505	09h10	16h42	3,9	10h49	16h50	10,9	76	28,0	10,4	142	19,2
4	25-260505	22h49	04h44	4,5	22h38	04h59	7,3	265	5,4	9,3	162	17,8
5	290505	15h48	21h25	3,0	14h24	20h27	9,3	143	4,6	8,3	144	5,5
6	250905	14h05	20h07	2,0	14h05	20h58	10,0	102	8,2	8,0	217	12,5
7	280905	08h44	13h14	1,5	06h56	12h59	11,1	96	13,2	10,1	266	12,3
8	240906	12h21	18h02	3,9	10h27	16h37	10,3	219	21,6	8,4	166	10,9
9	170807	15h18	16h21	3,5	12h08	18h20	14,3	253	14,3	11,9	191	11,3
10	210807	18h01	18h40	2,0	14h30	21h15	12,1	221	19,6	14,0	290	3,0
11	220807	18h59	19h29	1,8	15h41	22h24	13,0	285	12,0	10,6	207	12,9
12	230807	09h14	11h46	1,2	05h37	11h23	10,7	125	10,0	10,9	204	11,5
Régime tidal lors de l'échantillonnage :				Vive-eau								
				Transitoire								
				Morte-eau								

\* Prévisions tidales pour le port de Tadoussac, Service hydrographique du Canada

\*\* Données météorologiques enregistrées à la station Tadoussac, Environnement Canada

Tableau II. Appareils de mesure utilisés lors des périodes d'échantillonnage.

Échantillonnage			ADCP (puissance)	Échosondeur / Transducteur (angle du faisceau et puissance)	CTD	
no.	Date (jma)	Marnage (m)			Appareil	Type de profil
1	240505	3,9	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	SBE 911+	trôle
2	24-250505	4,5	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	-	-
3	250505	3,9	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	-	-
4	25-260505	4,5	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	SBE 911+	trôle
5	290505	3	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	SBE 911+	trôle
6	250905	2	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	-	-
7	280905	1,5	RDI Sentinel (307 kHz)	Simrad EK-60 / Transonics (3° 120 kHz)	-	-
8	240906	3,9	RDI Ocean Surveyor (154 kHz)	Simrad EK-60 / Simrad ES 120-7c (7° 120 kHz)	-	-
9	170807	3,5	-	-	SBE 19+	vertical
10	210807	2	-	-	SBE 19+	vertical
11	220807	1,8	-	-	SBE 19+	vertical
12	230807	1,2	-	-	SBE 19+	vertical

En août 2007, des profils CTD en station ont été réalisés à partir de la vedette de patrouille du PMSSL, l'Alliance. La cage de protection du CTD a été munie à sa base d'un dépresseur de câble afin de maintenir l'appareil en position verticale dans le courant. Les profils verticaux ont débuté en station

SE à BM+3. Aussitôt le profil SE complété, la plateforme se dirigeait vers la station BE afin d'y échantillonner le profil suivant. Les positions et profondeurs des stations SE et BE sont présentées au tableau III et l'heure d'échantillonnage des profils est présentée au tableau IV. Le transit entre les stations SE et BE s'effectuait entre 9 à 28 minutes, dépendamment de la présence ou absence de cétaqués à éviter. Seuls les profils en descente ont été considérés. Les profils ont été moyennés afin d'obtenir une valeur à tous les 0,5 m.

Tableau III. Position et profondeur des stations d'échantillonnage CTD.

Station	Latitude nord	Longitude OUEST	Profondeur (m)
SE	48° 07' 18''	69° 39' 40''	30,0
BE	48° 07' 30''	69° 42' 00''	150,0

Tableau IV. Heure d'échantillonnage des profils CTD.

Date (jma)	Marnage (m)	Pleine mer -3h (HAE)	Profil SE (HAE)		Début profil BE (HAE)
			Début	Fin	
170807	3,5	15h14	15h18	15h24	15h52
210807	2,0	17h52	18h01	18h07	18h19
220807	1,8	19h02	18h59	19h04	19h13
230807	1,2	08h30	08h44	08h49	09h27

### 2.3. Paramètres diagnostiques

Cette section présente les différents paramètres utilisés pour analyser la dynamique des masses d'eau sur le seuil et dans le BE. Le choix des calculs retenus aux fins d'analyse de la turbulence a été effectué suite à une consultation de la littérature portant sur des études impliquant des phénomènes similaires à ceux observés à l'embouchure du Saguenay. Ces paramètres sont :

- 1) le nombre de Froude densimétrique interne du premier mode (Helle, 1978; Farmer et Denton, 1985; Armi, 1986; Cummins *et al.*, 2006);
- 2) la vitesse de friction (Voulgaris et Trowbridge, 1998; Lozovatsky *et al.*, 2007);
- 3) le cisaillement vertical au carré (Peters, 1999; Bourgault *et al.*, 2000);
- 4) le prisme de marée;
- 5) le courant verticalement moyenné;
- 6) l'écart local du courant par rapport à la moyenne verticale.

Les résultats des points 4, 5 et 6 ont été obtenus à partir de mesures directes, de calculs mathématiques simples et en faisant appel, lorsque nécessaire, aux ouvrages de référence portant sur la dynamique des fluides (Turner, 1973; Kundu, 1990). Pour tous les calculs (hormis celui du nombre de Froude, basé directement sur la vitesse mesurée par ADCP), les valeurs des composantes  $u$  et  $v$  sont obtenues après une rotation horaire de  $8^\circ$  des axes afin de rendre l'axe  $x$  parallèle à l'axe du talweg de la pente entre le seuil et le BE (axe  $x$  à  $98^\circ$  depuis le nord géographique) (voir figure 2).

### 2.3.1. Nombre de Froude densimétrique interne de mode 1

Le nombre de Froude ( $F$ ) est un nombre non dimensionnel servant à caractériser le flux d'un volume (Turner, 1973).  $F$  est utilisé dans le but de caractériser la réponse en amont (dans le BE) suite à l'écoulement d'un fluide (le courant intrusif) sur un obstacle bathymétrique (le SE) (Cummins *et al.*, 2006). Il existe, dans la littérature, de nombreuses méthodes de calcul de  $F$  applicables en fonction des diverses conditions étudiées. Dans le cas qui nous intéresse,  $F$  pourra être calculé en considérant une seule couche puisque la masse d'eau intrusive est pratiquement homogène et son écoulement verticalement uniforme, alors que la masse d'eau en place dans le BE voit son écoulement bloqué et est pratiquement immobile, *i.e.* dynamiquement inactive. Le nombre de Froude densimétrique interne de mode 1 a été calculé dans des conditions similaires par Baschek (2002) et Gerdes *et al.* (2002), à qui la formule que nous utilisons est empruntée.

$$\text{Nombre de Froude densimétrique interne de mode 1 : } F_i = \frac{U_i}{\sqrt{g'H}} \quad [1]$$

où :

$U_i$  = vitesse de l'intrusion sur le seuil selon *WinADCP*, moyennée verticalement;

$$g' = g \left( \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right); \quad [2]$$

$g$  = constante gravitationnelle ( $9,8 \text{ m s}^{-2}$ );

$\rho_1$  = densité de l'eau de surface, *i.e.* moyenne entre 0 et 20 m à BE ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$\rho_2$  = densité de l'eau intrusive, *i.e.* moyenne sur toute la colonne d'eau à SE ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$H$  = épaisseur de l'intrusion à l'endroit où la vitesse  $U_i$  est mesurée (m).

Lorsque le nombre de Froude interne ( $F_i$ )  $< 1$ , l'écoulement est dit « sous-critique » et une onde interne se propageant à la vitesse  $\sqrt{g'H}$  peut remonter le courant. Lorsque  $F_i = 1$ , la vitesse de

l'écoulement est égale à la vitesse de l'onde interne du fluide, l'empêchant de le remonter. Cela correspond à un écoulement « critique » (Turner, 1973). Dans le cas d'un saut hydraulique interne, le front entre les deux masses d'eau, ou zone de subduction, correspond à  $F_i = 1$  (Farmer et Denton, 1985). Si  $F_i > 1$ , la condition de l'écoulement est qualifiée de « surcritique ». Pour une valeur de  $F_i$  légèrement supérieure à 1, une partie de l'énergie associée au saut hydraulique pourra être dissipée sous la forme d'une onde interne (Turner, 1973). Cependant, pour les valeurs de  $F_i$  excédant nettement 1, la dissipation d'énergie par génération d'une onde n'est pas suffisante. Cela provoque son déferlement, et la dissipation d'énergie s'effectue par mélange turbulent (Benjamin, 1966; 1967 *in* Turner, 1973). Enfin, un écoulement surcritique devient sous-critique en amont d'un saut hydraulique (Kundu, 1990).

Dans le cadre de ce travail,  $F_i$  n'a pu être calculé à un endroit précis tout au long des différents échantillonnages à cause des variations de trajectoire du navire par rapport au « transect idéal ». Les données d'ADCP à l'origine du calcul de  $F_i$  ont donc été prélevées à l'intérieur d'une zone de  $\sim 1 \text{ km}^2$  le long du transect d'étude dans le chenal principal, entre  $\sim 30 \text{ m}$  et  $\sim 60 \text{ m}$  de profondeur, en amont des bouées S7 et S8 (voir figure 2). Le relief uniforme de la pente a été considéré et les valeurs de  $H$  et  $U_i$  ont été mesurées dans une portion représentative et relativement homogène de la « tête », ou près de la tête, du courant gravitationnel (concernant la structure d'un courant gravitationnel, voir Turner, 1973). Bien sûr, une représentation de type analytique et un calcul systématique de  $F_i$  à maints endroits de part et d'autre du front ( $F_i = 1$ ) aurait été idéal. Cependant, les contraintes physiques et matérielles nous ont obligées à orienter notre analyse vers une solution autrement représentative en ces circonstances. Les résultats du calcul de  $F_i$  seront présentés sous forme de graphiques au chapitre 3.

### 2.3.2. Vitesse de friction

Le calcul de la vitesse de friction ( $u_*$ ) en tant qu'indicateur d'intensité de la turbulence est inspiré des travaux de Voulgaris et Trowbridge (1998) et Lozovatsky *et al.* (2007). Afin d'obtenir la vitesse de friction, il faut d'abord évaluer les valeurs des composantes  $\overline{u'w'}$  et  $\overline{v'w'}$  des contraintes de Reynolds. Les composantes des contraintes de Reynolds sont obtenues par la mise en relation de 2 des 3 composantes des fluctuations ( $u'$ ,  $v'$  et  $w'$ ) de vitesses au même endroit (Kundu, 1990). L'unité de mesure des composantes du courant et de  $u_*$  est  $\text{m s}^{-1}$ .

$$\text{Vitesse de friction: } u_* = \sqrt[4]{\left(-\overline{u'w'}\right)^2 + \left(-\overline{v'w'}\right)^2} \quad [3]$$

où :

$\overline{u'w'}$  = composante des contraintes de Reynolds selon l'axe longitudinal  $x$ ;

$\overline{v'w'}$  = composante des contraintes de Reynolds selon l'axe perpendiculaire  $y$ ;

$u$  = vitesse dans la direction horizontale  $x$ ;

$\bar{u}$  = vitesse  $u$  moyennée dans le temps<sup>1</sup>, sur 20 s;

$u'$  = fluctuation de vitesse  $u - \bar{u}$  ;

$v$  = vitesse dans la direction horizontale  $y$  ;

$\bar{v}$  = vitesse  $v$  moyennée dans le temps, sur 20 s;

$v'$  = fluctuation de vitesse  $v - \bar{v}$  ;

$w$  = vitesse dans la direction verticale  $z$ ;

$\bar{w}$  = vitesse  $w$  moyennée dans le temps, sur 20 s;

$w'$  = fluctuation de vitesse  $w - \bar{w}$  .

Nous nous intéressons à l'intensité relative et à la distribution spatiale de  $u^*$  plutôt qu'à sa valeur en termes absolus.

### 2.3.3. Cisaillement vertical au carré

Dans un contexte estuarien, l'effet de cisaillement génère de la turbulence (Peters, 1999). Le cisaillement vertical ( $S^2$ ) en tant qu'indicateur de turbulence a été retenu afin de vérifier et possiblement étayer les résultats obtenus via la vitesse de friction. La formule et son application sont tirées de Bourgault *et al.* (2000). L'unité de mesure du cisaillement au carré est  $s^{-2}$ .

$$\text{Cisaillement vertical au carré : } S^2 = \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad [4]$$

où les dérivées au carré sont moyennées dans le temps sur 20 s.

Ici encore, nous nous concentrons sur l'intensité relative de la turbulence et les structures turbulentes plutôt que sur la grandeur des valeurs estimées.

---

<sup>1</sup> Puisque les moyennes s'étalent sur 20 s, cela implique aussi une moyenne spatiale car le navire était en déplacement.

### 2.3.4. Courant verticalement moyenné

Le calcul du courant verticalement moyenné ( $U$  et  $V$ ) repose sur la vitesse instantanée horizontale moyennée dans le temps (sur 20 s), *i.e.*  $\bar{u}$  et  $\bar{v}$ . Les valeurs horizontales  $\bar{u}$  et  $\bar{v}$  sont ensuite moyennées sur toute la colonne d'eau.

Courant verticalement moyenné selon l'axe longitudinal  $x$  :  $U =$  moyenne de  $\bar{u}$  sur la verticale [5]

Courant verticalement moyenné selon l'axe perpendiculaire  $y$  :  $V =$  moyenne de  $\bar{v}$  sur la verticale [6]

### 2.3.5. Écart local du courant

L'écart local du courant ( $U_d$  et  $V_d$ ) correspond à la vitesse moyenne horizontale ( $\bar{u}$  ou  $\bar{v}$ ) de laquelle est soustraite la valeur du courant verticalement moyenné ( $U$  ou  $V$ ) correspondante. L'écart local du courant donne une indication de l'écart entre la vitesse du courant et le courant moyen.

Écart local du courant selon l'axe longitudinal  $x$  :  $U_d = \bar{u} - U$  [7]

Écart local du courant selon l'axe perpendiculaire  $y$  :  $V_d = \bar{v} - V$  [8]

### 2.3.6. Prisme de marée

Le prisme de marée ( $P$ ), qui est le volume d'eau ajouté à un bassin (ici le FS) pendant la période de flot, correspond approximativement à l'aire du fjord multipliée par le marnage. Bien qu'il soit habituel de comparer le prisme de marée à la décharge d'eau douce correspondant à la même période, cet exercice est ici volontairement omis puisque le but poursuivi n'est pas d'établir un bilan tidal mais plutôt de connaître la quantité d'eau estuarienne entrant dans le FS lors du flot.

Cette approximation est envisageable en vertu de la mince différence maximale de marnage entre les ports de l'embouchure (Tadoussac) et de la tête du fjord (La Baie - Port Alfred à ~100 km en amont) : ~1 m en période de vive-eau (~6 m à La Baie - Port Alfred pour ~5 m à Tadoussac). De plus, puisque la pleine mer (PM) est atteinte avec un décalage de ~20 minutes entre ces deux ports, il est possible de considérer la marée dans le Saguenay comme une onde stationnaire (Seibert *et al.*, 1979). Cependant, il est important de garder à l'esprit que cette désignation consiste en une simplification de la réalité. Ainsi, tout calcul basé sur le prisme tidal est une estimation.

Prisme de marée :  $P = A_{Sag} M$  [9]

où :

$A_{Sog}$  = Aire du Saguenay ( $m^2$ ),  $32,1 \times 10^7 m^2$  (Bélanger (2003) : 8029 cellules de  $4 \times 10^4 m^2$ );

$M$  = marnage, de basse mer à pleine mer (m).

### 2.3.7. Débit moyen d'eau dense pendant le flot

Le débit moyen d'eau dense pendant le flot ( $\bar{D}$ ) correspond au débit moyen d'eau dense de l'ESL vers l'intérieur du FS pendant le flot d'un cycle de marée donné.  $\bar{D}$  est obtenu du rapport entre le prisme de marée et la durée du flot et est exprimé en Sv (Sverdrup).

$$\text{Débit moyen d'eau dense pendant le flot : } \bar{D} = \frac{P}{\Delta t_m} \quad [10]$$

où :

$P$  = prisme de marée ( $m^3$ );

$\Delta t_m$  = durée du flot, de basse mer à pleine mer (s).

## 2.4. Modélisation numérique

Les solutions d'un modèle numérique ont été utilisées afin d'illustrer l'évolution horaire de la salinité de surface à l'embouchure du FS lors d'un flot de 2,7 m de marnage. Le modèle numérique utilisé est un modèle hydrostatique 3D couvrant l'estuaire du Saint-Laurent, de Trois-Rivières à Rimouski, incluant le Saguenay (modèle STLE 400 du Laboratoire d'analyse et de simulation des systèmes océaniques (LASSO) de l'Ismer). La résolution du modèle est de 400 m à l'horizontale et de 5 m et plus à la verticale, composée de 35 couches de fluide. L'épaisseur de la couche de surface varie en fonction du niveau d'eau et l'épaisseur de la dernière couche est déterminée par la bathymétrie. Pour une description du modèle STLE 400 et une analyse de sa performance, voir Saucier et Chassé (2000).

Comme précédemment mentionné, il s'agit d'un modèle hydrostatique et on peut se demander si l'utilisation d'un tel modèle est justifiée dans le présent contexte. Dans ce travail, qui est avant tout descriptif, nous avons fait appel, mais de manière très limitée, au modèle STLE 400. En fait il y aurait problème si nous prétendions décrire le détail local du saut hydraulique avec le modèle, mais ce n'est pas le cas. La situation est analogue à ce que l'on retrouve dans les théories hydrauliques courantes (classification de l'écoulement en critique ou sous-critique, contrôle hydraulique, etc.) que ce soit pour des situations barotropes (rivières et canaux) ou pour des cas baroclines (fjords, intrusions de marée,

etc.). Ces théories sont très généralement basées sur l'approximation hydrostatique, étant entendu qu'elles ne prétendent pas décrire le détail des phénomènes dans la zone de transition qu'occupe un saut hydraulique.

### 3. RÉSULTATS

La première section de ce chapitre consiste en une présentation des paramètres courantologiques dans la région étudiée du BE en période de vive-eau. De manière générale, l'organisation des structures et les fluctuations spatio-temporelles des courants demeurent semblables pour les différents régimes tidaux. Les particularités propres aux marnages de morte-eau sont présentées à la section 3.2. La section 3.3. traite des propriétés physicochimiques des masses d'eau, la section 3.4. analyse les paramètres du transport tidal et la section 3.5. porte sur les variations de l'intensité du mélange turbulent en fonction du marnage et du cycle de marée par l'entremise du calcul du nombre de Froude interne du premier mode. Enfin, la section 3.6. jette un regard sur l'évolution de la salinité de surface lors du flot. Les liens entre les phénomènes dynamiques et les données quantitatives du présent chapitre seront interprétés et discutés au chapitre 4.

#### 3.1. Paramètres courantologiques en période de vive-eau

L'intrusion d'eau dense en provenance de l'ESL sera suivie tout au cours du flot pour un cycle de marée de vive-eau (échantillonnage no. 2). On considèrera l'évolution des diverses structures dynamiques qui en découlent : saut hydraulique interne, ondulation du courant intrusif de mi-profondeur, circulation complexe à trois couches, doublet de fronts, etc. Les données illustrées concernent la période de vive-eau de l'échantillonnage no. 2. Cette séquence a été choisie comme témoin car elle couvre toute la période du flot et les structures y sont bien évidentes. Les résultats sont présentés sur deux figures (figure 6 et figure 7) comportant chacune 12 panneaux. Chaque panneau correspond à une tranche temporelle du cycle de marée. Les résultats de l'ADCP sont présentés à la figure 6 et ceux de l'échosondeur à la figure 7. La description des paramètres courantologiques par tranches temporelles du cycle de marée sera présentée aux sous-sections 3.1.1 à 3.1.10., à la suite des 28 pages occupées par les figures 6 et 7.

De manière détaillée, la figure 6 présente l'évolution de la dynamique sur le seuil et dans la partie aval du BE au cours d'une période complète de flot de marée (Échantillonnage no.2, de 19h52 le 24-05-05 à 05h17 le 25-05-05). L'abscisse représente la distance parcourue sur le transect (km), dans la direction aval-amont ou amont-aval. [Certaines figures présentent des déformations de l'abscisse pour des raisons de défaillance ponctuelles du GPS. Ex. : figure 6a, km 3 à km 8 et annexe 6g, ADCP 00h28 – 00h58.] L'ordonnée représente la profondeur (m). Les valeurs de profondeur tiennent compte de la profondeur d'installation de l'ADCP dans la coque du navire et de la zone initiale aveugle de l'appareil : les profondeurs indiquées pour chacune des planches correspondent aux profondeurs réelles

calculées à partir de la surface. Les paramètres suivants sont présentés : vitesse verticale moyennée dans le temps ( $\bar{w}$ ), vitesse longitudinale moyennée dans le temps ( $\bar{u}$ ), courant longitudinal verticalement moyenné ( $U$ ), écart local du courant longitudinal ( $U_d$ ), vitesse transverse moyennée dans le temps ( $\bar{v}$ ), courant transverse verticalement moyenné ( $V$ ), écart local du courant transverse ( $V_d$ ), vitesse de friction ( $u_*$ ); et cisaillement vertical au carré ( $S^2$ ), tels que définis à la section 2.3. Les données ADCP ont été enregistrées tout au long du transect d'échantillonnage lors de plusieurs passages (de durée variable) à différents stades du flot. Les valeurs du courant le long de l'axe  $x$  (variables  $\bar{u}$ ,  $U$ ,  $U_d$ ) sont positives vers l'est, positives vers le nord dans l'axe  $y$  (variables  $\bar{v}$ ,  $V$ ,  $V_d$ ) et la composante verticale  $\bar{w}$  est positive vers le haut dans l'axe  $z$ . Concernant les sous-figures de la figure 6, pour des raisons techniques, les notations  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$  et  $\langle w \rangle$  remplacent  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  et  $\bar{w}$ . L'heure et la position de départ (vert) et d'arrivée (rouge) du navire le long du transect sont notées, respectivement, par des traits verticaux sur la cartouche indiquant le niveau d'eau (coin supérieur gauche) et par des astérisques sur la carte de localisation (coin supérieur droit).

Cette figure permet de constater la relation de phase entre le courant et l'élévation de la surface. Par exemple, aux figures 6b et 6k, respectivement basse mer (BM) et PM, le courant longitudinal ( $\bar{u}$ ) est pratiquement nul, alors qu'il est maximal au milieu du flot (6f). Ce déphasage de  $90^\circ$  entre le courant et l'élévation de surface indique que l'onde de marée dans le FS a un caractère fortement stationnaire. Ce fait a déjà été noté par Siebert *et al.* (1979).

La figure 7 présente les profils réalisés par échosondeur pour les mêmes passages que ceux de la figure 6. Ces séquences sont simultanées aux distributions dynamiques de la figure 6. Le BE se trouve du côté gauche de l'image (ouest) et le seuil du côté droit (est). Cependant, contrairement à la figure 6, l'abscisse correspond au temps parcouru en minutes (traits verticaux dans le haut de l'image) et non à la distance parcourue. L'ordonnée correspond à la profondeur réelle et est graduée aux 25 m. La bande blanche horizontale, en surface, correspond à la profondeur de montage de l'appareil dans la coque du navire et la bande rouge sous-jacente est celle du champ proche de l'appareil, où le faisceau n'est pas bien formé et où le transducteur résonne encore.

Sous ces bandes continues, les images d'échosondeur montrent des régions de différentes intensités de rétrodiffusion. Les mesures que nous avons à notre disposition ne nous permettent pas d'identifier positivement les réflecteurs en cause mais, en nous basant sur les travaux d'autres auteurs ayant fait des observations concluantes dans des milieux semblables, elles nous conduisent tout de même à proposer des interprétations hypothétiques mais plausibles de certains signaux particuliers.

Dans son étude de Boundary Pass, Baschek (2002) rapporte les résultats de Medwin (1977) selon lesquels la section efficace acoustique des bulles de gaz dans l'eau est environ 1000 fois supérieure à leur section géométrique. S'appuyant par ailleurs sur des mesures indépendantes par résonateur acoustique démontrant directement la présence de bulles de gaz dans les régions de subduction associés aux zone de fronts tidaux, Baschek (2002) et Farmer *et al.* (2002) prennent pour acquis que la rétrodiffusion de haute intensité ( $S_v > -50$  dB), formant des amas denses joints à la surface, est due aux bulles de gaz plutôt qu'au zooplancton, à la turbulence ou aux poissons. Bien que nous n'en ayons pas de confirmation directe, nous allons présumer qu'il en est de même pour notre site d'étude, tout en attirant l'attention du lecteur sur le fait qu'il s'agit d'une hypothèse et non d'un fait avéré. Les principaux entraînements de bulles de gaz de ce type sont pointés sur les échogrammes de la figure 7.

On réfèrera au zooplancton, aux agrégations de poissons et à la turbulence de manière non spécifique en utilisant le terme « rétrodiffuseurs ». Sur les images d'échosondeur, le fond correspond à la rétrodiffusion maximale et continue qui varie avec la profondeur (ligne rouge continue, à laquelle a été ajoutée un trait noir). Sous cette bande, le reste de la figure doit être ignoré puisque le patron sous-jacent est le résultat de la répétition de l'écho du fond par rebonds entre la surface et le fond.

Afin de toujours représenter le SE du côté droit de l'image et le BE du côté gauche, une image sur deux (6b, 6d, 6f, 6h, 6j et 6l) a été horizontalement inversée. Par conséquent, sur ces images, l'échelle verticale se trouve inscrite à l'envers et affichée à droite. Toutefois, les graduations pointillées aux 25 m et la valeur de l'échelle verticale demeurent inchangées.

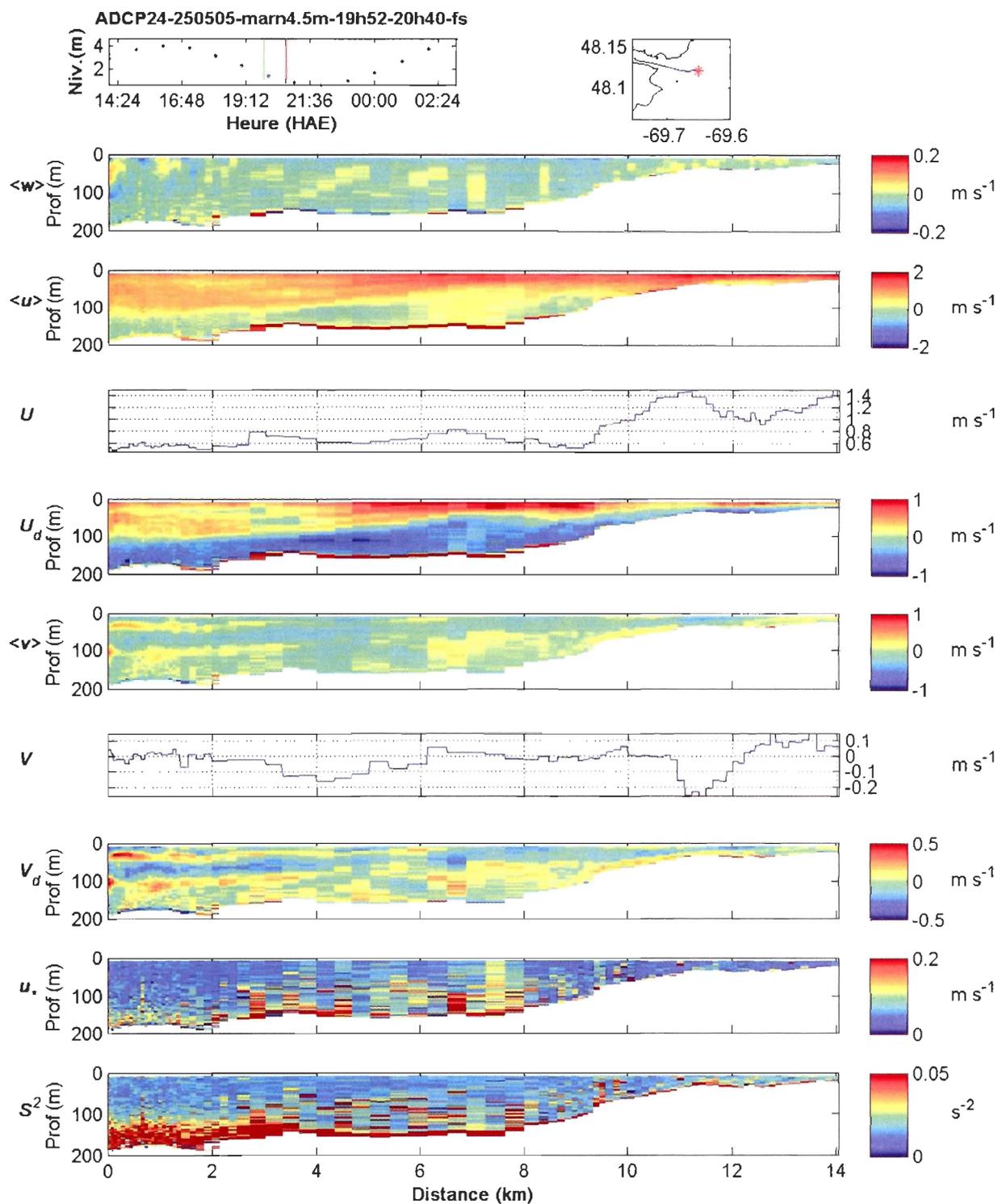


Figure 6a. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 19h52 à 20h40 le 24-05-05, trajet fjord-seuil, BM-1 à BM.

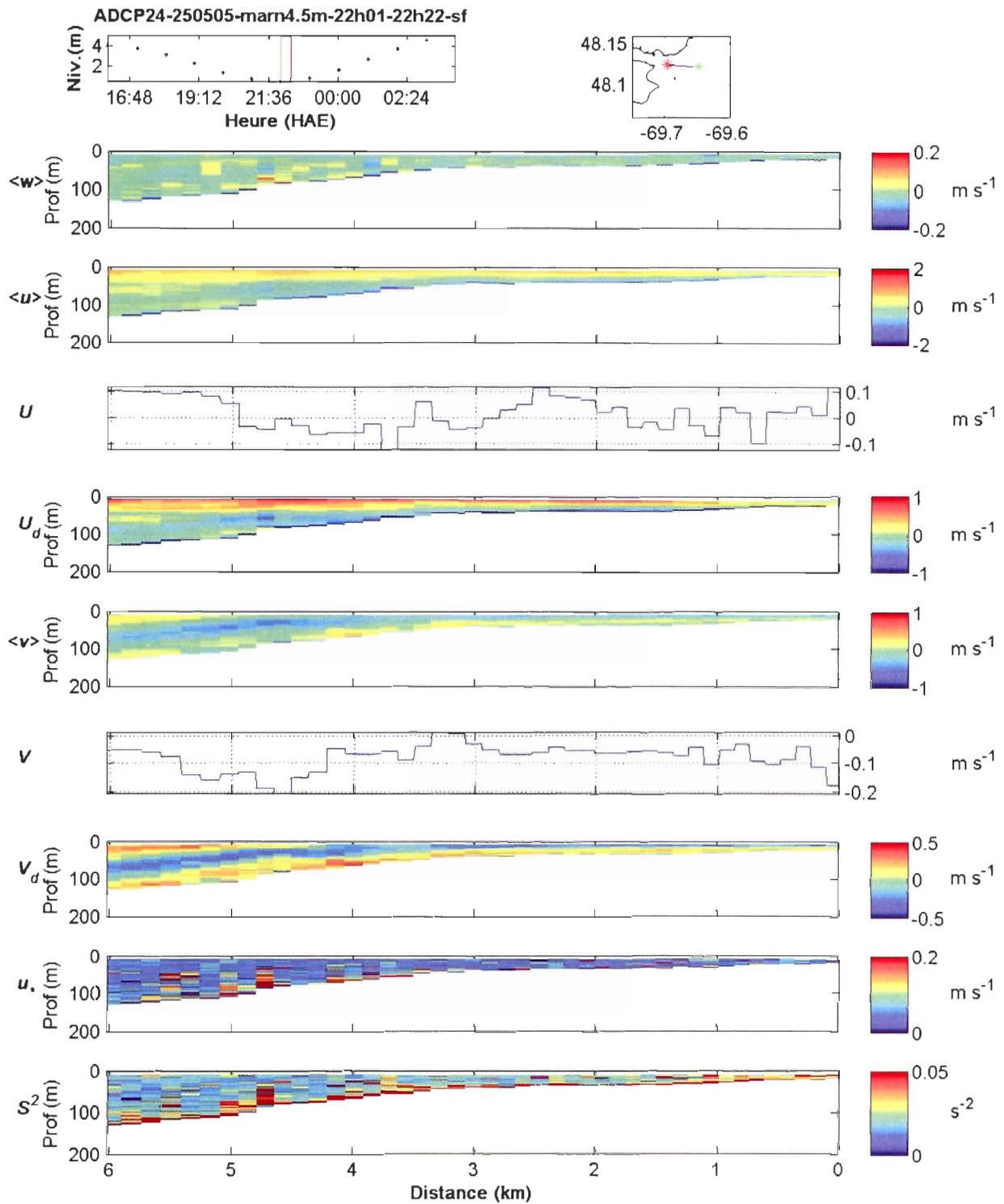


Figure 6b. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_a$ ;  $V$ ;  $V_a$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 22h01 à 22h22 le 24-05-05, trajet seuil-fjord, BM.

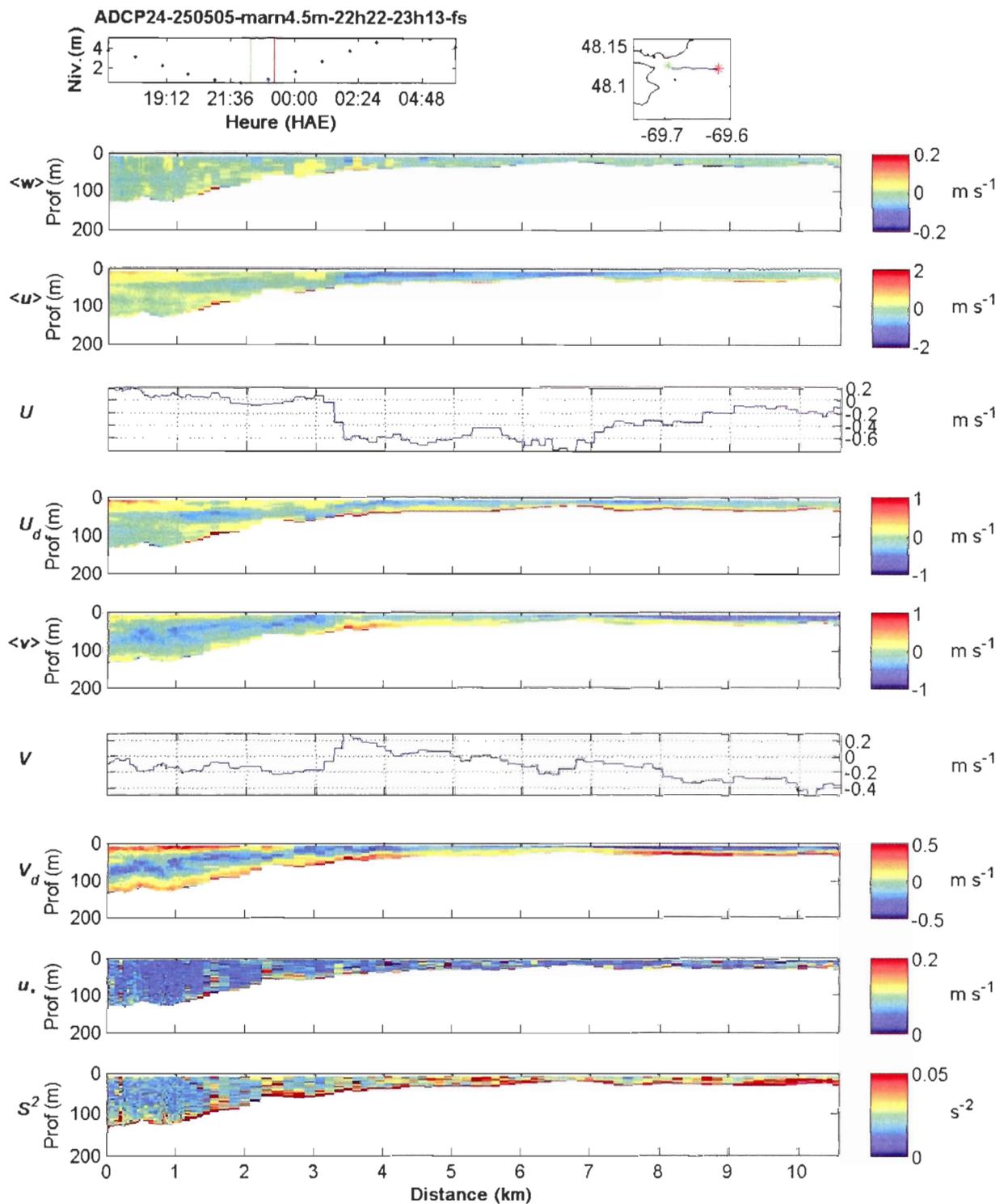


Figure 6c. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 22h22 à 23h13 le 24-05-05, trajet fjord-seuil, BM à BM+1.

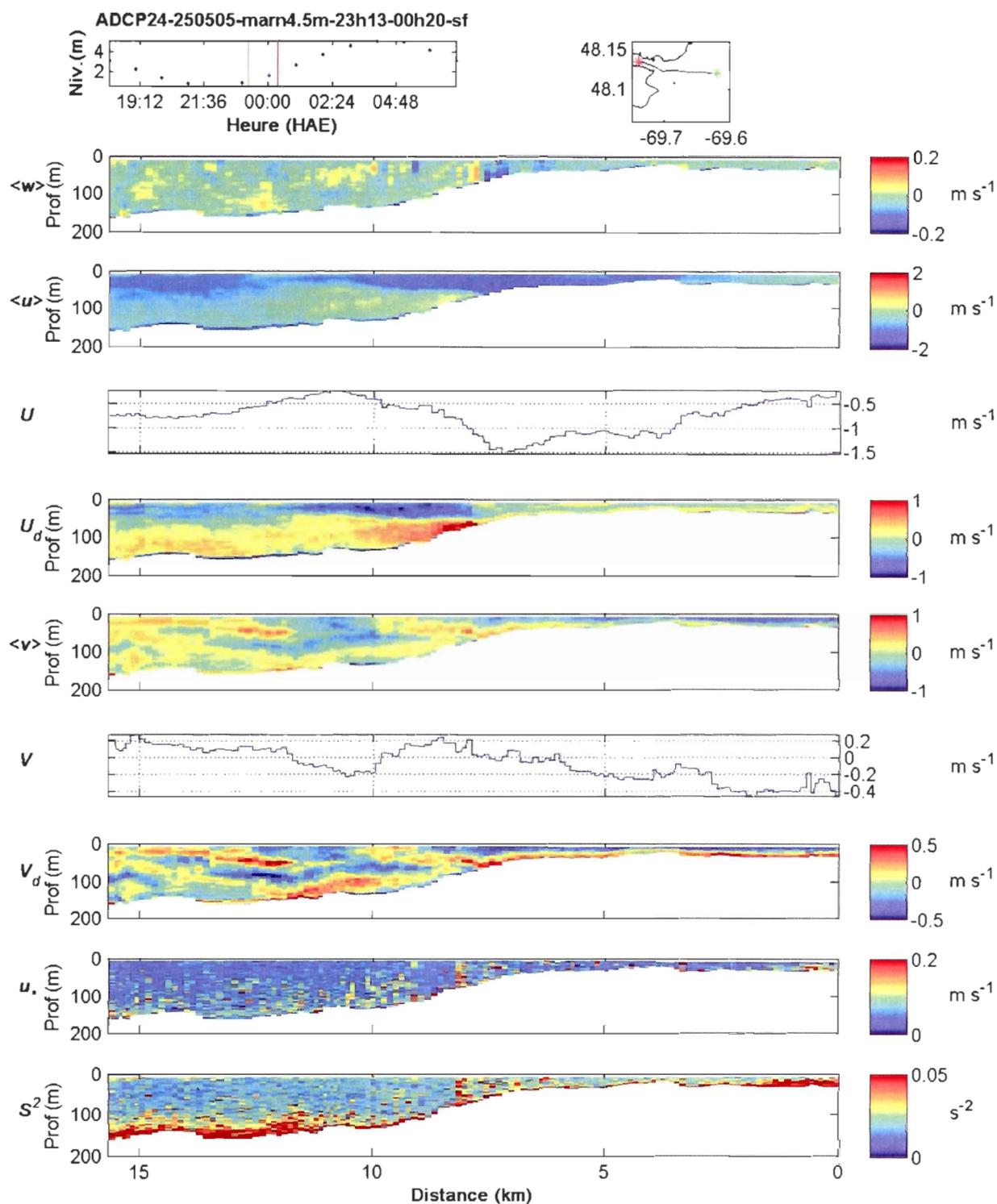


Figure 6d. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 23h13 le 24-05-05 à 00h20 le 25-05-05, trajet seuil-fjord, BM+I à BM+2.

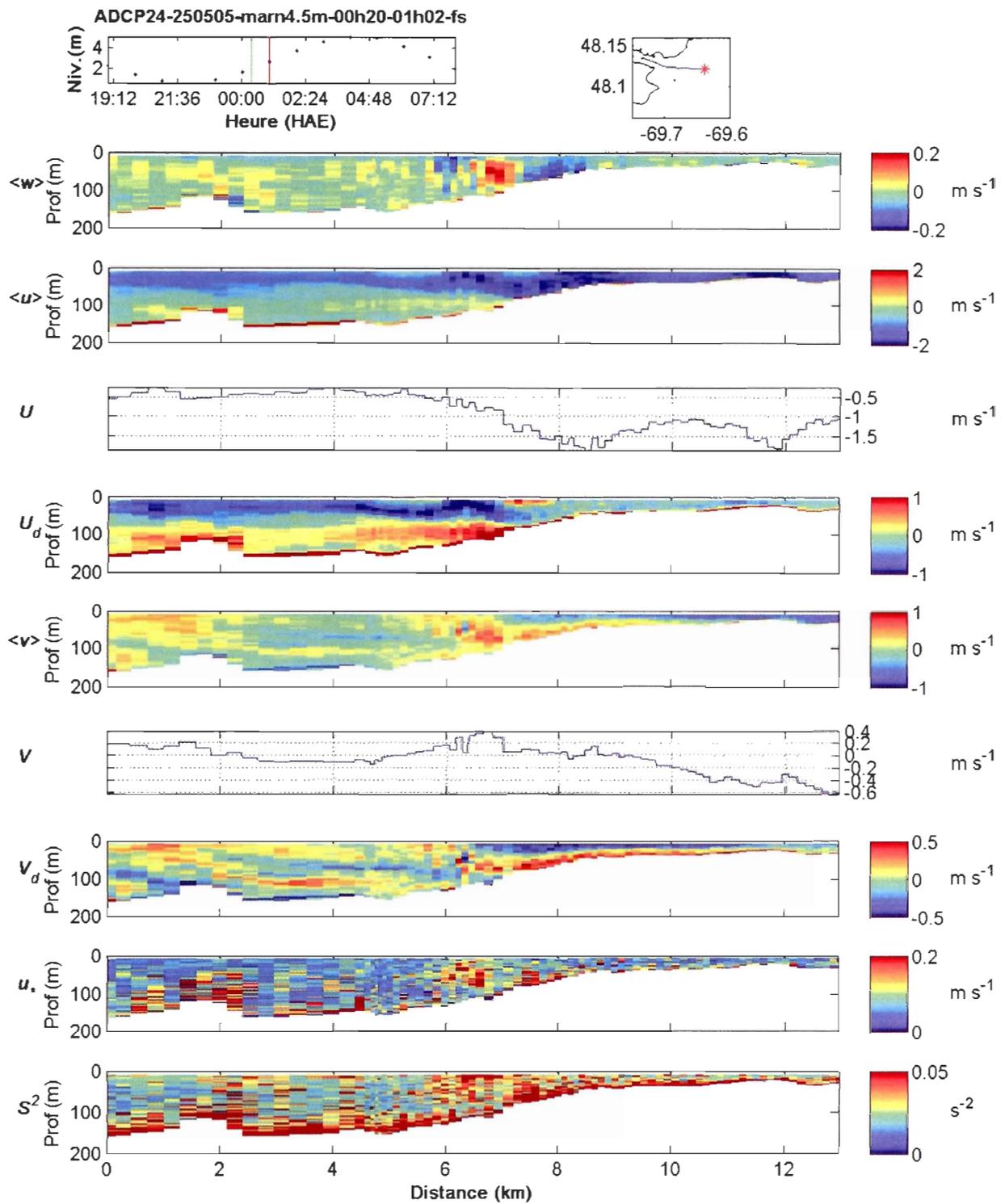


Figure 6e. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 00h20 à 01h02 le 25-05-05, trajet fjord-seuil, BM+ 2 à BM+3.

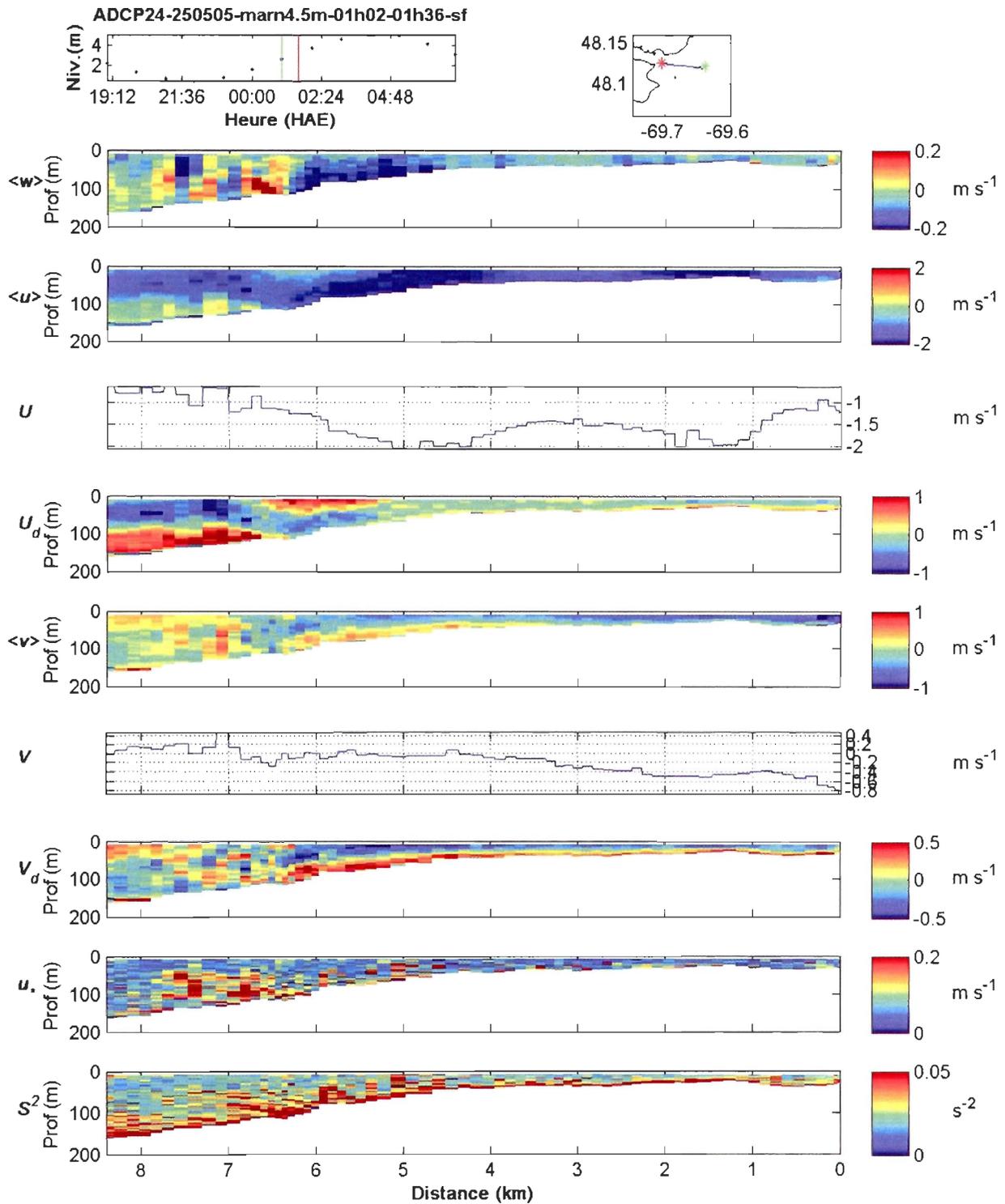


Figure 6f. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 01h02 à 01h36 le 25-05-20, trajet seuil-fjord, BM+3 à PM-2,5.

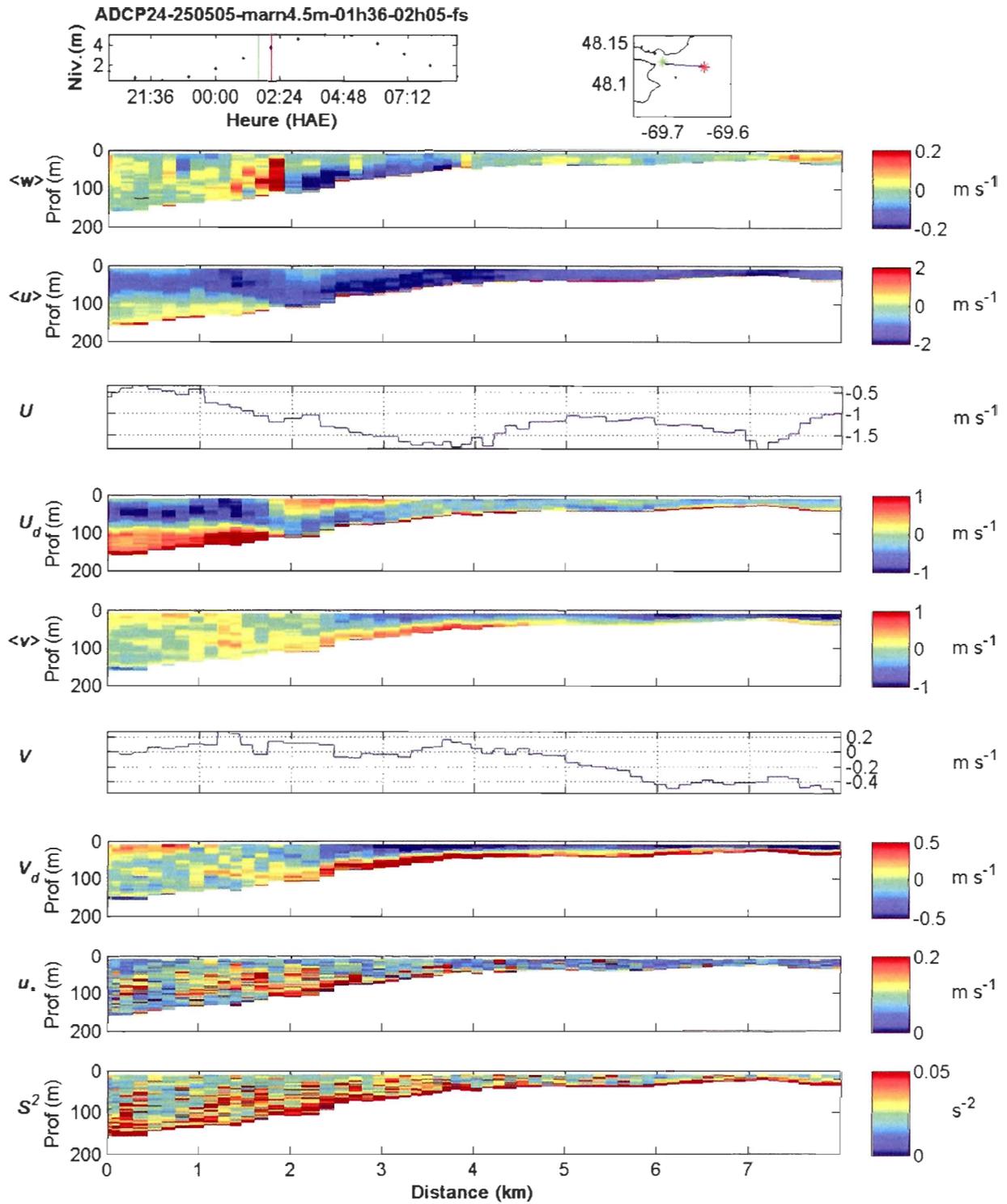


Figure 6g. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 01h36 à 02h05 le 25-05-20, trajet fjord-seuil, PM-2,5 à PM-2.

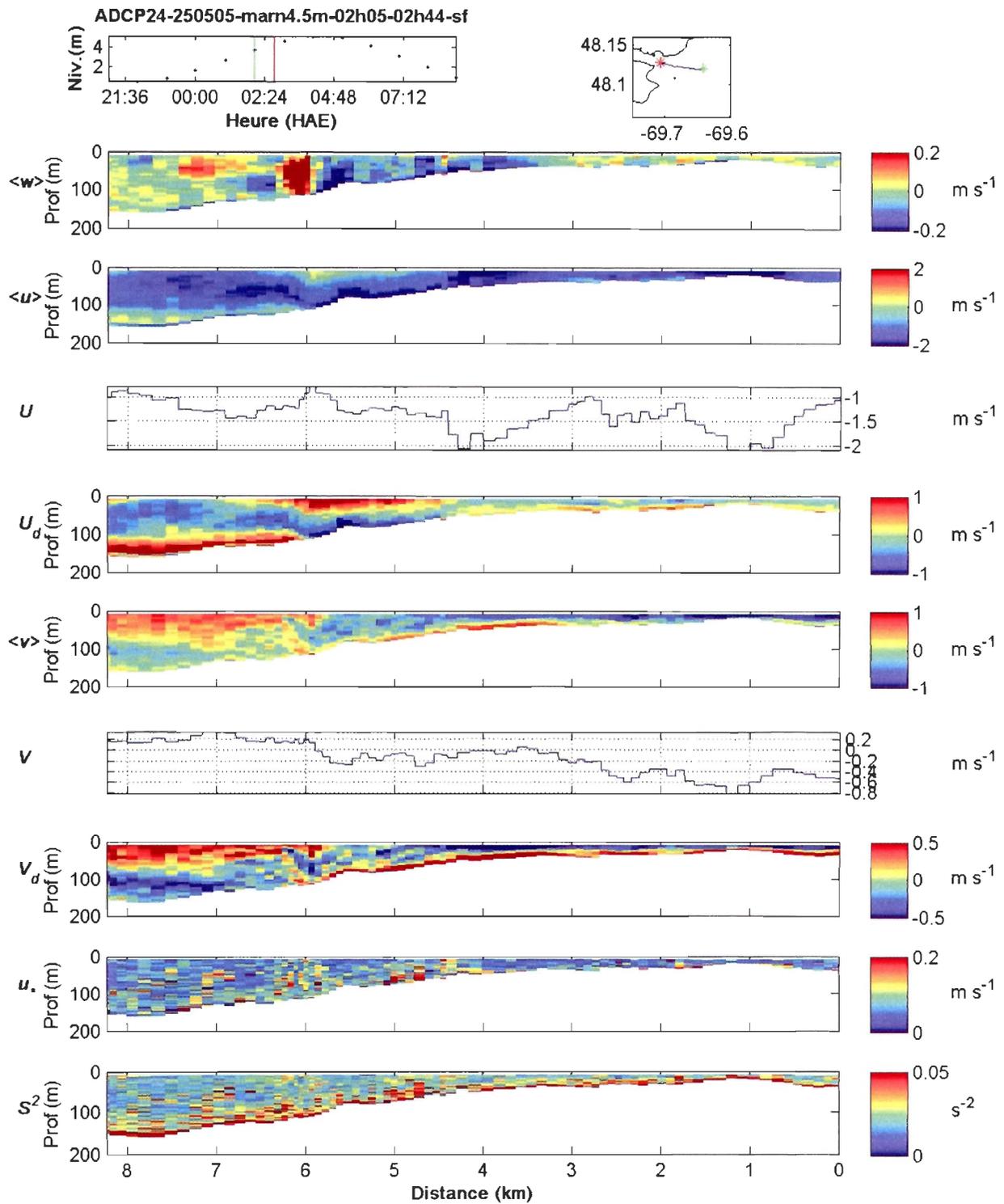


Figure 6h. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 02h05 à 02h44 le 25-05-05, trajet seuil-fjord, PM-2 à PM-1,5.

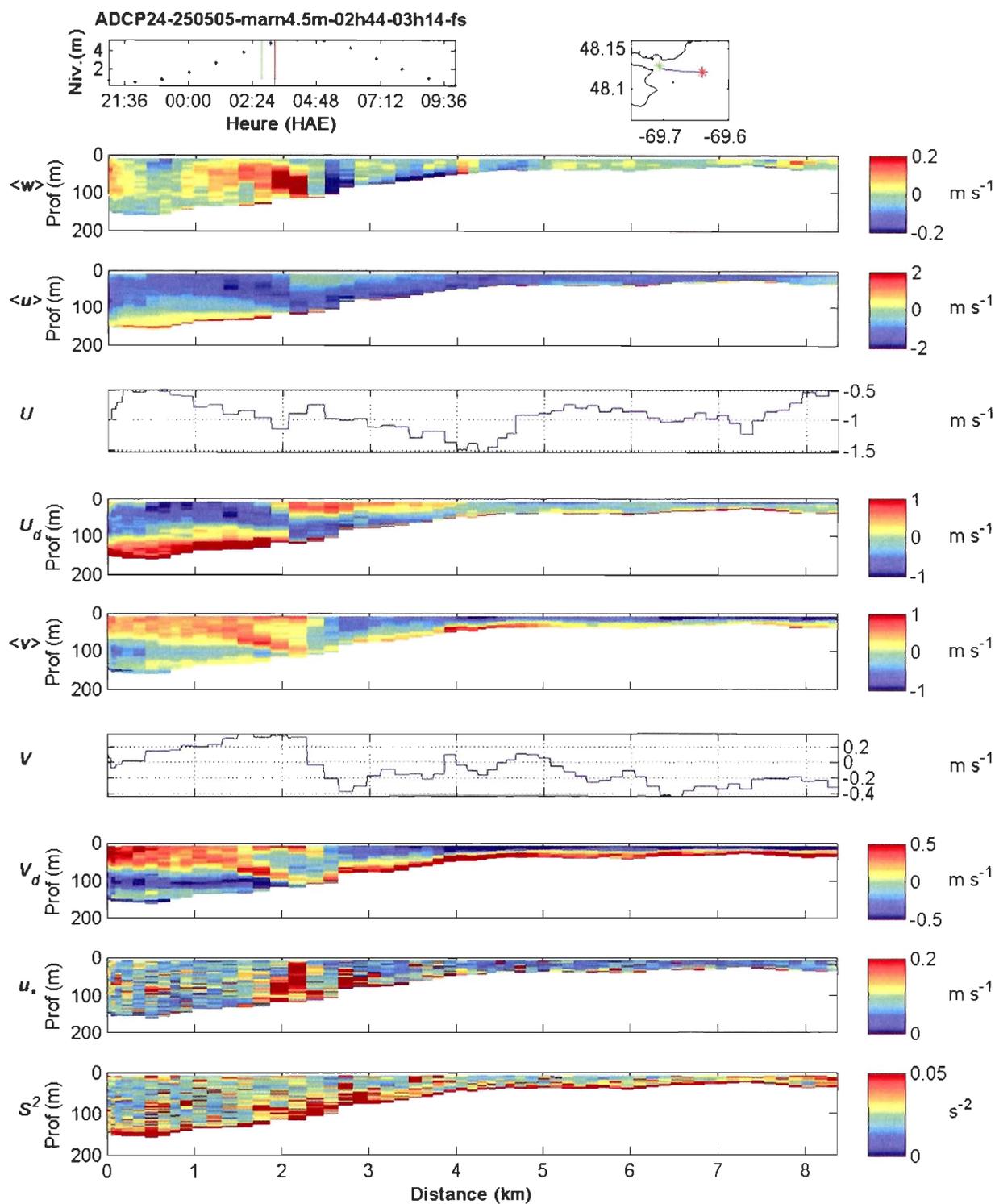


Figure 6i. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 02h44 à 03h14 le 25-05-05, trajet fjord-seuil, PM-1,5 à PM-1.

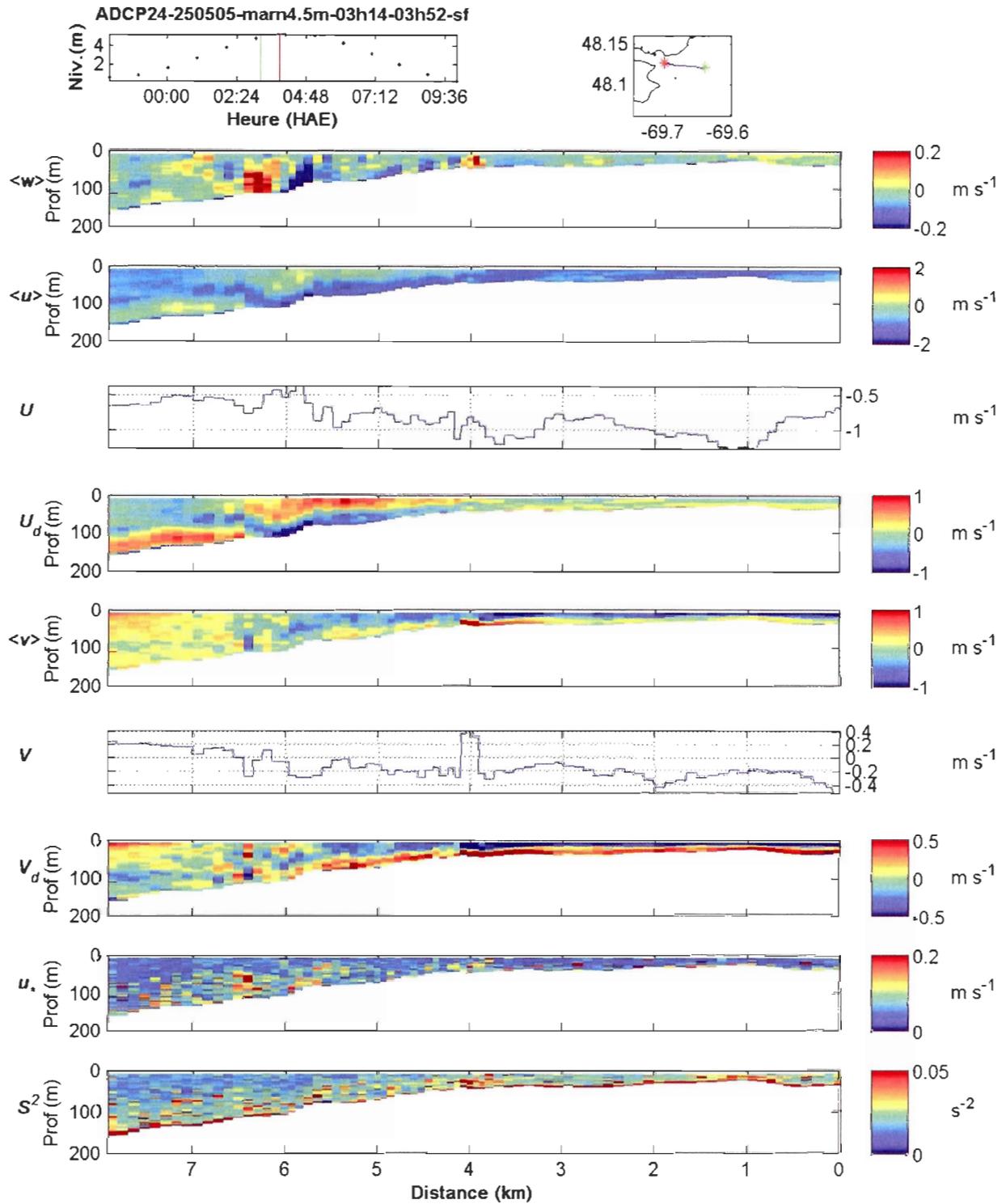


Figure 6j. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 03h14 à 03h52 le 25-05-05, trajet seuil-fjord, PM-1 à PM.

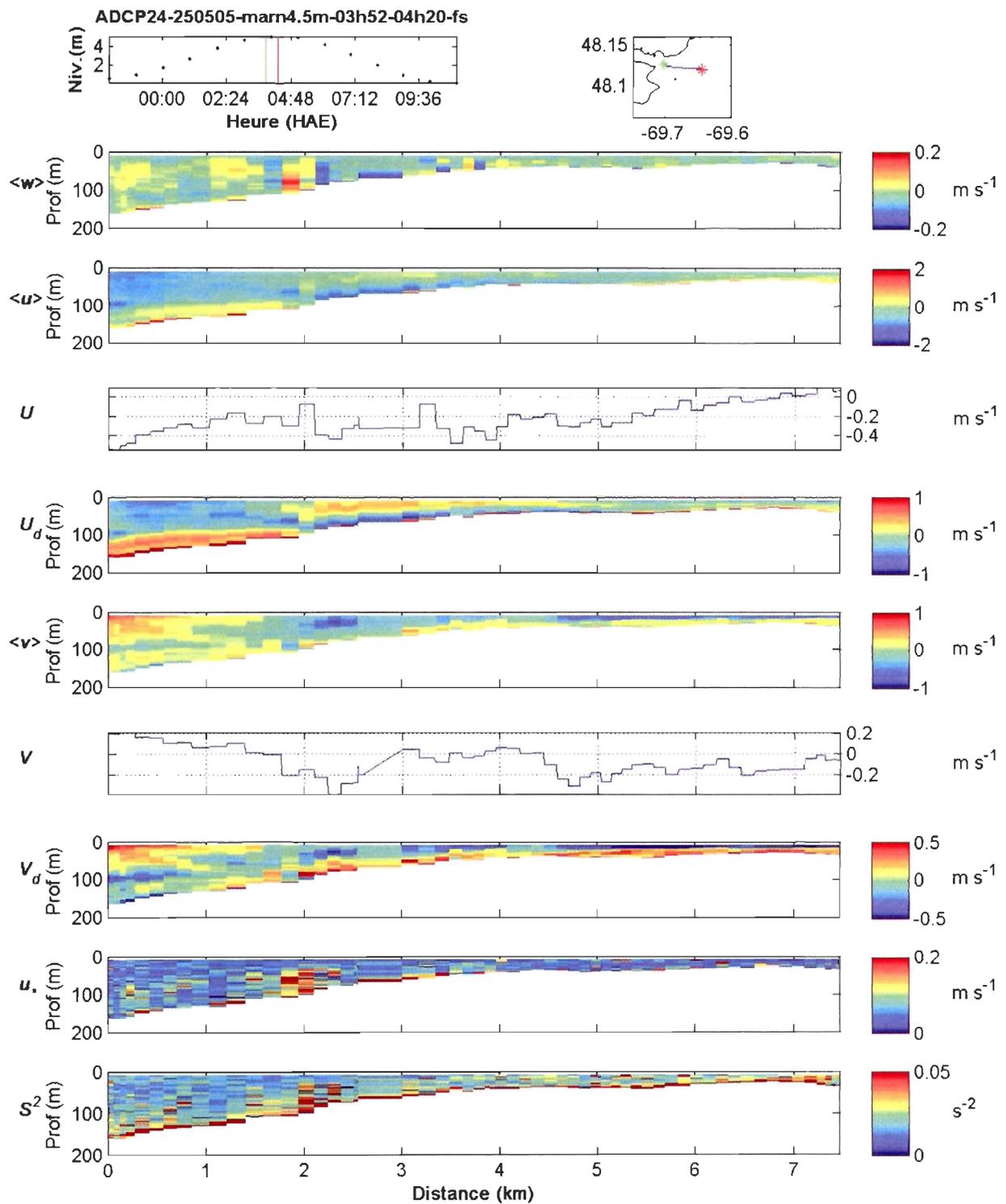


Figure 6k. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_a$ ;  $V$ ;  $V_a$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 03h52 à 04h20 le 25-05-20, trajet fjord-seuil, PM.

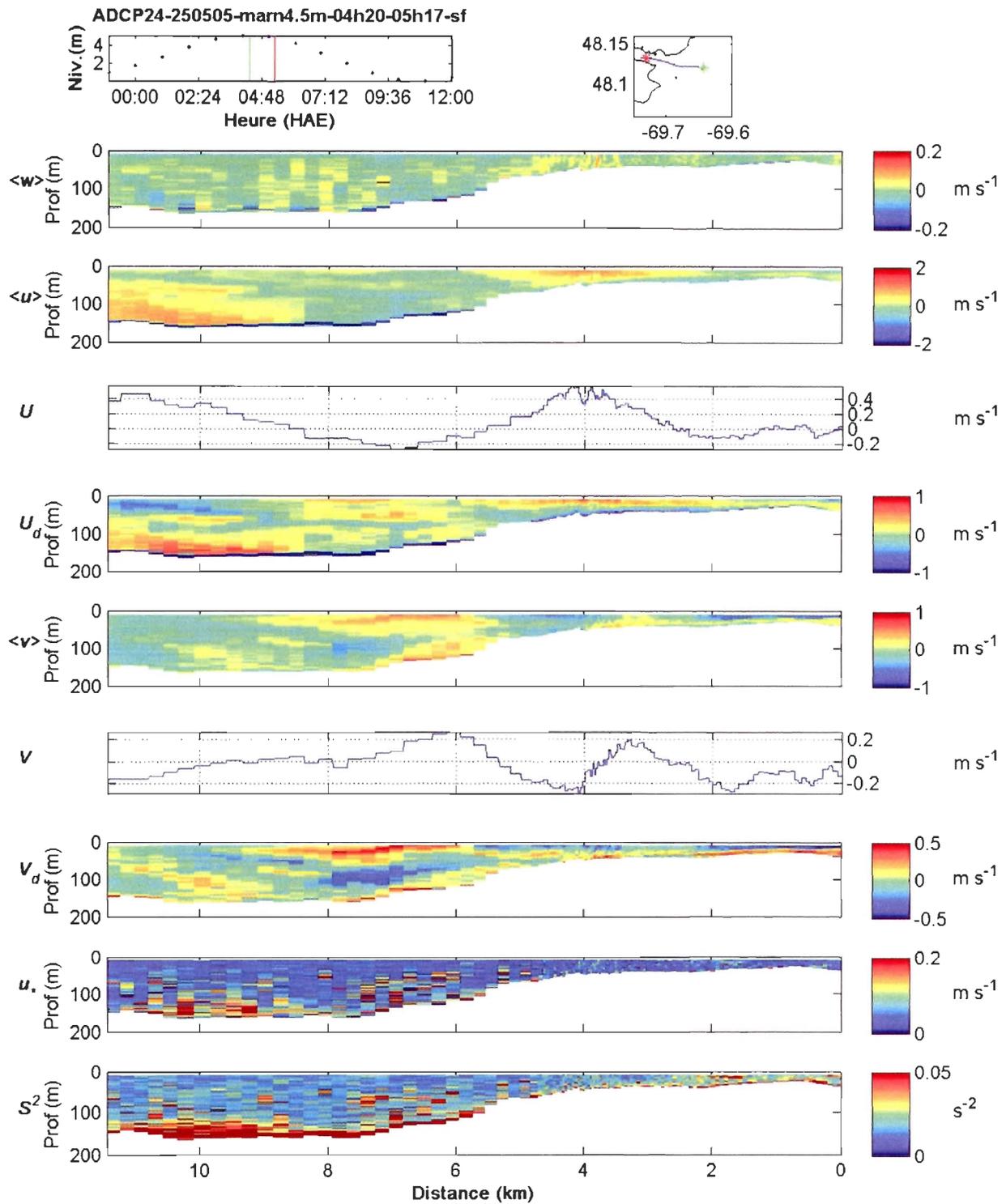


Figure 61. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $n_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 04h20 à 05h17 le 25-05-05, trajet seuil-fjord, PM à PM+1.

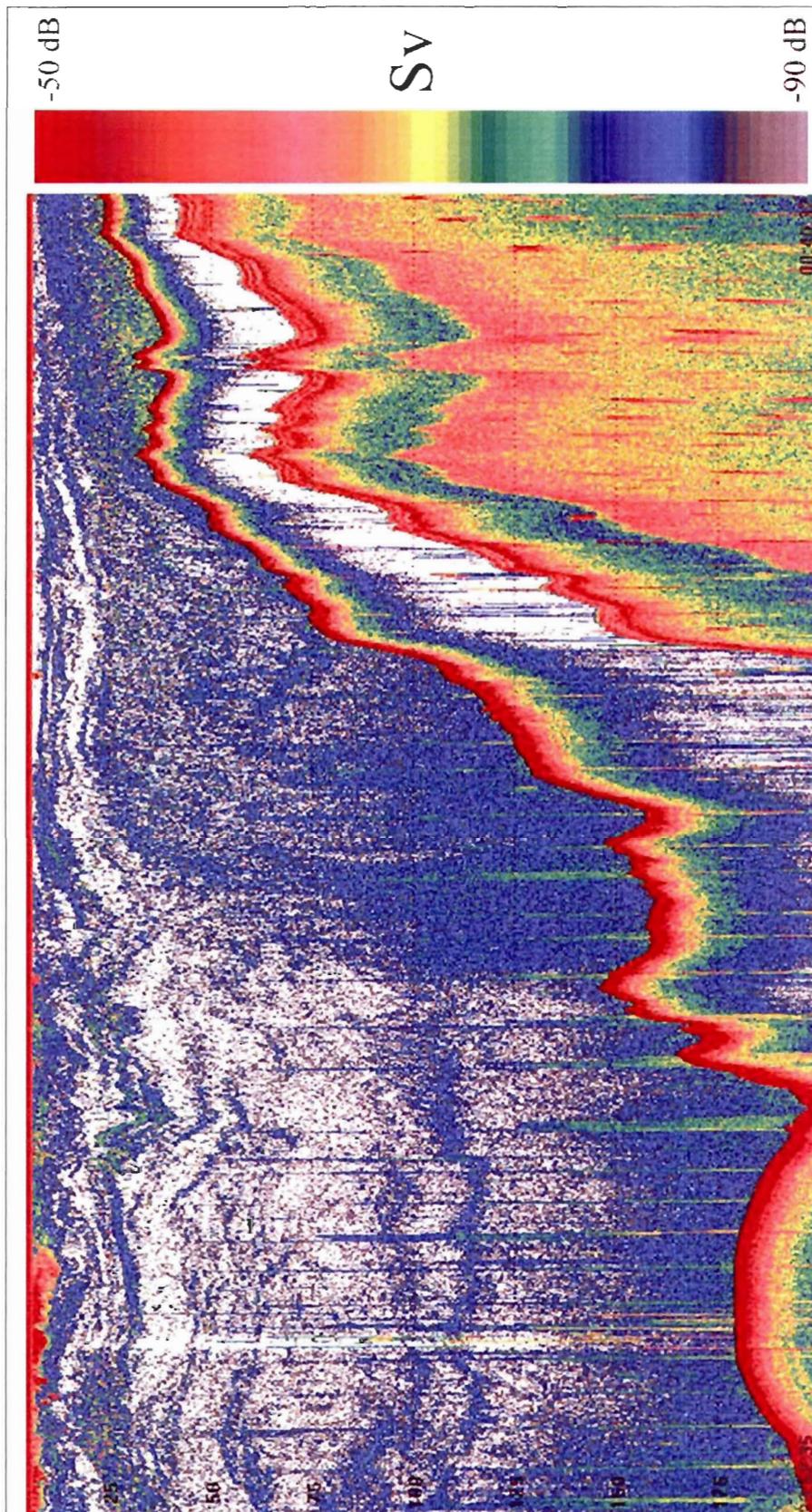


Figure 7a. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 19h52 à 20h40 le 24-05-05, BM-1 à BM.

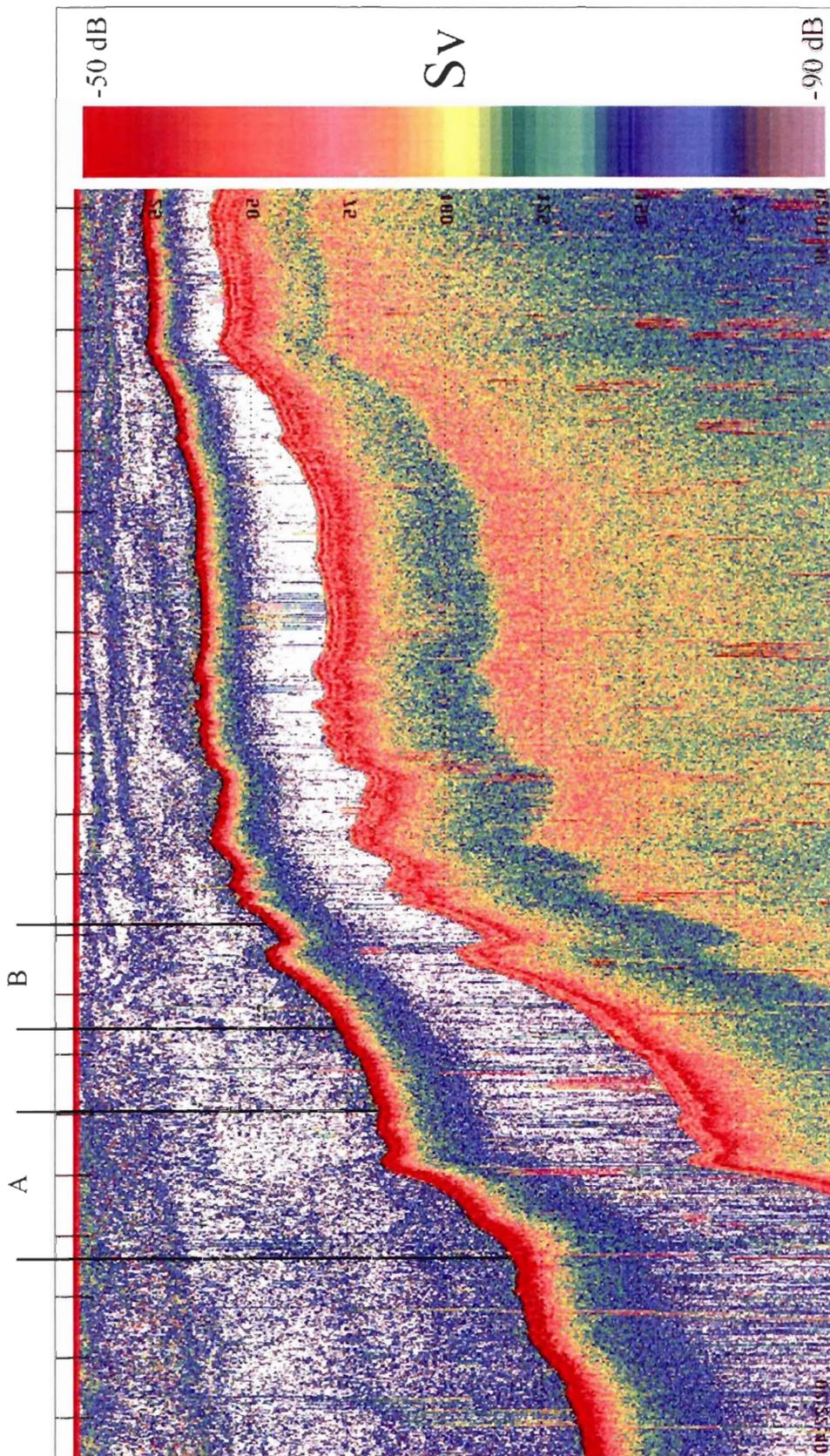


Figure 7b. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 22h01 à 22h22 le 24-05-05, BM.

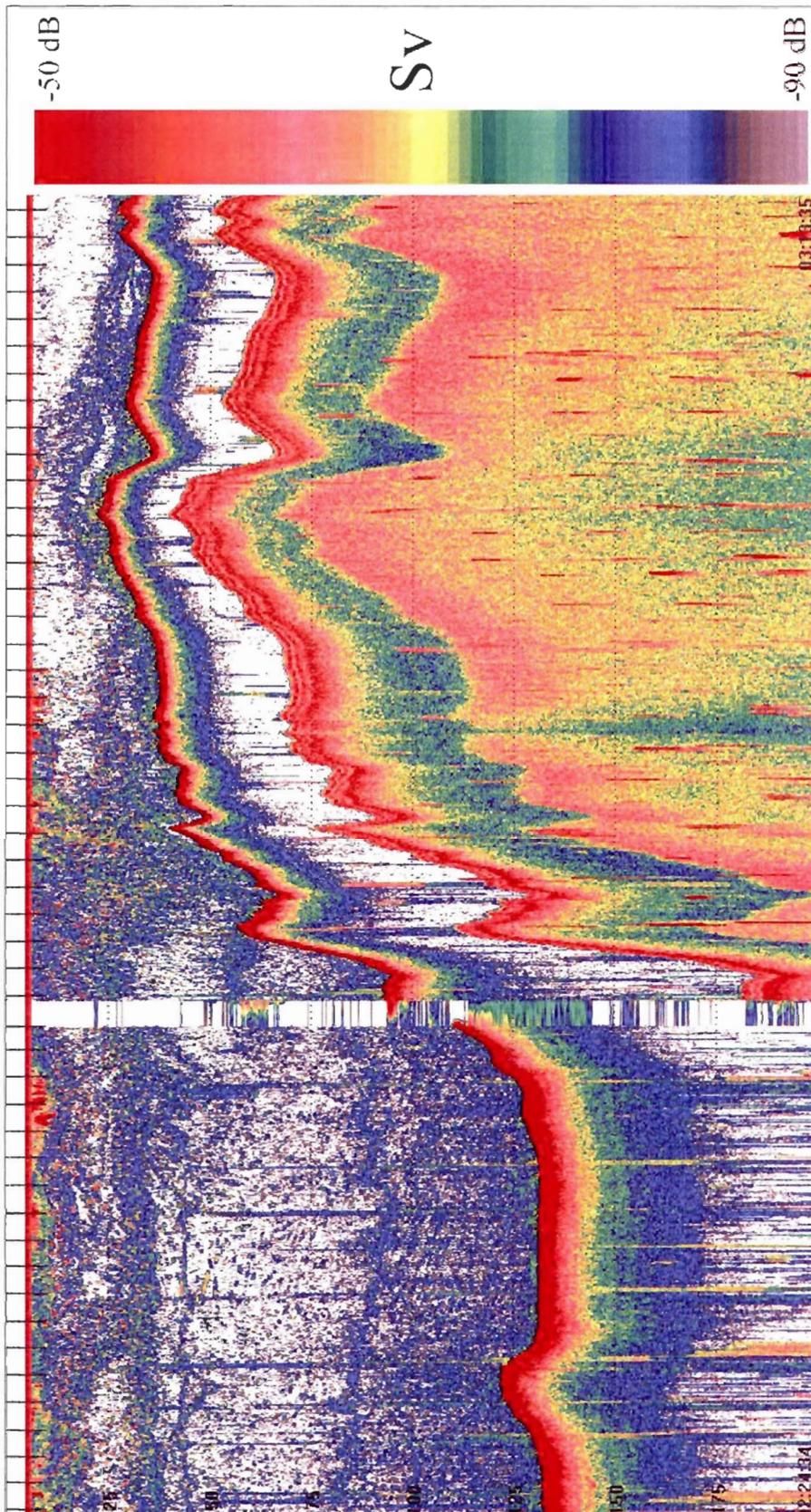


Figure 7c. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 22h22 à 23h13 le 24-05-05, BM à BM+1.

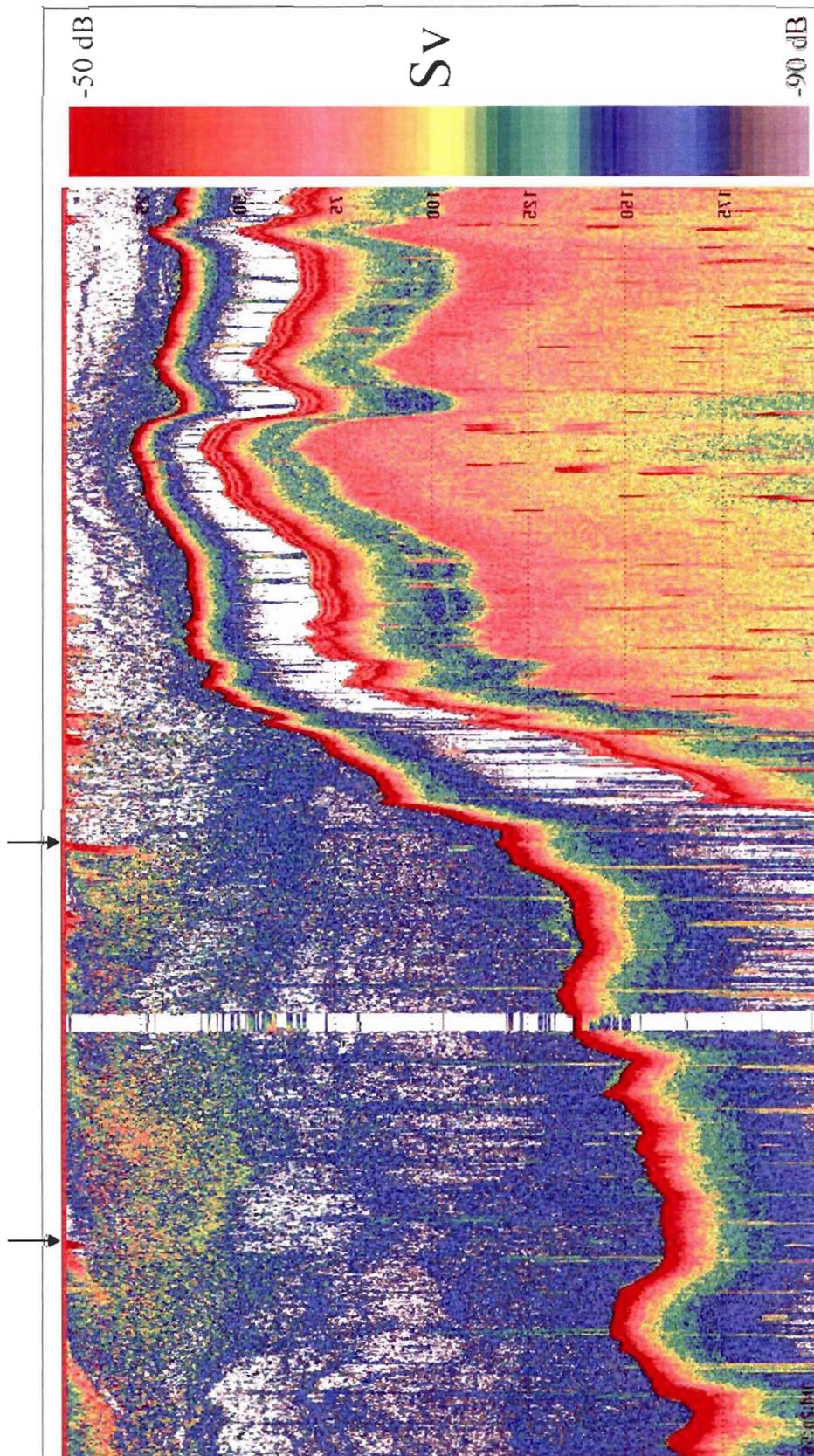


Figure 7d. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 23h13 le 24-05-2005 à 00h20 le 25-05-05, BM+1 à BM+2.

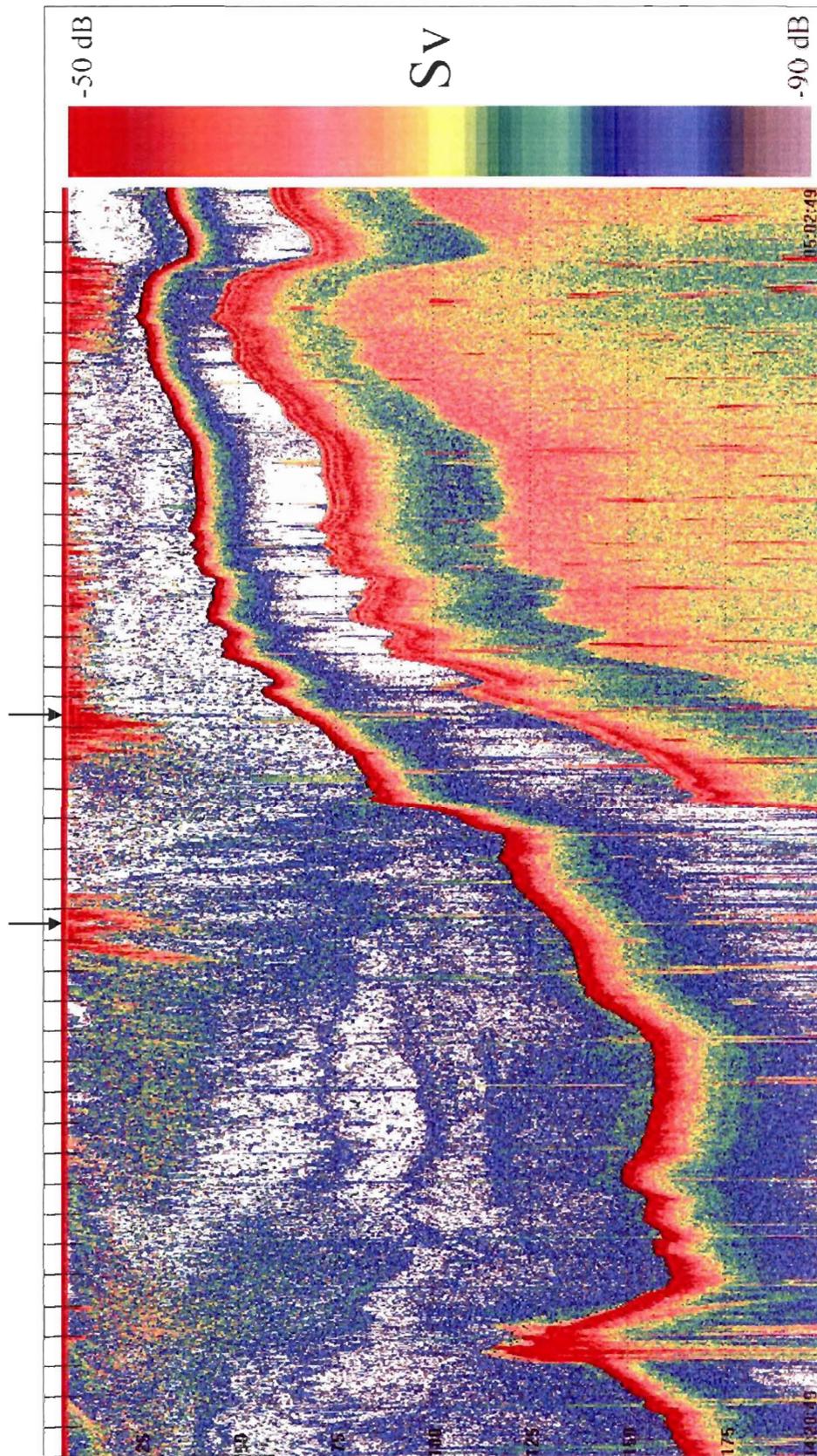


Figure 7e. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 00h20 à 01h02 le 25-05-05, BM+2 à BM+3.

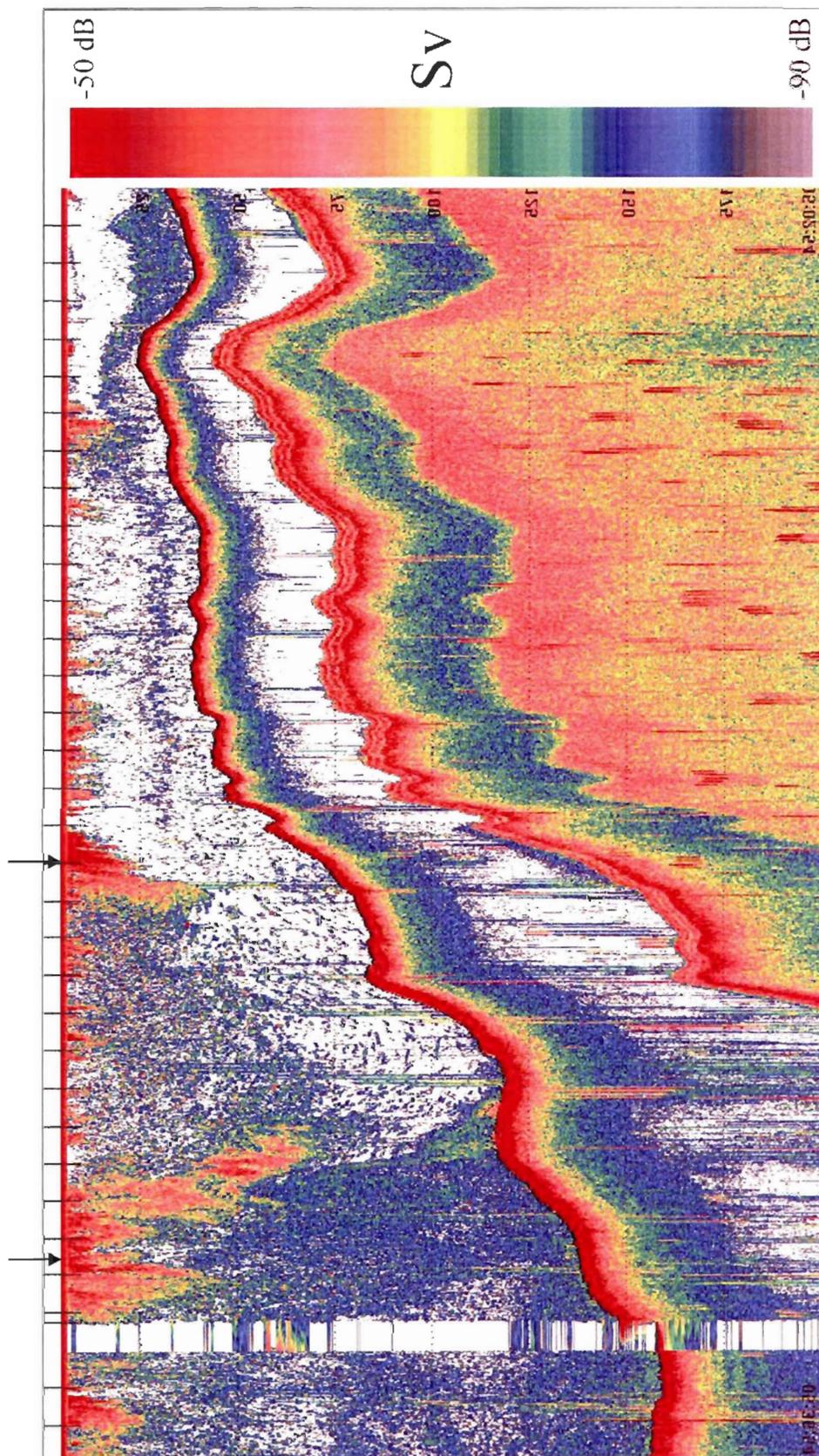


Figure 7f. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 01h02 à 01h36 le 25-05-05, PM+3 à PM-2,5.

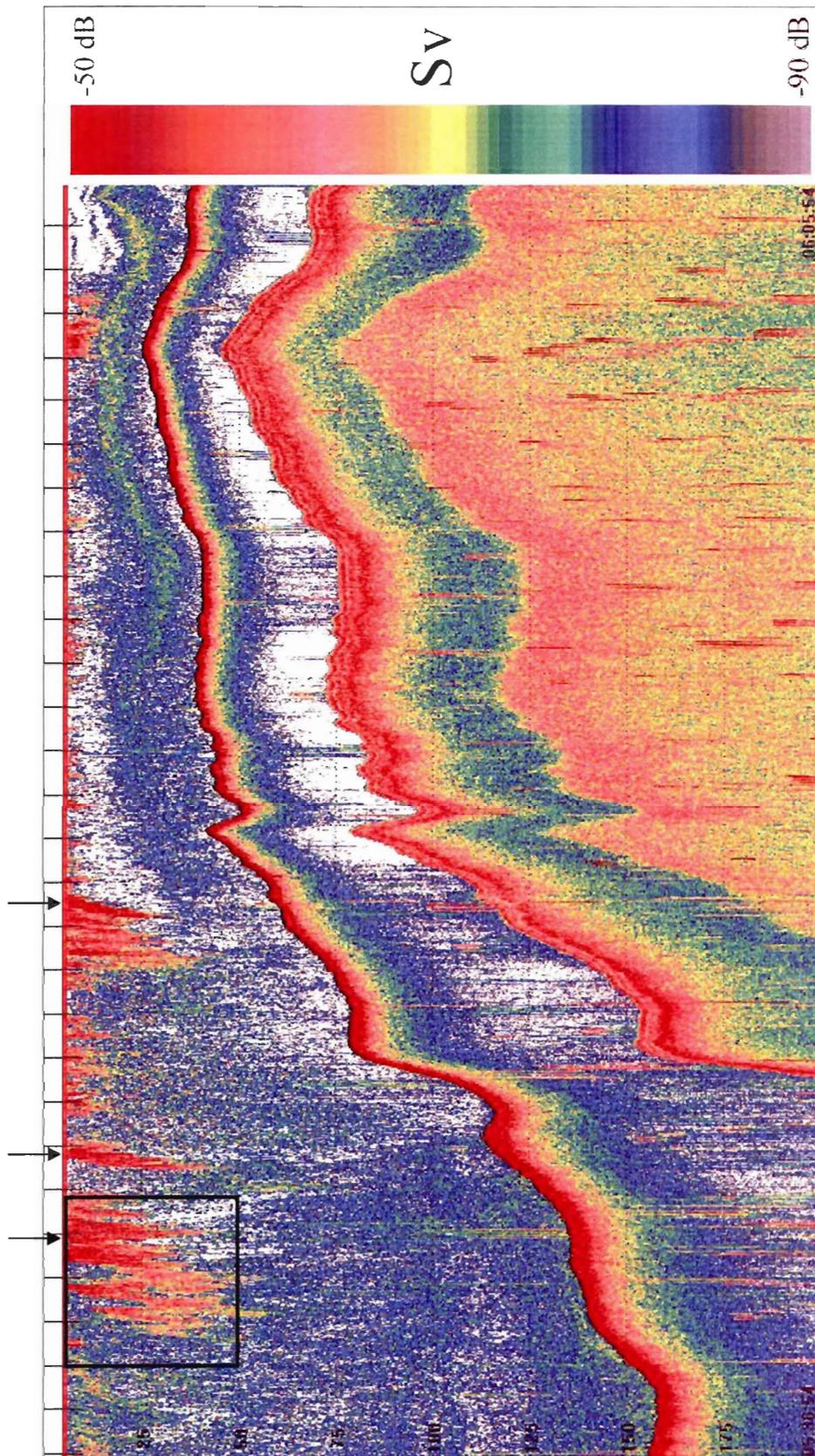


Figure 7g. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 01h36 à 02h05 le 25-05-05, PM-2,5 à PM-2.

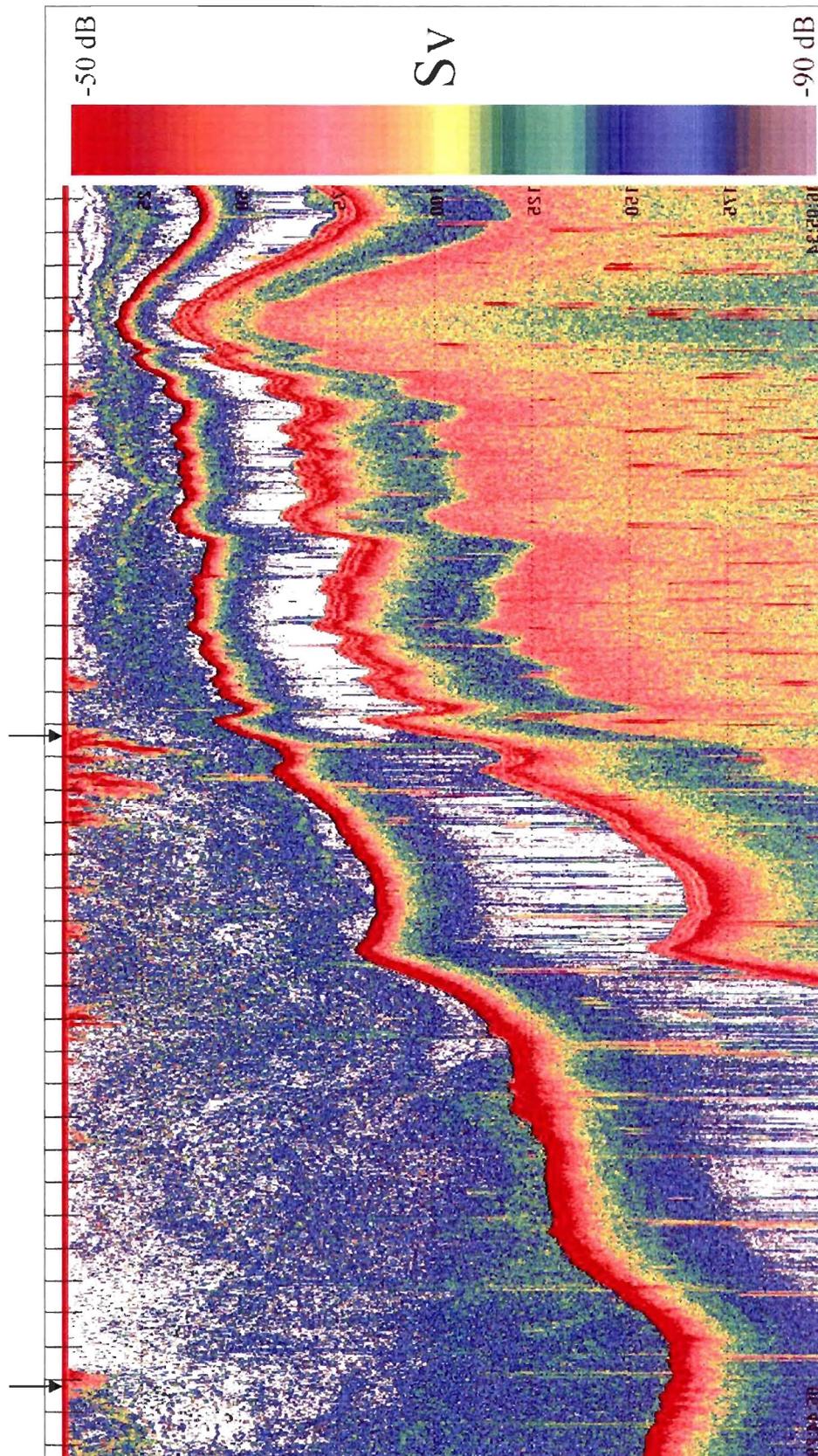


Figure 7h. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 02h05 à 02h44 le 25-05-05, PM-2 à PM-1,5.

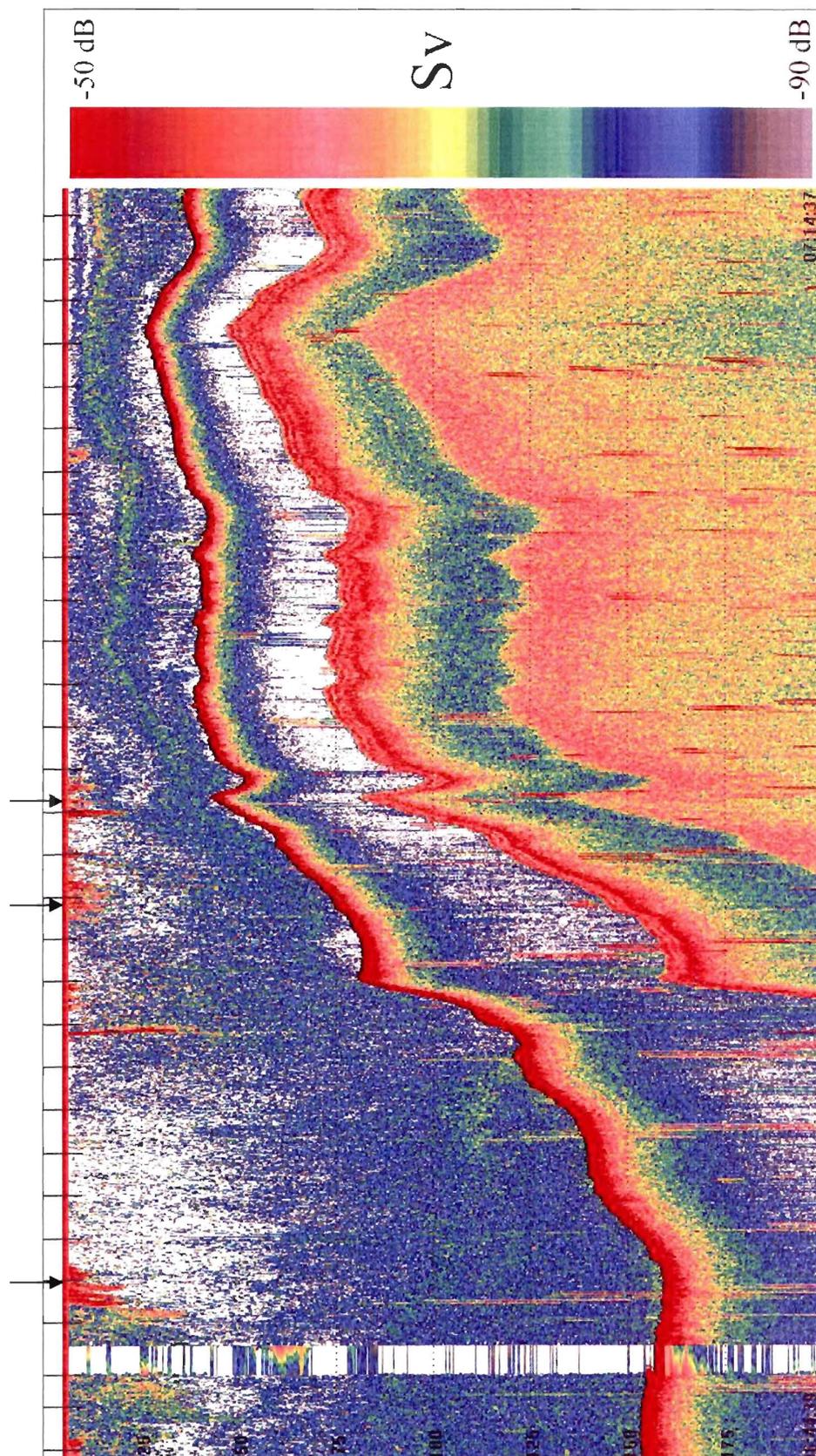


Figure 7i. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 02h44 à 03h14 le 25-05-05, PM-1,5 à PM-1.

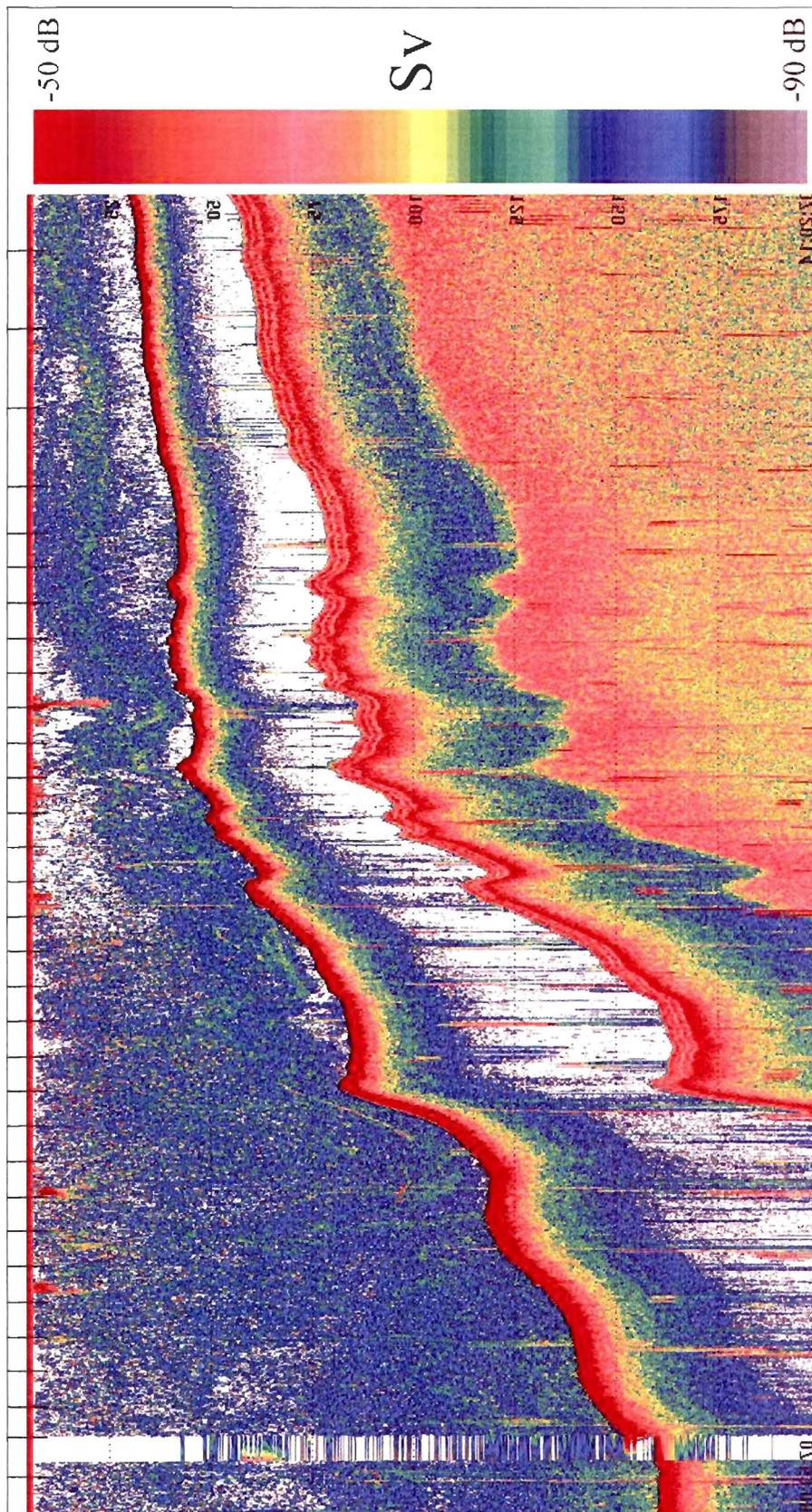


Figure 7j. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 03h14 à 03h52 le 25-05-05, PM-I à PM.

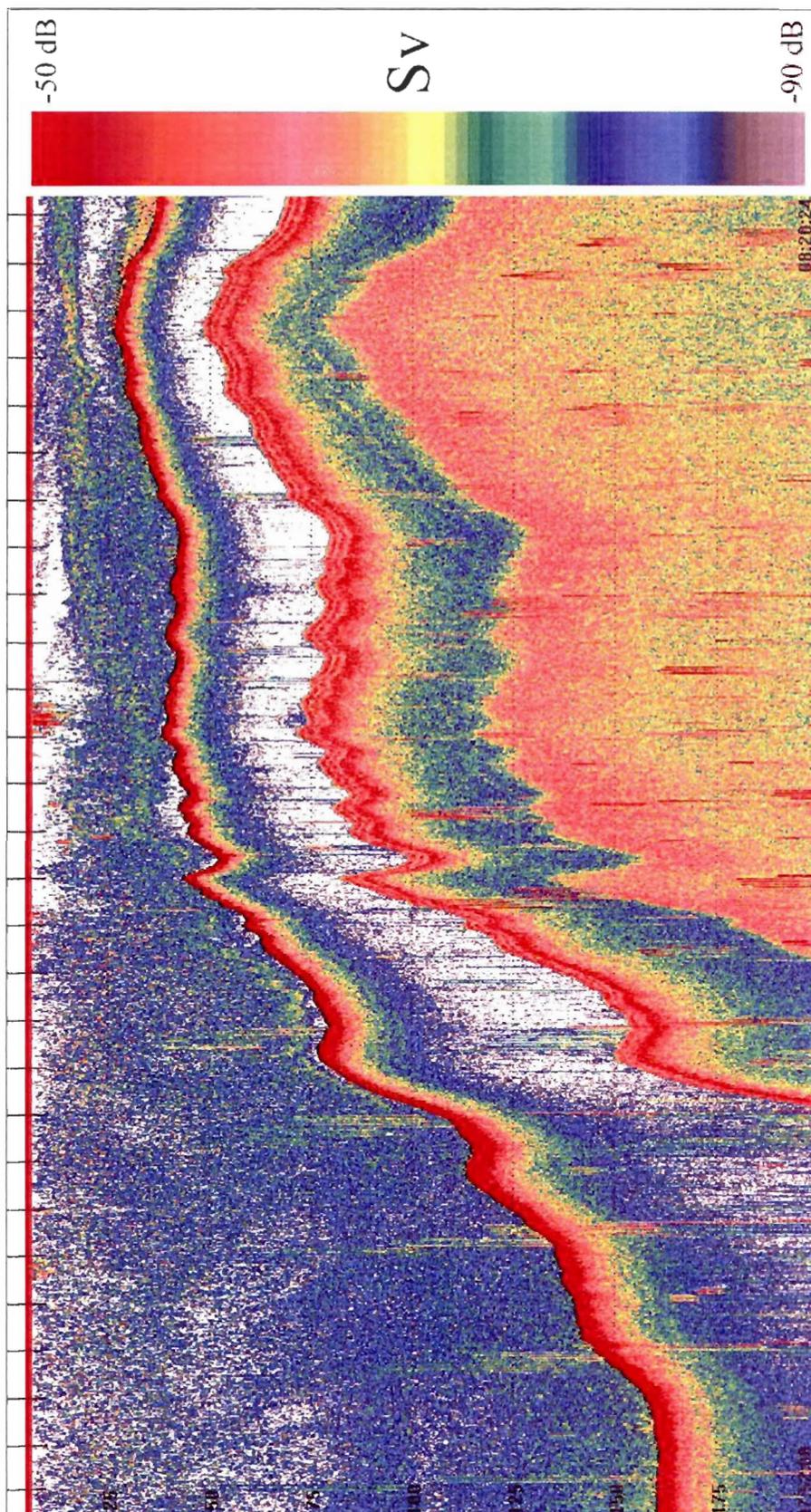


Figure 7k. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 03h52 à 04h20 le 25-05-05, PM.

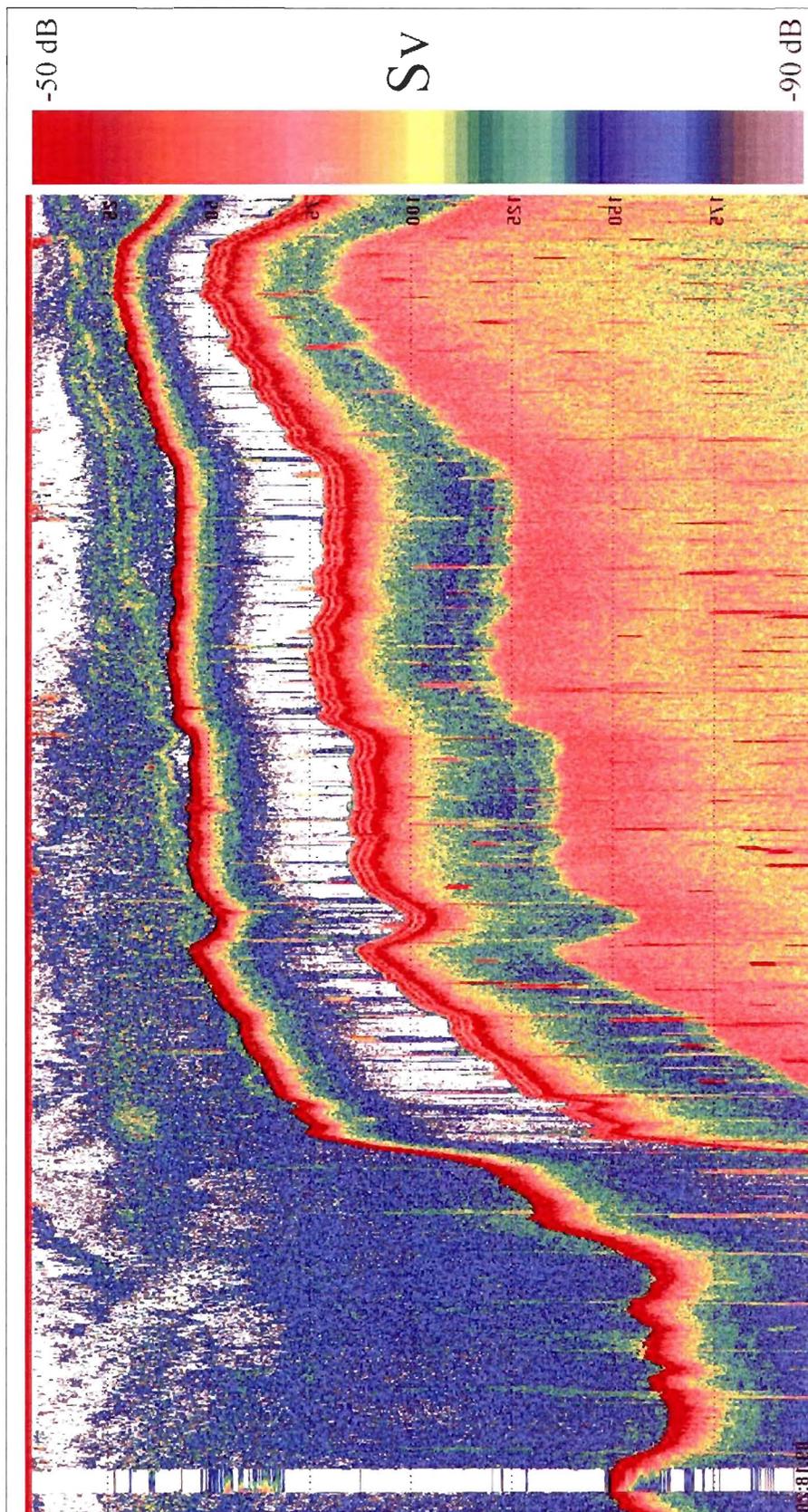


Figure 71. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 04h20 à 05h17 le 25-05-05, PM à PM+1.

### 3.1.1. Fin du jusant précédant le flot (BM-1 à BM) (figures 6a et 7a)

À la fin du jusant, le BE se caractérise par une couche de surface de 100 à 50 m d'épaisseur qui s'écoule vers l'est de  $1 \text{ m s}^{-1}$  à  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Sous cette couche,  $\bar{u}$  est près de  $0 \text{ m s}^{-1}$  sauf entre les km 4 à 6 et 6 à 8 où il passe de  $-0,7 \text{ m s}^{-1}$  (ouest) à  $0,7 \text{ m s}^{-1}$  (est). Sur le seuil et le talus (à  $\leq 100 \text{ m}$ ) la colonne d'eau se déplace vers l'aval à  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Le courant verticalement moyenné ( $U$ ) est maximum dans cette zone ( $1 \text{ m s}^{-1}$  à  $1,4 \text{ m s}^{-1}$  est).

Dans l'ensemble du BE,  $\bar{w}$  présente des valeurs de  $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$ . Les fluctuations de  $\bar{w}$  sont particulièrement marquées entre la couche de surface et celle du fond délimitées par  $\bar{u}$  et  $U_d$ . La disposition des rétrodiffuseurs révélée par l'échosondeur et l'alternance positif/négatif de  $\bar{w}$  indiquent la présence d'une onde interne d'une amplitude de 15 m, localisée à 30 m de profondeur sur l'ensemble du transect. La région de l'aval du talus et du seuil (km 10 à km 14) est l'endroit où  $\bar{w} > 0 \text{ m s}^{-1}$  est enregistré avec le plus de continuité spatiale. L'image obtenue par échosondeur montre qu'à cet endroit les eaux de surface et une partie des eaux sous-jacentes remontent à l'approche du seuil.

Dans la section talus – seuil,  $V$  est de direction nord ( $0,1 \text{ m s}^{-1}$ ) sur le seuil et de direction sud ( $-0,25 \text{ m s}^{-1}$ ) dans le haut du talus. De son côté,  $\bar{v}$  indique une succession verticale de courants nord – sud inclinée, sur la figure, d'environ  $10^\circ$ . Les valeurs maxima de  $\bar{v}$  y sont de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  vers le nord et de  $-0,3 \text{ m s}^{-1}$  vers le sud. Des km 4 à 8 du transect, sous les 100 m,  $\bar{v}$  indique une alternance directionnelle de  $-0,1 \text{ m s}^{-1}$  vers le sud (km 4 à km 6) à  $0,05 \text{ m s}^{-1}$  vers le nord (km 6 à km 8).  $V_d$  met en évidence la stratification inclinée de la composante transverse du courant, son caractère désordonné et les nettes alternances directionnelles qui y atteignent près de  $1 \text{ m s}^{-1}$ .

Les structures turbulentes mises en évidence par  $u_s$  et  $S^2$  calquent les cisaillements des composantes transverse et longitudinale. De plus, des zones de turbulence sont localisées dans la couche inférieure ( $< 120 \text{ m}$ ) ainsi qu'à l'interface entre les couches inférieures et la couche supérieure. Les régions du centre et du dessus du talus indiquent aussi des points de turbulence élevée.

### 3.1.2. Basse mer (BM) (figures 6b et 7b)

À BM,  $\bar{w}$  est près de la valeur 0, mises à part quelques oscillations verticales de  $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$  à  $\pm 0,2 \text{ m s}^{-1}$  observées dans la région du talus (figure 6b : km 3,5 à km 4 et km 4,5 à km 5). L'image d'échosondeur présente une organisation des rétrodiffuseurs suggérant la présence d'une onde interne à ces endroits (délimités par les sections A et B à la figure 7b).

En surface,  $\bar{u}$  présente une couche de 35 m (amont) à 25 m d'épaisseur (aval) qui s'écoule à une vitesse de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  à  $1 \text{ m s}^{-1}$  vers l'est. Sous celle-ci,  $\bar{u}$  tend vers  $0 \text{ m s}^{-1}$  mais atteint près de  $-1 \text{ m s}^{-1}$  (ouest) le long du talus. La planche  $U_d$  montre que ce cisaillement est davantage prononcé dans la moitié supérieure du talus. L'image de l'échosondeur révèle un changement dans la concentration de rétrodiffuseurs à l'interface entre ces deux couches, qui peuvent être associés à la pycnocline.

Du seuil au milieu du talus,  $\bar{v}$  est à  $-0,5 \text{ m s}^{-1}$  (sud) de la surface jusqu'à 50 m et à  $0,3 \text{ m s}^{-1}$  (nord) sous les 50 m. Sur le talus,  $\bar{v}$  se caractérise par une succession verticale oblique de couches en alternance nord – sud – nord de la surface au fond. Cet étagement oblique de la composante transverse n'est pas sans rappeler la configuration décrite dans le BE pour BM-1 à BM (point 3.1.). Ce patron directionnel est clairement mis en évidence par  $V_d$ . Dans l'ensemble,  $V$  est de direction sud (maxima près de  $-0,2 \text{ m s}^{-1}$ ) mais diminue à  $0 \text{ m s}^{-1}$  dans le haut du talus. De manière générale, le patron d'étagement vertical des alternances directionnelles est similaire entre les composantes longitudinale et transverse du courant.

$u_*$  et  $S^2$  indiquent que la turbulence la plus intense se situe sous les 25 m dans la région du talus. Les zones de turbulence élevée correspondent à la combinaison des pics de vitesse enregistrés pour  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  et  $\bar{w}$ . Quelques traces de turbulence, plus faibles, concordent avec les zones de friction issues des cisaillements longitudinal et transverse révélés par  $U_d$  et  $V_d$ .

### 3.1.3. Première heure du flot (BM à BM+1) (figures 6c et 7c)

De BM à BM+1, le courant longitudinal est verticalement uniforme sur le seuil et jusque dans le haut du talus (km 3,5). À cet endroit,  $U$  diminue radicalement à  $0 \text{ m s}^{-1}$  et on y enregistre les variations les plus importantes de  $\bar{w}$  : de  $-1 \text{ m s}^{-1}$  à  $1 \text{ m s}^{-1}$  sur une distance de moins de 0,5 km. À partir de ce point,  $\bar{u}$  indique le prolongement du courant intrusif vers l'amont à 50 m de profondeur. Au-dessus et au dessous de ce dernier, les couches de surface et du fond sont toutes deux de direction est à  $0,05 \text{ m s}^{-1}$ . Il se produit donc une subduction du courant intrusif sous le courant de surface du BE. De plus, les rétrodiffuseurs en suspension à 45 m de profondeur indiquent le déferlement d'ondes internes dans la zone de subduction du courant intrusif. Le courant intrusif occuperait alors l'intégralité de la colonne d'eau sur le seuil, bloquant l'écoulement de surface du fjord. Ainsi se forme le front tidal entre la masse d'eau intrusive et l'eau de surface du fjord.

La composante latérale du courant indique un étagement vertical des directions semblable à celui décrit précédemment (point 3.2.). L'illustration de  $V_d$  rend évidente cette alternance verticale sur

le seuil et dans le BE : l'écart de vitesse directionnelle entre les courants est de l'ordre de  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Quant à  $V$ , il est de  $-0,4 \text{ m s}^{-1}$  (sud) dans la partie aval du seuil, de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  (nord) dans le haut du talus et  $-0,2 \text{ m s}^{-1}$  (sud) dans le reste du BE.

Les secteurs indiquant la présence intense de friction et de cisaillement sont localisés dans la moitié aval de la pente. De plus,  $u_*$  et  $S^2$  montrent une forte intensité de turbulence sur le seuil.

#### 3.1.4. Deuxième heure du flot (BM+1 à BM+2) (figures 6d et 7d)

Sur le seuil et jusqu'au haut du talus (km 7), le courant longitudinal vers l'ouest est tout à fait verticalement uniforme. Immédiatement en amont du haut du talus,  $\bar{w}$  passe de  $-0,1 \text{ m s}^{-1}$  à  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  sur l'intégralité de la colonne d'eau. Une alternance semblable, mais de plus faible ampleur, est aussi présente dans les 50 m de surface au km 10 du transect. Ces mouvements correspondent aux zones de changement de profondeur du courant intrusif (planche  $\bar{u}$ ). D'ailleurs, l'échosondeur révèle l'entraînement de rétrodiffuseurs jusqu'à 25 m de profondeur en ces endroits. Sous le courant intrusif, la masse du fond (entre 50 et 100 m de profondeur) se dirige vers l'est jusqu'à atteindre  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  à son extrémité aval (sur le talus, à l'interface avec le courant intrusif de direction ouest). Ce point correspond aussi au maximum ascendant de  $\bar{w}$ .

Sur le seuil,  $\bar{v}$  est d'environ  $-0,5 \text{ m s}^{-1}$  pour les 15 premiers mètres de la surface avec une tendance vers  $0 \text{ m s}^{-1}$  près du fond. À partir de la zone du talus, et pour le reste du BE, la distribution des vitesses directionnelles de la composante latérale du courant est formée de vastes couches d'alternances nord – sud, superposés les unes aux autres. Malgré cela,  $V$  indique que la moitié aval du transect est de tendance sud, alors que la partie amont est orientée au nord.

Les paramètres de  $u_*$  et  $S^2$  indiquent que le milieu du talus (km 8 du transect) est l'endroit le plus turbulent de l'ensemble. De plus,  $S^2$  révèle la présence, dans les 4 kilomètres amont du transect et sous les 120 m de profondeur, d'une nappe uniforme caractérisée par un cisaillement à  $0,05 \text{ s}^{-2}$ . Ce phénomène avait aussi été observé au même endroit de BM-1 à BM (point 3.1.).

#### 3.1.5. Troisième heure du flot (BM+2 à BM+3) (figures 6e et 7e)

La composante longitudinale de l'intrusion est verticalement uniforme ( $-1 \text{ m s}^{-1}$  à  $-2 \text{ m s}^{-1}$ ) sur le seuil. Dans le haut du talus, il y a subduction du courant intrusif sous les eaux de surface en place (front tidal) et  $\bar{w}$  atteint  $-0,2 \text{ m s}^{-1}$ . À cet endroit, l'image de l'échosondeur révèle la présence d'amas de forts rétrodiffuseurs ( $Sv > -50 \text{ dB}$ ) liés à la surface, vraisemblablement attribuables à des bulles d'air,

entraînées à plus de 25 m de profondeur. Sur le talus,  $\bar{u}$  indique que le courant intrusif forme un courant gravitaire jusqu'à 90 m, profondeur à laquelle il se décroche de la pente. C'est alors que  $\bar{w}$  est ascendant à  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  sur la quasi-totalité de la colonne d'eau. Le courant intrusif rejoint ainsi la surface, isolant par le fait même une lentille d'eau de surface (planche  $U_d$ , km 7,5 à km 8). Cette ondulation du courant intrusif se répète au km 6 du transect : une seconde subduction sous la couche de surface du fjord se produit (second front tidal). Cette fois, l'échosondeur montre que l'entraînement de bulles d'air atteint 40 m de profondeur. Au-delà du 6<sup>e</sup> kilomètre du transect vers l'amont,  $\bar{u}$  se maintient à une vitesse de  $-1 \text{ m s}^{-1}$  jusqu'à 100 m de profondeur. Sous les 100 m,  $\bar{u}$  indique la présence d'un courant en sens opposé (est) qui atteint  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  à l'extrémité aval du BE. La planche  $U_d$  montre que cette nappe s'imisce sous l'ondulation du courant principal, dans le milieu du talus (profondeur 100 m), exactement à l'endroit où  $\bar{w}$  est à son maximum ascendant.

Concernant la composante transverse du courant, elle passe de verticalement uniforme en direction sud ( $-0,6 \text{ m s}^{-1}$ ) sur le seuil, à verticalement non uniforme dans la moitié supérieure du talus. Au milieu de la pente,  $V$  est presque entièrement dirigée vers le nord ( $0,4 \text{ m s}^{-1}$ ). En amont de cette zone (km 5 au km 2)  $V_d$  montre une succession verticale des vitesses directionnelles sud - nord. Malgré cette complexité le courant latéral moyen ( $V$ ) est dirigée vers le sud dans cette partie du BE.

Les zones révélant les indices de turbulence  $u_e$  et  $S^2$  les plus élevés se trouvent sur le talus, entre les km 6 et 8, ainsi qu'entre 50 m et 125 m de profondeur près du km 2 du transect. En outre,  $S^2$  révèle la présence, sous les 120 m de profondeur, d'une nappe uniforme de cisaillement à  $0,05 \text{ s}^{-2}$ . Cela avait été observé de BM-1 à BM (point 3.1.) et de BM+1 à BM+2 (point 3.4.).

### 3.1.6. Quatrième heure du flot (BM+3 à PM-2) (figures 6f, 6g, 7f et 7g)

Le portrait général de la circulation et de la turbulence de BM+3 à PM-2 est semblable à celui de l'heure précédente. L'évolution la plus notable concerne l'intensification des phénomènes décrits précédemment. En effet, la profondeur maximale atteinte sur le talus par le courant gravitationnel atteint 115 m et  $\bar{u}$  indique que le courant intrusif se maintient à près de  $-2 \text{ m s}^{-1}$  sur l'ensemble du transect tout au long de l'heure. Le paramètre  $U_d$  met en évidence l'ondulation du courant principal et l'isolement de la lentille d'eau de surface (30 m de profondeur par 1,5 km de longueur) que cette trajectoire provoque. Le mouvement ondulatoire de l'intrusion est notable par les alternances ascendantes / descendantes de  $\bar{w}$ . D'intenses indices de rétrodiffusion, vraisemblablement attribuables à des bulles d'air, sont entraînés à un minimum de 40 m de profondeur à chaque subduction du courant

intrusif sous la couche de surface (figure 7e et 7f). L'encart à la figure 7g, met en évidence le déferlement d'ondes de Kelvin-Helmholtz occasionné par la seconde subduction du courant intrusif ondulatoire. Enfin, lorsque comparée autres sous-figures de la figure 7, la position de la première subduction est observée à sa position amont maximale à la fin de cette 4<sup>e</sup> heure (figure 7g).

En ce qui concerne la composante latérale du courant, la planche  $V$  indique qu'elle est de direction sud sur le seuil jusqu'au milieu du talus et de tendance nord de ce point vers l'amont.  $V_d$  montre l'organisation stratifiée de la composante transversale du courant dans la région du talus.

Les valeurs les plus élevées de  $u_x$  et de  $S^2$  sont réparties du haut du talus à la zone la plus profonde du transect. De plus, l'indice de turbulence  $S^2$  est aussi maximal entre 100 m et 150 m à l'extrémité amont du transect. Cette zone présente une valeur de  $S^2$  identique à celles enregistrées de BM-1 à BM (point 3.1.), de BM+1 à BM+2 (point 3.4.) et de BM+2 à BM+3 (point 3.5.).

### 3.1.7. Cinquième heure du flot (PM-2 à PM-1) (figures 6h, 6i, 7h et 7i)

De PM-2 à PM-1, les structures et les courants sont semblables à ceux décrits pour BM+3 à PM-2 (point précédent). Dans l'axe du fjord, les évolutions notables sont : 1) la diminution graduelle de la vitesse du courant intrusif; 2) le déplacement vers l'aval de la zone du premier front tidal; 3) la réduction de la profondeur maximale d'entraînement des rétrodiffuseurs de forte intensité (bulles d'air) à partir de la surface.

Le principal changement qui s'opère à cette période concerne l'organisation bien définie de la composante latérale du courant en amont du centre du talus ( $> \text{km } 6$  sur figure 6h et  $< \text{km } 1,5$  sur figure 6i). En effet, la composante latérale du courant s'y trouve maintenant à  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  (nord) dans les premiers 80 m et à  $-0,5 \text{ m s}^{-1}$  (sud) sous les 100 m. Simultanément,  $V$  conserve une tendance générale vers le sud du seuil au haut du talus et une tendance vers le nord en amont du centre du talus. En somme, la direction du courant dans le BE est ouest – nord – ouest dans la partie supérieure de la colonne d'eau et sud – est dans la partie inférieure.

Une fois de plus, les valeurs de  $u_x$  et de  $S^2$  les plus élevées se trouvent au haut ainsi qu'au centre du talus. Enfin, la région du fond du BE (extrémité amont du transect) se caractérise encore par la valeur élevée de  $S^2$  ( $0,05 \text{ s}^{-2}$ ).

### 3.1.8. Sixième heure du flot (PM-1 à PM) (figures 6j et 7j)

À la sixième heure du flot, l'image de l'échosondeur et la planche  $U_d$  montrent que le premier front tidal est davantage déporté vers l'aval qu'à l'heure précédente. Cela concorde avec la diminution

de vitesse du courant intrusif par rapport à la séquence antérieure ( $\bar{u}$  n'excède plus  $-1,5 \text{ m s}^{-1}$ ). En surface, cela permet le relâchement vers l'aval de la structure lenticulaire de surface ( $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ). Cependant, malgré la diminution de vitesse de la composante longitudinale du courant,  $\bar{w}$  demeure à  $-0,2 \text{ m s}^{-1}$  dans le haut du talus et le courant gravitationnel atteint encore 115 m.

Vers le milieu du talus, la composante latérale varie de manière significative tant longitudinalement que verticalement. À cet endroit correspond un fort signal de turbulence révélé à la fois par  $u_*$  et  $S^2$  ( $\sim \text{km } 6,5$ ). D'autre part,  $V$  indique la constance de l'opposition directionnelle de la composante transversale du courant : nord dans le BE et sud dans la partie aval du talus et sur le SE.

### 3.1.9. Pleine mer (PM) (figures 6k et 7k)

En période de pleine mer,  $\bar{u}$  est légèrement supérieur à  $0 \text{ m s}^{-1}$  (est) à partir dans la moitié supérieure de la colonne d'eau au milieu du talus, et sur le seuil,  $U$  est de direction est ( $0,1 \text{ m s}^{-1}$ ). Cela indique que de la lentille d'eau de surface, isolée par le courant intrusif ondulatoire, est maintenant libérée vers l'ESL. La composante longitudinale du courant est verticalement non uniforme sur le seuil et les rétrodiffuseurs entre 12 m et 15 m de profondeur (figure 7k) illustrent le cisaillement déjà en cours entre les eaux de surface (direction est) et sous-jacentes (direction ouest). Par contre, à partir du milieu du talus vers l'amont,  $\bar{u}$  atteint  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  vers l'est dans les 50 m du fond et les 90 m supérieurs se dirigent vers l'ouest entre  $-0,5 \text{ m s}^{-1}$  et  $-1,0 \text{ m s}^{-1}$ .

Concernant la composante transverse du courant,  $V$  indique le maintien de l'organisation nord / sud de part et d'autre du milieu du talus. Aussi, hormis les 100 m inférieurs de la moitié ouest du talus, la concordance persiste entre les patrons de distribution des composantes longitudinale et transverse : lorsque  $\bar{u}$  est orienté à l'est,  $\bar{v}$  se dirige vers le nord, et *vice versa*.

L'endroit le plus turbulent révélé par  $u_*$  et  $S^2$  se trouve entre 20 m et 100 m de profondeur, sur une distance de 0,5 km, dans le centre du talus ( $\sim \text{km } 2$ ).

### 3.1.10. Début du jusant suivant (PM à PM+1) (figures 6l et 7l)

Au début du jusant, la structure lenticulaire de surface est expulsée vers l'ESL à la vitesse de  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Sur le seuil, une couche oblique de rétrodiffuseurs (figure 7l) marque la séparation entre les eaux de surface du fjord, dirigées vers l'aval, et les eaux sous-jacentes, plutôt immobiles (figure 6l).

En ce qui concerne la composante latérale du courant,  $V$  permet de constater la persistance de la circulation nord / sud entre la région du talus et la partie aval du BE. La portion aval du seuil est

caractérisée par un courant verticalement non uniforme : la partie supérieure de la colonne d'eau se dirige au sud ( $-0,5 \text{ m s}^{-1}$ ) et la partie inférieure est de direction nord ( $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ).

Le principal secteur turbulent ne se trouve plus au milieu du talus, comme lors des autres passages, mais dans sa partie inférieure et sous les 75 m de profondeur dans le BE. Tel qu'observé au cours des stades précédents, la valeur la plus élevée de  $S^2$  ( $0,05 \text{ s}^{-2}$ ) se trouve sous les 120 m.

### 3.2. Paramètres courantologiques propres aux marnages inférieurs

La figure 8 présente les mêmes paramètres que ceux de la figure 6 pour un marnage de 2 m de BM+3 à PM-2,25 (période d'échantillonnage no. 6, le 25-09-05) et la figure 9 la distribution correspondante réalisée par échosondeur.

En période de morte-eau, les structures sont en tout point semblables à celles observées en période de vive-eau :

- 1) courant longitudinal verticalement uniforme sur le seuil et verticalement non uniforme dans le BE;
- 2) isolation d'une lentille d'eau de surface, formation de fronts tidaux, déferlement d'ondes de Kelvin-Helmholtz entre les couches et formation de zones de forte rétrodiffusion dans la région de subduction et de cisaillement, qui semblent vraisemblablement être des rideaux de bulles induits par la plongée du courant intrusif;
- 3) remontée des eaux de la couche profonde du BE vers les 100 m de profondeur sur le talus;
- 4) prépondérance des maxima de turbulence  $u_*$  et  $S^2$  dans les zones du milieu du talus et du fond du BE.

Cependant, les vitesses maximales associées à la période de morte-eau sont moindres de moitié à tous les égards. Le principal exemple est la vitesse maximale du courant longitudinal qui n'atteint que  $-1 \text{ m s}^{-1}$  (planche  $\bar{u}$ ). Le maximum de profondeur atteint par le courant intrusif, qui n'excède pas 80 m de profondeur, constitue une seconde différence majeure entre la morte-eau et les marnages supérieurs. Une autre distinction en période de morte-eau est la distribution des valeurs élevées pour les paramètres  $u_*$  et  $S^2$ . [Il est important de noter que la valeur maximale de l'échelle  $S^2$  est le double de celle utilisée pour les marnages de vive-eau (et intermédiaires), *i.e.*  $0,1 \text{ s}^{-2}$  au lieu de  $0,05 \text{ s}^{-2}$ . Cela est rendu nécessaire par la saturation provoquée par le maintien d'une échelle à  $0,05 \text{ s}^{-2}$ .] Les valeurs élevées de turbulence tendent à occuper l'ensemble de la partie inférieure de la colonne d'eau dans le BE en

période de morte-eau (à partir de 50 m). Ainsi, au fond du BE, la masse d'eau en place affiche uniformément des valeurs de turbulence maximales et  $S^2$  y est uniformément de  $0,1 \text{ s}^{-2}$ . Dans la couche profonde du BE, les paramètres de turbulence sont élevés pour les deux échantillonnages en période de morte-eau (échantillonnages no. 6 et 7).

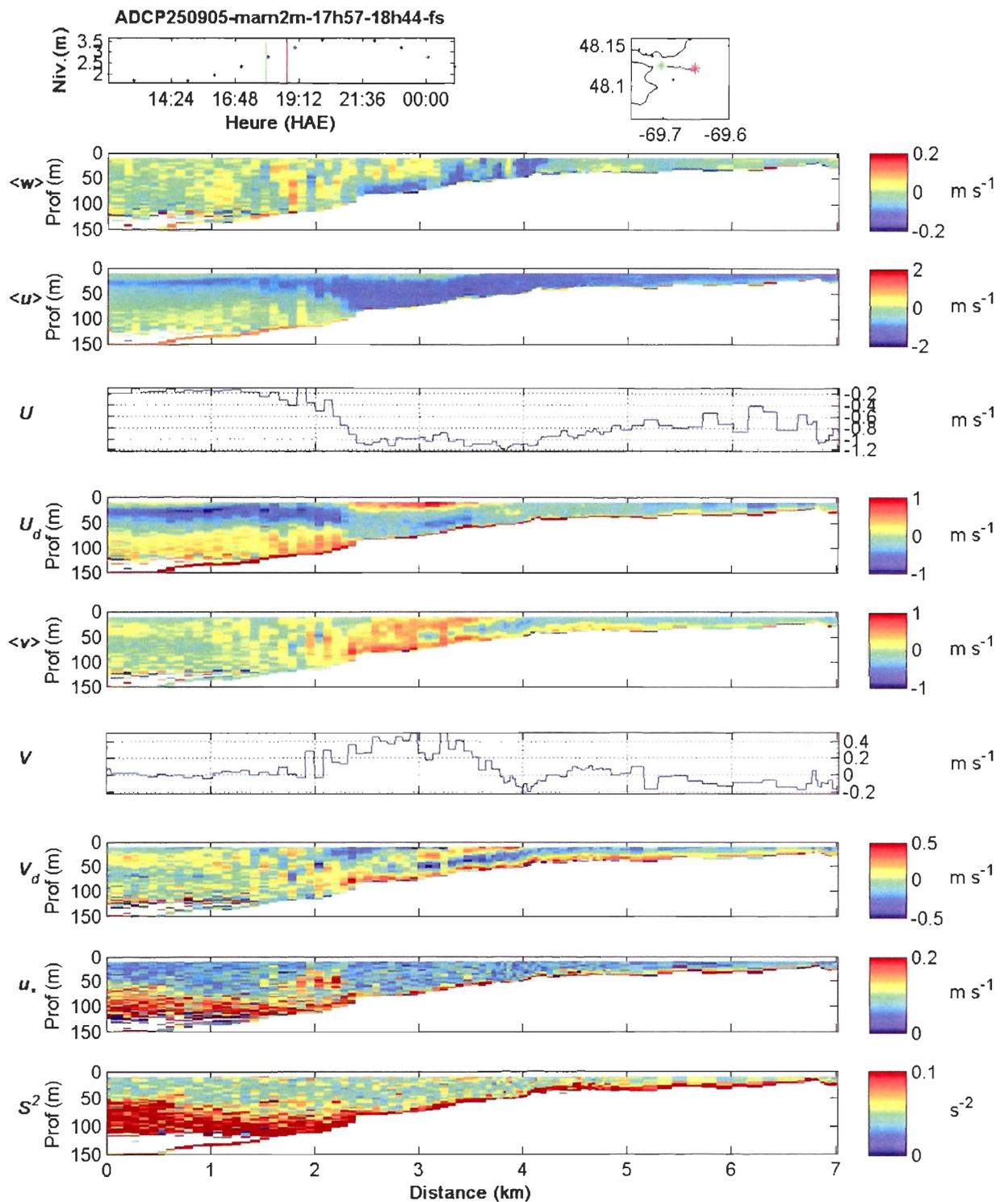


Figure 8. Vitesses observées (moyenne sur 20 s), composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  et paramètres dérivés  $U$ ;  $U_d$ ;  $V$ ;  $V_d$ ;  $u_*$ ;  $S^2$ . Échantillonnage no.6, marnage 2,0m, 17h57 à 18h44 le 25-09-05, trajet fjord-seuil, BM+3 à PM-2,25.

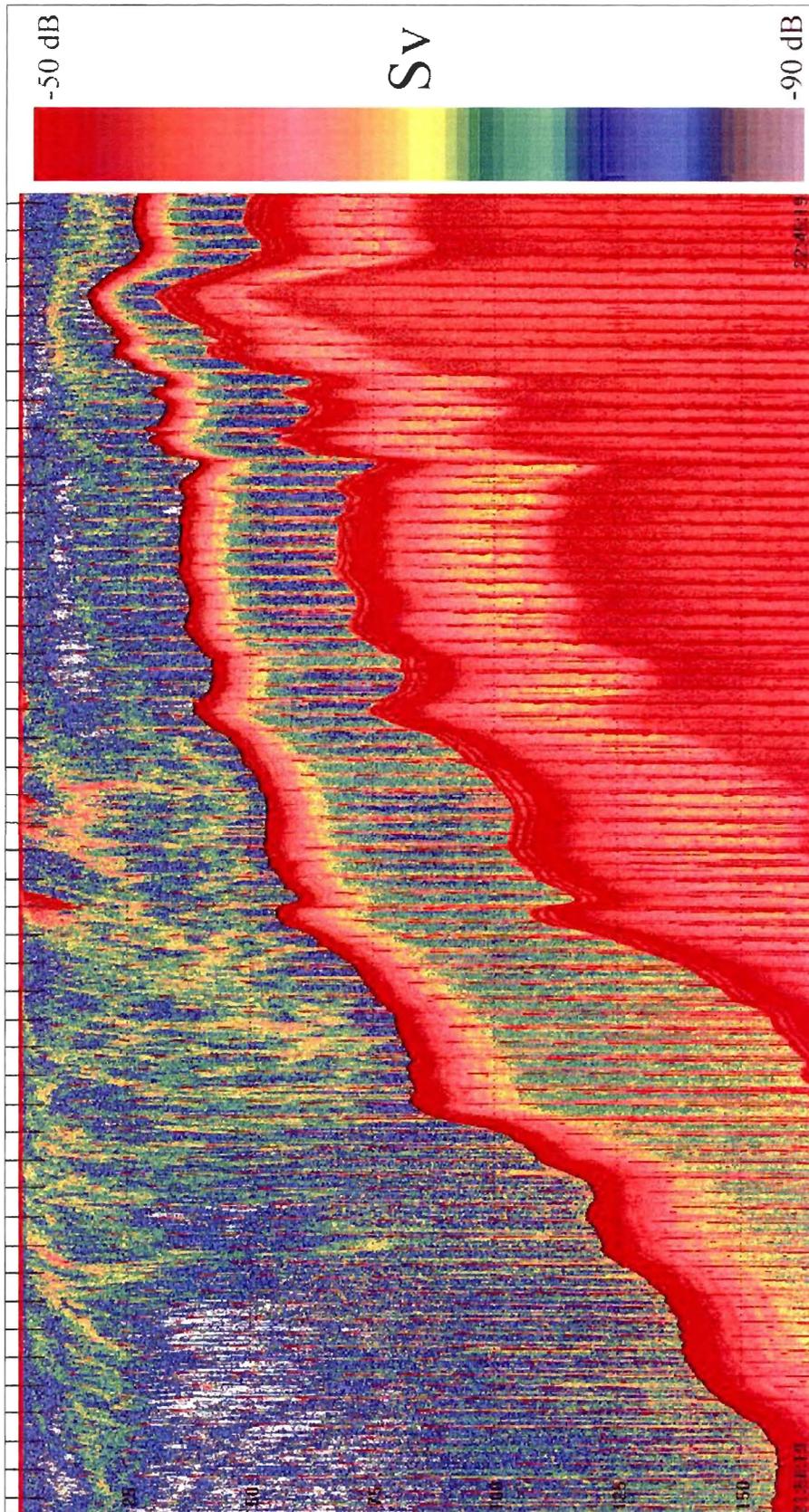


Figure 9. Échosondeur 120 KHz, échantillonnage no.6, marnage 2,0m, 17h57 à 18h44 le 25-09-05, BM+3 à PM-2,25.

### 3.3. Propriétés physicochimiques des masses d'eau

Cette partie du travail est consacrée aux propriétés (température, salinité et densité) des masses d'eau à diverses profondeurs dans la région de l'embouchure du Saguenay. Ces paramètres permettront d'identifier les principales structures vues aux points 3.1. et 3.2. dans le but de mieux comprendre la dynamique du mélange dans le BE. La densité utilisée est la valeur de densité *in situ*.

#### 3.3.1. Profils CTD à la trôle

Les données recueillies pendant la période d'échantillonnage no. 6 (marnage de 4,5 m, le 26-05-05) sont considérées ci-dessous et celles des périodes no. 5 et no. 1 (marnages de 3 m et 3,9 m) sont présentées à l'annexe 2. La figure 10 présente les données de CTD à la trôle de l'échantillon no. 6 et correspond à PM-3. L'heure et la position de départ (vert) et d'arrivée (rouge) du navire le long du transect sont indiquées, respectivement, par des traits verticaux sur la cartouche indiquant le niveau d'eau (coin supérieur gauche) et par des astérisques sur la carte de localisation (coin supérieur droit). Les eaux de densité maximale ( $\rho \sim 1025 \text{ kg m}^{-3}$ ) se trouvent sous les 15 m, tant dans l'estuaire que sur le seuil (km 9,7 à 17 du transect). Dans le haut du talus (km 8 du transect), la densité est de  $1024 \text{ kg m}^{-3}$  à 25 m de profondeur. Donc, la densité de la masse intrusive diminue de  $1 \text{ kg m}^{-3}$  en franchissant les 6 km du seuil. Du côté du fjord, les eaux les plus denses ( $\rho \sim 1023 \text{ kg m}^{-3}$ ) se retrouvent à la fois au fond du BE (130 m de profondeur) et sur le talus à 50 m de profondeur (km 6,5 du transect). On en déduit qu'une fois dans le BE, l'eau de l'intrusion ne se rend pas au fond malgré une masse plus élevée que celle de l'eau en place. Les paramètres de température et salinité suivent une évolution concordante à celle de la densité. Cette distribution des propriétés physicochimiques des masses d'eau est semblable pour les autres marnages échantillonnés par CTD à la trôle (annexe 2).

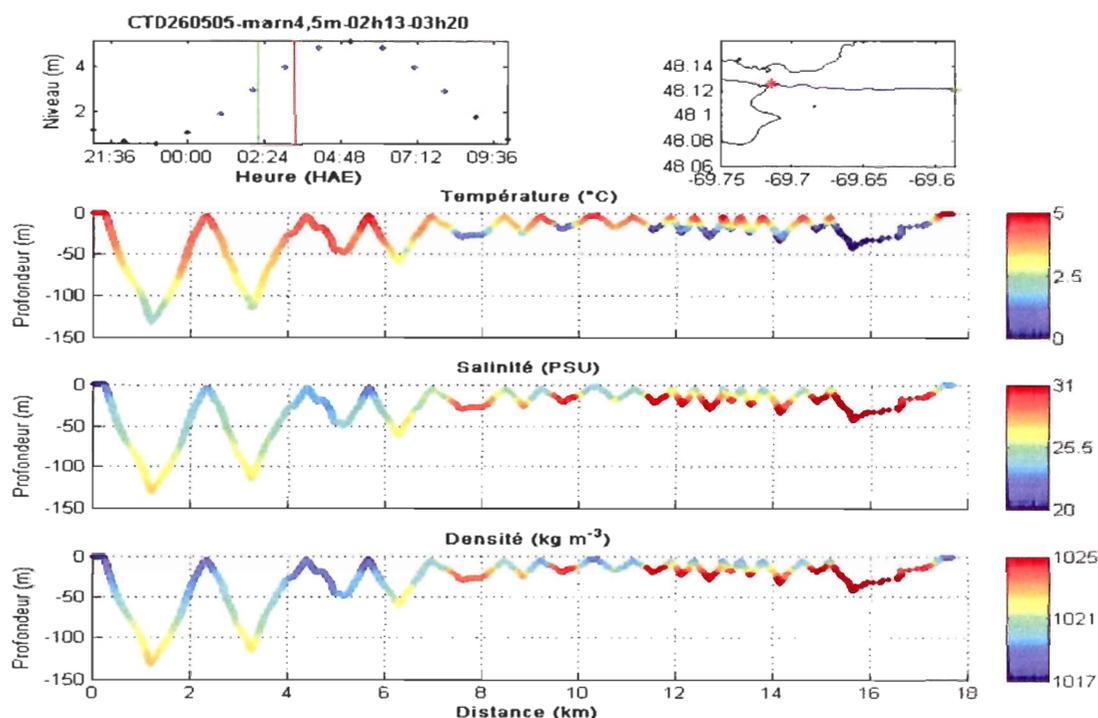


Figure 10. Température, salinité et densité échantillonnées par CTD à la trôle, échantillonnage no. 6 (marnage 4,5m), 02h13 à 03h20 le 26-05-05, trajet estuaire - fjord, BM+3 à PM-2.

### 3.3.2. Profils CTD

Les données de CTD acquises aux stations SE et BE au cours des périodes d'échantillonnages no. 9, 10, 11 et 12 sont présentées à l'annexe 3. On y trouve aussi les diagrammes T-S pour les périodes d'échantillonnage no. 9, 10 et 11. Les valeurs moyennes pour les échantillonnages no. 9, 10, 11 et 12 sont présentées au tableau V.

Tableau V. Paramètres physicochimiques moyennés par couche aux stations SE et BE, estimés à l'aide des profils CTD des échantillonnages no. 9, 10, 11 et 12.

Échantillonnage			Température (°C)				Salinité (PSU)				Densité (kg m <sup>-3</sup> )			
no.	Date (jma)	Marnage (m)	Seuil	BE ≥100 m	BE 35-65 m	BE 0-20 m	Seuil	BE ≥100 m	BE 35-65 m	BE 0-20 m	Seuil (ρ <sub>2</sub> )	BE ≥100 m (ρ <sub>3</sub> )	BE 35-65 m (ρ <sub>4</sub> )	BE 0-20 m (ρ <sub>1</sub> )
9	170807	3,5	3,01	2,75	3,78	4,66	30,51	30,73	29,7	28,61	1024,30	1024,50	1023,59	1022,65
10	210807	2,0	3,09	2,65	3,39	6,22	30,32	30,78	29,87	26,07	1024,14	1024,54	1023,76	1020,48
11	220807	1,8	2,83	2,77	3,6	5,23	30,55	30,72	29,59	27,79	1024,35	1024,49	1023,52	1021,94
12	230807	1,2	3,42	3,46	3,38	5,03	30,69	30,29	29,69	27,43	1024,41	1024,09	1023,62	1021,67
Moyennes :			3,09	2,91	3,54	5,28	30,52	30,63	29,71	27,47	1024,30	1024,40	1023,62	1021,68

Les figures 11 et 12 présentent des diagrammes T-S réalisés à partir des données CTD de la période d'échantillonnage no. 12 (27-08-07, marnage 1,2 m). Pour la figure 11, sont considérées les données à BE sur toute la colonne d'eau, et pour la figure 12, ne sont considérées que les données à BE entre 35 m et 65 m, soit au cœur de l'intrusion à mi-profondeur. [Noter les différences d'échelles.] Pour ces deux figures, la position des stations et l'heure de début du profil en station SE (vert) et l'heure de fin du dernier profil en station BE (rouge) sont indiquées, respectivement, par des traits verticaux sur la cartouche indiquant le niveau d'eau (coin supérieur gauche) et par des astérisques sur la carte de localisation (coin supérieur droit).

Selon le tableau V, les densités moyennes des masses d'eau vues à la figure 11 sont, à SE :  $1024,41 \text{ kg m}^{-3}$ ; dans les 20 m de la surface du BE :  $1021,67 \text{ kg m}^{-3}$ ; sous les 100 m dans le BE :  $1024,09 \text{ kg m}^{-3}$ . Aussi, la station BE montre une augmentation constante de la salinité dans les eaux de densités inférieures à  $1023,50 \text{ kg m}^{-3}$  au cours du flot, alors que la densité des eaux les plus denses (entre  $1023,50 \text{ kg m}^{-3}$  et  $1025,00 \text{ kg m}^{-3}$ ) n'est pas significativement augmentée.

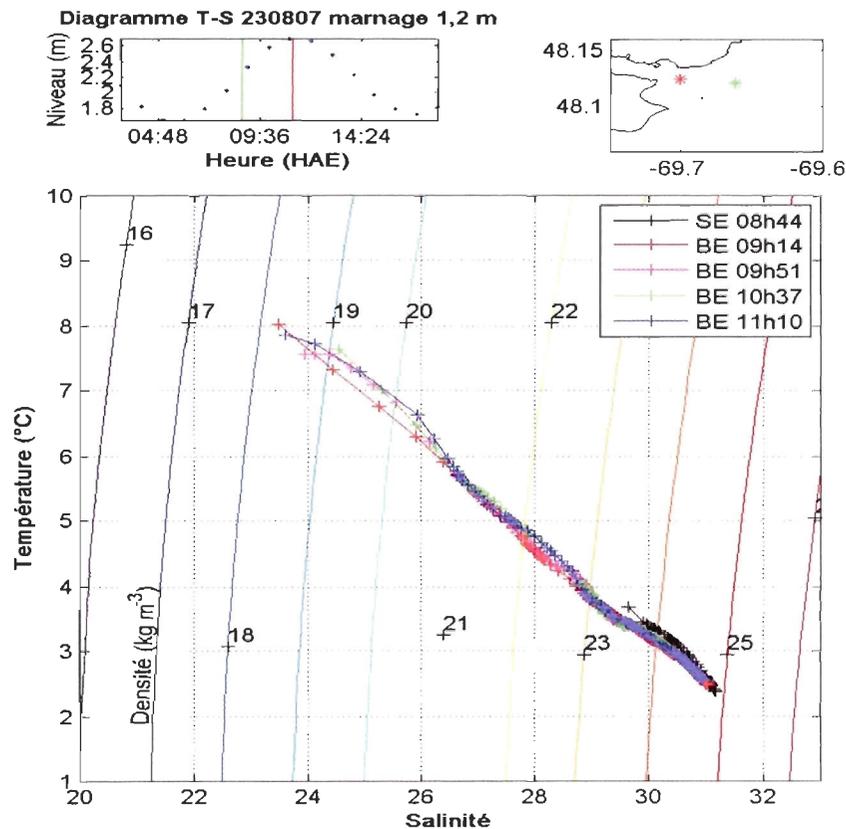


Figure 11. Diagramme T-S des stations SE (\*) et BE (\*), échantillonnage no.12 (marnage 1,2m), 08h44 à 11h10 le 23-08-07, PM-3 à PM.

La figure 12, présente un diagramme T-S faisant la comparaison entre les propriétés physicochimiques sur toute la colonne d'eau du seuil et celles retrouvées dans le BE au coeur du courant principal de direction ouest (vu aux points 3.1. à 3.10.). Selon ce diagramme T-S, l'intrusion à mi-profondeur, *i.e.* de 35 à 65 m de profondeur dans le BE, se densifie continuellement au cours des 2 heures d'échantillonnage à cet endroit (PM-2 à PM). Les valeurs de densité maximales y passent de  $1023,75 \text{ kg m}^{-3}$  à  $1024,25 \text{ kg m}^{-3}$ , mais cette masse d'eau n'adopte en aucun temps des caractéristiques identiques à celle qui occupe le SE.

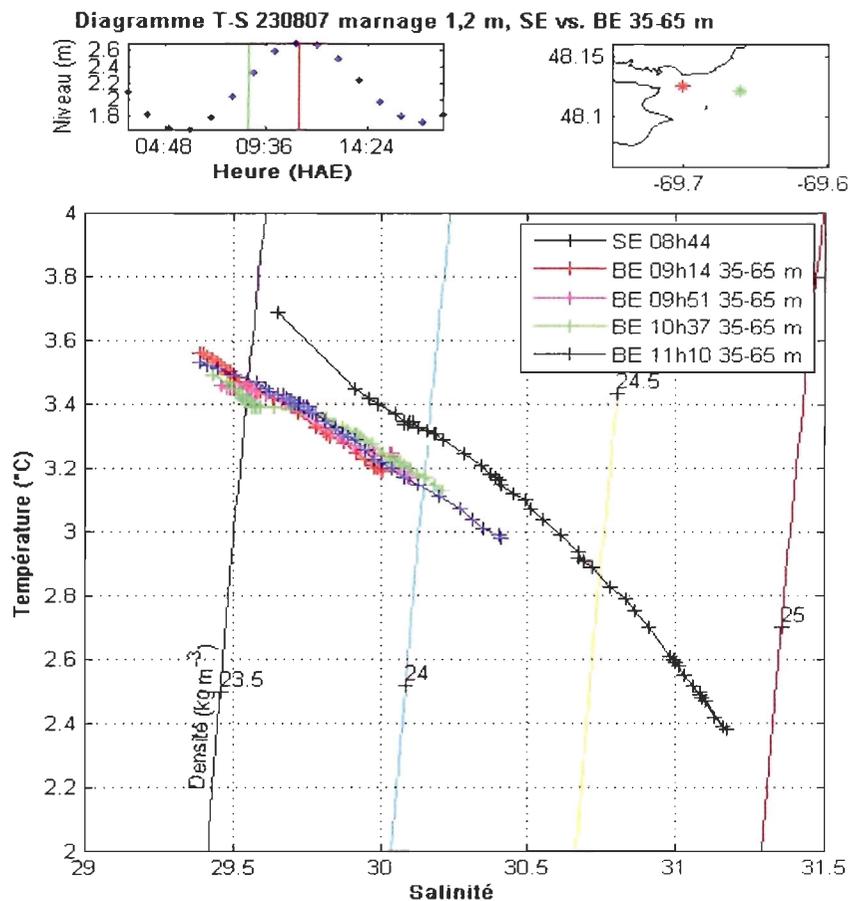


Figure 12. Diagramme T-S des stations SE (\*) et BE (\*), échantillonnage no.12 (marnage 1,2m), 08h44 à 11h10 le 23-08-07, PM-3 à PM. Pour BE, seules les données comprises entre 35 m et 65 m sont considérées.

À la lumière des observations constatées aux figures 11 et 12 ainsi qu'à partir des résultats compilés au tableau V, il a été possible de calculer les proportions (%) des masses d'eau  $\rho_1$  et  $\rho_2$  qui composent l'intrusion à mi-profondeur ( $\rho_4$ ). [Ces calculs sont présentés à l'annexe 3f]

Estimation de la composition de la masse d'eau intrusive de mi profondeur (35 – 65 m) à BE ( $\rho_4$ ) :

Proportion de l'eau de surface (0 – 20 m) à BE ( $\rho_1$ ) : 26%

Proportion de l'intégralité de la colonne d'eau à SE ( $\rho_2$ ) : 74%

### 3.4. Paramètres du transport tidal

Le tableau VI présente une compilation des résultats de calcul des paramètres du transport tidal. On y trouve, pour chaque marnage correspondant aux périodes d'échantillonnage, les volumes du prisme de marée ( $P$ ), du taux d'advection moyen pendant le flot ( $\bar{D}$ ) et de l'advection de la couche de surface du BE dans le mélange ( $A\rho_1$ ).

Tableau VI. Paramètres du transport tidal.

Marnage (m)	4,5	4,5	3,9	3,9	3,9	3,5	3,0	2,0	2,0	1,8	1,5	1,2
Échantillonnage	2	4	1	3	8	9	5	6	10	11	7	12
Date (jma)	24-250505	25-260505	240505	250505	240906	170807	290505	250905	210807	220807	280905	230807
$P$ ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> )	1395	1395	1209	1209	1209	1085	930	620	620	558	465	372
$\bar{D}$ (Sv)	0,061	0,061	0,056	0,056	0,054	0,048	0,043	0,025	0,026	0,023	0,022	0,018
$A\rho_1$ ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> )	363	363	314	314	314	282	242	161	161	145	121	97

#### 3.4.1. Prisme de marée

La valeur de  $P$  est directement proportionnelle au marnage. Il est logique qu'il en soit ainsi puisque l'aire du fjord est fixe et l'onde de marée est pratiquement stationnaire. Donc, le seul paramètre pouvant influencer le résultat du calcul est la hauteur d'eau.

#### 3.4.2. Advection tidale moyenne d'eau de l'ESL

La valeur de  $\bar{D}$  découle directement du calcul de  $P$  et en conséquence, la valeur de  $\bar{D}$  est directement influencée par le marnage. Cependant, la durée du flot s'avère ici un autre facteur déterminant puisque pour un marnage équivalent, la durée plus ou moins grande du flot influencera le débit de la marée. C'est ce qui explique la différence de 0,002 Sv pour les marnages équivalents de 3,9 m (les 25-05-05 et 24-09-06) et celle de 0,001 Sv pour les marnages de 2 m des 25-09-05 et 21-08-07.

### 3.4.3. Advection de la couche de surface du BE dans le mélange

Le calcul de  $A\rho_1$  est issu du calcul de  $P$  et réfère au calcul des proportions des masses d'eau de densités  $\rho_1$  et  $\rho_2$  qui composent l'intrusion à mi-profondeur ( $\rho_4$ ) vue au point 3.3.2.

### 3.5. Évolution du nombre de Froude interne lors du flot

Tel que mentionné au point 2.3.1., le calcul de  $F_i$  [1] nécessite l'emploi des valeurs de densité ( $\rho$ ) des masses d'eau intrusive et en place. Puisqu'aucun profil CTD prélevé simultanément aux passages avec ADCP n'était disponible pour les stations SE et BE, nous avons eu recours aux valeurs moyennes des profils CTD des 17, 21, 22 et 23 août 2007 (présentées au tableau V). Ainsi, les mêmes valeurs de  $\rho$  ont été utilisées pour tous les calculs de  $F_i$ .

La figure 13 présente l'évolution de  $F_i$  en fonction du niveau tidal pour sept cycles de marée, de morte-eau à vive-eau. La distribution temporelle des valeurs de  $F_i$  est oscillatoire, ce qui résulte du caractère sinusoïdal du courant. La valeur maximale de  $F_i$  tend à apparaître environ trois heures avant la PM, ce qui correspond au fait que  $F_i$  croît avec le courant et que l'onde de marée est sensiblement une onde stationnaire. En période de vive-eau,  $F_i$  augmente dès le début du flot, atteint son maximum à PM-3 et diminue ensuite. Plus le marnage est faible, plus  $F_i$  atteint son maximum tôt au cours du flot et tend à diminuer constamment ensuite. De plus, la valeur atteinte par  $F_i$  est élevée lors des marnages élevés et *vice-versa*. Dans les deux cas où les évolutions de  $F_i$  peuvent comparées pour une même grandeur de marnage (4,5 m et 3,9 m), les valeurs et évolutions obtenues sont passablement différentes.

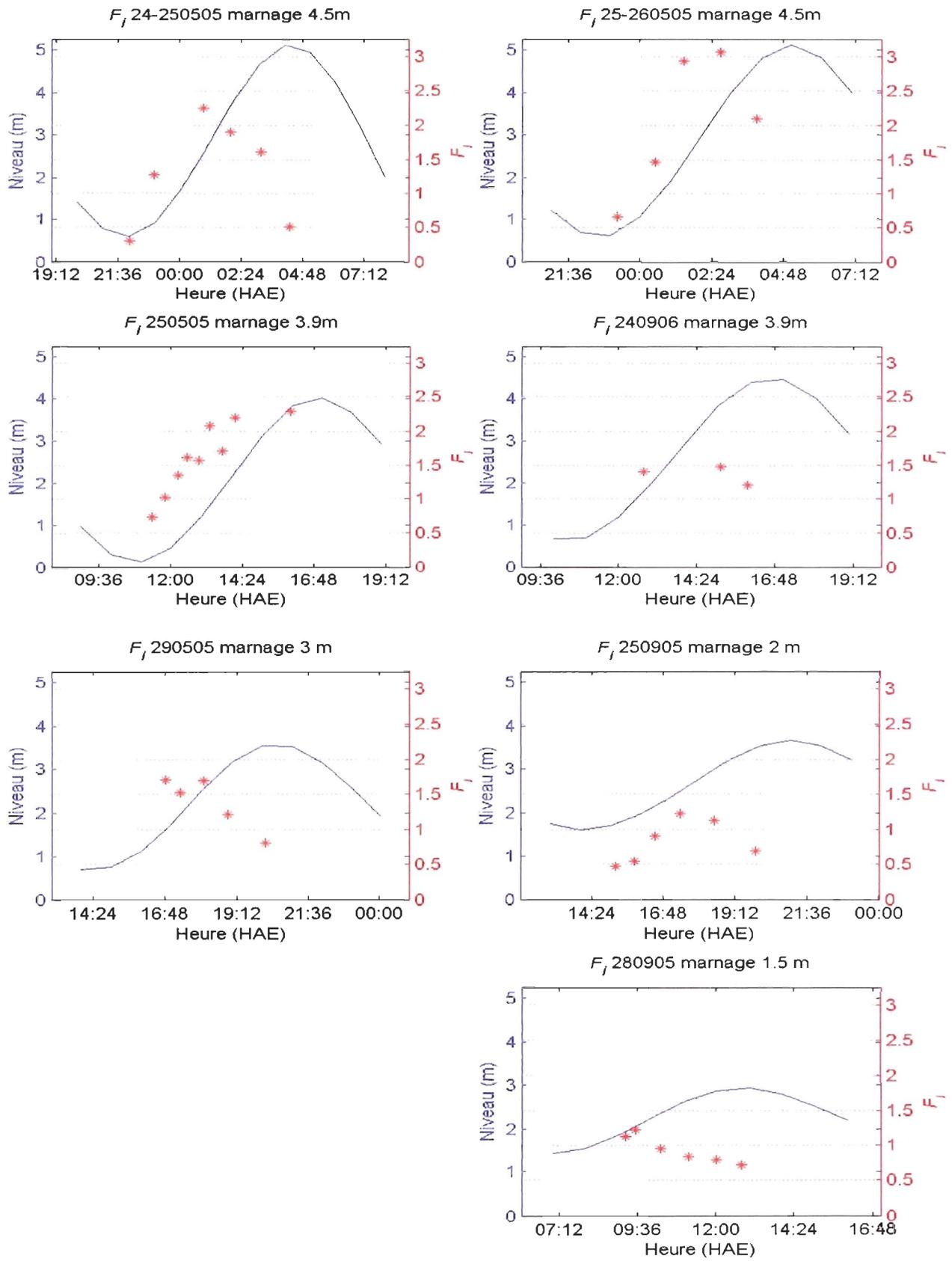


Figure 13. Évolution du nombre de  $F_i$  pour différents marnages. Niveau d'eau prédit à Tadoussac en bleu et  $F_i$  en rouge.

### 3.6. Évolution de la salinité de surface lors du flot

La figure 14 montre l'évolution de la salinité de surface à l'embouchure du FS lors du flot pour un marnage de 2,7 m (résultats du modèle STLE 400). De BM à PM, l'accroissement horaire de la salinité de surface (de 28 PSU à 32 PSU) dans la région de l'embouchure est synonyme d'une densification proportionnelle des eaux advectées dans le BE. Cette séquence permet de suivre l'avancée vers l'amont du front principal au cours du flot, ainsi que son relâchement à la période de pleine mer. On peut également y voir la signature en surface du courant intrusif ondulatoire (région indiquée par des ellipses à B+4 et B+5). Les lentilles d'eaux moins salées isolées en surface par les successions de fronts y sont clairement visibles. L'expression en surface de ces structures apparaît plus accentuée du côté nord du fjord que du côté sud. On peut faire un lien entre les valeurs de salinité de surface de la figure 14 et les structures de surface visibles sur la photographie présentée à la figure 5. Nous reviendrons sur ces similitudes au chapitre suivant.

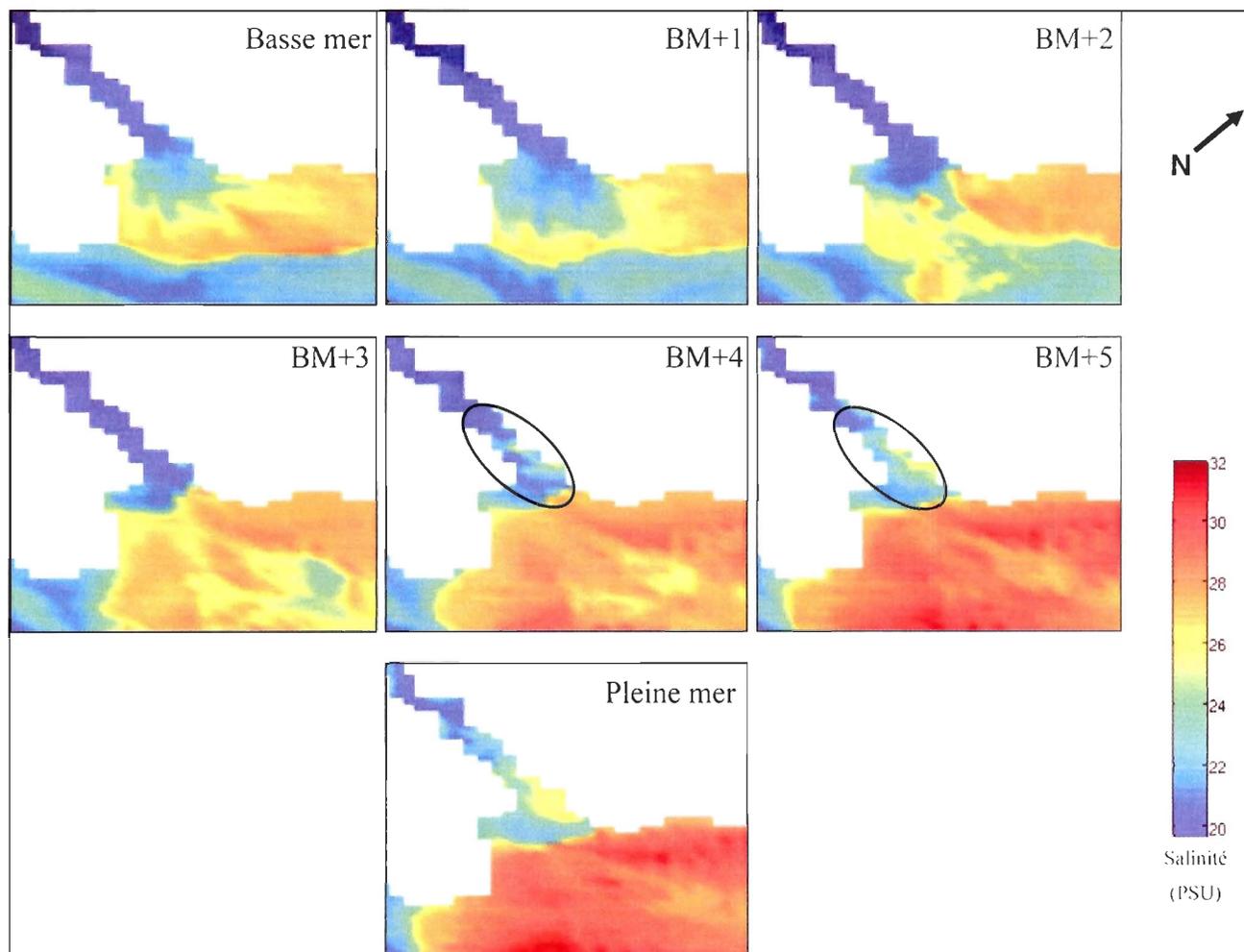


Figure 14. Évolution de la salinité de surface lors du flot dans la région de l'embouchure du Saguenay. Valeurs extraites d'une solution du modèle numérique STLE 400 (9h00 à 15h00 le 20 septembre 2002, marnage de 2,7 m). Les ellipses indiquent la région où est visible la signature de l'ondulation du courant intrusif.

#### 4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le présent chapitre met en évidence les interrelations entre les divers résultats présentés au chapitre 3. Il est ainsi possible de décrire les patrons généraux de circulation, de déterminer les sources du mélange dans la partie aval du BE et de dégager l'influence d'une variation du marnage sur ces processus. Nous verrons que, d'un point de vue temporel, le lien entre les phénomènes discutés et la phase de la marée résulte du caractère sensiblement stationnaire de l'onde. Les caractéristiques sont présentées en quatre sections correspondant aux diverses parties du transect (et à des intervalles de profondeur), à savoir : le seuil (0 à ~30 m de profondeur) (section 4.1.); le haut du talus (entre ~30 m et ~50 m de profondeur) (section 4.2.); le centre du talus (entre ~50 m et ~100 m de profondeur) (section 4.3) ; et le BE (section 4.4.).

Tout au long du chapitre, de nombreuses références seront faites à la figure 15. Celle-ci présente un schéma qualitatif général établi à partir de l'ensemble des résultats obtenus lors de la présente étude. La figure 15 représente les masses d'eau, les courants et les phénomènes dynamiques observés. Elle est divisée en fonction des séquences significatives du cycle de marée et permet la distinction entre vive-eau morte-eau. Il est important d'établir clairement que la désignation, sur le schéma, d'une zone de mélange intense (à l'instar des autres indications d'éléments dynamiques), ne concerne pas uniquement la région identifiée. La représentation de la zone de mélange intense correspond à la région ayant été identifiée en tant que tel de manière récurrente entre toutes les séquences d'échantillonnage par les indices élevés de turbulence de  $u$  et  $S^2$  (les sous-figures 6g et 6j en sont les exemples-types), mais ne se borne pas qu'à cet endroit.

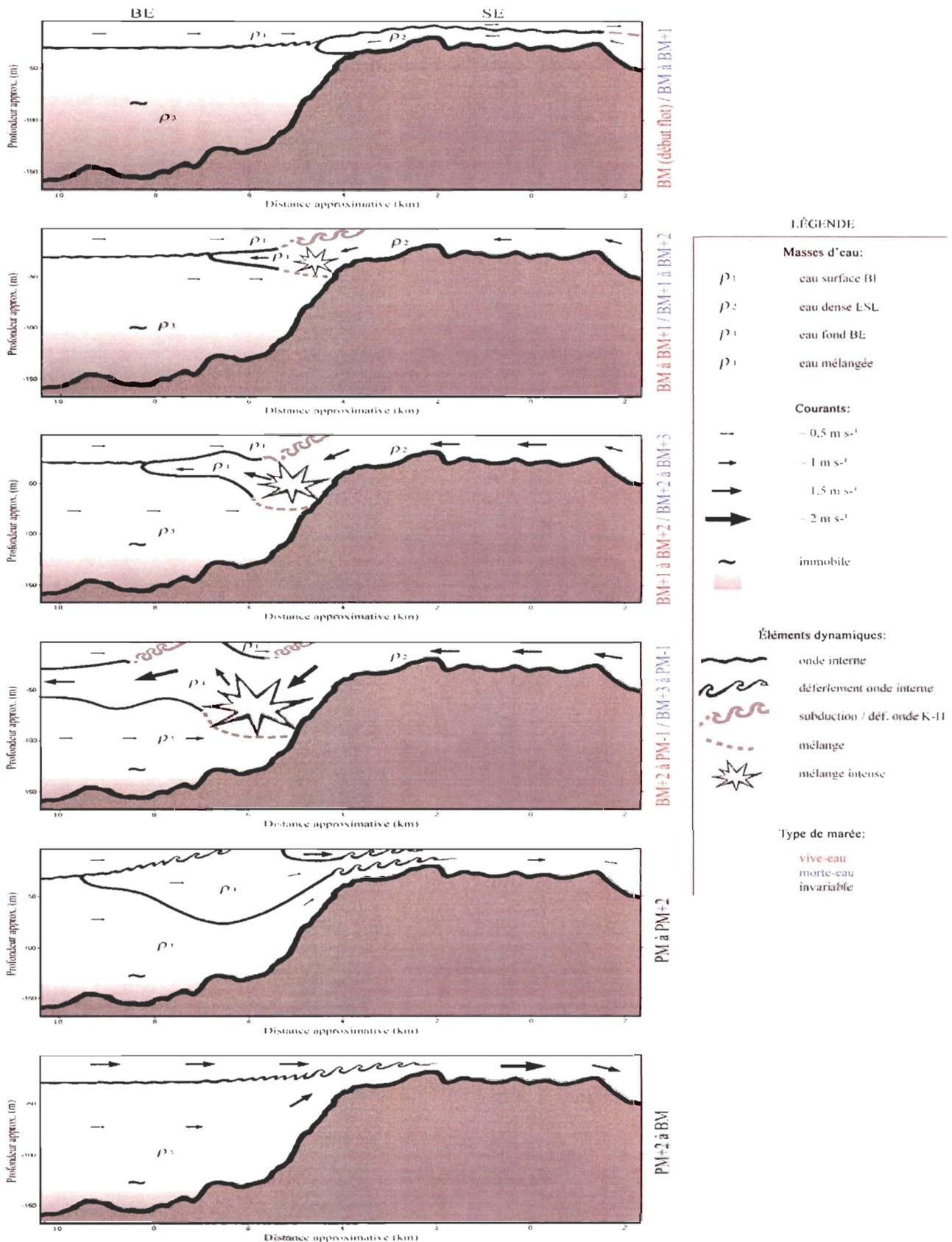


Figure 15. Schéma – synthèse représentant l'évolution des structures dynamiques et des courants dans la région de l'embouchure du Saguenay pendant un cycle de marée. Les flèches indiquent la direction et la vitesse relative du courant. Les stades de marée représentés diffèrent selon les marnages typiques de vive-eau et morte-eau.

## 4.1. Caractéristiques propres à la période du flot sur le seuil

### 4.1.1. Variation latérale du courant verticalement moyenné

Nous décrivons ici un aspect intéressant de la structure verticale du courant lors du flot sur le seuil. Alors qu'en tout temps, le courant formé par la masse d'eau intrusive d'origine laurentienne est verticalement uniforme selon sa composante longitudinale  $u$ , la composante transverse  $v$  de ce courant intrusif présente une partie verticalement non uniforme très marquée. En effet, nous avons vu à la figure 6 que, de BM à PM, la composante transverse du courant intrusif sur le seuil est dirigé au sud en surface et vers le nord dans la moitié inférieure. Ceci pourrait être expliqué par un courant s'infiltrant par le chenal nord-est (presque perpendiculaire au transect échantillonné). En effet, on remarque à la figure 5 un second front en « V », en marge nord du front principal, et visible en surface à la figure 14 (au nord de l'embouchure : structure en « V » présentant la salinité la plus élevée de BM+3 à PM). Cette structure de surface est en fait la signature d'une masse d'eau provenant directement de la tête du chenal laurentien par le chenal nord-est. Sous ce panache, il y aurait un courant de retour (vers le nord) induit par un phénomène d'« attachement à la paroi » (*wall attachment*), qui est un type d'effet Coanda (Tritton, 1977). La figure 16 présente un schéma qualitatif d'attachement à la paroi qui illustre le comportement de la masse d'eau provenant du chenal nord-est lorsqu'elle rejoint perpendiculairement le chenal principal sur le seuil. Cette figure correspondrait (qualitativement) à une coupe transverse du chenal principal et ne représente que la composante transverse du courant. La partie supérieure du jet conserve une énergie cinétique élevée, mais la friction au fond ralentit la partie du bas. Cela crée, près du fond, un gradient de pression inverse en direction de la paroi nord-est du chenal principal, entraînant une partie des eaux intrusives dans cette direction (effet d'entraînement).

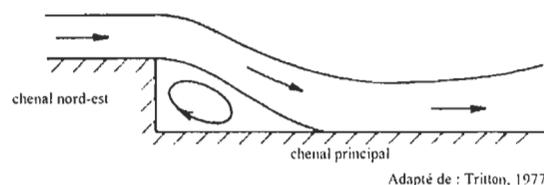


Figure 16. Coupe transverse schématique à une couche illustrant le comportement d'attachement à la paroi de la masse d'eau en provenance du chenal nord-est lorsqu'elle atteint le chenal principal.

### 4.1.2. Formation de la masse d'eau intrusive initiale

Sur le seuil, la faible hauteur de la colonne d'eau à laquelle les eaux laurentiennes sont confinées et le relief accidenté du fond créent des conditions fortement turbulentes. Ces conditions, reflétées en tout temps sur le seuil par les valeurs élevées de turbulence  $u$ , et de cisaillement  $S^2$ ,

tendent à homogénéiser l'ensemble des masses d'eau lors de leur passage. Une homogénéisation semblable est observée lors du passage de masses d'eau sur des seuils peu profonds (Garrett, 2004; Lane-Serff, 2004; Valle-Levinson *et al.*, 2006). Ainsi, le mélange sur le seuil est toujours très important. Les profils CTD effectués à SE montrent que ce mélange a lieu même en morte-eau. Il est donc possible de considérer que, peu importe le marnage et les conditions environnementales, une fois formé, le courant de gravité ( $\rho_2$ ) est entièrement homogène.

## 4.2. Caractéristiques propres à la période du flot dans le haut du talus

### 4.2.1. Formation d'un tourbillon associé au front de densité

La région du front, auquel est associée la zone tourbillonnaire, est le deuxième endroit en importance dans le système où les indices de turbulence  $u_*$  et  $S^2$  sont à leur maximum à chaque période du flot. À la limite entre le seuil et le talus (~km 4 de la figure 15), le courant intrusif, jusqu'alors verticalement homogène, accélère le long de la pente et devient soudainement verticalement non uniforme. Cet endroit correspond à la zone de subduction de l'intrusion sous l'eau de surface du fjord. Le front de densité en forme de « V » est ainsi formé et le tourbillon situé en son apex sont tous deux bien visibles en surface lors des marées de marnage intermédiaire et de vive-eau (voir figure 5). Les fronts en forme de « V » de quelques estuaires sont bien documentés (Booth, 1987 ; Pelegrí, 1988; Largier et Taljaard, 1991), mais la dimension du phénomène et les volumes mis en cause dans le Saguenay apparaissent supérieurs aux exemples mentionnés dans la littérature. Selon Largier (1992), la présence d'un tourbillon bien défini à cet endroit est l'expression en surface du plongeon rapide d'une masse d'eau sous une masse en place immobile. Ce phénomène est typique des situations de saut hydraulique fort. Dans la présente étude, la position exacte du tourbillon associé au front n'est pas décelable avec certitude sur les distributions produites à partir des données d'ADCP. Cela peut s'expliquer par les raisons suivantes : 1) la vitesse du courant verticalement moyennée ( $V$ ), dont la représentation graphique est effectuée sur un laps de temps trop étendu pour en révéler les fluctuations à une échelle plus fine ; 2) le passage du navire à côté du centre de vorticité ; 3) l'orientation oblique de l'interface entre les eaux en place et l'intrusion [ $V$  est calculé sur l'intégralité de la colonne d'eau], telle qu'observée à Boundary Pass (Farmer *et al.*, 2002; Baschek, 2002) ; et 4) l'éventualité selon laquelle le tourbillon ne serait pas toujours présent.

L'évolution spatiale de la zone de subduction du courant intrusif indiquée par  $\bar{u}$  et  $U_{cl}$ , de même que les ensembles de rétrodiffuseurs de forte intensité ( $S_v > -50$  dB) connectés à la surface révélés par l'échosondeur, attribuées à des bulles d'air, montrent qu'au cours du flot, le front se déplace progressivement vers l'amont en fonction de l'augmentation de la vitesse du courant intrusif. Le schéma présenté à la figure 17 illustre cette évolution. Ainsi, la localisation du front de densité plus ou moins en amont par rapport au seuil varie au cours d'un cycle de marée ainsi qu'entre la vive-eau et la morte-eau, ce qui correspond aux observations présentées (ADCP et échosondeur).

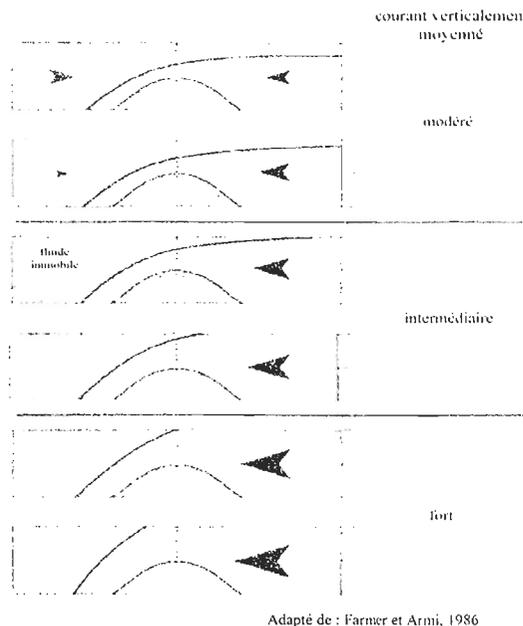


Figure 17. Déplacement du front de densité au-dessus du seuil en fonction de la vitesse du courant verticalement moyenné. Adapté de : Farmer et Armi, 1986

#### 4.2.2. Formation d'un rideau de bulles

Le déferlement du clapot dans la région du front (voir figure 5), le tourbillon à l'apex du front en « V » et la subduction du courant intrusif sous la couche de surface, provoquent l'entraînement en profondeur de bulles d'air, selon les observations de Farmer *et al.* (2002) à Haro Strait (Colombie Britannique). Tel qu'expliqué au point 3.1., nous faisons l'hypothèse que le même phénomène se produit aussi à l'embouchure du Saguenay. La zone d'écho peut atteindre 60 m de profondeur (Annexe 6f: Période d'échantillonnage no. 8, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006, Échosondeur 12h21 – 13h06). L'entraînement de bulles d'air jusqu'à une telle profondeur est inférieur de moitié aux observations faites par Baschek (2002) à Boundary Pass (Colombie Britannique). Toutefois, en raison des vitesses verticales enregistrées dans la zone du front (près de  $-0,3 \text{ m s}^{-1}$ ), il serait possible que l'entraînement de bulles d'air atteigne parfois une plus grande profondeur puisque cette vitesse est supérieure ou égale à la vitesse de remontée des plus grosses bulles ( $0,15 \text{ m s}^{-1}$  à  $0,3 \text{ m s}^{-1}$ ) (Baschek,

2002). La basse température de l'eau intrusive (*i.e.* sa haute solubilité à l'O<sub>2</sub>) et l'incorporation de bulles d'air à cet endroit en font possiblement la principale source d'oxygénation du fjord. Cependant, l'importance de ce processus frontal pour l'oxygénation du fjord demeure inconnue et devrait être vérifiée à l'aide d'un CTD muni d'une sonde à oxygène.

### 4.3. Caractéristiques propres à la période du flot au centre du talus

#### 4.3.1. Passage de conditions surcritiques à sous-critiques

Au centre du talus (de 50 m à 100 m de profondeur), les vitesses verticale négative et horizontale du courant de densité sont à leur maximum. Le courant de densité atteint la couche d'eau dense sise au fond du fjord. Le saut hydraulique interne survient lorsque la masse d'eau intrusive rencontre la masse d'eau de densité supérieure à la sienne (les profils CTD échantillonnés aux stations SE et BE révèlent que sous les 100 m de profondeur, l'eau du fjord possède une densité légèrement supérieure à la masse intrusive formée sur le seuil, voir tableau V). Le déferlement de l'onde interne issue du saut hydraulique provoque le mélange turbulent du courant gravitationnel aux eaux en place (Turner, 1973). Ce phénomène est illustré à la figure 15 par le symbole « mélange intense ». Pour tous les marnages étudiés, les estimés du nombre de Froude indiquent que le passage à des conditions surcritiques ( $F_i > 1$ ) survient dès BM+1 (vive-eau) ou BM+2 (morte-eau). Le mélange turbulent intense provoqué par le saut hydraulique interne est donc une constante intrinsèque au flot à l'embouchure du FS. De plus, le centre du talus est le premier endroit en importance où les indices de turbulence  $u_*$  et  $S^2$  sont à leur maximum tout au long du flot, pour tous les marnages. En outre, Saucier *et al.* (2009) indiquent que le centre du talus est le siège du flux vertical turbulent de sel le plus élevé de l'ESL. Cela signifie que c'est l'endroit où le mélange des eaux saumâtres et salées est le plus intense de tout le système. Ces observations supportent l'hypothèse selon laquelle le saut hydraulique est, lors de chaque flot de marée, le principal processus de mélange dans le BE.

#### 4.3.2. Formation d'une masse d'eau mélangée

Au cœur de la zone de mélange intense se produit le mélange d'une partie des eaux de surface ( $\rho_1$ ) et du fond du fjord ( $\rho_3$ ), avec les eaux denses issues du chenal Laurentien ( $\rho_2$ ), pour former une nouvelle masse d'eau ( $\rho_4$ ). Puisque l'eau intrusive et l'eau du fond possèdent des caractéristiques presque identiques, il est pratiquement impossible de connaître leurs proportions dans le mélange sans des analyses plus poussées. Toutefois, si on ne considère que  $\rho_2$ , il est possible d'estimer ce rapport

pour l'eau de surface incorporée au mélange. L'apport de  $\rho_1$  à la formation de la nouvelle masse d'eau est alors évalué à 26% (point 3.12.2.). Bien sûr, ce pourcentage serait moindre si l'apport de  $\rho_3$  pouvait être intégré au calcul.

#### 4.3.3. Décrochement du talus de la masse d'eau mélangée

Sur le talus, après le passage aux conditions d'écoulement sous-critiques, il y a détachement du courant gravitationnel. Le décrochement du talus de la masse d'eau mélangée consiste en un élément de la formation du mascaret interne stationnaire expliqué au point suivant.

### 4.4. Caractéristiques propres à la période du flot dans le bassin externe

#### 4.4.1. Formation d'un mascaret interne stationnaire

Les travaux sur les sauts hydrauliques internes de Farmer et Denton (1985) et Farmer et Armi (1986; 1999) (Observatory Inlet), ainsi que ceux de Cummins *et al.* (2003; 2006) (Knight Inlet), montrent qu'un saut hydraulique fort associé à un courant gravitationnel est accompagné d'un mascaret interne stationnaire (*internal bore*) immédiatement en amont du seuil. La section comprise entre les km 8 et 9,5 du transect de la planche présentant  $\bar{u}$  à l'annexe 6g (période d'échantillonnage no. 4, 02h31 à 03h21 le 25-05-05, marnage 4,5m, PM-3) constitue un exemple typique de formation d'un mascaret interne stationnaire. Non seulement le mascaret interne stationnaire joue-t-il un rôle déterminant dans la formation des structures décrites ci-après, il permettrait potentiellement d'expliquer l'abaissement des isopycnes observé au début du flot dans la partie aval du BE lors des travaux concernant l'ensemble du fjord réalisés par Siebert *et al.* (1979) et par Bélanger (2003). Le mascaret interne stationnaire est bien visible dans cette région dans le document de Bélanger (2003), lorsqu'on considère les champs de densité, alors que les contraintes d'échelles verticales et horizontales ne permettent pas d'observer le phénomène chez Siebert *et al.* (1979).

#### 4.4.2. Isolation d'une lentille d'eau saumâtre en surface

Le mascaret interne stationnaire a pour effet d'isoler une structure lenticulaire d'eau de surface exactement au-dessus du site du saut hydraulique. Cette lentille, vraisemblablement composée d'eau saumâtre de surface ( $\rho_1$ ), occupe l'espace libéré par le mascaret interne stationnaire. Ce reliquat d'eau de surface du BE présente un gradient de vitesse pointant vers l'aval, dont le maximum de vitesse se

trouve à la zone de subduction (front de densité). Bien qu'elle soit continuellement érodée à sa base par la subduction de l'intrusion dense, cette structure est préservée pendant toute la durée du flot.

#### 4.4.3. Progression du courant ondulatoire de mi-profondeur et formation d'un second front

À partir de BM+3 (cf. sections 3.1.5. à 3.1.7., figures 6e à 6i, 7e à 7i et 15), un patron longitudinal d'oscillation stationnaire se met en place dans la composante verticale du courant. Animée par l'ondulation, la masse d'eau mélangée ( $\rho_4$ ) est poussée vers le haut et atteint la surface. Dès qu'il a atteint la surface, le courant formé de  $\rho_4$ , plus dense que la masse de surface ( $\rho_1$ ), replonge pour atteindre sa profondeur d'équilibre et poursuit sa course vers l'amont. Une seconde subduction du courant intrusif sous l'eau de surface se produit ainsi, formant un second front de densité, ainsi qu'un second rideau de bulles. À ce moment, en morte-eau, le courant est affaibli et l'intrusion mélangée progresse vers l'amont à mi-profondeur. Plus les conditions de saut hydraulique sont intenses (*i.e.* près de vive-eau), plus l'amplitude de l'ondulation est importante au sein de l'intrusion à mi-profondeur. Ainsi, en période de vive-eau, la couche mélangée rejoint une seconde fois la surface (pendant la deuxième moitié du flot). Il en résulte un troisième front de densité accompagné des structures inhérentes décrites précédemment. La signature en surface de ces ondulations est clairement visible dans la salinité de surface à BM+4 et BM+5 (figure 14). On y voit les lentilles d'eau saumâtre isolées par la série de fronts.

#### 4.4.4. Course du courant de mi-profondeur

Siebert *et al.* (1979) ont observé que suite au maximum de vitesse du flot (entre BM+3 et PM-2), des masses d'eau denses s'épanchent par delà le second seuil. Les observations du présent ouvrage suggèrent que Siebert *et al.* (1979) aient observé le passage vers l'amont du second seuil de la masse d'eau  $\rho_4$  en fin de flot. En effet, dans l'actuelle zone d'étude, la masse d'eau mélangée  $\rho_4$  est poussée vers l'amont par le courant de mi-profondeur à près de  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Si cette vitesse est maintenue sur les 20 km séparant le seuil externe du second seuil, la masse d'eau  $\rho_4$  mettra près de 5,5 heures à parcourir cette distance et franchir le second seuil. Cette hypothèse est concordante avec les résultats du modèle présentés par Bélanger (2003) qui indiquent des vitesses près de  $1 \text{ m s}^{-1}$  entre 0 m et 100 m de profondeur dans l'ensemble du BE pendant ~5 heures durant le flot.

#### 4.4.5. Mouvement de la couche profonde du BE lors du flot

Les paramètres  $\bar{u}$ ,  $U_d$  et  $S^2$  présentent tous une configuration similaire du mouvement de la couche profonde du BE ( $\rho_3$ ). En effet, en tout temps au cours du flot, le courant qui anime  $\rho_3$  adopte une forme ogivale dont la vitesse augmente vers l'aval. Cette observation suggère que le mélange de l'eau  $\rho_2$  à l'eau  $\rho_1$  à la profondeur atteinte par le courant gravitationnel sur le talus, favorise le développement d'un gradient de pression horizontal pointant vers l'amont au sein de la couche  $\rho_3$ . La vitesse maximale de ce contre-courant vers le talus se trouve à l'endroit le plus profond atteint par le courant de gravité, tel que schématisé à la figure 15 et bien visible, par exemple, aux planches présentant  $\bar{u}$  et  $U_d$  aux figures 6c à 6k et 8. L'évolution du gradient de densité au cours du flot de marée s'y accompagnerait d'une évolution proportionnelle du gradient de pression. Ce gradient de pression décroissant vers la région de brassage provoquerait le déplacement vers l'aval d'une partie de  $\rho_3$ . L'épaisseur de  $\rho_3$  en mouvement vers l'aval varie peu (50 à 75 m) en fonction du marnage et est d'un tiers au-dessus et deux tiers en dessous de la profondeur maximale du courant gravitationnel. Lorsque la profondeur maximale atteinte par le courant de gravité est à plus de 50 m du fond, la partie inférieure de  $\rho_3$  demeure immobile par rapport à un repère fixe. Cela signifie qu'au-dessus et en dessous du contre-courant, la friction avec les parcelles d'eau environnantes suffit à empêcher ce mouvement vers l'aval. Cette réflexion suggère que lorsque la profondeur maximale atteinte par le courant gravitationnel sur le talus est à moins de 50 m du fond, toute la couche de fond se déplacerait vers la zone de mélange. Cependant, au cours des 8 périodes de flot étudiées, il y avait toujours présence, si minime soit-elle, d'une masse d'eau immobile au fond du BE.

Puisque, selon nos observations, la vitesse instantanée d'une partie de la couche profonde du BE est toujours dirigée vers l'aval, si on considérait le courant résiduel, il serait à l'inverse de celui d'une circulation estuarienne classique, où les eaux denses et salées pénètrent par le fond pendant le flot.

Pour deux des périodes échantillonnées, le courant gravitationnel a atteint 140 m de profondeur (presque le fond du BE) : période d'échantillonnage no. 4, 02h31 à 03h21 le 25-05-05, marnage de 4,5m (annexe 6g) et période d'échantillonnage no. 8, 14h50 à 15h32 le 24-09-06, marnage de 3,9 m (annexe 6f). Le premier a suivi le patron d'entraînement hydrodynamique et de remontée ondulatoire typique décrit plus tôt. Dans le second cas (fin de flot), le courant est resté en contact avec le talus sur une plus grande distance. Cela pourrait s'expliquer par : 1) une diminution de la vitesse du courant en fin de flot et 2) la densité plus élevée de la masse intrusive en fin de flot (d'origine plus profonde dans la couche intermédiaire froide, donc plus dense). Cependant, puisque la course du navire le long du transect n'est pas suffisamment prolongée vers l'amont, il est impossible de confirmer le

maintien du courant de densité au fond du BE. Donc, bien que l'observation du 24-09-06 le suggère, on ne peut affirmer avec certitude que le courant gravitationnel ait alors remplacé une partie des eaux profondes du BE.

#### 4.4.6. Circulation cyclonique dans le BE lors du flot

Lors de tous les passages en cours de flot, la composante transverse verticalement moyennée  $V$  révèle sa constante alternance nord-sud dans la partie aval du BE : les valeurs de  $V$  indiquent un mouvement vers le nord au centre du talus et un mouvement vers le sud plus en amont, jusqu'à la section Pointe-Noire – Pointe-de-l'Islet. La courbe de vitesses  $V$ , d'alternance nord-sud de part et d'autre d'un point de vitesse transverse nulle, ainsi que la persistance spatio-temporelle de cette configuration, suggère l'hypothèse que le BE soit le siège d'une « circulation cyclonique » au sens de la dynamique des fluides ( $\Gamma$ ).

La circulation  $\Gamma$  sur une courbe fermée est la moyenne de la composante tangentielle du courant, multipliée par la longueur de la courbe :  $\Gamma = \int_C \vec{v} \cdot \vec{T} dl$ , où :  $C$  est une courbe fermée;  $\vec{v}$  est le vecteur de composantes  $(U, V)$ ;  $\vec{T}$  est un vecteur unitaire tangent à la courbe; et  $dl$  est un élément de longueur sur la courbe (Pedlowsky, 1979).

La figure 18 présente les valeurs moyennées sur la verticale  $U$  et  $V$  telles que vues précédemment à la figure 6e (Échantillonnage no.2, de 00h20 à 01h02 le 25-05-05). La troisième planche de la figure illustre les vecteurs de composantes  $(U, V)$  tracés le long du transect d'étude (axe d'origine). L'échelle de longueur des vecteurs est illustrée sur l'ordonnée. La section comprise entre les traits verticaux correspond à la partie « cuvette » du transect. Cette section est aussi délimitée par des traits perpendiculaires au trajet du navire représenté dans l'encadré supérieur droit de la figure.

Selon nos observations cette circulation  $\Gamma$ , dans la cuvette aval du BE, serait plus marquée en période de vive-eau qu'en période de morte-eau. Les facteurs favorables à sa formation seraient : la forme de cette partie du BE (*c.f.* figure 2 et sa description) et la puissance du courant intrusif. En effet, le chenal principal provenant du SE se joint à la cuvette de manière excentrée vers le nord, par rapport au centre du complexe. Cela oriente le courant intrusif en une course qui tend à longer la paroi nord du bassin dès qu'il y pénètre. Cela favorise l'entraînement de l'eau située à la gauche du courant (*i.e.* du côté sud de la cuvette), initiant le mouvement circulatoire  $\Gamma$ .

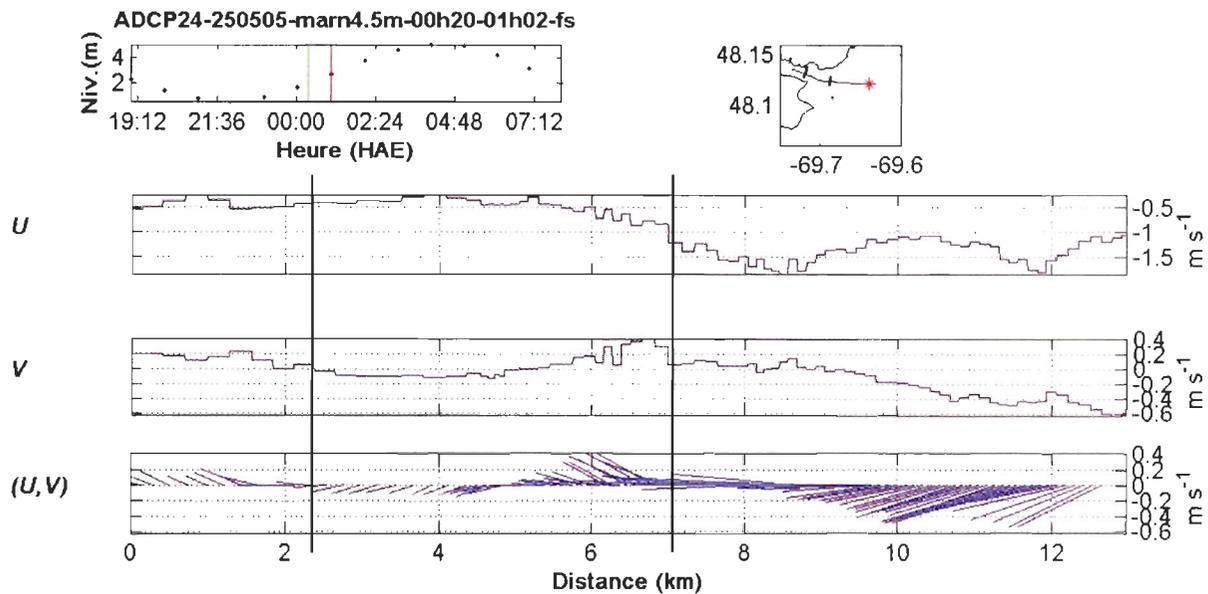


Figure 18. Composantes  $U$ ,  $V$  et vecteurs  $(U, V)$  le long du transect. Échantillonnage no.2, marnage 4,5m, 00h20 à 01h02 le 25-05-05, trajet fjord-seuil, BM+ 2 à BM+3.

Il est intéressant de souligner que Allen et Simpson (2002) ont observé une gyre près de l'embouchure du Loch Linnhe et y attribuent l'initiation de cette circulation non seulement à la morphologie du bassin mais aussi à la puissance du courant intrusif. Les distributions de salinité en surface obtenues du modèle numérique STLE 400 ont d'ailleurs montré que la signature des structures associées à l'ondulation interne dans le BE est plus accentuée du côté nord du fjord que du côté sud (figure 14). Cela suggère qu'une plus grande partie de l'énergie cinétique est déployée du côté nord du fjord et que le courant intrusif ondulatoire y serait plus puissant.

Dans l'ensemble, les valeurs de la composante  $V$  indique que l'intensité de la circulation  $\Gamma$  devrait diminuer à partir de la fin de la 4<sup>e</sup> heure du flot suite à la diminution du courant de flot. Les données de  $V$  suggèrent que la circulation  $\Gamma$  serait encore présente en fin de flot (fin de 5<sup>e</sup> heure et 6<sup>e</sup> h), bien que moins marquée. Comme ce mouvement n'est alors plus soutenu par le courant intrusif, son maintien est alors vraisemblablement attribuable à l'inertie des eaux du BE.

## 5. CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que l'intensité du saut hydraulique et la profondeur atteinte par le courant gravitationnel dans le BE varient en fonction du cycle vive-eau – morte-eau. L'influence de l'intensité du saut hydraulique sur les eaux en place dans le BE est davantage de l'ordre des vitesses des courants que d'ordre structurel. Le phénomène d'intrusion d'eau estuarienne dans le FS est à l'origine du mélange turbulent de la masse intrusive avec les eaux en place dans le BE. La turbulence, qui se manifeste jusqu'à la surface, fait probablement de la région de l'embouchure le principal lieu de ventilation des eaux du FS. Il a aussi été montré que lors d'un flot de marée, la circulation est verticalement uniforme sur le seuil alors qu'elle est plus complexe dans le BE : le courant intrusif remonte le cours du BE à mi-profondeur alors que sous cette couche, un contre-courant se dirige vers l'aval. Il en résulte, à cet endroit lors du flot, une circulation tidale inversée par rapport à la circulation estuarienne typique. De plus, la composante transverse du courant, conjuguée à la physionomie du BE, y suggère une circulation cyclonique. Enfin, l'attention portée aux courants transverses au cours de ce travail a permis de déceler l'étagement de ces derniers.

Cependant, le présent travail comporte peu d'informations concernant l'étagement des propriétés physicochimiques. Une exploration plus approfondie de ce champ par une combinaison de profils physicochimiques plus nombreux et l'enregistrement des vitesses transversales pourrait permettre de comprendre l'origine des observations de Siebert *et al.* (1979) et de Bélanger (2003) concernant la variation d'inclinaison des isopycnes dans le BE en fonction du stade de marée, et de vérifier l'existence de liens entre ces observations et la circulation tidale. De plus, l'étude de la circulation  $\Gamma$  dans la cuvette aval du BE devrait être approfondie, notamment par le relevé des vitesses le long d'axes perpendiculaires à l'actuel transect d'échantillonnage longitudinal.

Somme toute, les percées réalisées par ce projet laissent de nouvelles questions en suspens : Le mélange turbulent résultant du saut hydraulique incorpore l'intégralité des eaux intrusives et approximativement 26% des eaux de surface. Mais quel est le pourcentage de l'eau du fond introduit dans le mélange ? Ces proportions demeurent-elles constantes lorsque les propriétés physicochimiques des masses d'eau en cause sont autres que celles observées ? Quel est le mécanisme à l'origine de l'étagement des courants transverses ? La circulation tidale inversée par rapport à la circulation estuarienne typique est-elle persistante sur plusieurs cycles de marée ? Allen et Simpson (2002), ont observé la disparition de la gyre du Loch Linnhe lorsque l'intrusion d'eau dense atteint le fond du Loch. Il serait intéressant d'étudier cette question dans le contexte du FS.

En bref, une nouvelle campagne permettant la prise de données simultanées dans le BE et sur le SE, couplée à l'enregistrement courantologique à l'aide d'un ADCP fixé au fond, serait préalable à une analyse en trois dimensions des paramètres intégrés à un modèle non-hydrostatique à haute résolution pour la région de l'embouchure du fjord du Saguenay.

## REMERCIEMENTS

Ce manuscrit est dédié à la mémoire de François J. Saucier, directeur initial du projet, pour le partage de sa passion envers la science et le Saint-Laurent, ainsi que pour son indéfectible confiance m'ayant permis de mener à terme ce projet.

Je désire remercier les personnes suivantes, sans qui la réalisation de ce projet n'aurait pu être accomplie avec autant de plaisir et de bons moments :

Dr. Jean-François Dumais, directeur du projet. Merci de m'avoir « adopté » en cours de route;

Mes collègues du Laboratoire d'analyse et de simulation des systèmes océaniques de l'Ismer : Marc Desfossez, Simon Saint-Onge, Yuan Ye, Nicolas Lambert, et particulièrement James Caveen, Simon Senneville et Pierre Saint-Laurent;

Dr. Jean-Claude Brêthes, professeur; Gilles Desmeules, technicien; ainsi que l'ensemble du personnel de l'Institut des sciences de la mer à Rimouski;

Nadia Ménard, biologiste; Benoît Dubeau, coordonnateur des opérations; Gérard Therrien, capitaine; Marie-Claude Martel, Martin Gaudreau et Danny Gareau, gardes-parc; ainsi que l'ensemble du personnel du Parc marin du Saguenay – Saint-Laurent;

André Richard et Robert Noël, capitaines; Ève Guilbault et Kathy Bérubé, 1<sup>ers</sup> maîtres; Michel Rousseau, technicien; ainsi que les matelots et l'ensemble de l'équipage du Coriolis II;

Pascal Guillot, gestionnaire des données physiques pour Québec-Océans;

Maxime Dion, assistant de recherche à l'Institut Maurice-Lamontagne;

Martin Levebvre, Géomaticien du CIDCO;

Mireille Pilote, Service météorologique du Canada, Environnement Canada - Région du Québec;

Bernard Labrecque, Agent des marées, Service hydrographique du Canada - Région du Québec;

Darrin Thorne, représentant des ventes à Nautical Data International.

Enfin, je remercie les membres de mon jury de mémoire pour leurs suggestions éclairantes et leurs critiques constructives.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen, G.L. et Simpson, J.H. 2002. The response of a strongly stratified fjord to energetic tidal forcing. *Est., Coast. and Shelf Sc.* **55** : 629-644.
- Armi, L. 1986. The hydraulics of two flowing layers. *J. Fluid Mech.*, **31** : 209-248.
- Baschek, B. 2002. Air-sea gas exchange in tidal fronts. Thèse de doctorat, University of Victoria, Victoria, 131 p.
- Bélanger, C. 2003. Observation and modelling of a renewal event in the Saguenay Fjord. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 235 p.
- Benjamin, T.B. 1966. Internal waves of finite amplitude and permanent form. *J. Fluid Mech.*, **25** : 241-70. [pp. 53, 55, 57, 67].
- Benjamin, T.B. 1967. Internal waves of permanent form in fluids of great depth. *J. Fluid Mech.*, **29** : 559-92. [pp. 54, 67].
- Booth, D.A. 1987. Some consequences of a flood tide front in Loch Creran. *Est., Coast. and Shelf Sc.* **24** : 363-375.
- Bourgault, D., Saucier, F.J., et Lin, C.A. 2000. Shear instability in the St. Lawrence Estuary, Canada: A comparison of fine-scale observations and estuarine circulation model results. *J. Geophys. Res.*, **106** (C5) : 9393-9409.
- Cummins, P.F., Armi, L., Vagle, S. et Farmer D. M. 2003. Stratified flow over topography: upstream influence and generation of nonlinear internal waves. *Proc. R. Soc. Lond.* **459** : 1467-1487.
- Cummins, P.F., Armi, L. et Vagle, S. 2006. Upstream internal hydraulic jumps. *J. Phys. Oceanogr.*, **36** : 753-759.

- De Ladurentaye, R., Therriault, J.-C., Lacroix, G. et Côté, R. 1984. Processus advectifs et répartition du zooplancton dans un fjord. *Marine Biology*, **82** : 21-29.
- Diab, G. 2009. Distribution de l'ichyoplancton et croissance larvaire dans le fjord du Saguenay. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 92 p.
- Drainville, G. 1968. Le fjord du Saguenay : I - Contributions à l'océanographie. Travaux sur les pêcheries du Québec, **24**, Direction des pêcheries, Ministère de l'Industrie et du Commerce, In *Nat. Can.*, vol. 95, 1968, **4** : 809-855.
- Farmer D.M. et Armi, L. 1986. Maximal two-layer exchange over a sill and through the combination of a sill and contraction with barotropic flow. *J. Fluid Mech.*, **164** : 53-76.
- Farmer D.M. et Armi, L. 1999. The generation and trapping of internal solitary waves over topography. *Science*, **283** (5398) : 188-190.
- Farmer D.M. et Denton R.A. 1985. Hydraulic control of flow over the sill in Observatory Inlet. *J. Geophys. Res.*, **90** : 9051-9068.
- Farmer D.M., Pawlowicz, R. et Jiang, R. 2002. Tilting separation flows: a mechanism for intense vertical mixing in the coastal ocean. *Dyn. of Atmos. and Oceans*, **36** (2002): 43-58.
- Forrester, W.D. 1972. Tidal transports and streams in the St. Lawrence River and Estuary. *Int. Hydro. Rev.* **49** : 95-108.
- Gade, H.G. et Edwards, A. 1980. Deep water renewal in fjords. Geophysical Institute, University of Bergen, In *Fjord oceanography*, Plenum Press. New-York, pp. 453-489.
- Garrett, C.J.R. 2004. Frictional processes in straits. *Deep-Sea Res. II.* **51** : 393-410.
- Gerdes, F., Garrett, C. et Farmer, D.M. 2002. On internal hydraulics with entrainment. *J. Phys. Oceanogr.* **32** : 1106-1111.

- Helle, H.B. 1978. Summer replacement of deep water in Byfjord, Western Norway : Mass exchange accross the sill induced by coastal upwelling. In *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords* (Nihoul, J.C.J. Ed.), Elsevier Oceanography Series, New-York, **23**, pp. 441-464.
- Holland, D.M., Rosales, R.R., Stefanica, D. et Tabak, E.G. 2002. Internal hydraulic jumps and mixing in two-layer flows. *J. Fluid Mech.* **470** : 63-83.
- Ingram, R.G. 1979. Water mass modification in the St. Lawrence Estuary. *Nat. Can.* **106** : 45-54.
- Ingram, R.G. 1983. Vertical mixing at the head of the Laurentian Channel. *Est. Coast. Shelf Sci.* **16** : 332-338.
- Ingram, R.G. 1985. Frontal characteristics at the head of the Laurentian Channel. *Nat. Cat.* **112** : 31-38.
- Ingram, R.G. et El-Sabh M.I. 1990. Fronts and mesoscale features in the St. Lawrence estuary. In *Oceanography of a large-scale estuarine system: The St. Lawrence* (M.I. El-Sabh and N. Silverberg, Eds.), Springer-Verlag, New-York, pp. 71-93.
- Kundu, P.K. 1990. Fluid Mechanics, Academic Press Inc., San Diego, 638 p.
- Lamontagne, É. 1993. Étude de la fracturation au Lac-St-Jean. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 226 p.
- Lane-Serff, G.F. 2004. Topographic and boundry effects on steady and unsteady flow through straits. *Deep-Sea Res. II.* **51** : 321-334.
- Largier, J.L. 1992. Tidal intrusion fronts. *Estuaries*, **15** (1) : 26-39.
- Largier, J.L. et Taljaard, S., 1991. The dynamics of tidal intrusion, retention, and removal of seawater in a bar-built estuary. *Est. Coast. and Shelf Sci.*, **33** : 325-338.

- Lavoie, D., Simard, Y. et Saucier, F.J. 2000. Aggregation and dispersion of krill at channel heads and shelf edges: the dynamics in the Saguenay – St. Lawrence Marine Park. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **57** : 1853-1869.
- Loucks, R.H. et Smith-Sinclair, R.E. 1975. Report on the physical oceanography of the Saguenay Fjord. Unpub. report, Chemical Oceanography Division of Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, N.S., 77 p.
- Lozovatsky, I., Liu, Z., Wei, H. et Fernando, H.J.S. 2007. Tides and mixing in the northwestern east China Sea, Part II: Near bottom turbulence, *Cont. and Shelf Res.*, doi:10.1016/j.csr.2007.08.007, 13 p.
- Marchand, C., Simard, Y. et Gratton, Y. 1999. Concentration of capelin in the tidal upwelling fronts at the head of the Laurentian channel in the St. Lawrence estuary. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **56** : 1832-1848.
- Mickett, J.B., Gregg, M.C. et Seim, H.E. 2004. Direct measurements of diapycnal mixing in a fjord reach – Puget Sound's Main Bassin. *Est. Coast. Shelf Sci.* **59** : 539-558.
- Mertz, G. et Gratton, Y. 1990. Topographic waves and topographically induced motion in the St. Lawrence estuary. In *Oceanography of a large-scale estuarine system: The St. Lawrence* (M.I. El-Sabh and N. Silverberg, Eds.), Springer-Verlag, New-York, pp. 94-108.
- Parc marin du Saguenay – Saint-Laurent. 1995. Le plan directeur du parc marin du Saguenay – Saint-Laurent «Carrefour de vie, source d'échanges et de richesses». Environnement et Faune Canada et Patrimoine Canada, Ottawa, 70 p.
- Pelegrí, J.L. 1988. Tidal fronts in Estuaries. *Est. Coast. Shelf Sci.* **21** : 45-60.
- Pedlosky, J. 1979. *Geophysical Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, New York, 710 p.
- Peters, H. 1999. Spatial and temporal variability of turbulent mixing in an estuary. *J. Mar. Res.*, **57** : 805-845.

- Saucier, F.J., Chassé, J. et D'Astous, A. 1997. Preliminary calculation of summer circulation and density changes in the Saguenay Fjord, Canada. Division de la productivité océanique, Institut Maurice-Lamontagne, Pêches et océans Canada.
- Saucier, F.J. et Chassé J., 2000. Tidal circulation and buoyancy effects in the St.Lawrence Estuary. *J. Atmosph. Ocean*, **38** (4) : 505-556.
- Saucier, F.J., Roy, F., Senneville, S., Smith, G., Lefaiivre, D., Zakardjian, B. et Dumais, J.-F. 2009. La circulation et le climat dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. *Revue des Sciences de l'Eau*, **21** (4) : 525-542.
- Schafer, C.T., Roy, F. et Côté, R. 1990. The Saguenay Fjord: a major tributary to the St.Lawrence Estuary. In *Oceanography of a large scale system: the St.Lawrence*, El-Sabh, M.I. et Silverberg, N. (Eds.), New-york: Springer-Verlag, Coastal and Estuarine Studies, **39** : 378-420.
- Siebert, G.H, Trites, R.W. et Reid, S.J. 1979. Deepwater exchange processes in the Saguenay Fjord. *J. Fish. Res. Board Can.*, **36** : 42-53.
- Simpson, M.R. 2001. Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler, United States Geological Survey, Sacramento, 123 p.
- Smith, D.J. et Farmer, D.M. 1980. Mixing induced by internal hydraulic disturbances in the vicinity of sills. In *Fjord Oceanography*. ED. Plenum Press, New York., pp. 251-257.
- Stacey, M.W. et Gratton, Y. 2001. The energetics and tidally induced reverse renewal in a two-silled fjord. *J. Phys. Oceanogr.*, **31** : 1599-1615.
- Stine, A. 2002. A survey of internal tides as seen in moored buoy records. Mémoire de maîtrise, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 144 p.
- Therriault, J.-C. et Lacroix, G. 1975. Penetration of the deep layer of the Saguenay Fjord by

surface waters of the St. Lawrence Estuary. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32** : 2373-2377.

Therriault, J.-C., De Ladurentaye, R. et Ingram, R.G. 1984. Particulate matter exchange across a fjord sill. *Est. Coast. Shelf Sci.* **18** : 51-64.

Tritton, D.J. 1977. Physical fluid dynamics, Van Nostrand Reinhold, Wokingham, 362 p.

Turner, J.S. 1973. Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press, Cambridge, 368 p.

Valle-Levinson, A., Blanco, J.A. et Frangópulos, M. 2006. Hydrography and frontogenesis in a glacial fjord off the Strait of Magellan. *Ocean Dynamics* **56** : 217-227.

Voulgaris, G. et Trowbridge, J.H. 1998. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, **15** (1) : 272-289.

**Annexe 1 – Présentation et description de la routine d'analyses ADCP réalisée à l'aide du logiciel  
*MatLab.***

Chaque passage du navire le long du transect a permis l'enregistrement de séries de données ADCP, dont le format original \*.enx a été converti en base de données \*.mat par le logiciel *WinADCP*, pour être traitées sous *MatLab* à l'aide de la routine suivante. Les commentaires apparaissant en vert et précédés du symbole de pourcentage (%), décrivent les opérations de tri, de classement, de calcul et de représentation graphique appliqués aux lignes de commandes subséquentes.

```

% lire le fichier nommé filename
% les sous-ensembles ont nstep éléments
% nbin est le nombre de bin de l'ADCP à utiliser
% bbin est la profondeur de la première mesure (profondeur de montage de l'ADCP + portée de l'ADCP)
% pbin est l'épaisseur d'un bin
function [u,v,w,uprim,vprim,wprim,umoy,vmoy,wmoy,utrope,ucline,vtrope,vcline,friction,cisaille] =
calc_rey(filename,fs,nstep,bbin,pbin,pmax,wmoymax,wmoymax,umoymax,uclinemin,uclinemax,vmoymax,
vclinemin,vclinemax,frictionmin,frictionmax,cisaillemin,cisaillemax,tcomments)
opengl neverselect
load(filename)
load 'le3425.GMT.txt'
% Determiner la série de date relative aux données de niveau d'eau en HAE
wlevdate=datetime(le3425(:,1),le3425(:,2),le3425(:,3),le3425(:,4),le3425(:,5),0)-(4/24);
% renommer les variables relatives au courant
u = SerEmmpersec;
v = SerNmmperssec;
w = SerVmmperssec;
% ntime est le nombre d'éléments de la série
% nmax est le nombre de sous-ensembles
ntime = length(u)
nmax = floor(ntime/nstep);
% u,v et w sont redimensionnés pour avoir un nombre fini de sous-ensembles
u = u(1:nmax*nstep,:);
v = v(1:nmax*nstep,:);
w = w(1:nmax*nstep,:);
% ntime est redéfini
% nbin est défini
[ntime,nbin] = size(u);
prof = flipdim([1:nbin]*pbin+bbin,1);
% Remplacer les -32768 par des NaN dans u,v et w
found = find(u==-32768);
u(found) = NaN;
found = find(v==-32768);
v(found) = NaN;
found = find(w==-32768);
w(found) = NaN;
% rotation des champs de vitesses
theta = 8/360*2*pi;
utmp = u;
vtmp = v;
u = (utmp.*cos(theta) - vtmp.*sin(theta))/1000;

```

```

v = (utmp.*sin(theta) + vtmp.*cos(theta))/1000;
w = w/1000;
clear utmp vtmp;
% Initialisation des variables, ...+t = temporaire
umoyt = zeros(nmax,nbin);
vmoyt = zeros(nmax,nbin);
wmoyt = zeros(nmax,nbin);
utropet = zeros(nmax,1);
vtropet = zeros(nmax,1);
dvtrope = zeros(nmax,1);
dvtropet = zeros(ntime,1);
uclinet = zeros(nmax,nbin);
vclinet = zeros(nmax,nbin);
utrope = zeros(ntime,1);
vtrope = zeros(ntime,1);
ucline = zeros(ntime,nbin);
vcline = zeros(ntime,nbin);
umoy = zeros(ntime,nbin);
vmoy = zeros(ntime,nbin);
wmoy = zeros(ntime,nbin);
uprim = zeros(ntime,nbin);
vprim = zeros(ntime,nbin);
wprim = zeros(ntime,nbin);
rey_uw = zeros(ntime,nbin);
rey_vw = zeros(ntime,nbin);
reymoy_uw = zeros(ntime,nbin);
reymoy_vw = zeros(ntime,nbin);
reymoy_uwt = zeros(nmax,nbin);
reymoy_vwt = zeros(nmax,nbin);
uz = zeros(ntime,nbin);
vz = zeros(ntime,nbin);
uzmoyt = zeros(nmax,nbin);
vzmoyt = zeros(nmax,nbin);
uzmoy = zeros(ntime,nbin);
vzmoy = zeros(ntime,nbin);
% Déterminer date début et fin, ...+t = temporaire, ...+t = temporaire
Ddebut = datenum(SerYear(1)+2000,SerMon(1),SerDay(1),SerHour(1),SerMin(1),SerSec(1));
Dfin =
datenum(SerYear(ntime)+2000,SerMon(ntime),SerDay(ntime),SerHour(ntime),SerMin(ntime),SerSec(ntime));
Ddebutm = datenum(SerYear(1)+2000,SerMon(1),SerDay(1),SerHour(1)-6,SerMin(1),SerSec(1));
Dfinm =
datenum(SerYear(ntime)+2000,SerMon(ntime),SerDay(ntime),SerHour(ntime)+6,SerMin(1),SerSec(ntime));
dfoundm = find(wlevdate>=Ddebutm,1);
ffoundm = find(wlevdate>=Dfinm,1);
dfound = find(wlevdate>=Ddebut,1);
ffound = find(wlevdate>=Dfin,1);
% Déterminer les courants moyens sur nstep éléments dans une variable temporaire
for i = 1:ntime/nstep
    umoyt(i,:) = nanmean(u((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));
    vmoyt(i,:) = nanmean(v((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));

```

```

    w moyt(i,:) = nanmean(w((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));
end
% Déterminer les courants moyens sur les ntime éléments
for i = 1:ntime
    umoy(i,:) = umoyt(ceil(i/nstep),:);
    vmoy(i,:) = vmoyt(ceil(i/nstep),:);
    wmoy(i,:) = wmoyt(ceil(i/nstep),:);
end
% Calcul des courants barotropes
for i = 1:ntime/nstep
    utropet(i) = nanmean(umoyt(i,:));
    vtropet(i) = nanmean(vmoyt(i,:));
end
for i = 1:ntime/nstep;
    uclinet(i,:) = umoyt(i,:) - utropet(i);
    vclinet(i,:) = vmoyt(i,:) - vtropet(i);
end
for i = 1:ntime
% Déterminer les perturbations du courant
    utrope(i) = utropet(ceil(i/nstep));
    vtrope(i) = vtropet(ceil(i/nstep));
    ucline(i,:) = uclinet(ceil(i/nstep),:);
    vcline(i,:) = vclinet(ceil(i/nstep),:);
    uprim(i,:) = u(i, :)-umoy(i, :);
    vprim(i,:) = v(i, :)-vmoy(i, :);
    wprim(i,:) = w(i, :)-wmoy(i, :);
end
% Déterminer les composantes des contraintes de Reynolds
rey_uw = uprim.*wprim;
rey_vw = vprim.*wprim;
% Déterminer les composantes des contraintes de Reynolds moyennes dans une variable temporaire
for i = 1:ntime/nstep
    reymoy_uwt(i,:) = nanmean(rey_uw((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));
    reymoy_vwt(i,:) = nanmean(rey_vw((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));
end
% Déterminer les composantes des contraintes de Reynolds moyennes sur les ntime éléments
for i = 1:ntime
    reymoy_uw(i,:) = reymoy_uwt(ceil(i/nstep),:);
    reymoy_vw(i,:) = reymoy_vwt(ceil(i/nstep),:);
end
% Calcul des composantes des contraintes de Reynolds moyennes au carré
reymoy_uwc = reymoy_uw.^2;
reymoy_vwc = reymoy_vw.^2;
% Calcul de la vitesse de friction au carré
frictionc = reymoy_uwc+reymoy_vwc;
% Calcul de la vitesse de friction
friction = nthroot(frictionc, 4);
% Calcul de la dérivée de u en fonction de la profondeur
for j = 1:nbin-1
    uz(:,j) = (u(:,j+1)-u(:,j))/2;

```

```

    vz(:,j) = (v(:,j+1)-v(:,j))/2;
end
% Calcul de la dérivée au carré
uzc = uz.^2;
vzc = vz.^2;
% Déterminer les dérivées au carré moyennes sur nstep éléments dans une variable temporaire
for i = 1:ntime/nstep
    uzmoyt(i,:) = nanmean(uzc((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));
    vzmoyt(i,:) = nanmean(vzc((i-1)*nstep+1:i*nstep,:));
end
% Déterminer les dérivées au carré moyennes sur les ntime éléments
for i = 1:ntime
    uzmoy(i,:) = uzmoyt(ceil(i/nstep),:);
    vzmoy(i,:) = vzmoyt(ceil(i/nstep),:);
end
% Calcul du cisaillement vertical au carré
cisaille = uzmoy + vzmoy;
% Calcul des distances
dist(1) = 0;
R = 6371; %km
theta = (90 - AnLLatDeg(1))*pi/180;
phi = -AnLLonDeg(1)*pi/180;
x1 = R * sin(theta)*cos(phi);
y1 = R * sin(theta)*sin(phi);
z1 = R * cos(phi);
for ind = 2: length(reymoy_uw);
    theta = (90 - AnLLatDeg(ind))*pi/180;
    phi = -AnLLonDeg(ind)*pi/180;
    x2 = R * sin(theta)*cos(phi);
    y2 = R * sin(theta)*sin(phi);
    z2 = R * cos(phi);
    dist(ind) = dist(ind-1) + [(x2-x1)^2 + (y2-y1)^2 + (z2-z1)^2]^0.5;
    x1 = x2;
    y1 = y2;
    z1 = z2;
end
%Créer une figure aux dimensions fixes
clf
figure(1)
set(gcf,'Position',[254 46 777 653]);
% Tracer la figure
eval(sprintf('text(0.1,0.9, ''%s'', ''Units'', ''normalized'')',filename))

% Tracer les données de niveau d'eau ainsi que le début et la fin des données ADCP
subplot(10,2,1)
plot(wlevdate(dfoundm:ffoundm) ,le3425(dfoundm:ffoundm,5),'.')
mmin = min(le3425(dfoundm:ffoundm,5));
mmax = max(le3425(dfoundm:ffoundm,5));
hold on
plot([Ddebut,Ddebut],[mmin,mmax], 'g')

```

```

plot([Dfin,Dfin],[mmin,mmax],'r')
axis([wlevdate(dfoundm) wlevdate(ffoundm) mmin mmax])
datetick('x','keeplimits','kepticks')
ylabel('Niv. (m)','FontWeight','demi')
xlabel('Heure (HAE)','FontWeight','demi')
title(tcomments,'FontWeight','bold')

% Tracer le trajet du navire
subplot(10,5,4)
plot(AnLLonDeg,AnLLatDeg)
hold on
plot(AnLLonDeg(1),AnLLatDeg(1),'*g')
plot(AnLLonDeg(ntime),AnLLatDeg(ntime),'*r')
cote_stle400_ll
lonmin = min(-69.75,min(AnLLonDeg));
lonmax = max(-69.6,max(AnLLonDeg));
latmin = min(48.06,min(AnLLatDeg));
latmax = max(48.16,max(AnLLatDeg));
axis([lonmin lonmax latmin latmax])

% Tracer vitesses verticales moyennées
subplot (10,1,2)
pcolor(dist,prof,wmoy')
shading ('flat')
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax], 'ij')
caxis([wmoymin wmoymax])
hc=colorbar;
set(hc,'YTick',[wmoymin 0 wmoymax]);
pos = get(gca,'Position');
text(-0.135,0.6,'<\it{w}>','Units','normalized','FontWeight','demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56,'m s-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
    set(gca,'Xdir','reverse')
end

% Tracer vitesses longitudinales moyennées
subplot (10,1,3)
pcolor(dist,prof,umoy')
shading ('flat')
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax], 'ij')
caxis([umoymin umoymax])
hc=colorbar;
set(hc,'YTick',[umoymin 0 umoymax]);
text(-0.135,0.6,'<\it{u}>','Units','normalized','FontWeight','demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56,'m s-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0

```

```

set(gca,'Xdir','reverse')
end

% Tracer vitesses longitudinales barotropes
subplot (10,1,4)
plot(dist,utrope')
pos2 = get(gca,'Position');
set(gca,'Position',[pos2(1) pos2(2) pos(3) pos2(4)])
axis( [dist(1) dist(ntime) min(utrope) max(utrope)])
grid on
text(-0.12,0.6,'\it{U}','Units','normalized','FontWeight','demi')
set(gca,'YAxisLocation','Right')
text(1.15,0.56,'m s^-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
set(gca,'Xdir','reverse')
end

% Tracer vitesses longitudinales baroclines
subplot (10,1,5)
pcolor(dist,prof,ucline')
shading ('flat')
axis('ij')
caxis([uclinemin uclinemax])
hc=colorbar;
set(hc,'YTick',[uclinemin 0 uclinemax]);
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax],'ij')
text(-0.12,0.6,'\it{U_r}','Units','normalized','FontWeight','demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56,'m s^-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
set(gca,'Xdir','reverse')
end

% Tracer vitesses transverses moyennées
subplot (10,1,6)
pcolor(dist,prof,vmoy')
shading ('flat')
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax],'ij')
caxis([vmoymin vmoymax])
hc=colorbar;
set(hc,'YTick',[vmoymin 0 vmoymax]);
text(-0.135,0.6,'<\it{v}>','Units','normalized','FontWeight','demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56,'m s^-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
set(gca,'Xdir','reverse')
end

```

```

% Tracer vitesses transverses barotropes
subplot (10,1,7)
plot(dist,vtrope')
hold on
pos2 = get(gca,'Position');
set(gca,'Position',[pos2(1) pos2(2) pos(3) pos2(4)])
axis( [dist(1) dist(ntime) min(vtrope) max(vtrope)])
grid on
text(-0.12,0.6,'\it{V}','Units','normalized','FontWeight','demi')
text(1.15,0.56,'m s-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
set(gca,'Xdir','reverse')
end

```

```

% Tracer vitesses transverses baroclines
subplot (10,1,8)
pcolor(dist,prof,vcline')
shading ('flat')
axis('ij')
caxis([vclinemin vclinemax])
hc=colorbar;
set(hc,'YTick',[vclinemin 0 vclinemax]);
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax], 'ij')
text(-0.12,0.6,'\it{V_r}','Units','normalized','FontWeight','demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56,'m s-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
set(gca,'Xdir','reverse')
end

```

```

% Tracer les vitesses de friction
subplot (10,1,9)
pcolor(dist,prof,friction')
shading ('flat')
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax], 'ij')
caxis([frictionmin frictionmax])
hc=colorbar;
set(hc,'YTick',[frictionmin frictionmax]);
text(-0.12,0.6,'\it{u_*}','Units','normalized','FontWeight','demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56,'m s-1','Units','normalized')
set(gca,'XTickLabel',{' '})
if fs==0
set(gca,'Xdir','reverse')
end

```

```

% Tracer le cisaillement vertical au carré

```

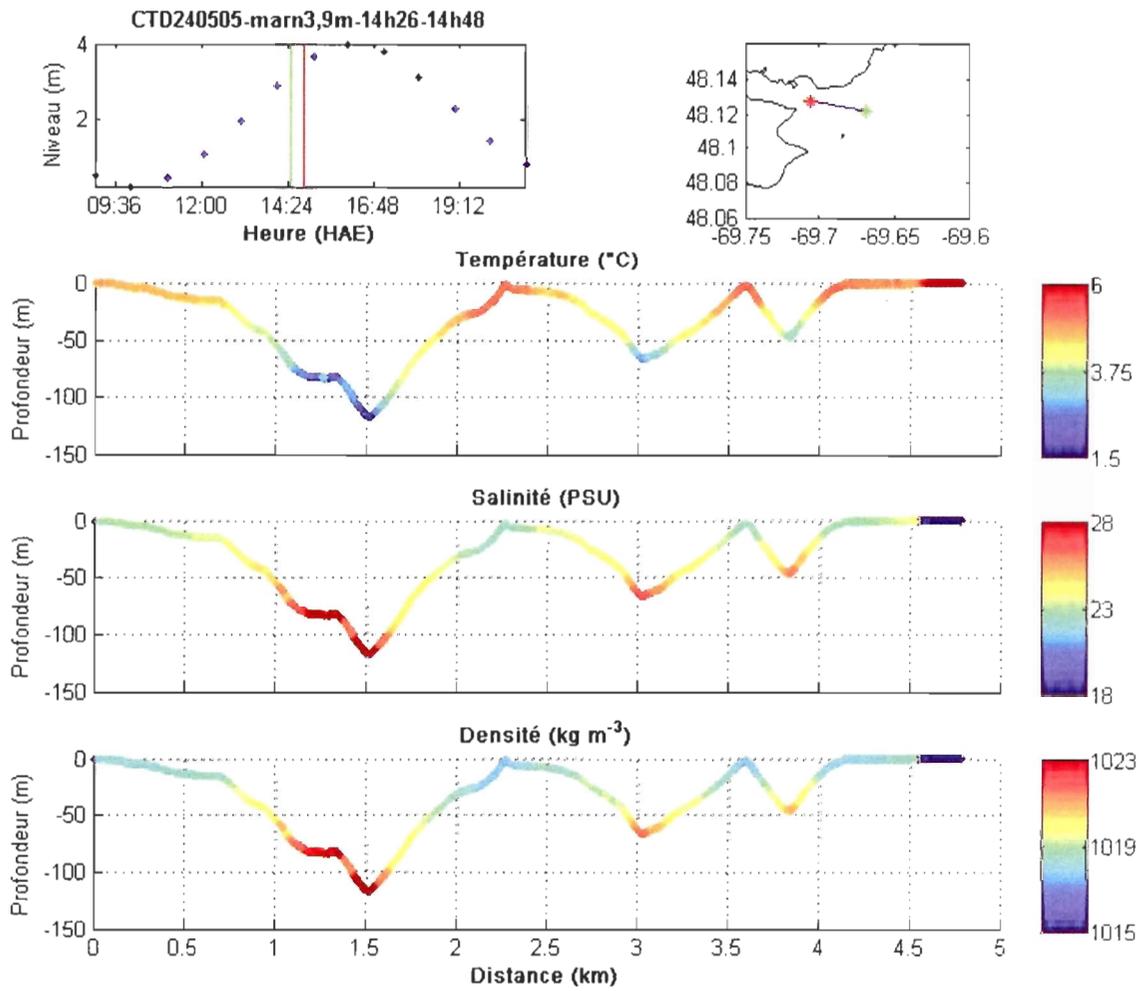
```

subplot (10,1,10)
pcolor(dist,prof,cisaille')
shading ('flat')
axis( [dist(1) dist(ntime) 0 pmax], 'ij')
caxis([cisaillemin cisaillemax])
hc=colorbar;
set(hc, 'YTick', [cisaillemin cisaillemax]);
text(-0.12,0.6, '\it{S^2}', 'Units', 'normalized', 'FontWeight', 'demi')
ylabel('Prof (m)')
text(1.15,0.56, 's^-^2', 'Units', 'normalized')
xlabel('Distance (km)', 'FontWeight', 'demi')
if fs==0
set(gca, 'Xdir', 'reverse')
end

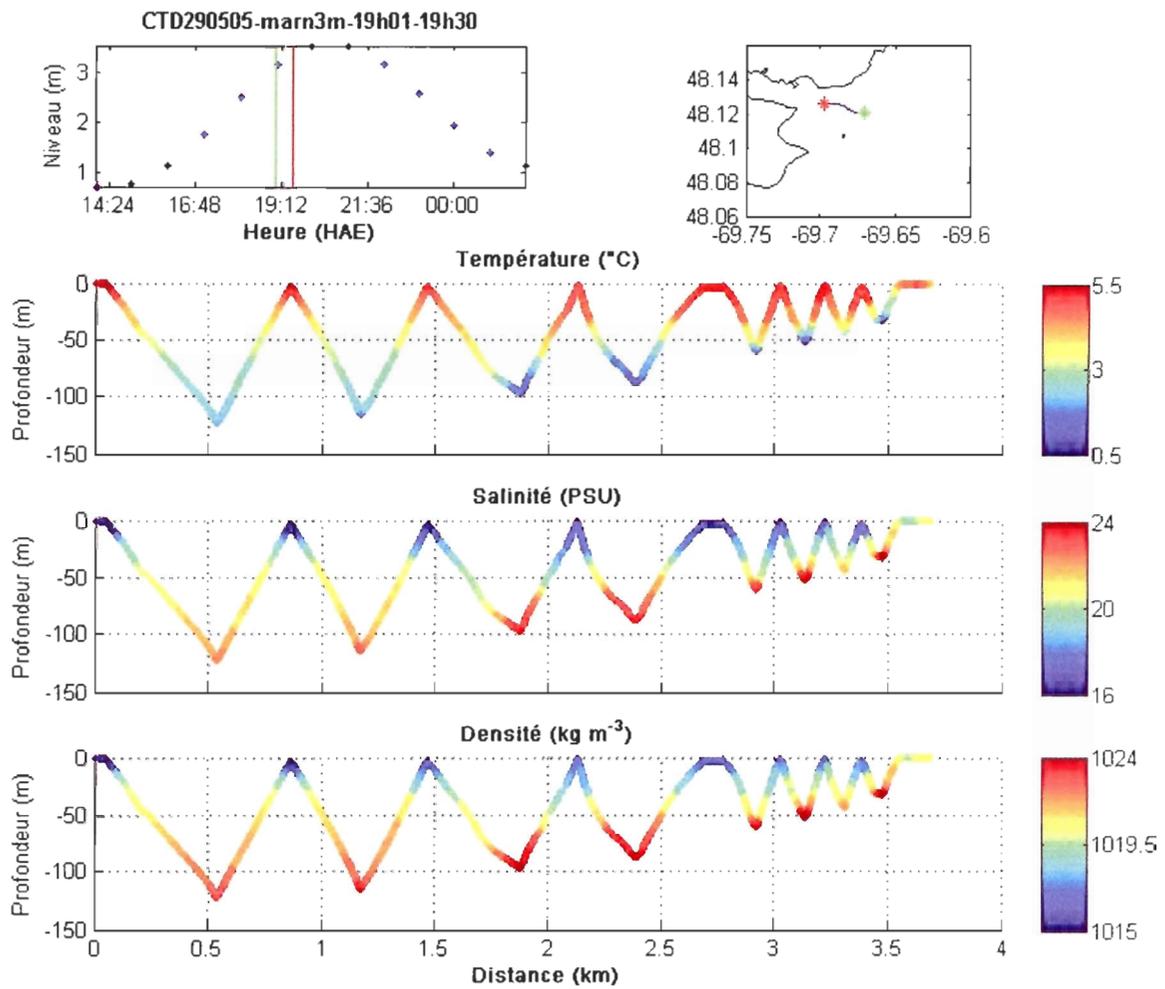
```

**Annexe 2 – Paramètres physicochimiques issus de profils par CTD à la trôle,  
le long du transect d'étude, les 24 et 29 mai 2005.**

Annexe 2a – Profils par CTD à la trôle, marnage 3,9m, 24 mai 2005.



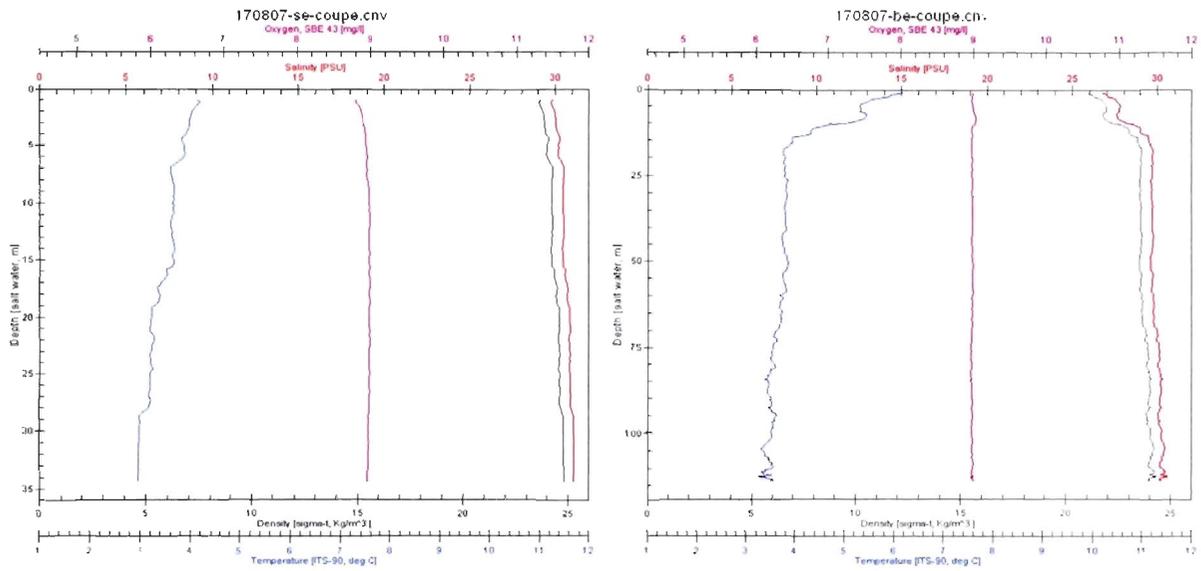
Annexe 2b – Profils par CTD à la trôle, marnage 3m, 29 mai 2005.



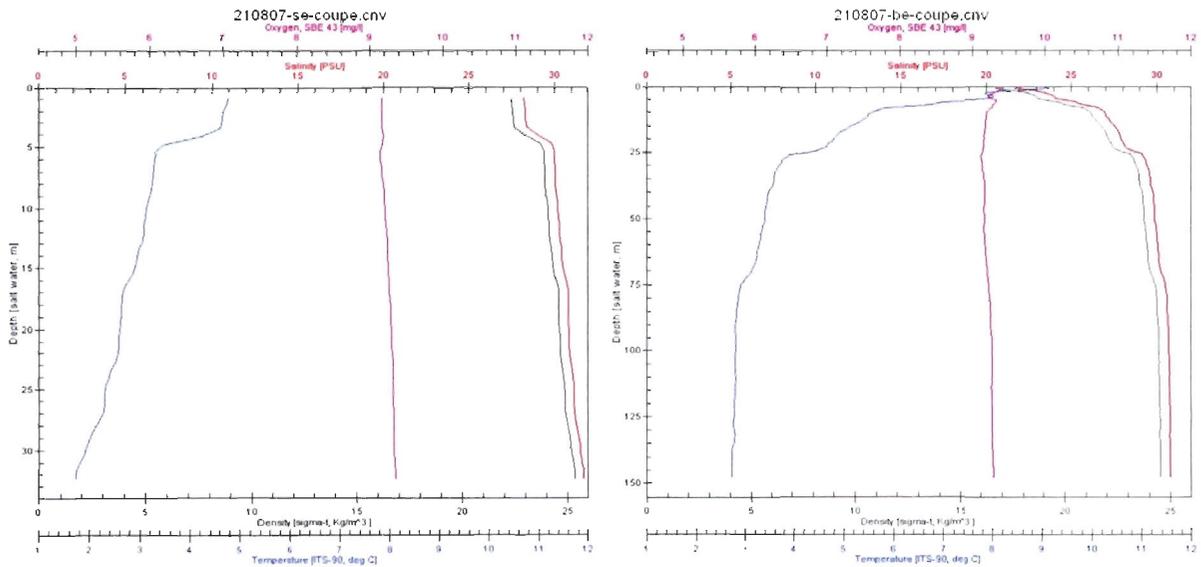
**Annexe 3 – Paramètres physicochimiques issus de profils verticaux par CTD,  
aux stations SE et BE, les 17, 21, 22 et 23 août 2007, stn SE à BM+3.**

(voir tableau IV pour connaître l'heure des profils)

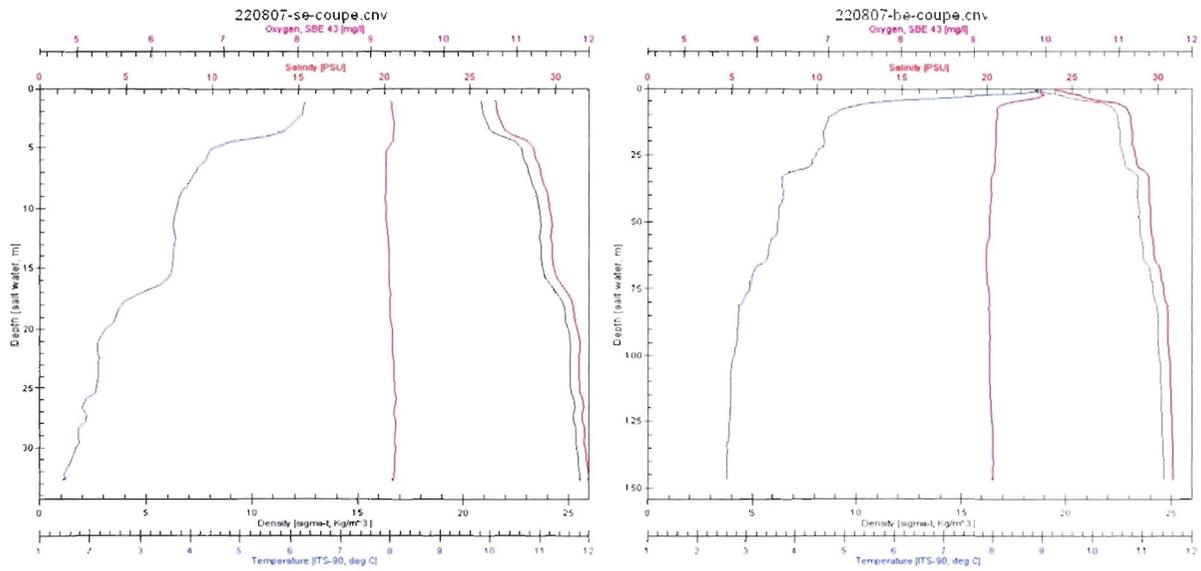
### Annexe 3a – Profils verticaux CTD des stations SE et BE, le 17 août 2007.



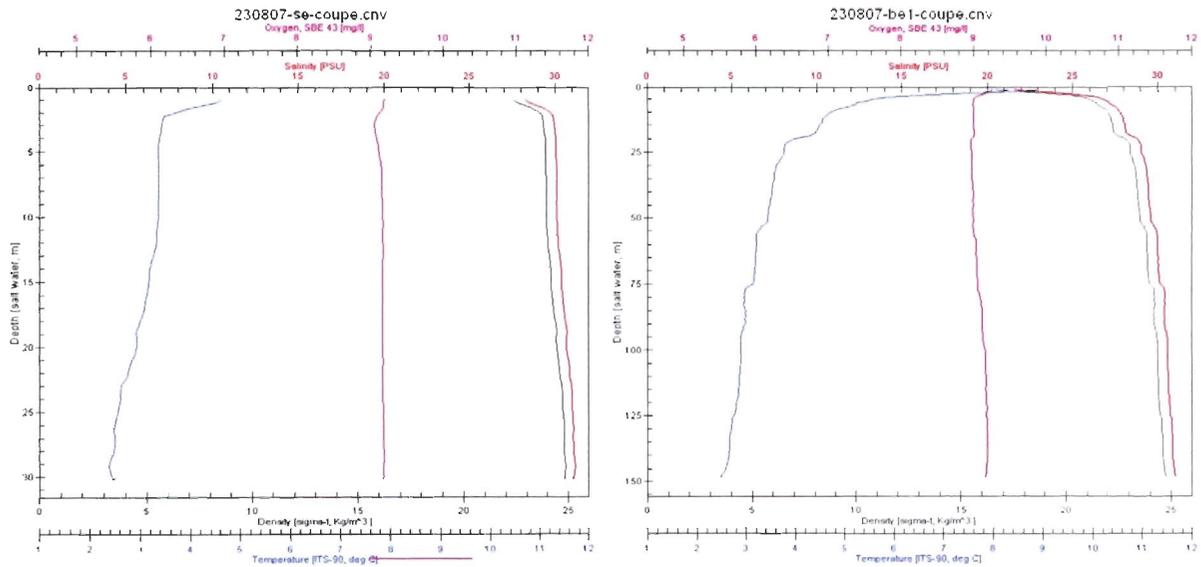
### Annexe 3b – Profils verticaux CTD des stations SE et BE, le 21 août 2007.



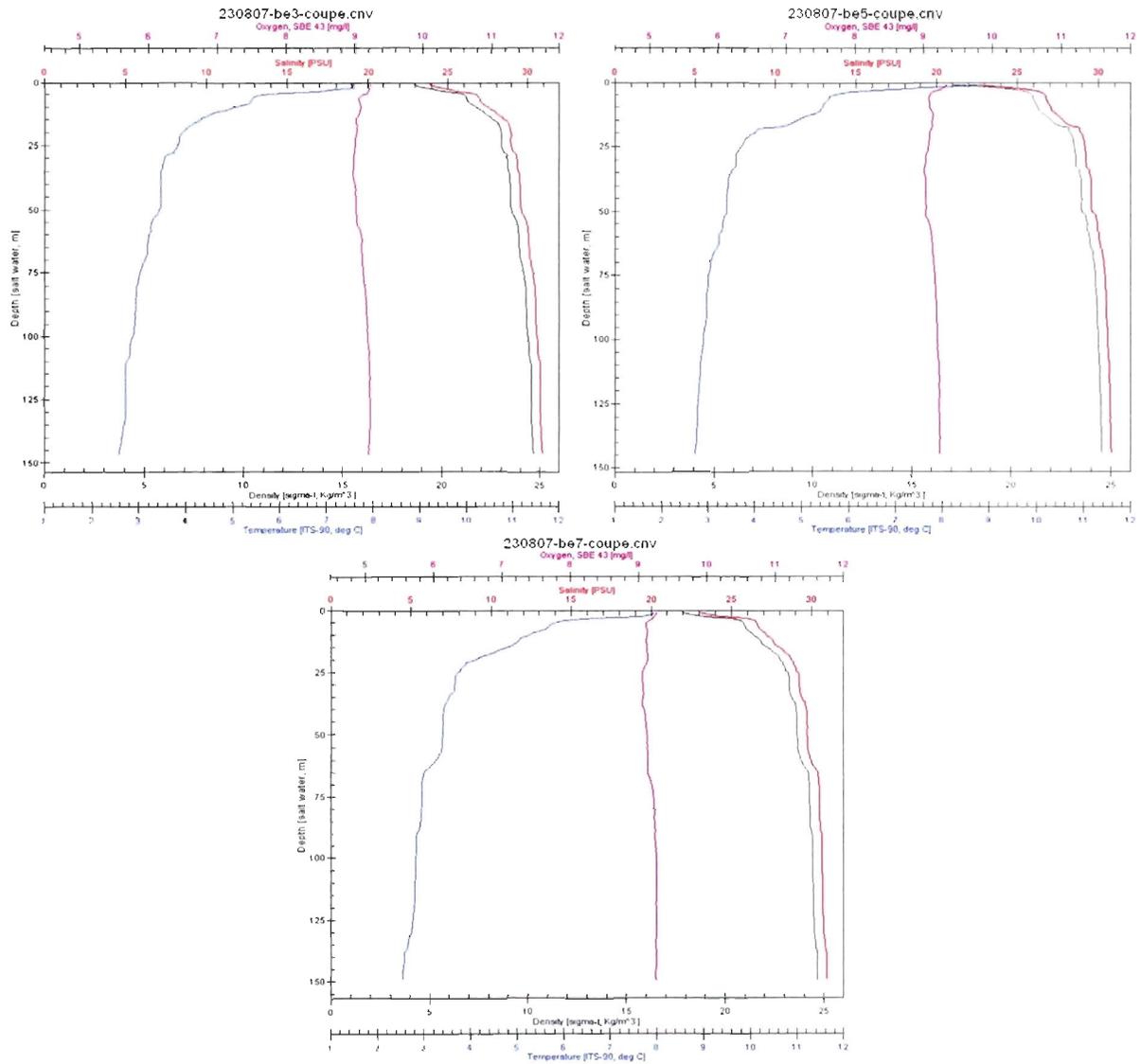
### Annexe 3c – Profils verticaux CTD des stations SE et BE, le 22 août 2007.



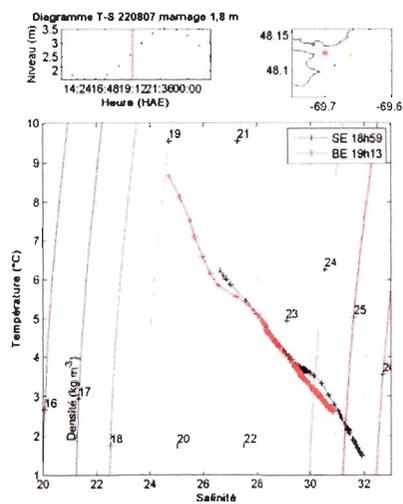
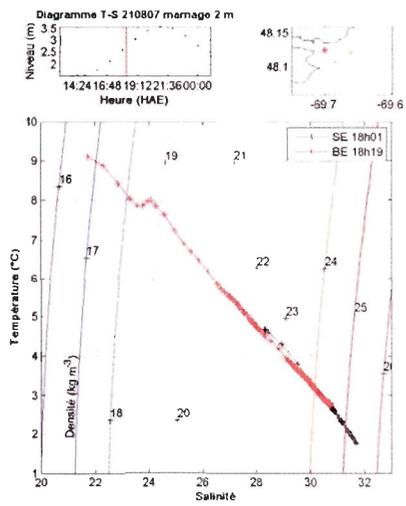
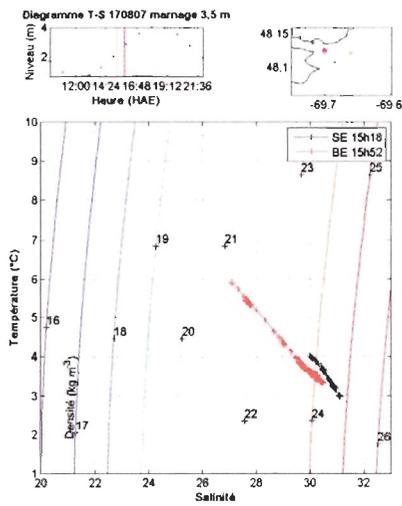
### Annexe 3d – Profils verticaux CTD des stations SE et BE, le 23 août 2007.



Annexe 3d (suite) – Profils verticaux CTD des stations SE et BE, le 23 août 2007.



**Annexe 3e – Diagrammes T-S des stations SE et BE, issus des profils verticaux CTD,  
les 17, 21 et 22 août 2007.**



**Annexe 3f. Calcul des fractions attribuables à l'eau de surface du BE ( $\rho_1$ ) et à l'eau de l'intrusion dense à SE ( $\rho_2$ ) dans la composition de la masse d'eau de l'intrusion à mi-profondeur ( $\rho_4$ ).**

Ces calculs sont effectués à partir des valeurs de densité moyennes issues du tableau V présentant les paramètres physicochimiques des profils verticaux CTD aux stations SE et BE, les 17, 21, 22 et 23 août 2007.

Moyenne de la densité au cœur de l'intrusion à mi-profondeur (35 – 65 m) à BE ( $\rho_4$ ) :	1023,62 kg m <sup>-3</sup>
Moyenne de la densité en surface (0 – 20 m) à BE ( $\rho_1$ ) :	1021,68 kg m <sup>-3</sup>
Moyenne de la densité sur l'intégralité de la colonne d'eau à SE ( $\rho_2$ ) :	1024,30 kg m <sup>-3</sup>

La moyenne de la densité de la couche profonde (<100 m) à BE ( $\rho_3$ ) est négligée car sa densité (1024,40 kg m<sup>-3</sup>) est trop semblable à celle de ( $\rho_2$ ).

$$a \text{ (fraction attribuable à } \rho_1) = \rho_4 - \rho_1 = 1,94 \text{ kg m}^{-3}$$

$$b \text{ (fraction attribuable à } \rho_2) = \rho_2 - \rho_4 = 0,68 \text{ kg m}^{-3}$$

$$a + b = 1$$

$$b = 1 - a$$

$$\begin{aligned} \rho_4 &= a \rho_1 + b \rho_2 \\ 1023,62 &= a \times 1021,68 + (1 - a) 1024,30 \\ 1023,62 &= a \times 1021,68 + 1 \times 1024,30 - a \times 1024,30 \\ 1023,62 - 1 \times 1024,30 &= a \times 1021,68 - a \times 1024,30 \\ -0,68 &= a \times -2,62 \\ a &= -0,68 \div -2,62 \\ a &= 0,26 \end{aligned}$$

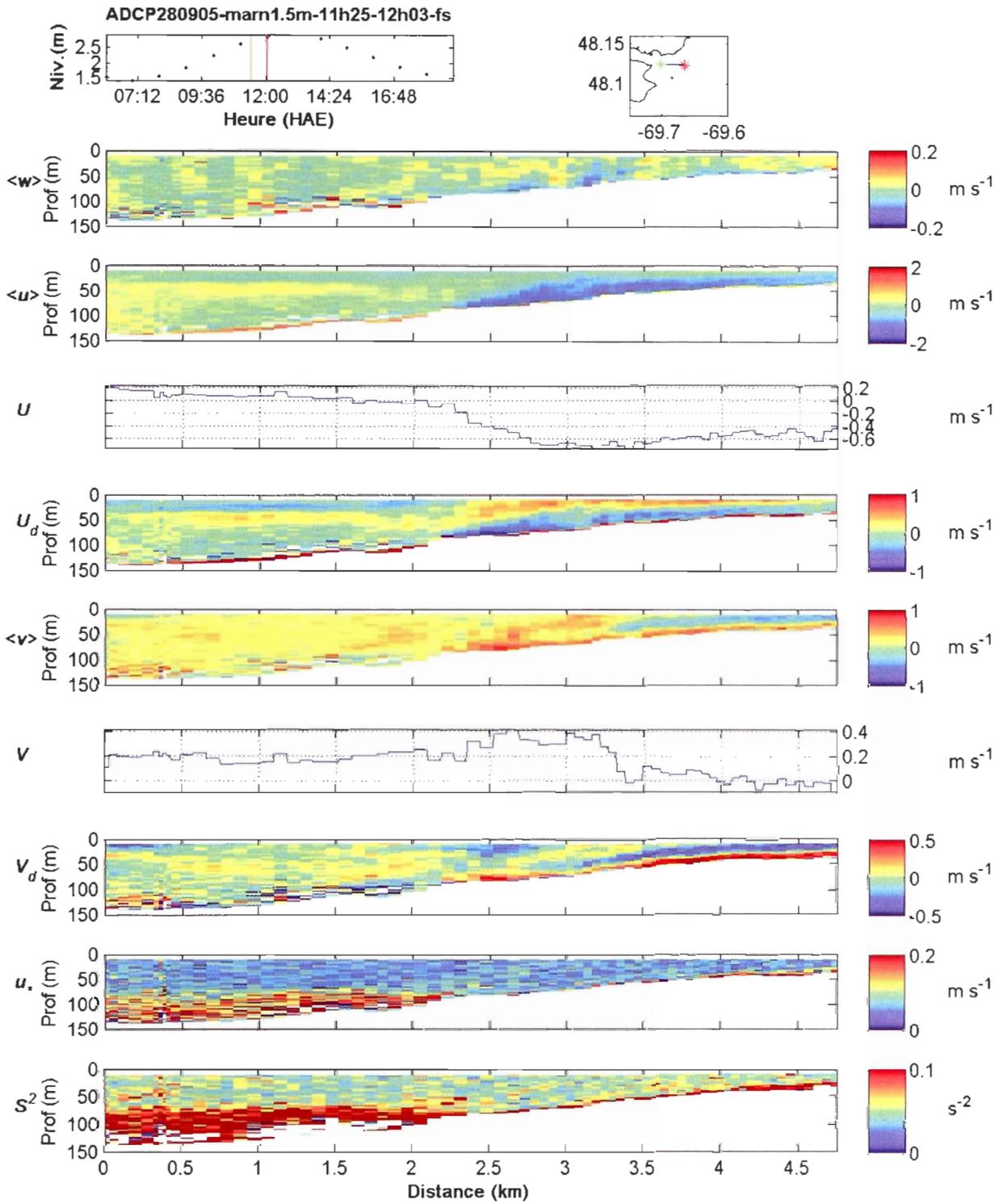
$$\text{si } a = 0,26 \text{ , alors } \rho_1 = 26\% \text{ de } \rho_4$$

$$\text{et que } a + b = 1$$

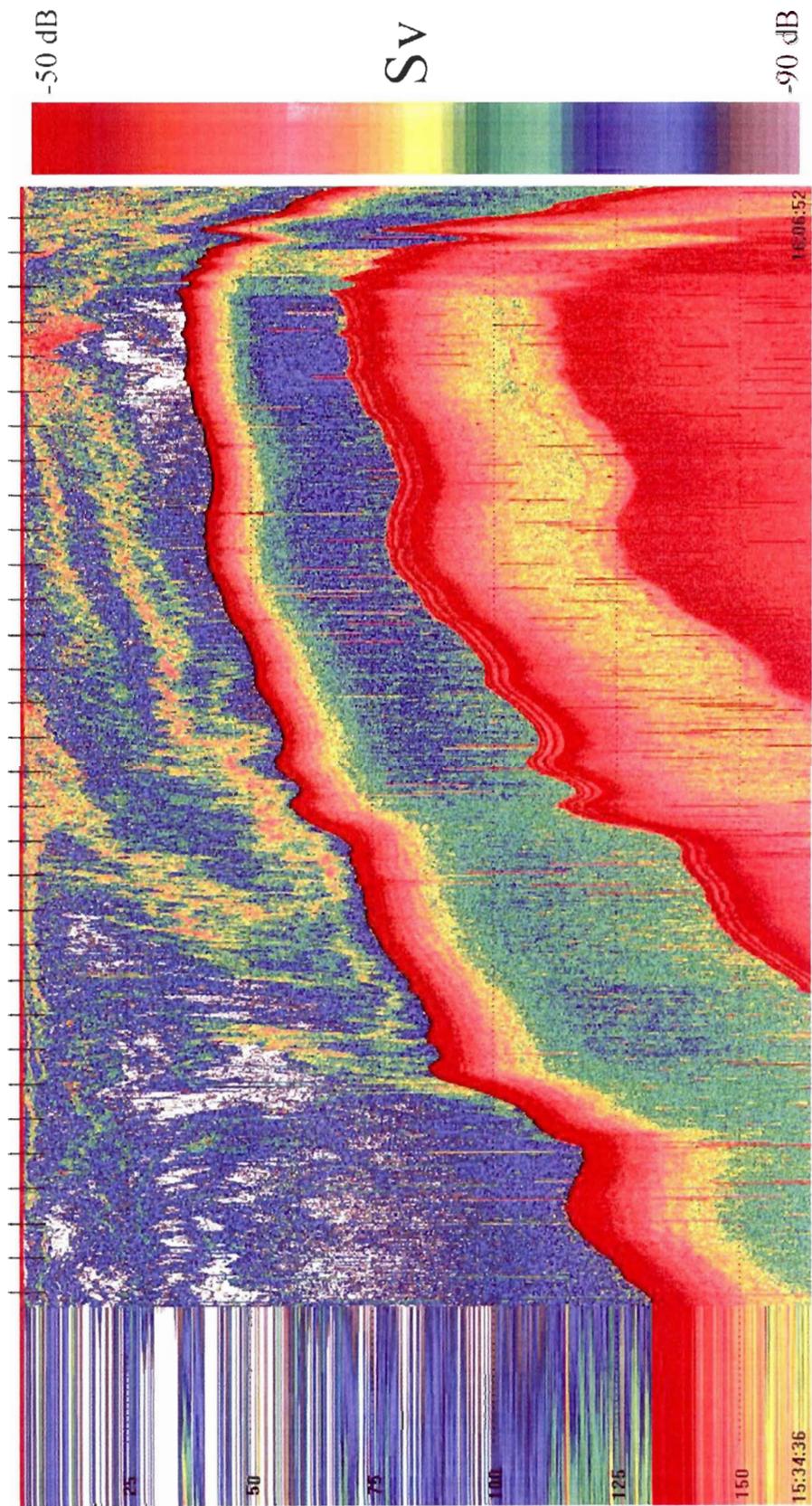
$$\text{alors } b = 0,74 \text{ , donc } \rho_2 = 74\% \text{ de } \rho_4$$

**Annexe 4 – ADCP et échosondeur.**

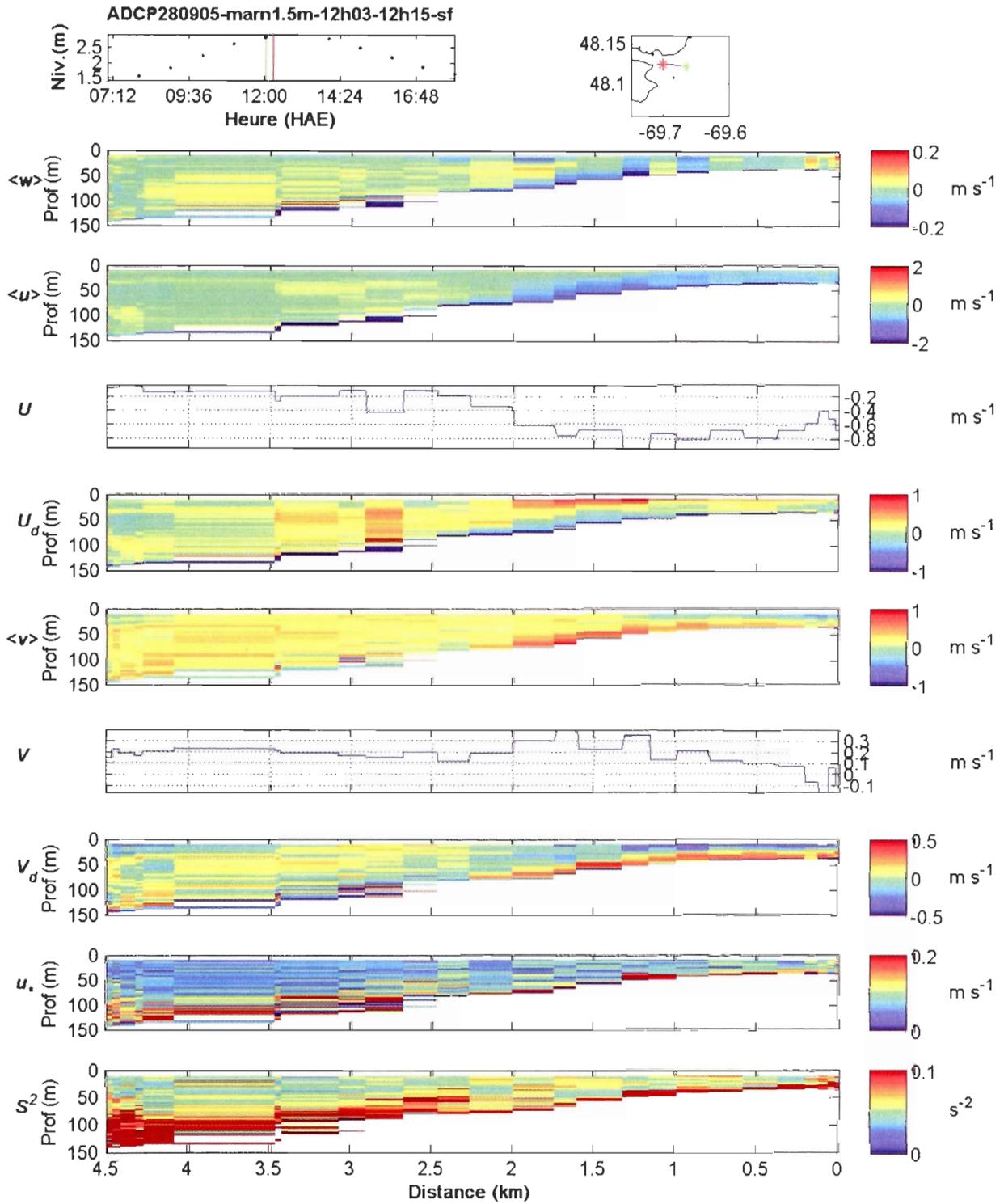
Annexe 4a – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
 ADCP 11h25 – 12h03



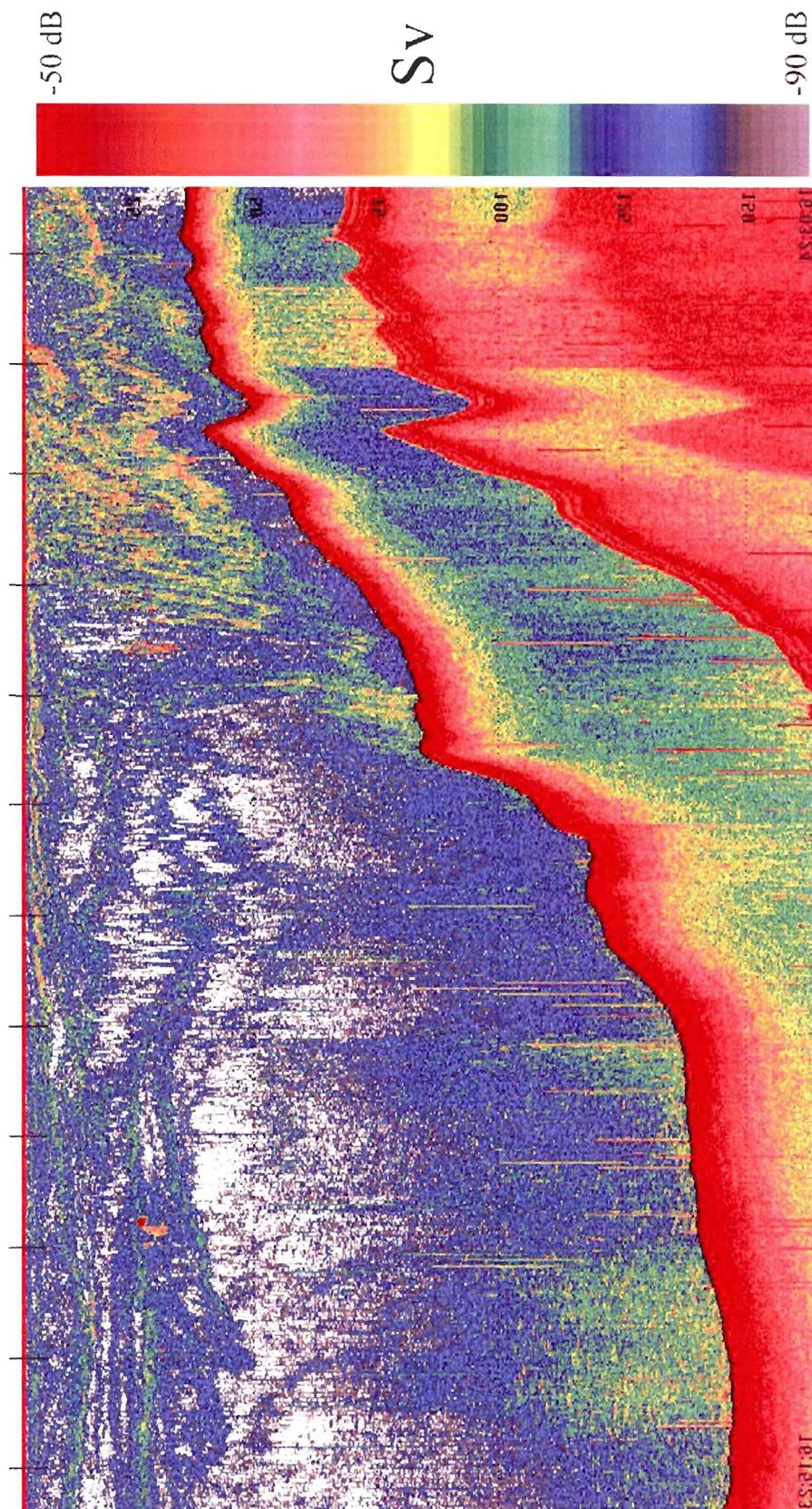
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
Échosondeur 11h25 – 12h03



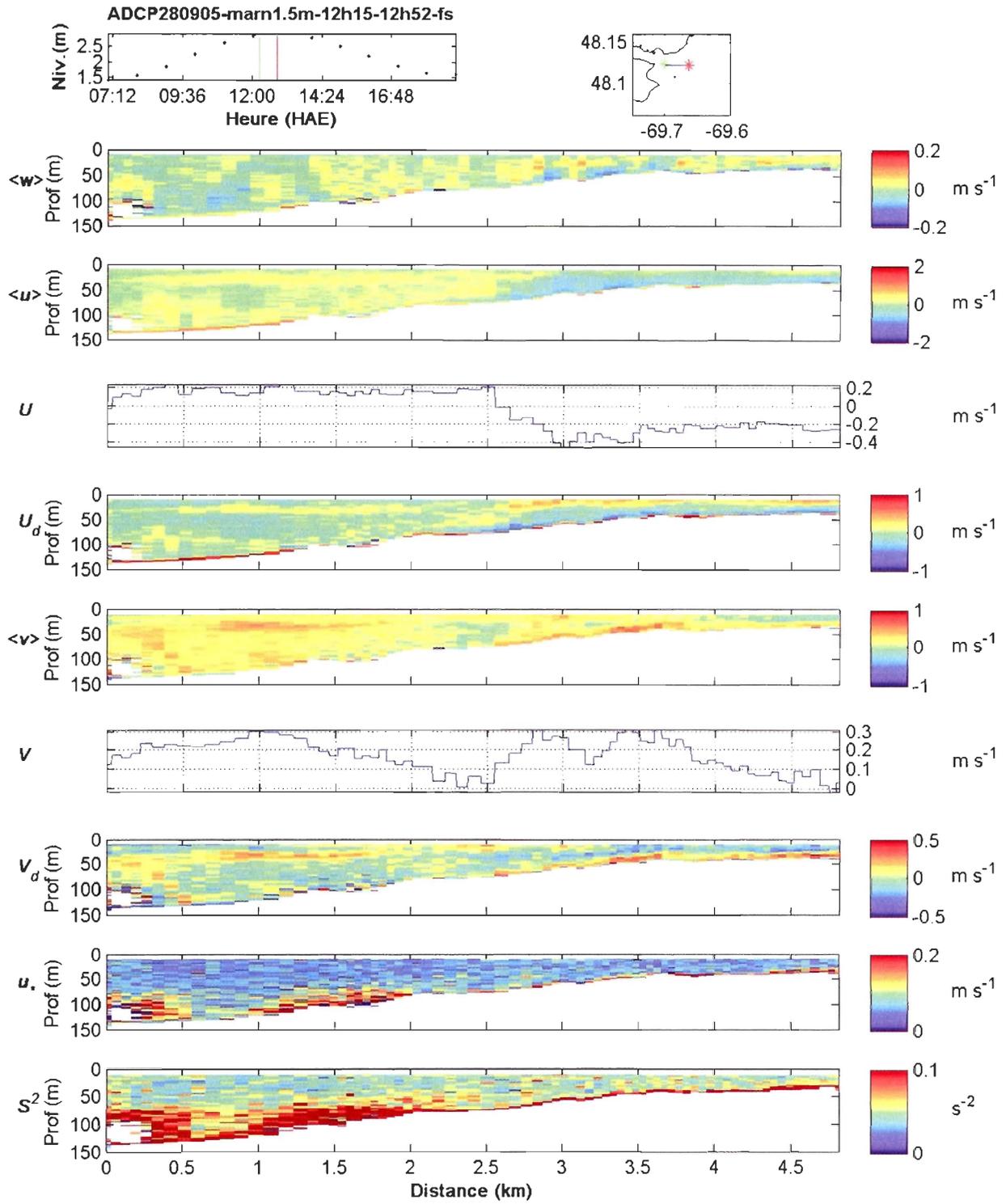
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
 ADCP 12h03 – 12h15



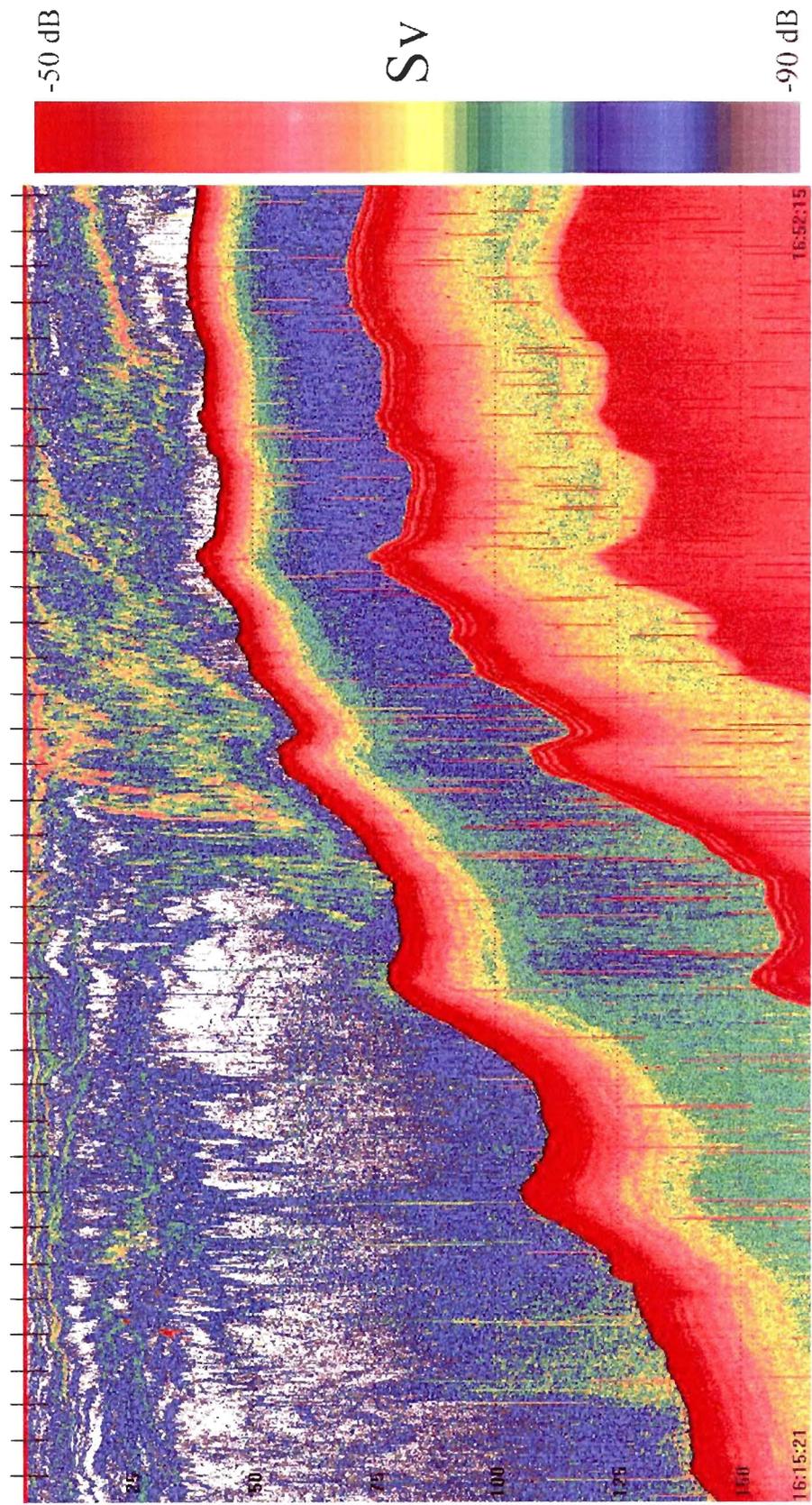
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
Échosondeur 12h03 – 12h15



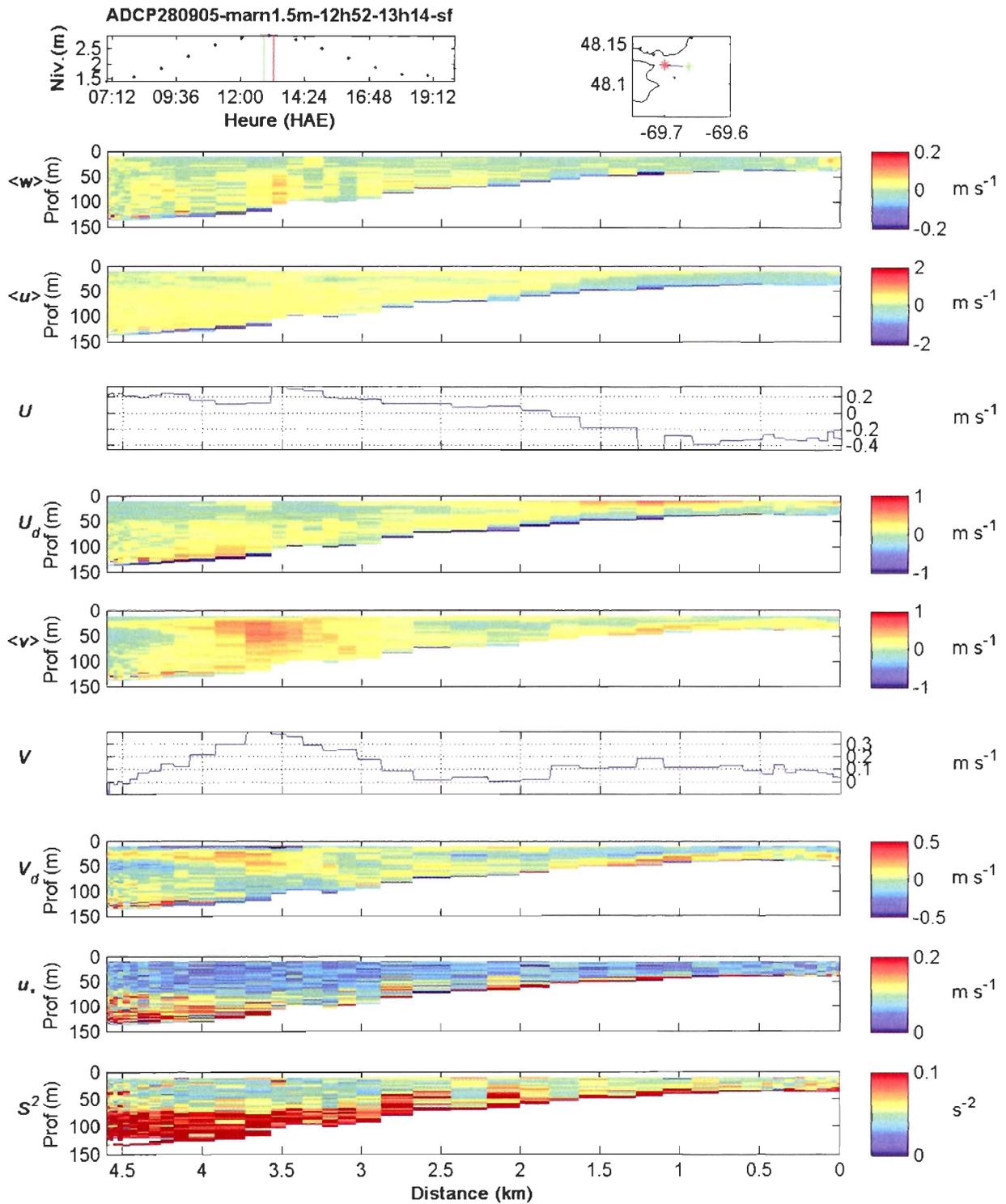
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
 ADCP 12h15 – 12h52



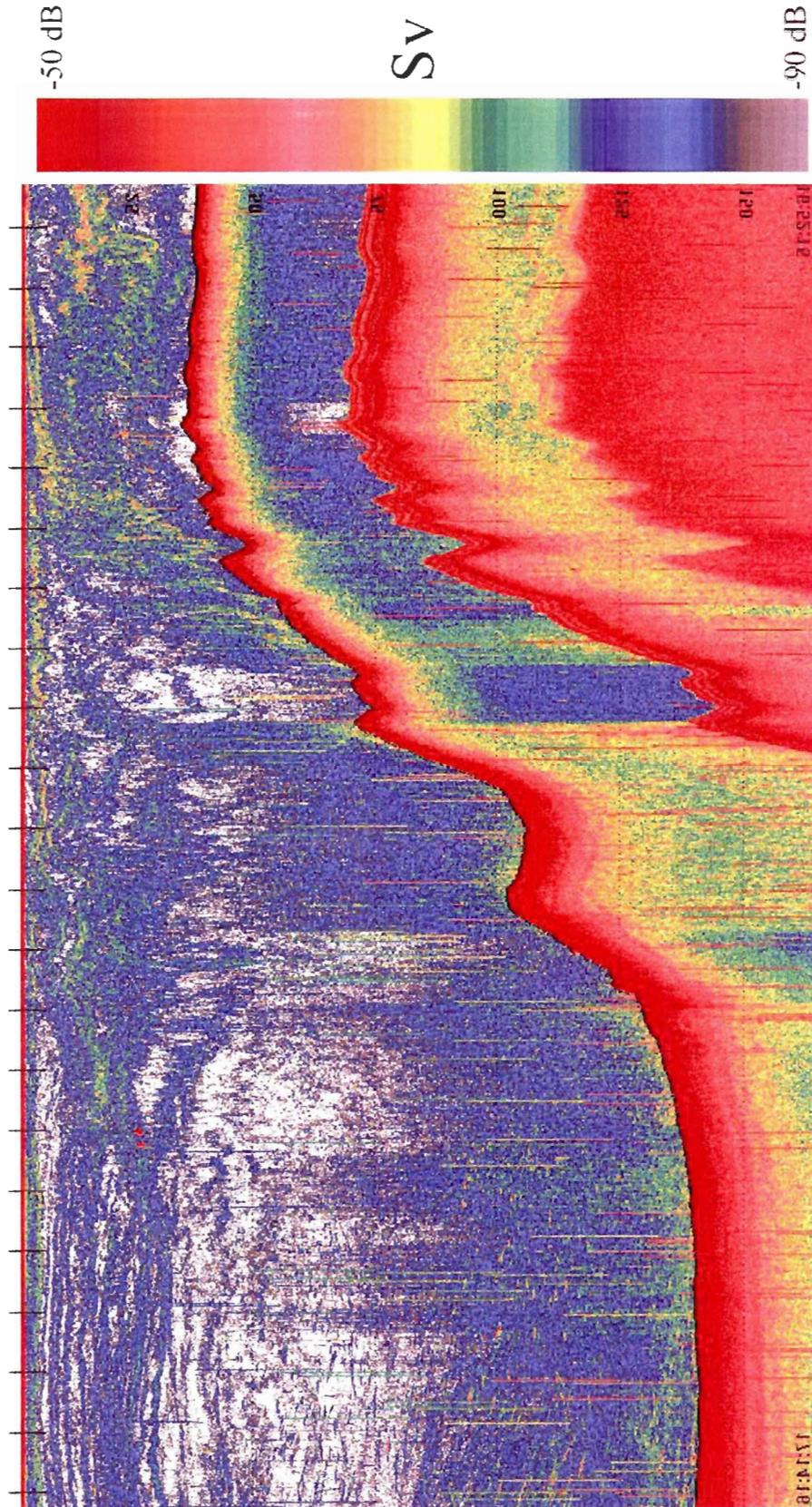
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
Échosondeur 12h15 – 12h52



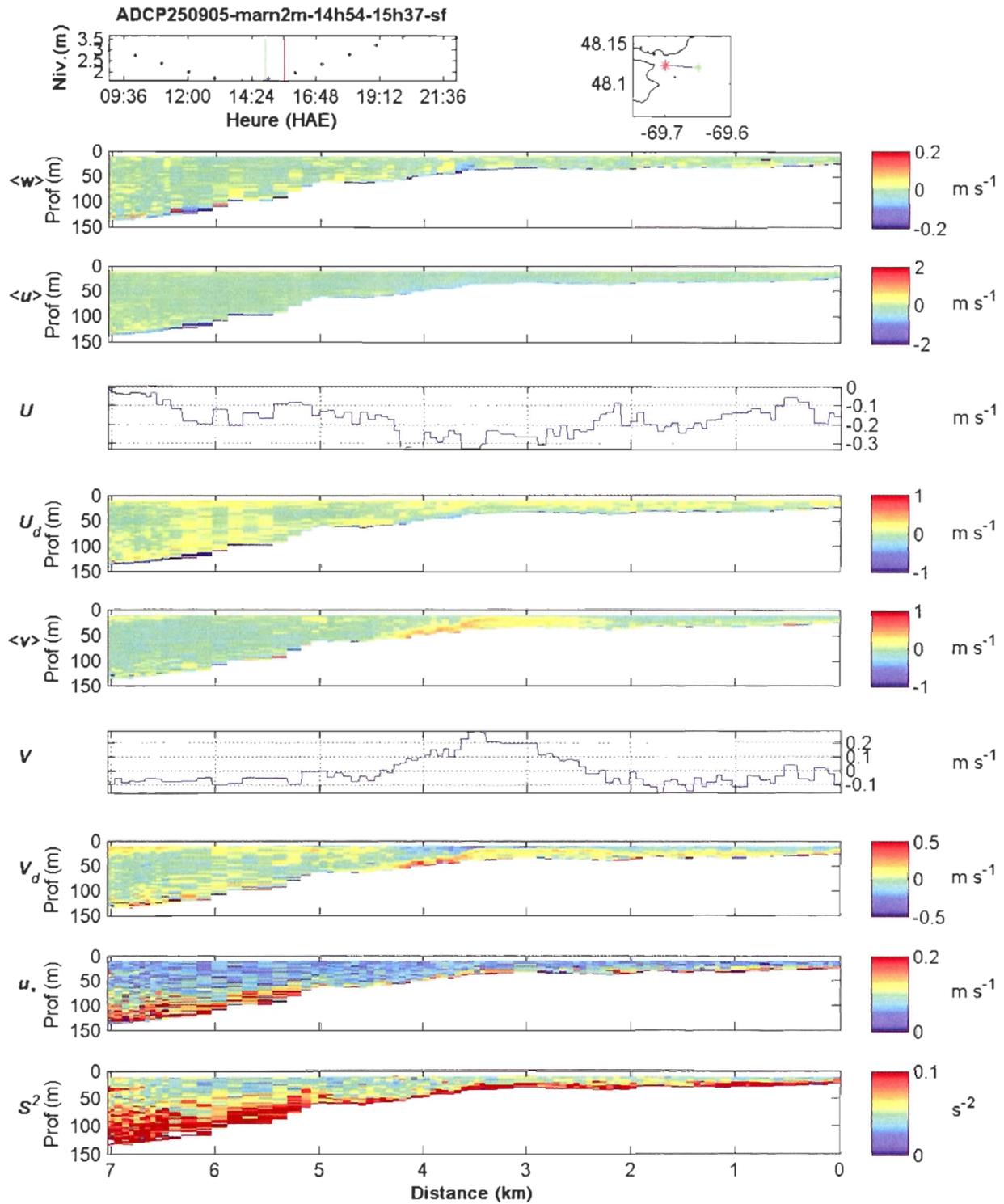
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
 ADCP 12h52 – 13h14



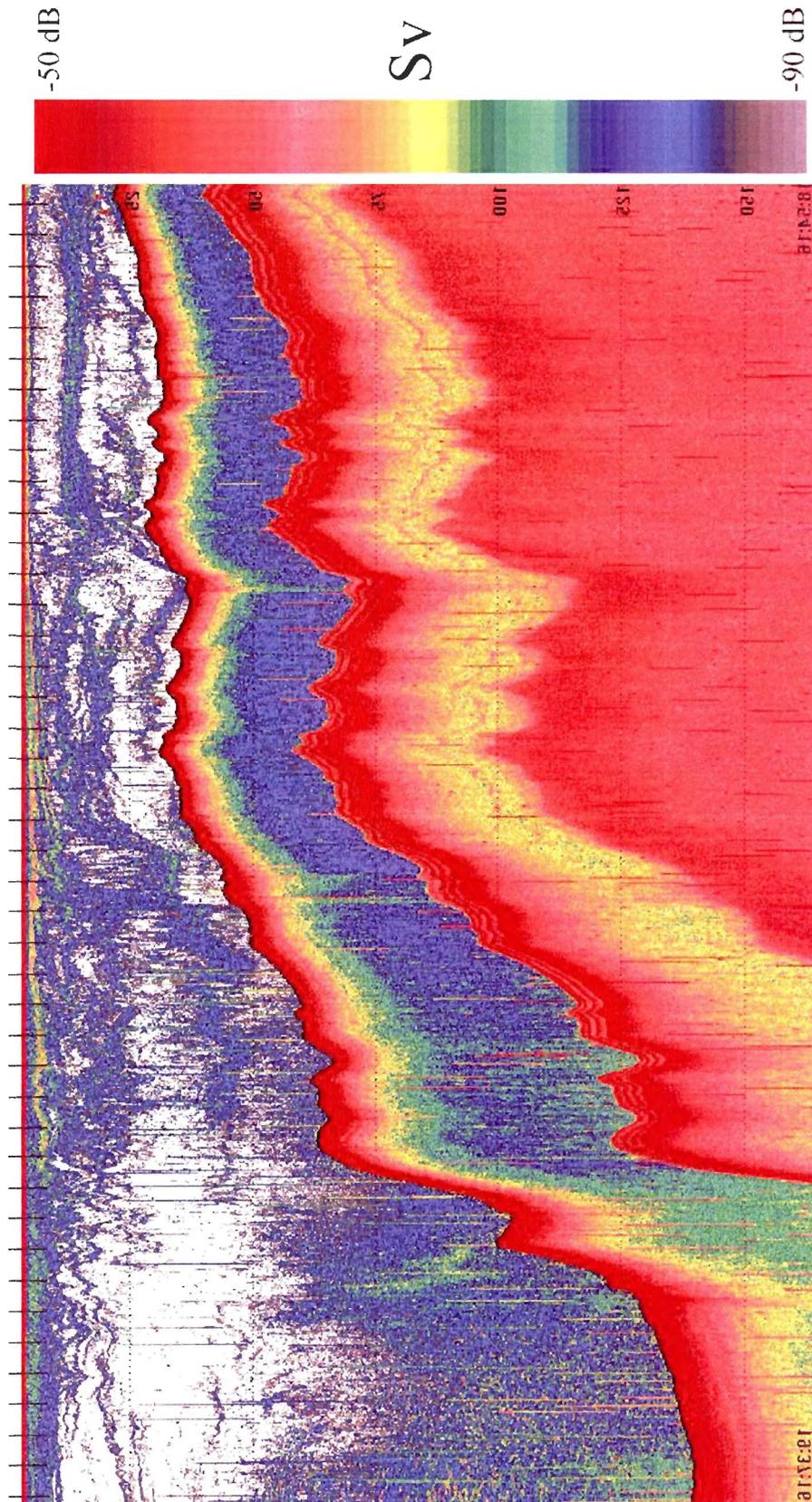
Annexe 4a (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 1,5m, le 28 septembre 2005.  
Échosondeur 12h52 – 13h14



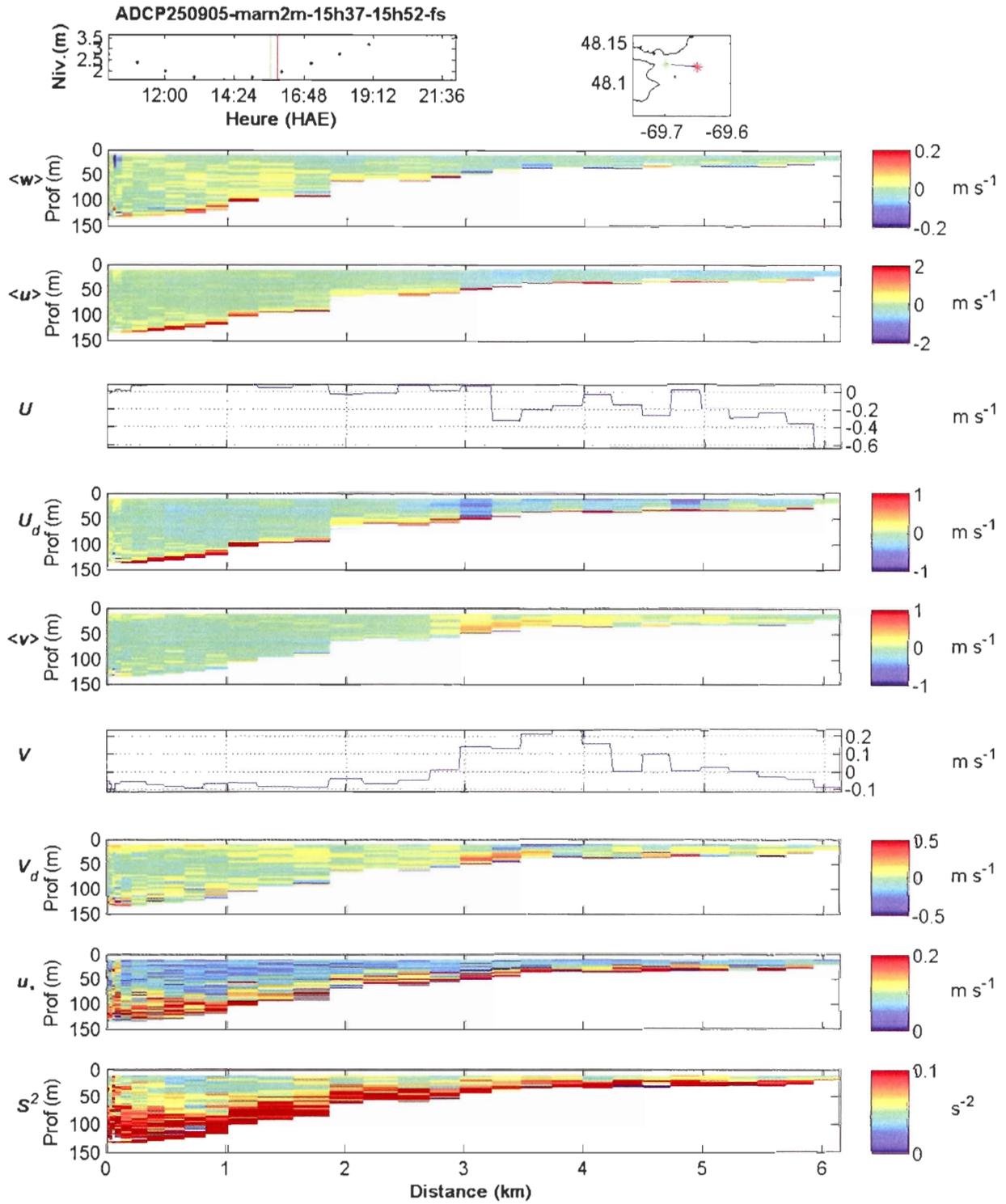
Annexe 4b – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 14h54 – 15h37



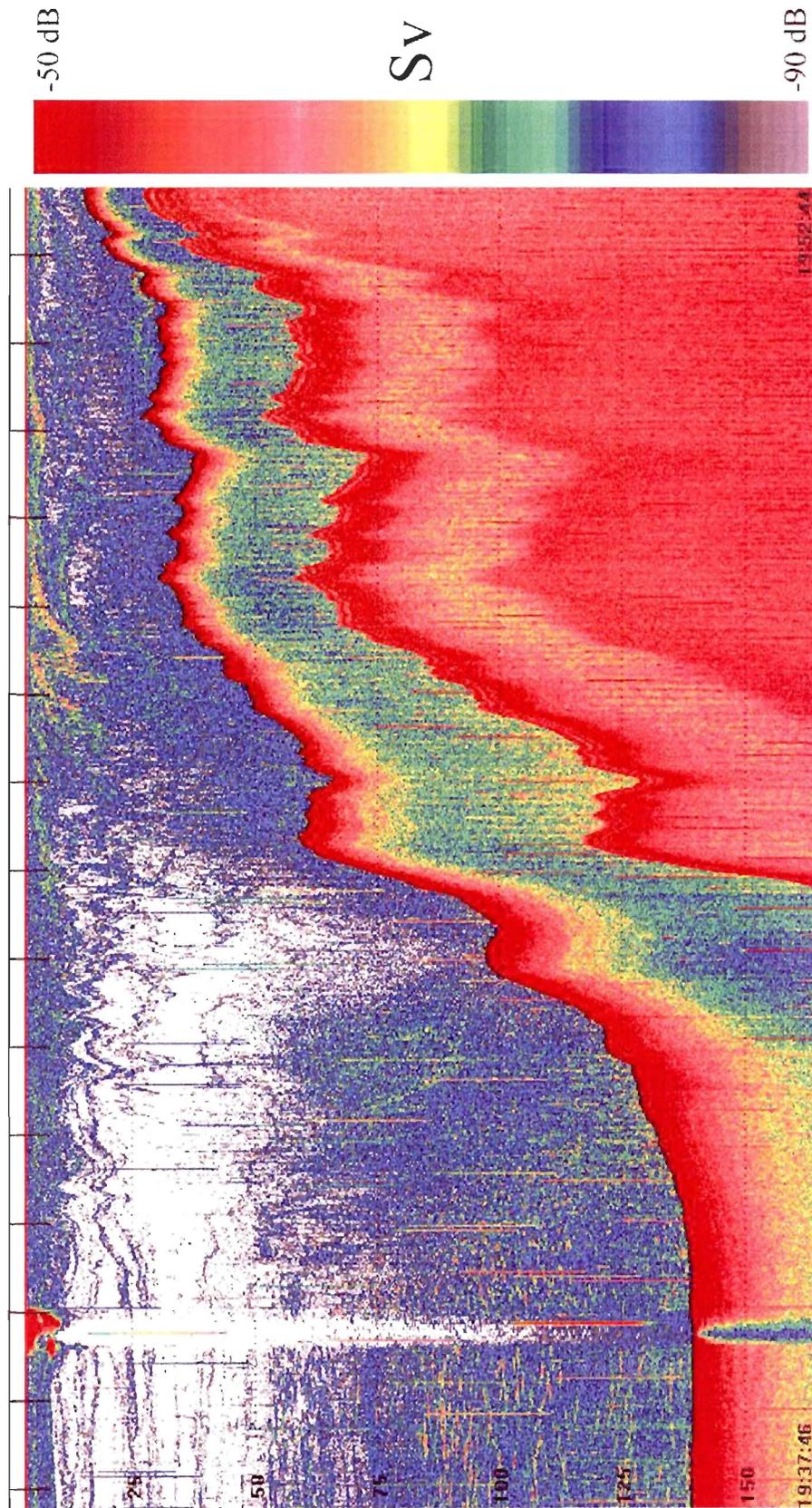
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 14h54 – 15h37



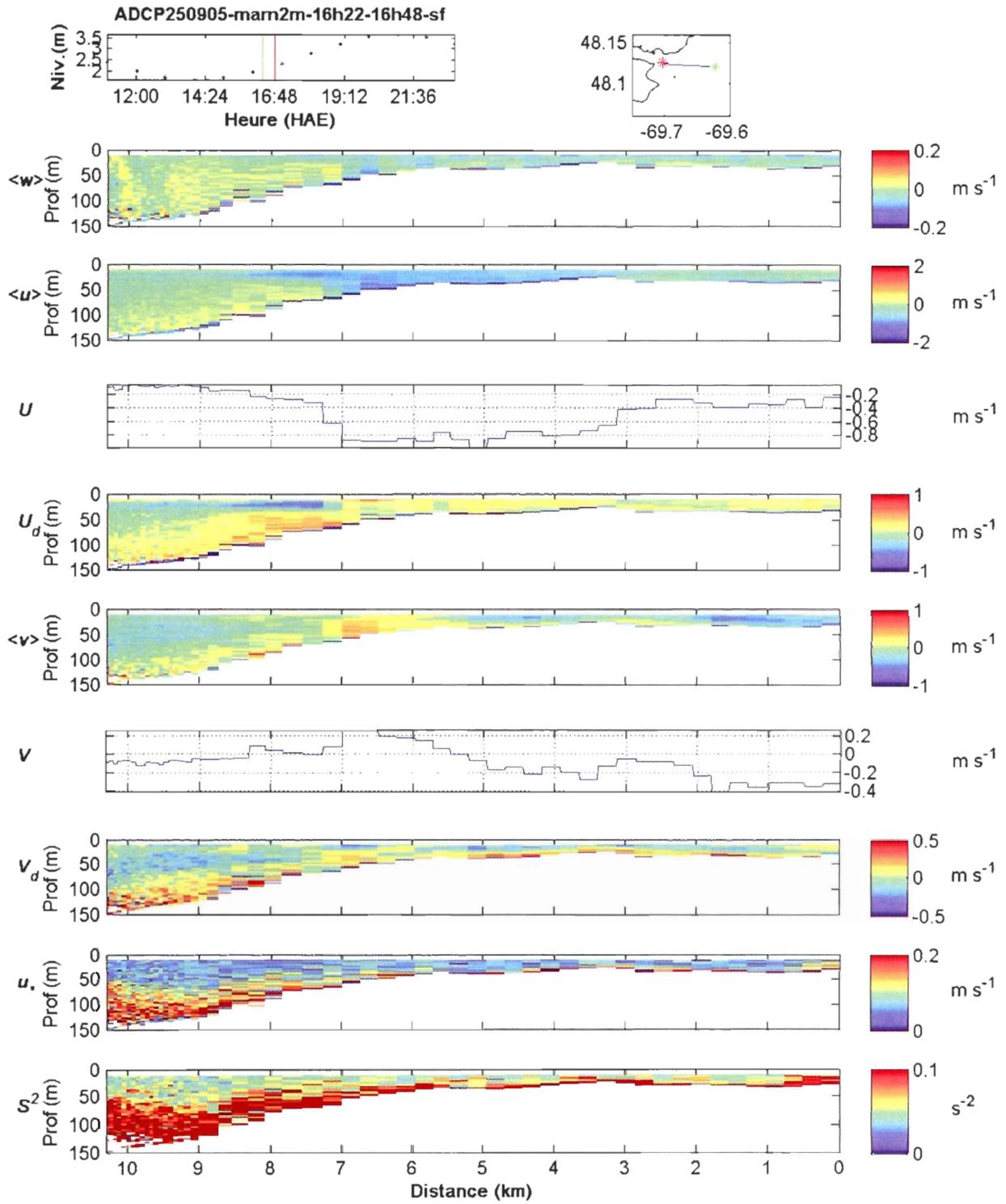
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 15h37 – 15h52



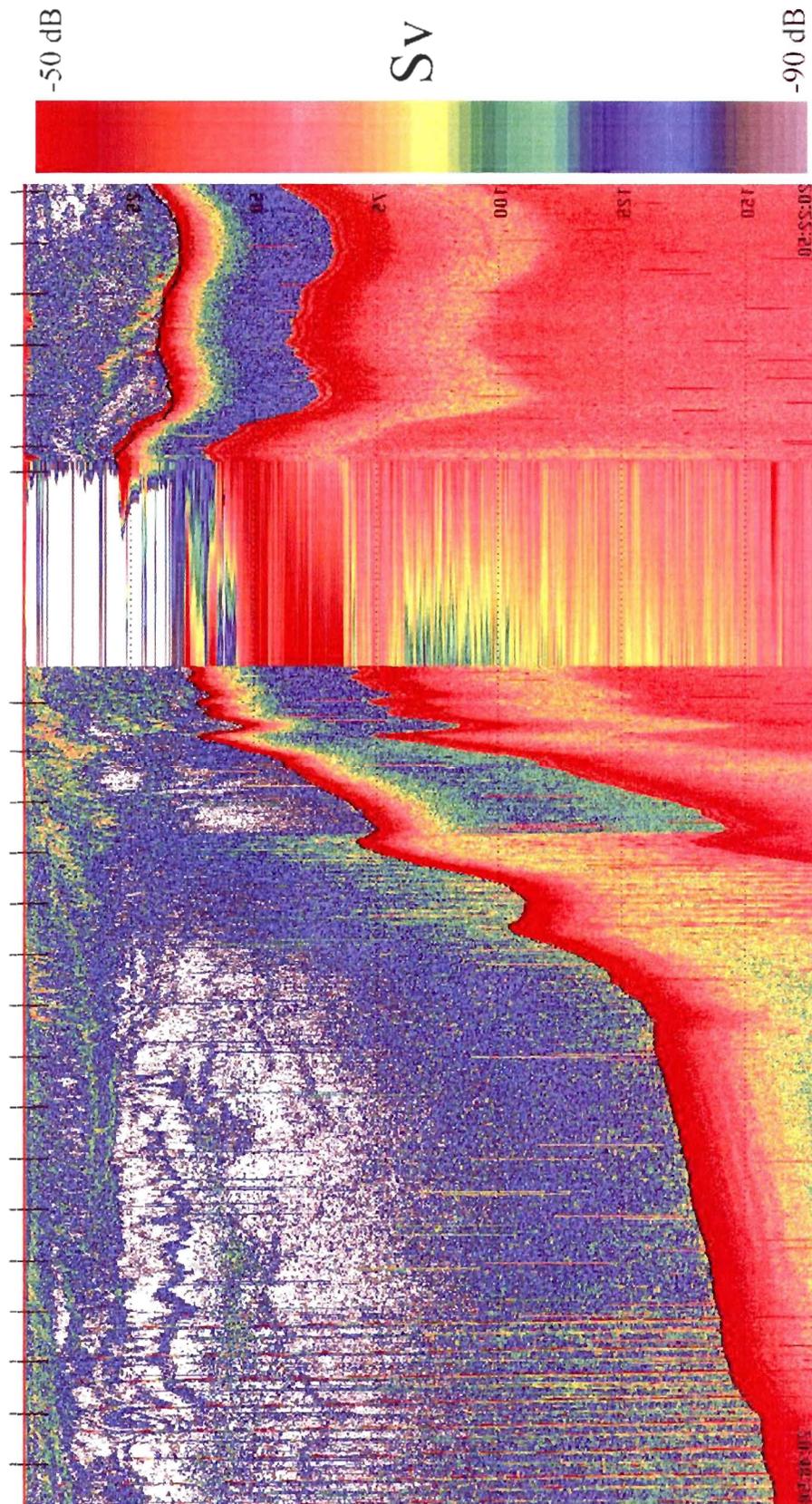
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 15h37 – 15h52



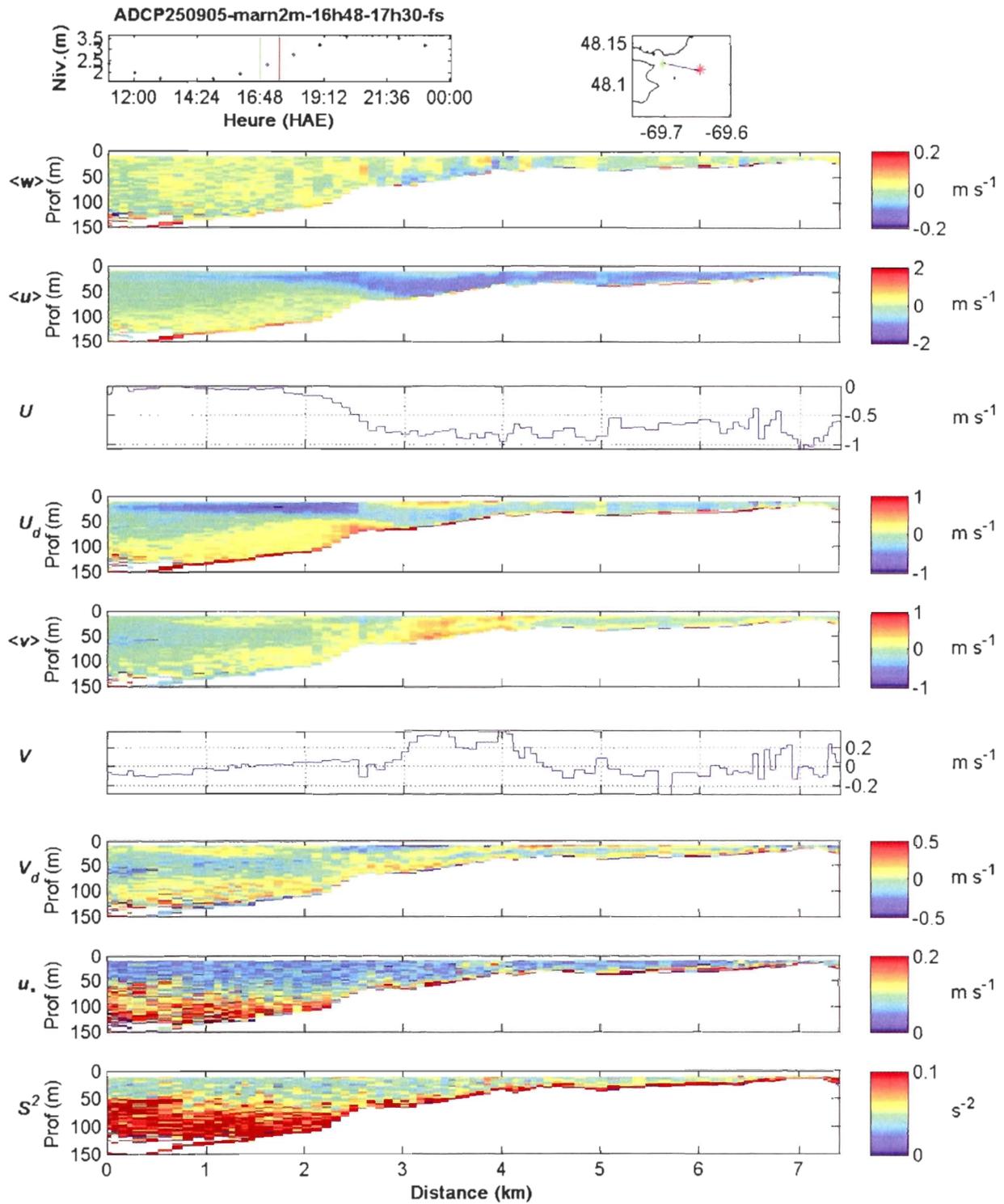
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 16h22 – 16h48



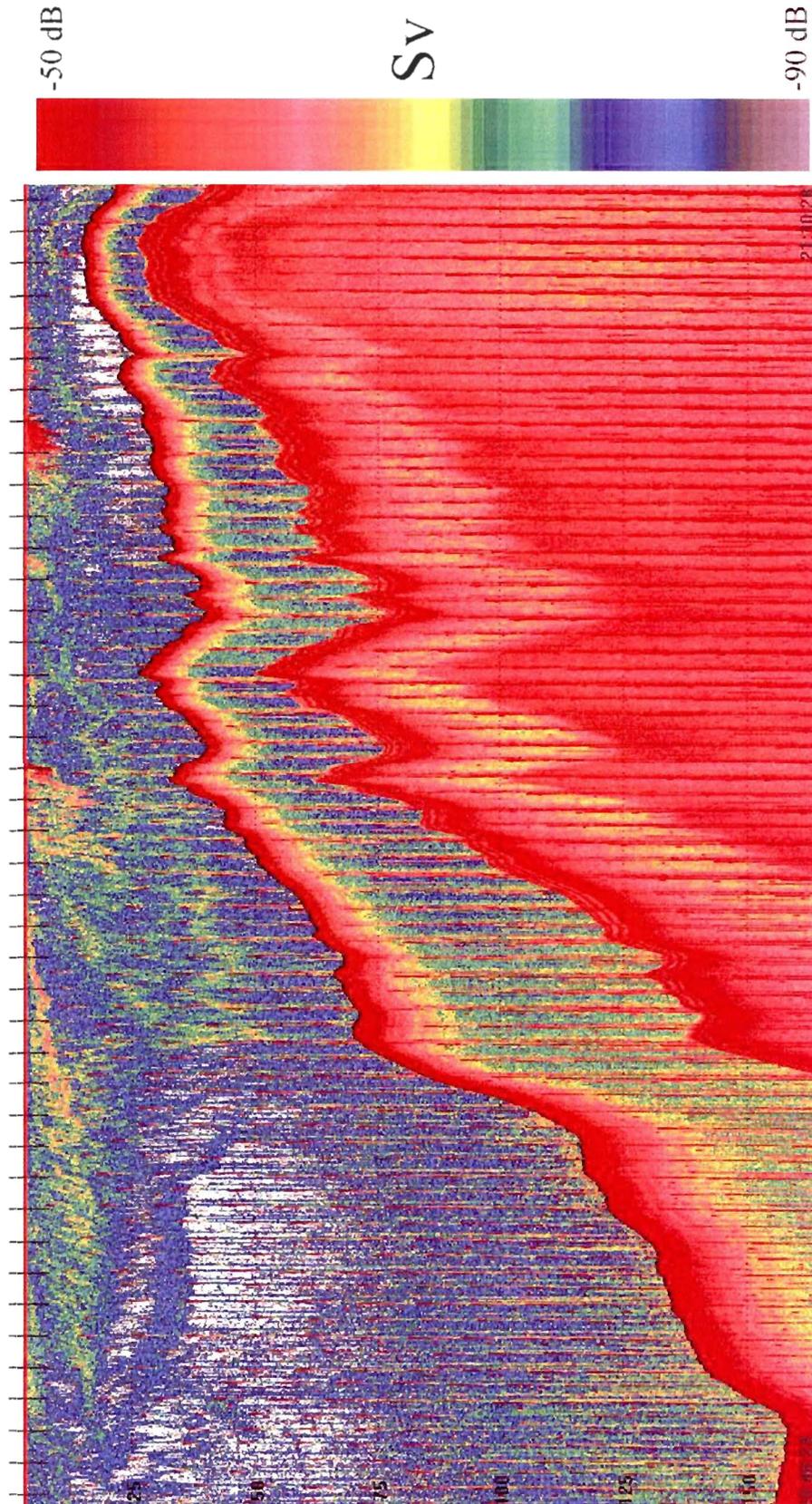
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 16h22 – 16h48



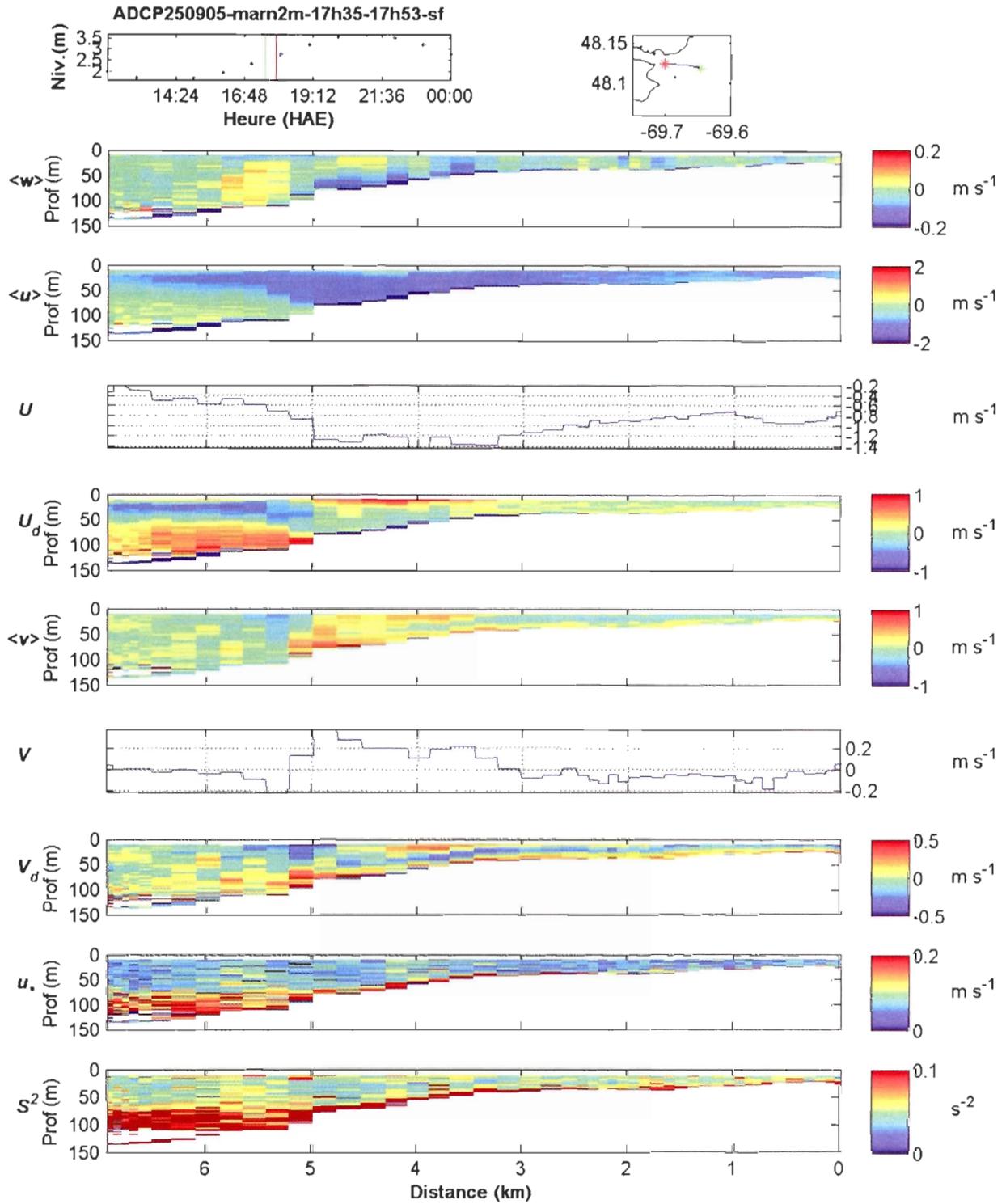
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 16h48 – 17h30



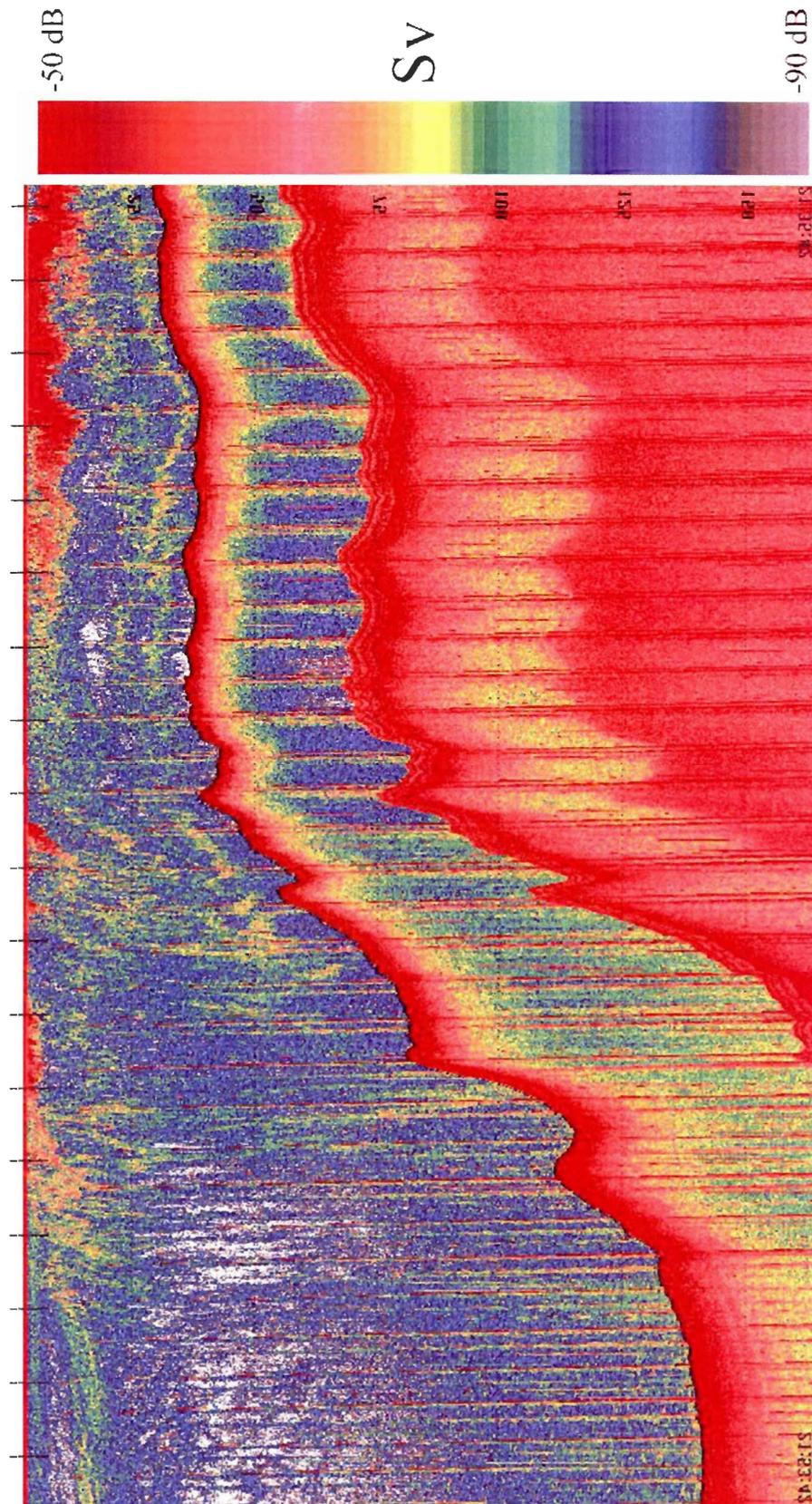
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 16h48 – 17h30



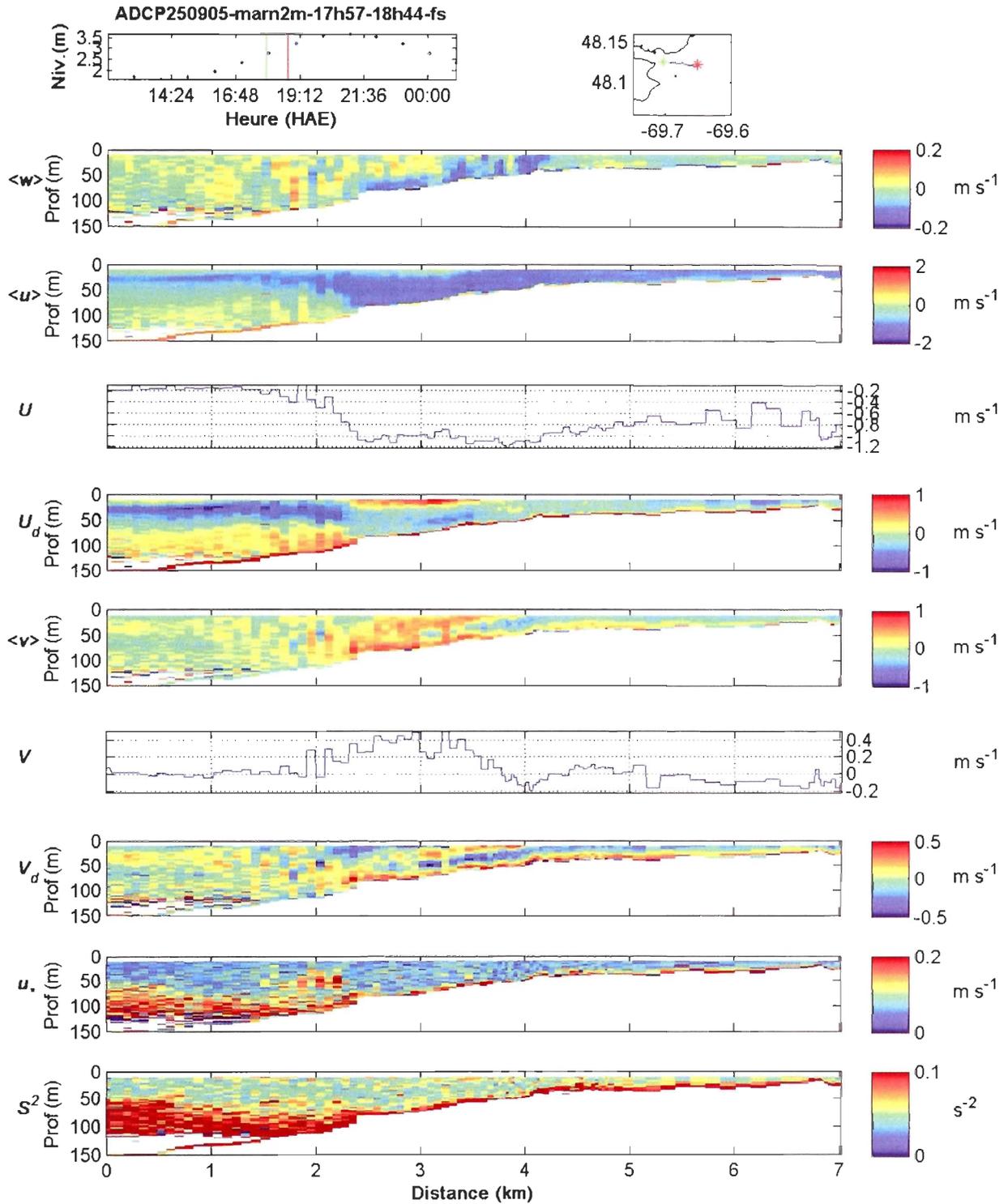
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 17h35 – 17h53



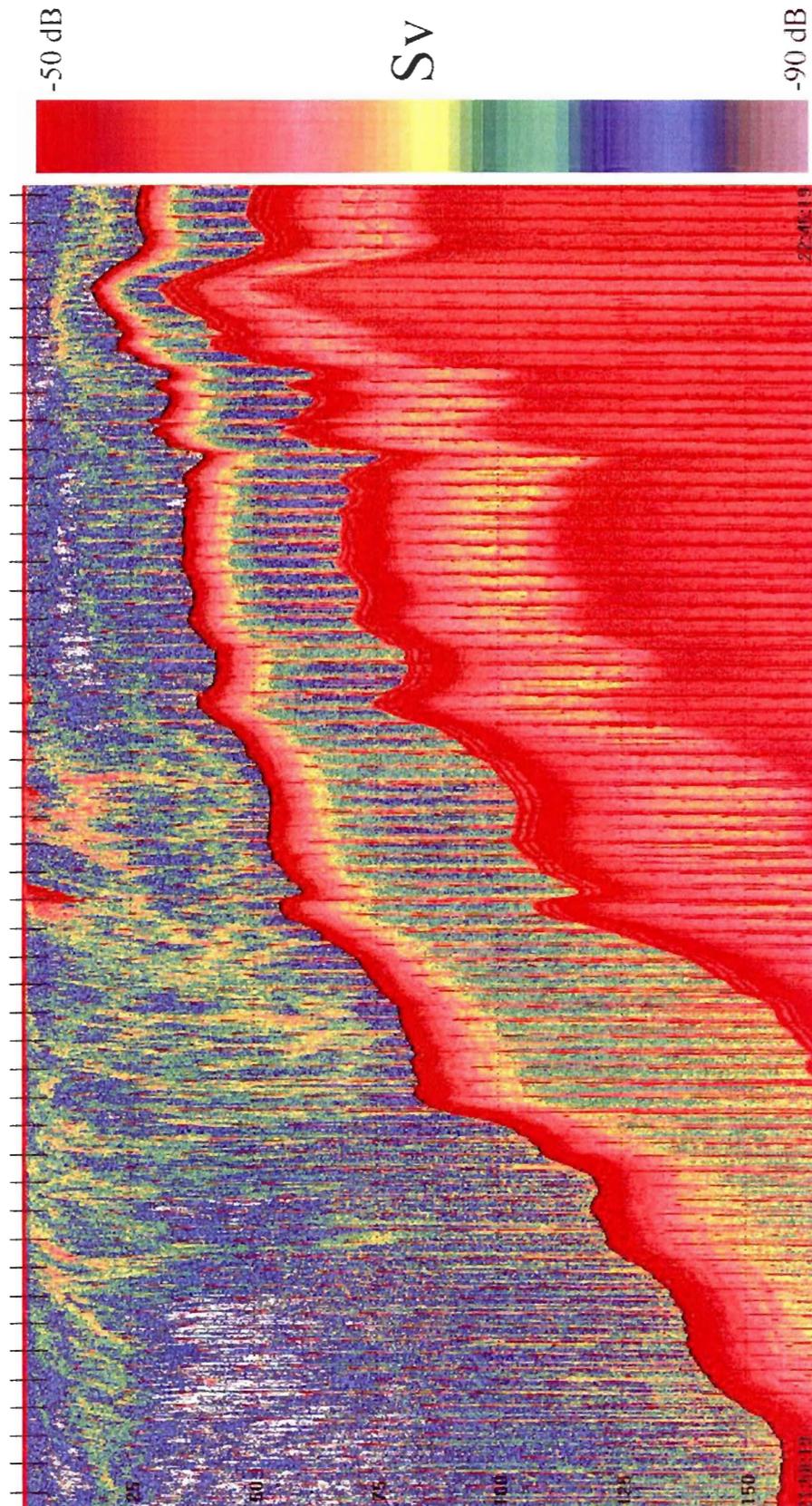
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 17h35 – 17h53



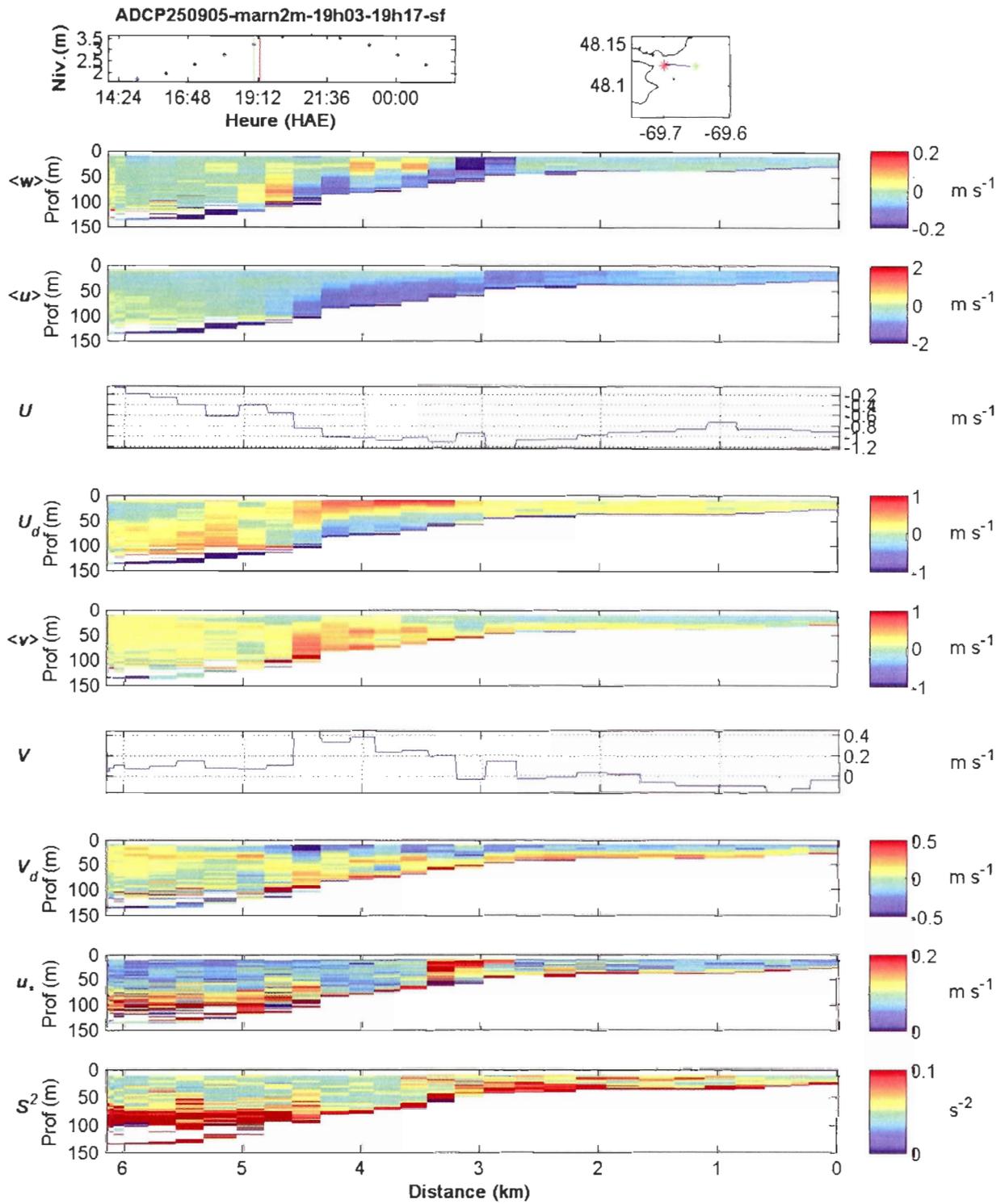
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 17h57 – 18h44



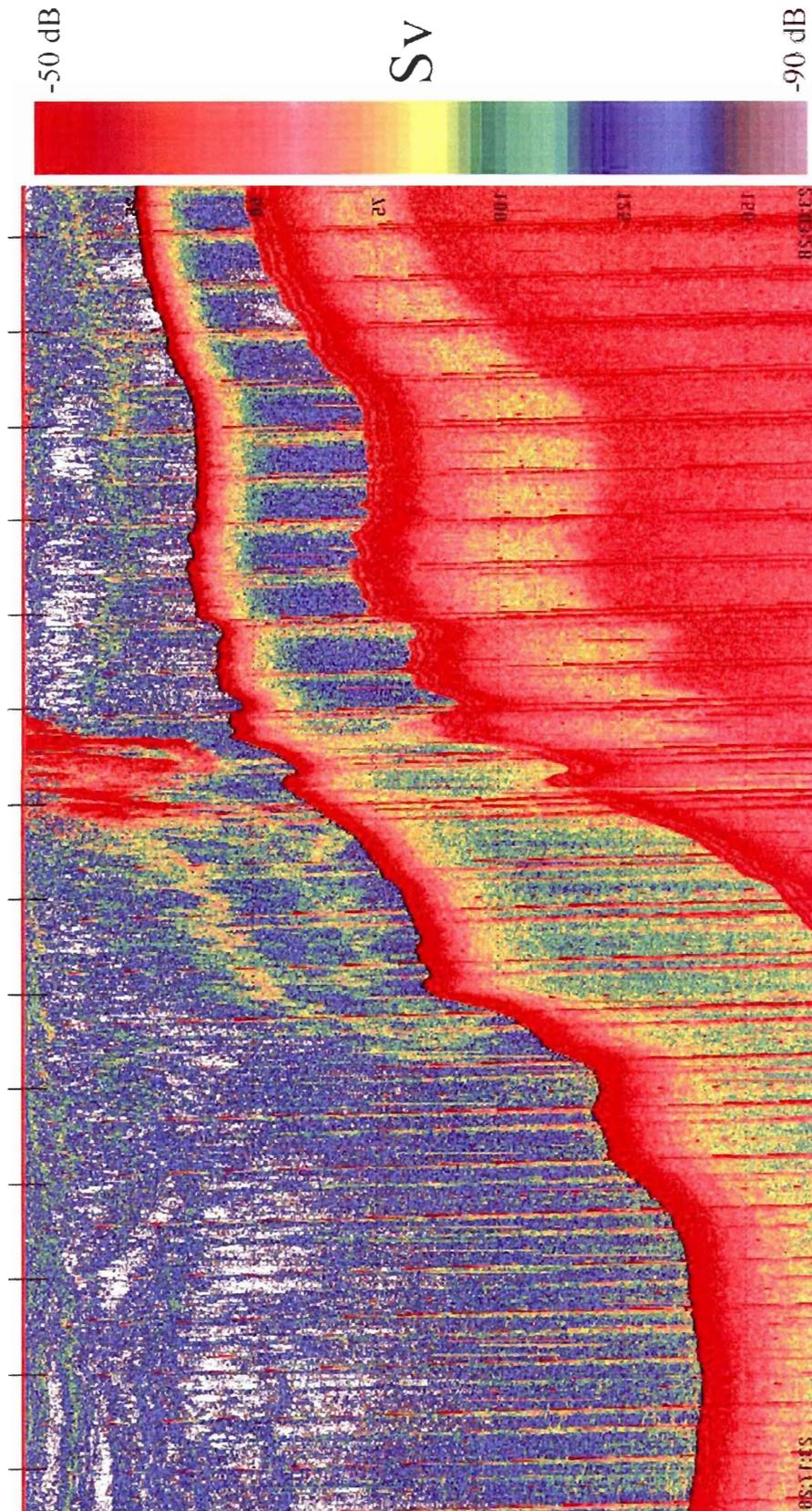
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 17h57 – 18h44



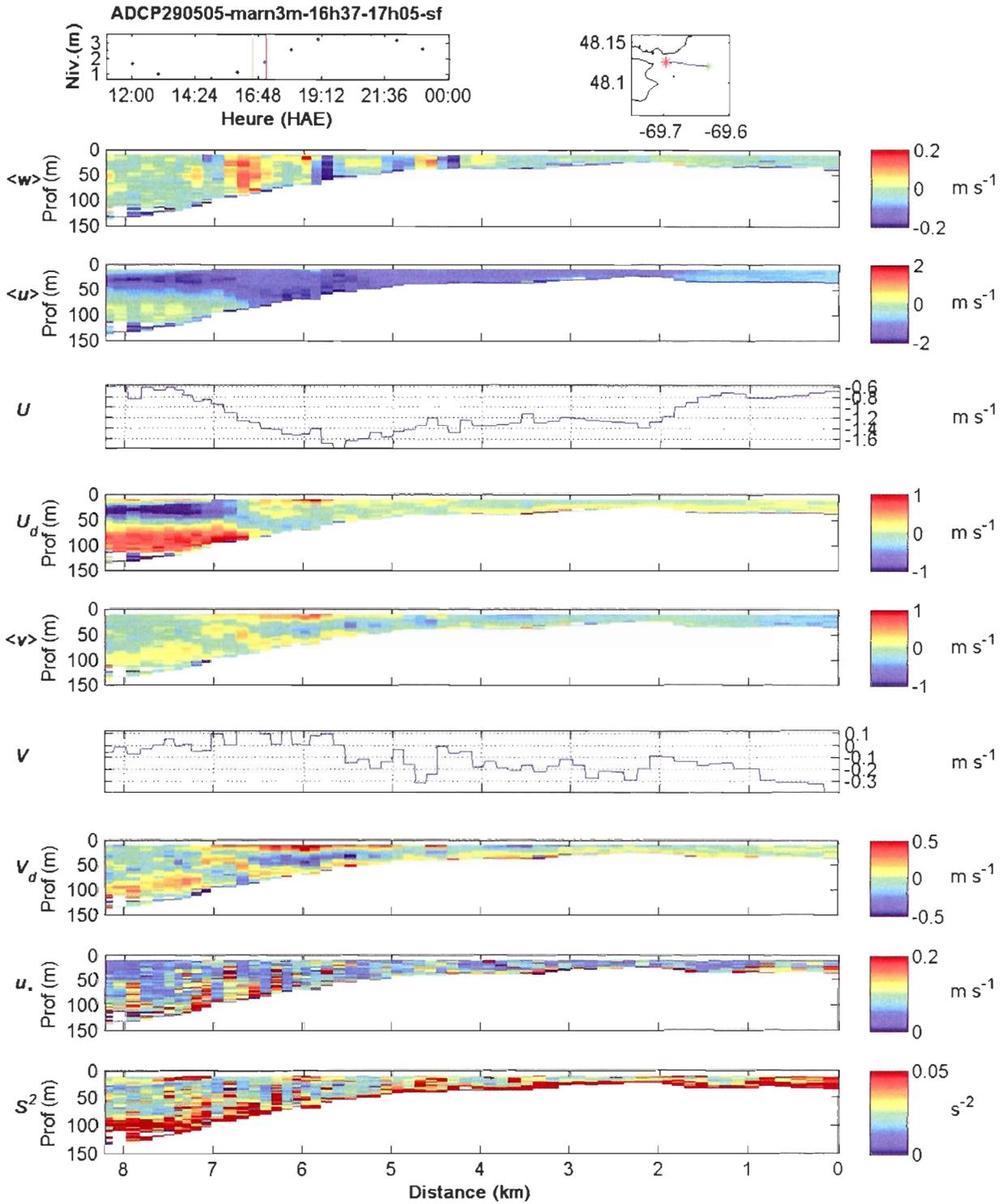
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
 ADCP 19h03 – 19h17



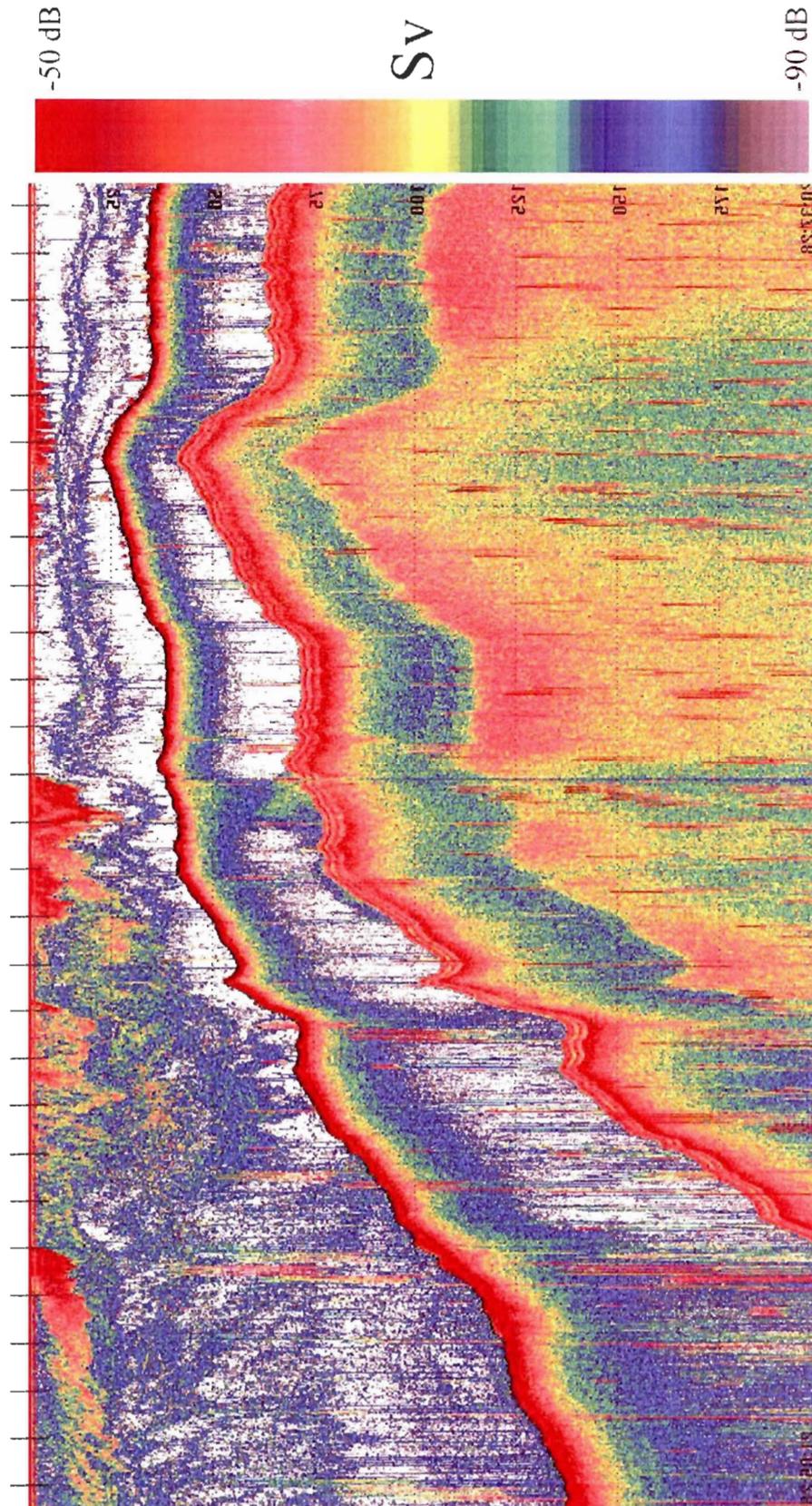
Annexe 4b (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 2m, le 25 septembre 2005.  
Échosondeur 19h03 – 19h17



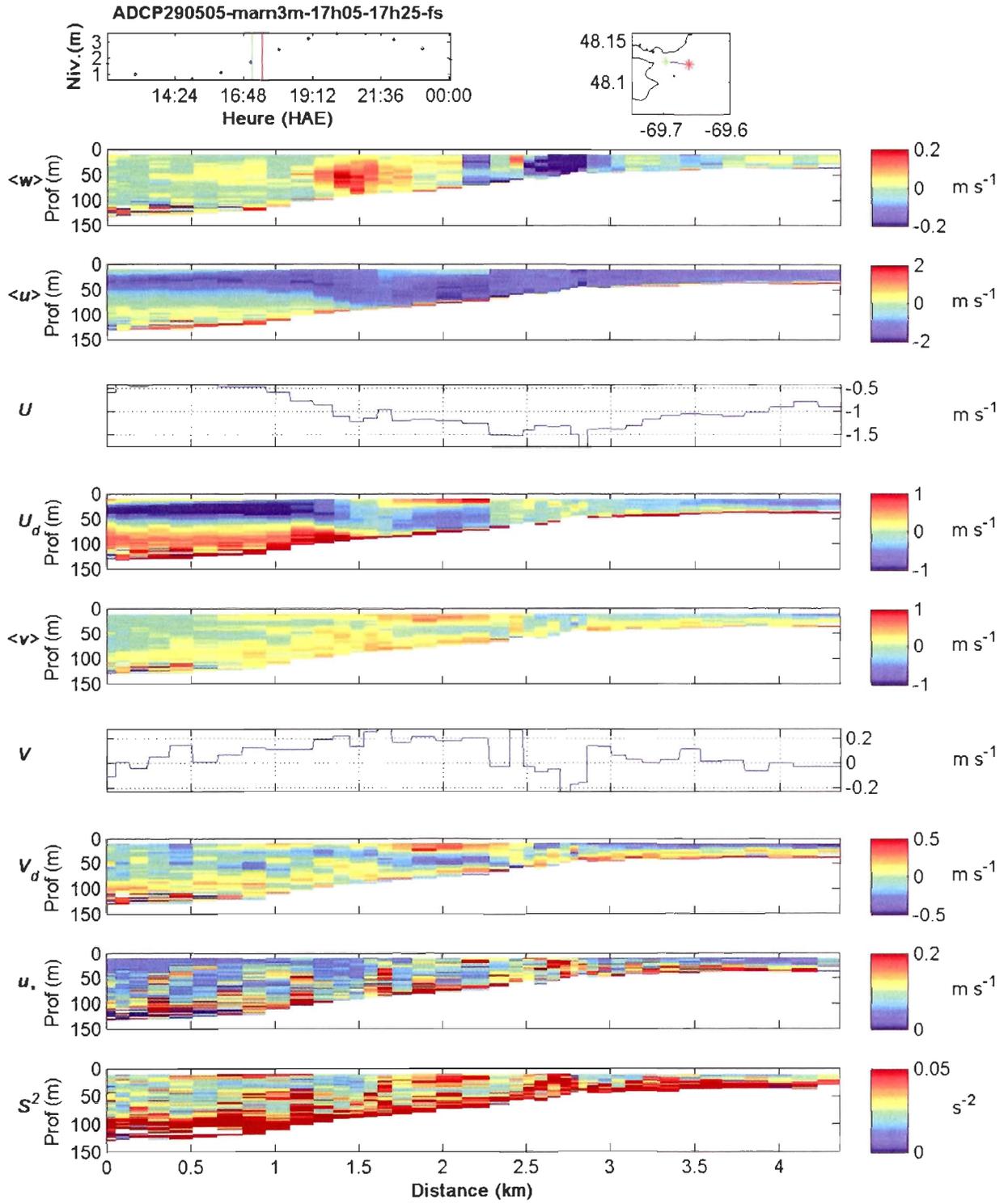
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 16h37 – 17h05



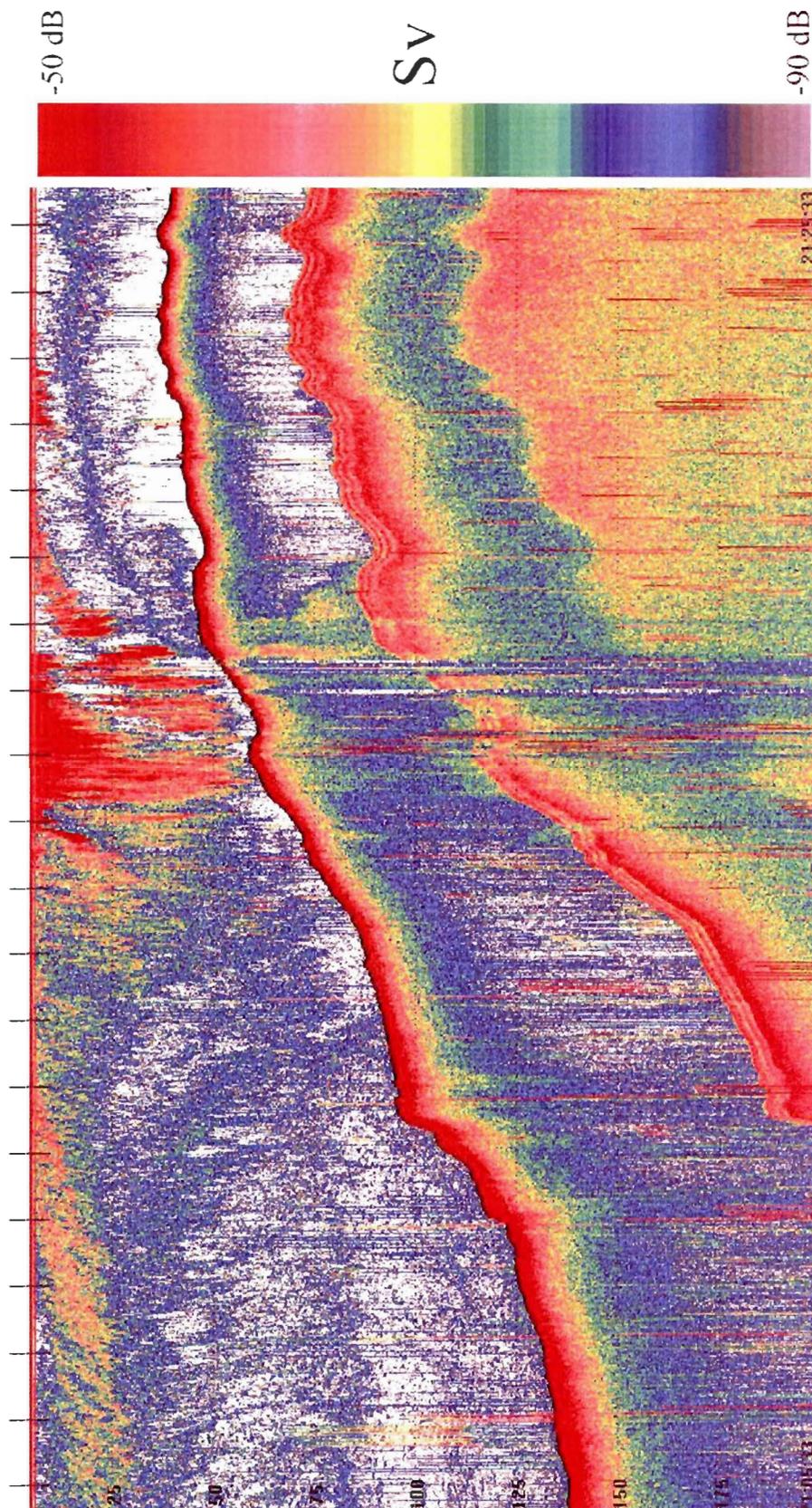
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 16h37 – 17h05



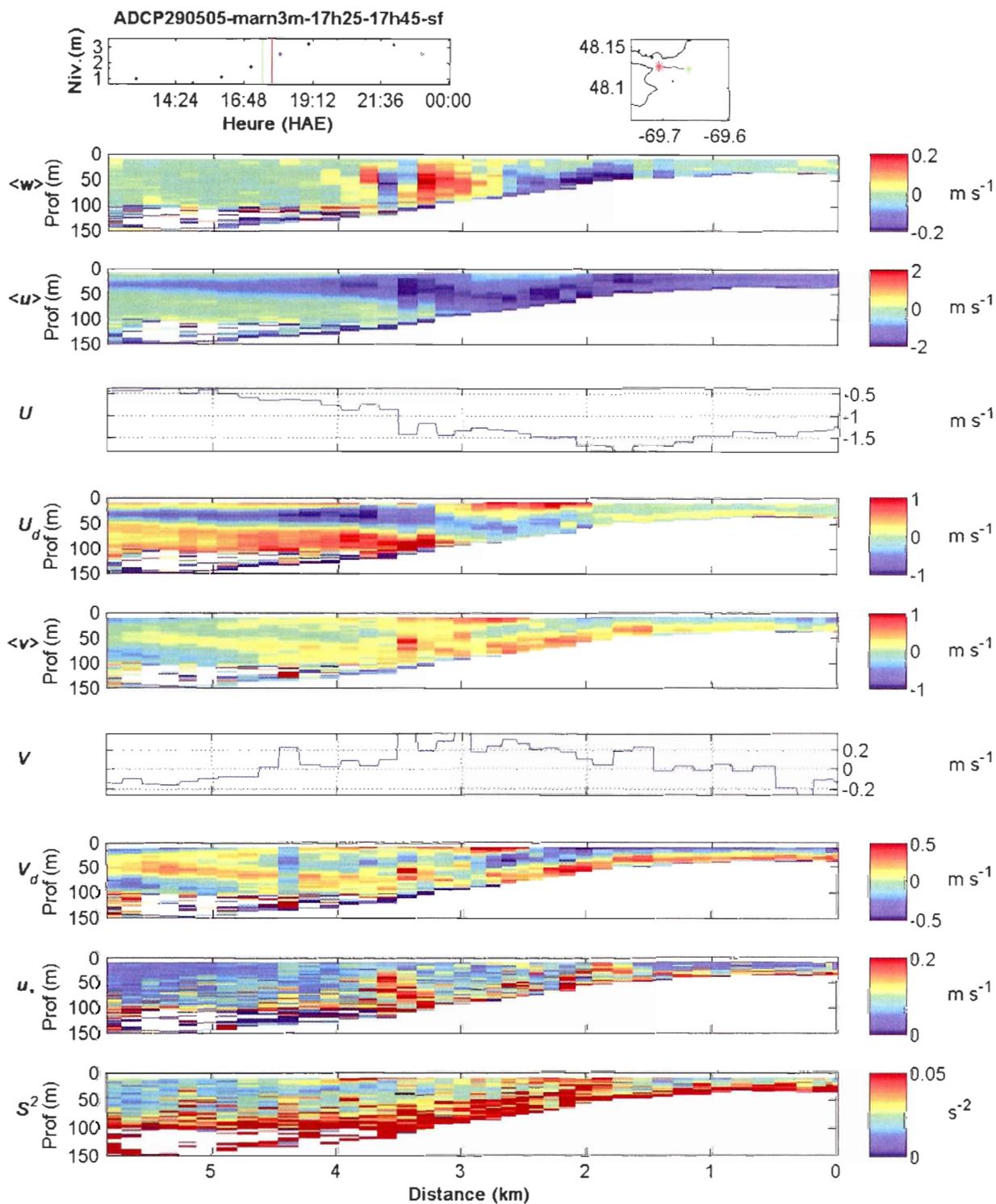
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 17h05 – 17h25



Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 17h05 – 17h25

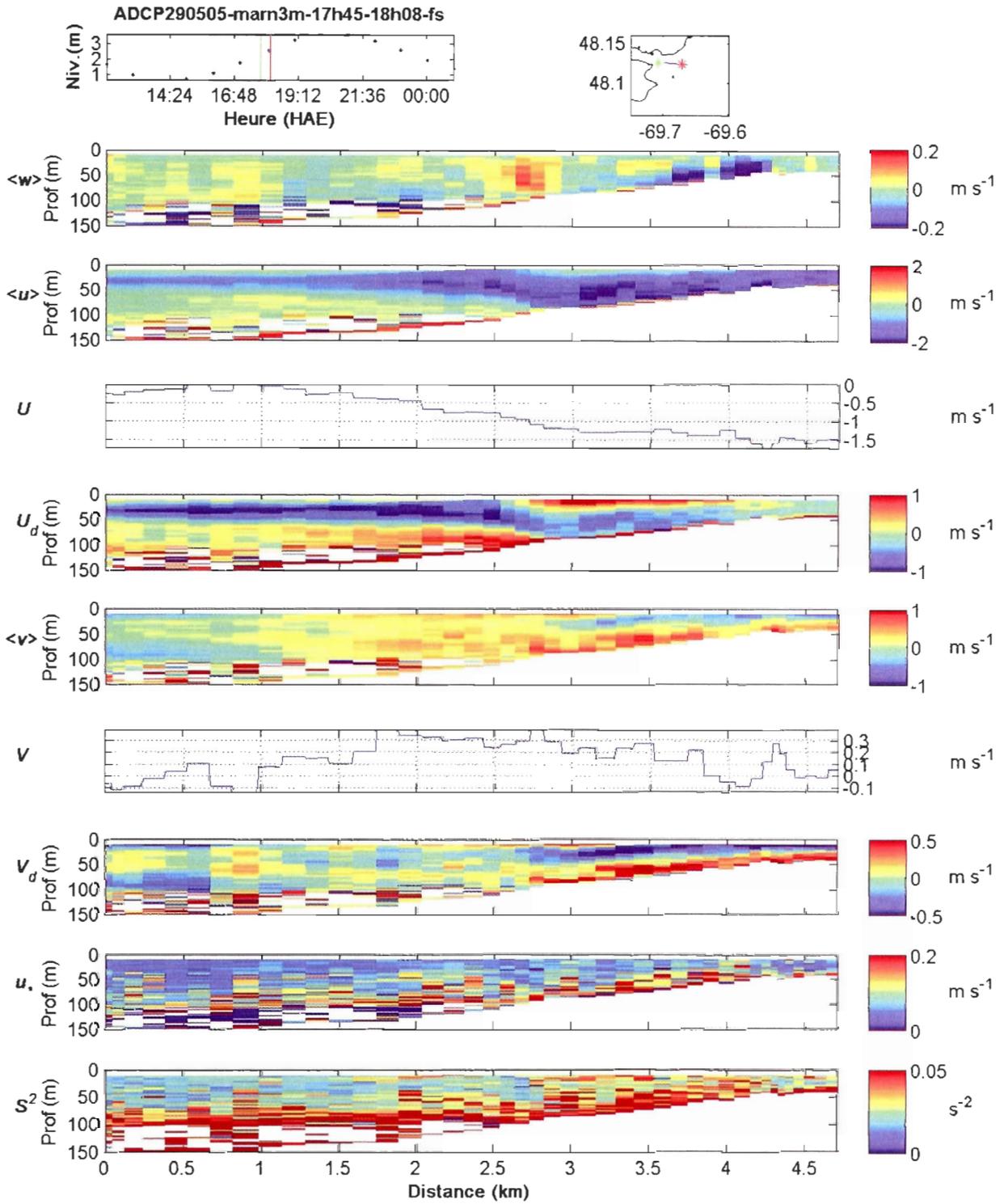


Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 17h25 – 17h45

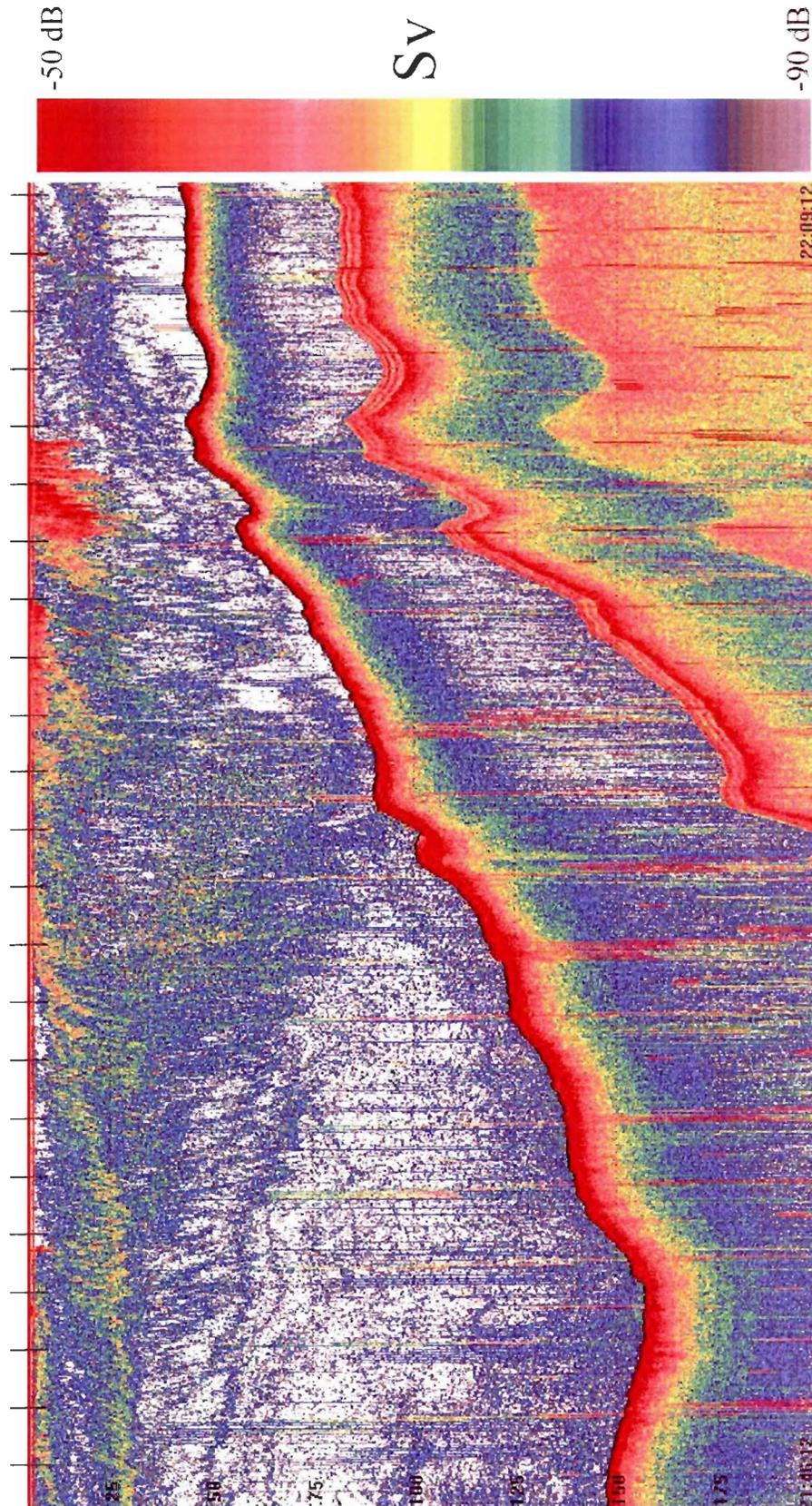




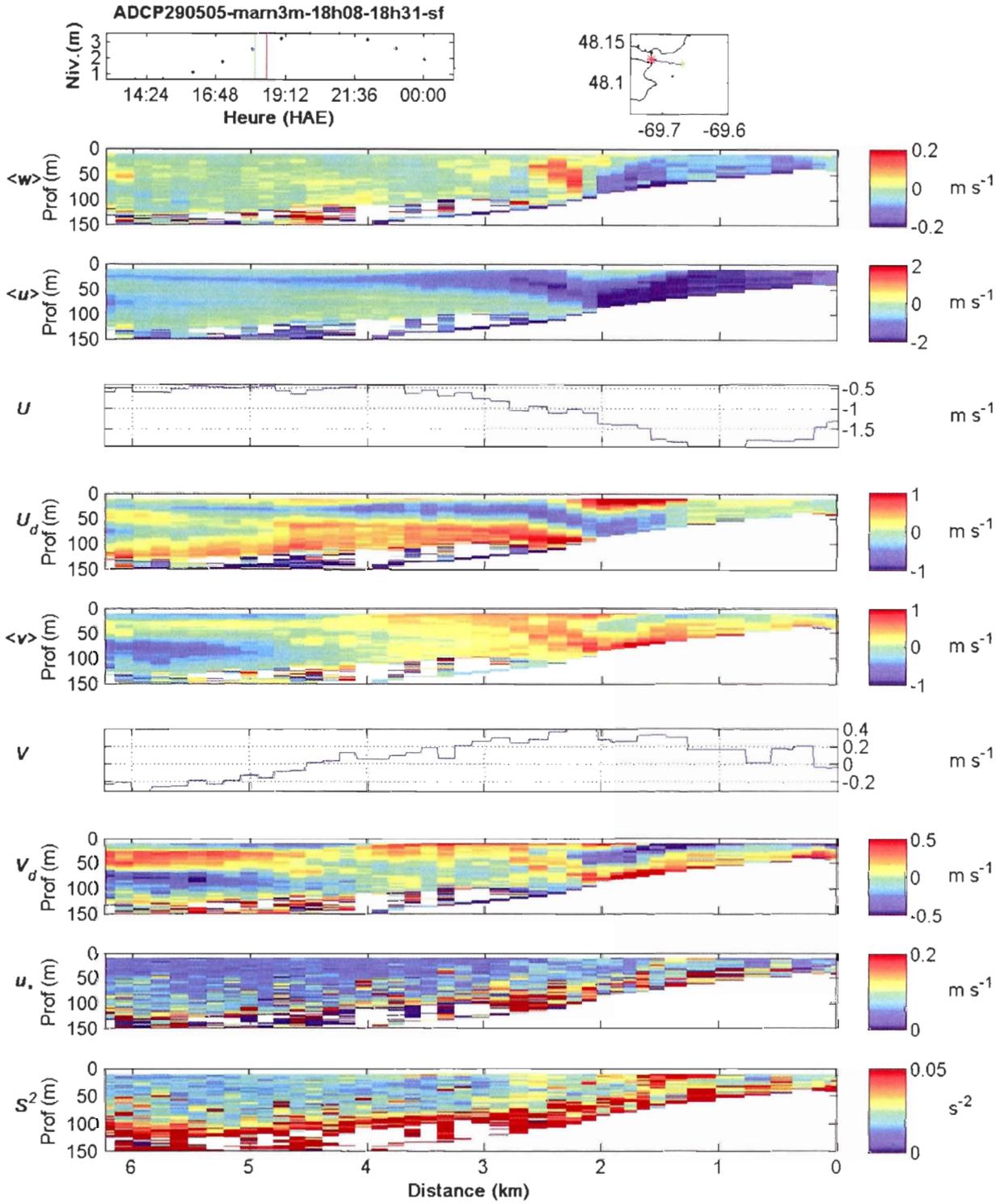
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 17h45 – 18h08



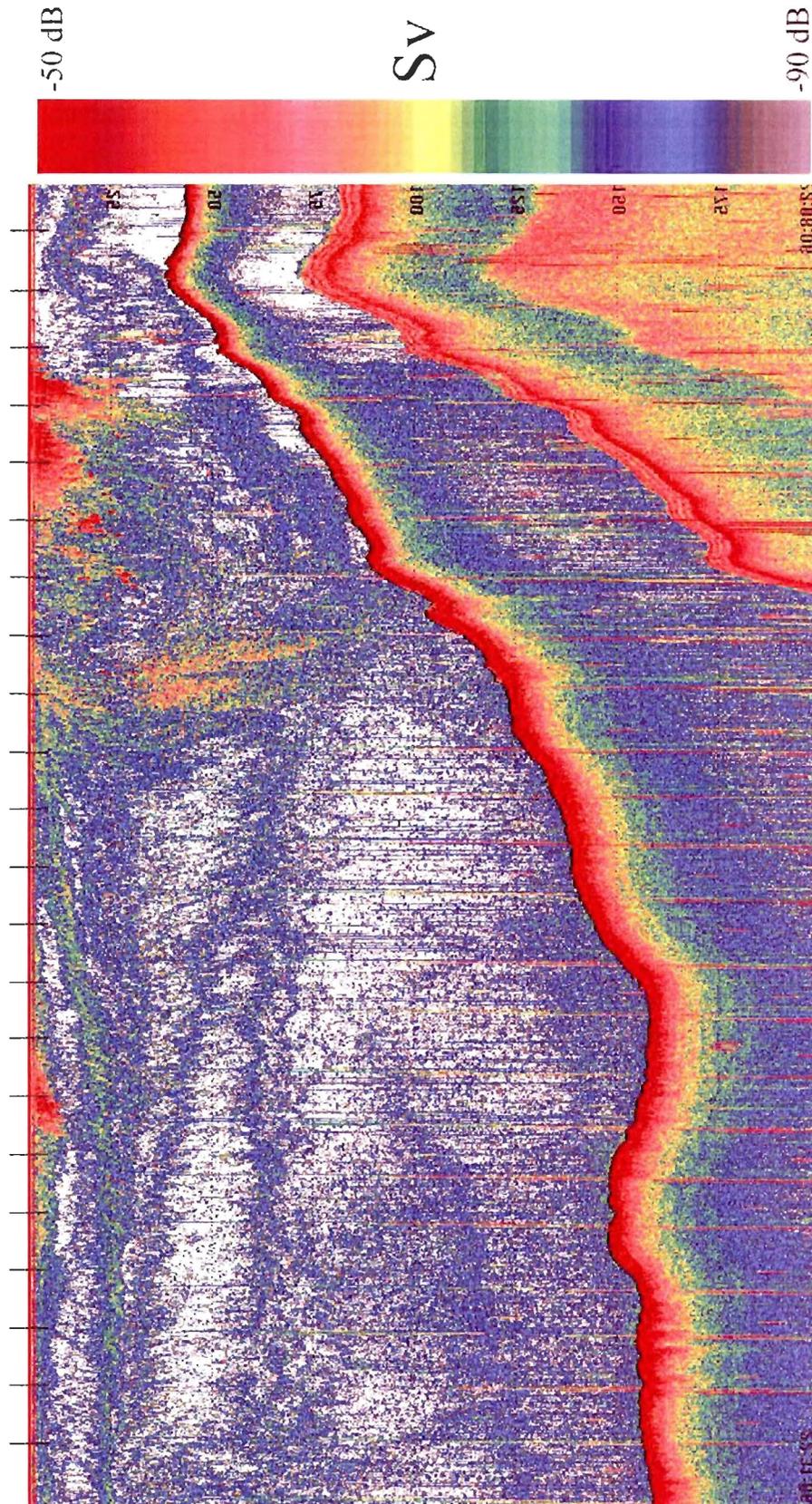
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 17h45 – 18h08



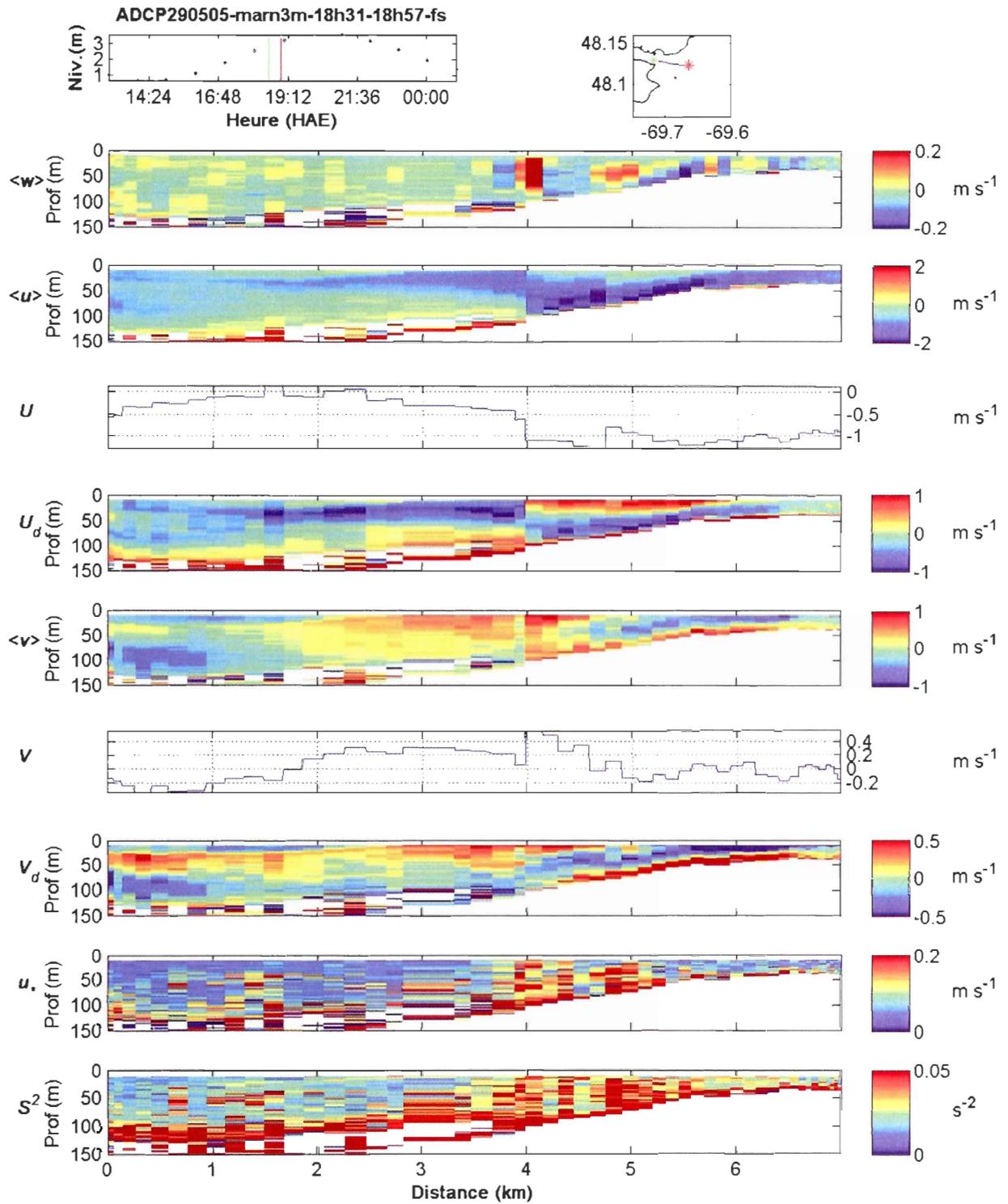
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 18h08 – 18h31



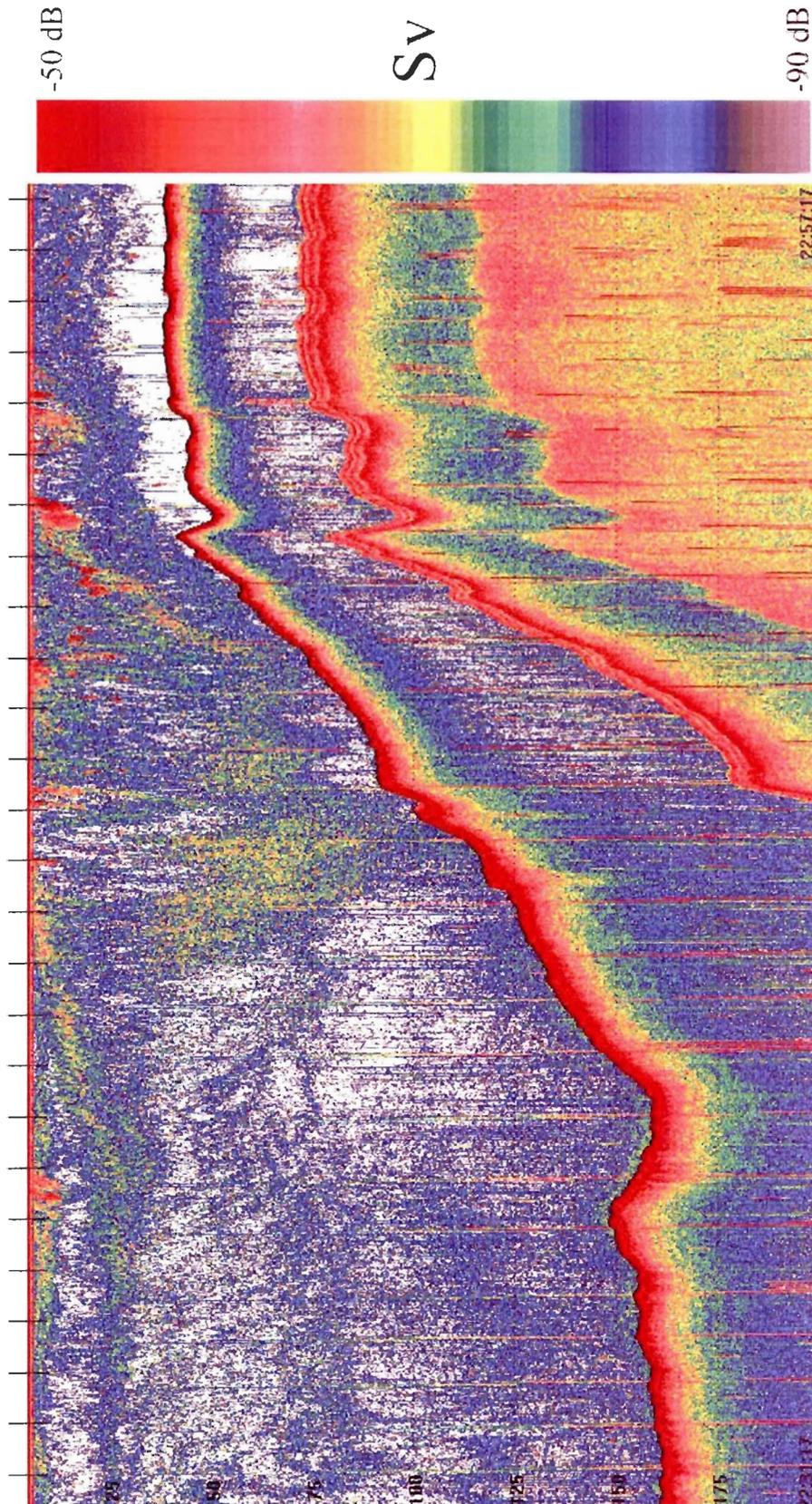
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 18h08 – 18h31



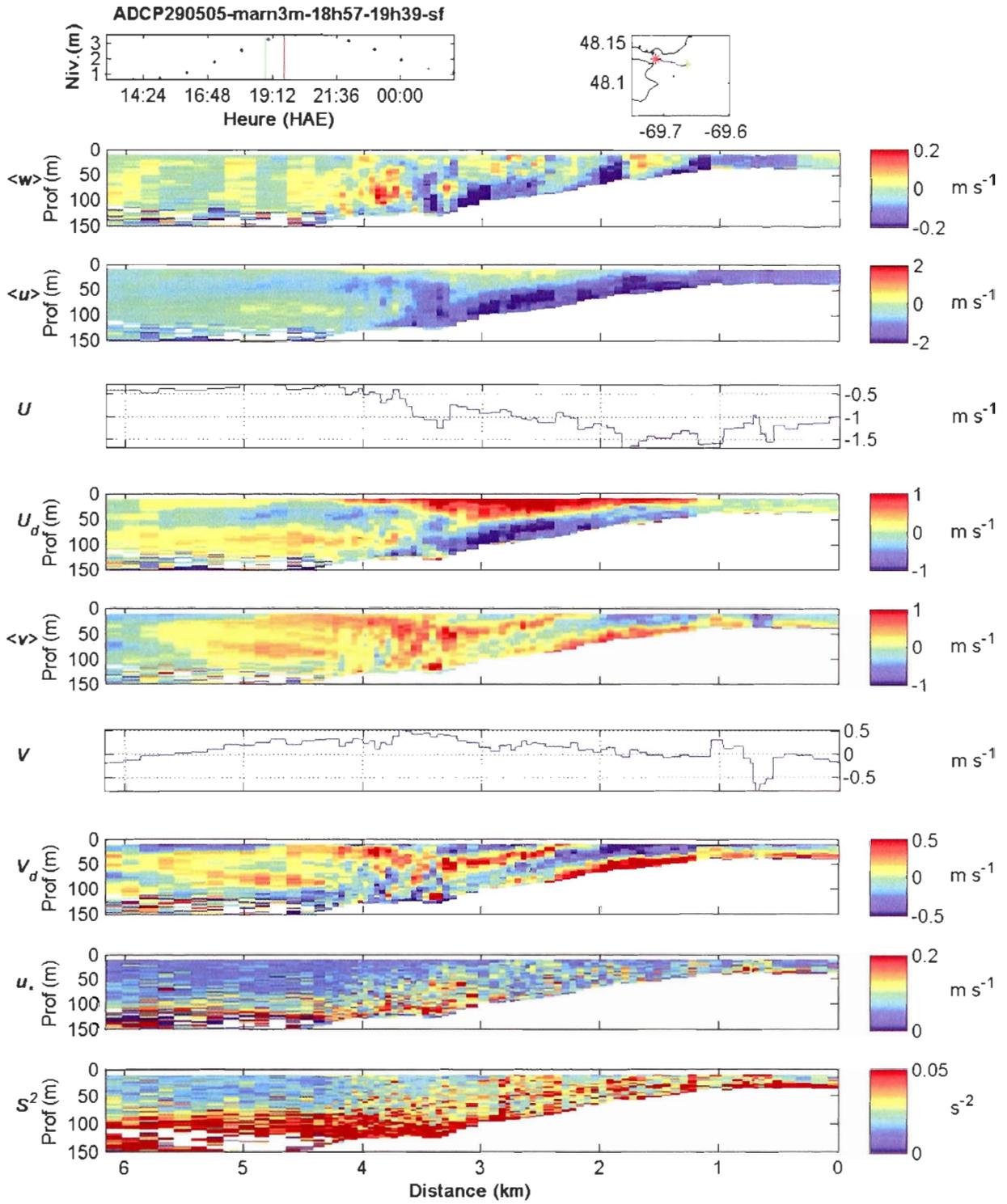
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 18h31 – 18h57



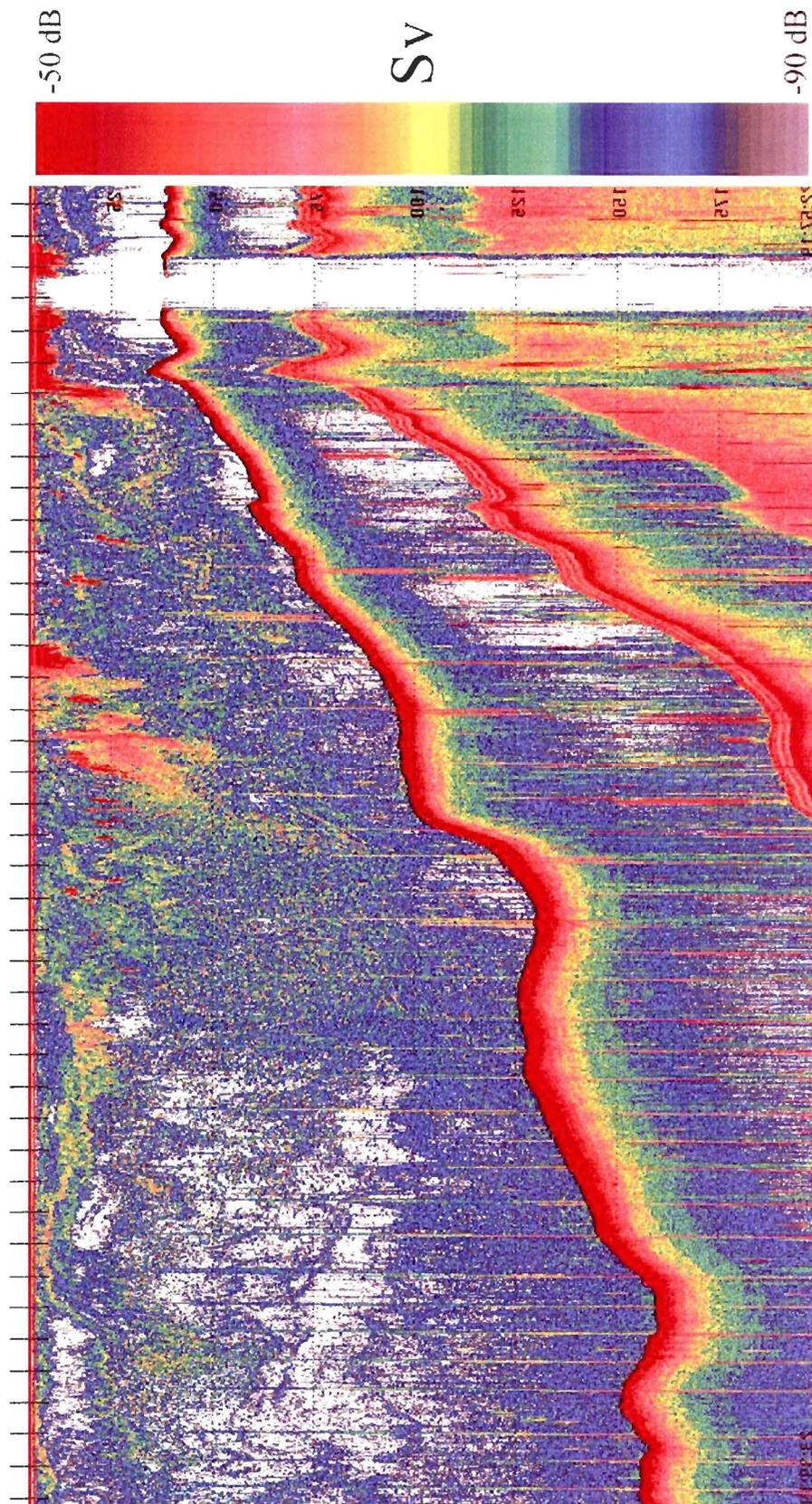
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 18h31 – 18h57



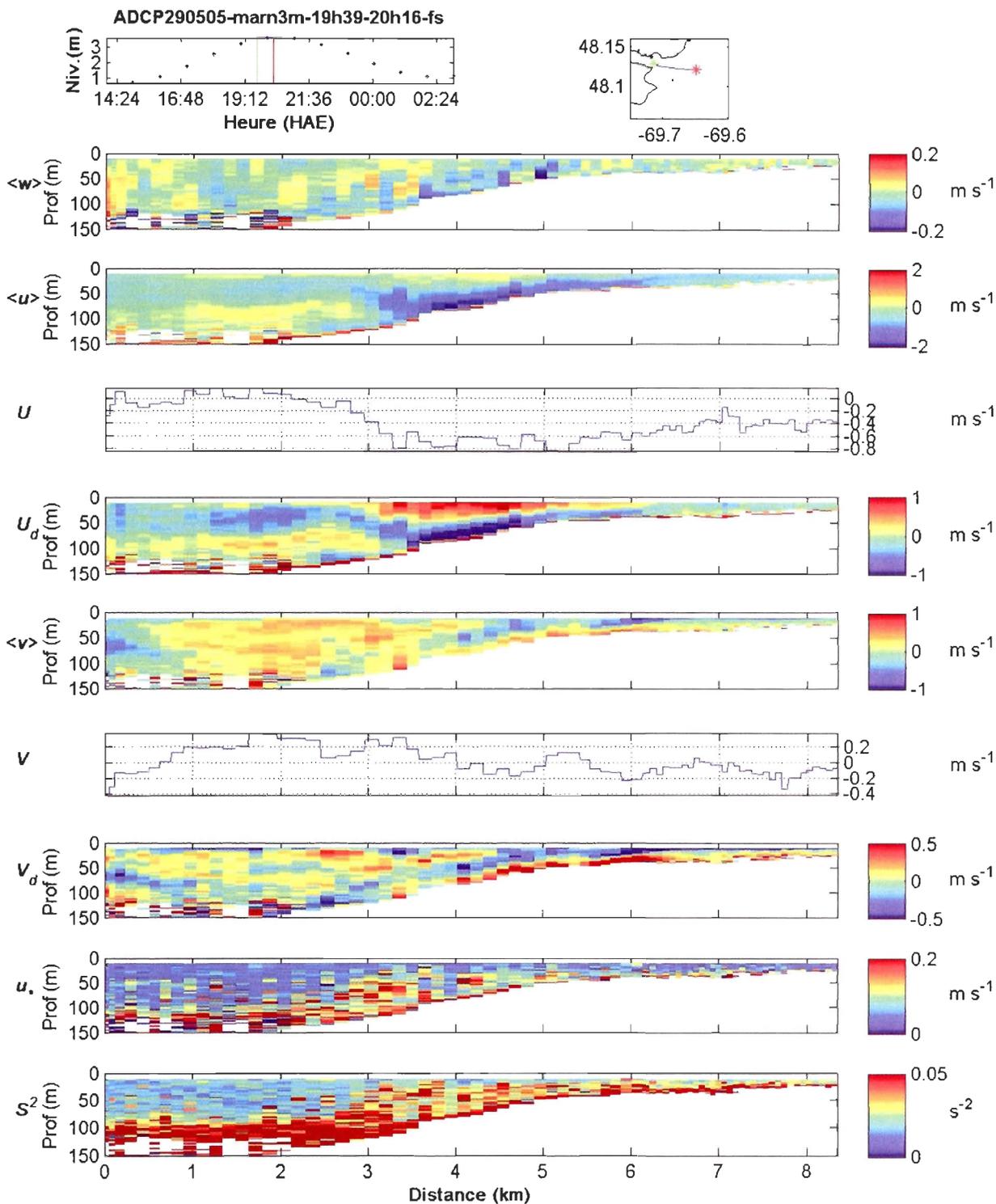
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 18h57 – 19h39



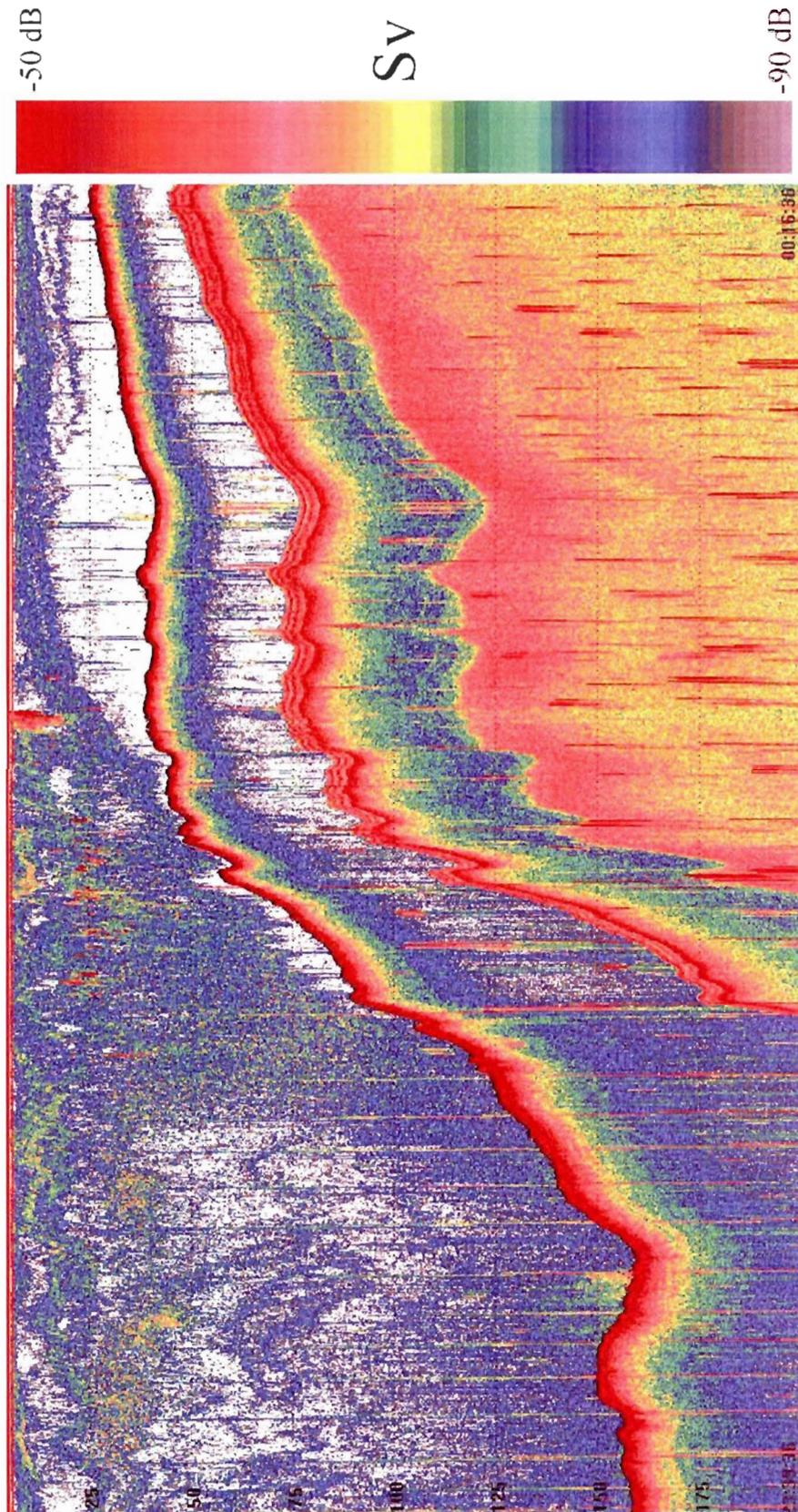
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 18h57 – 19h39



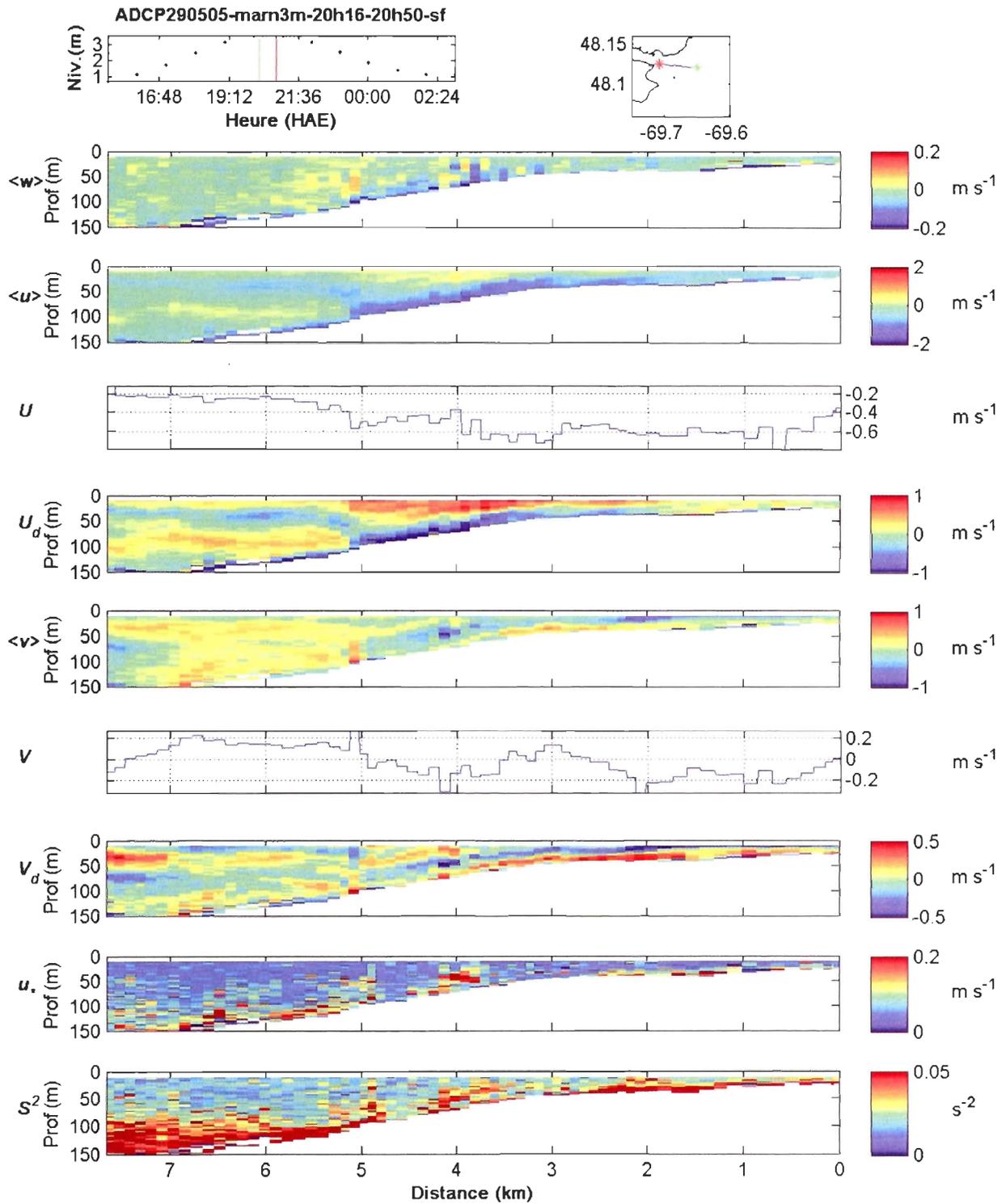
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 19h39 – 20h16



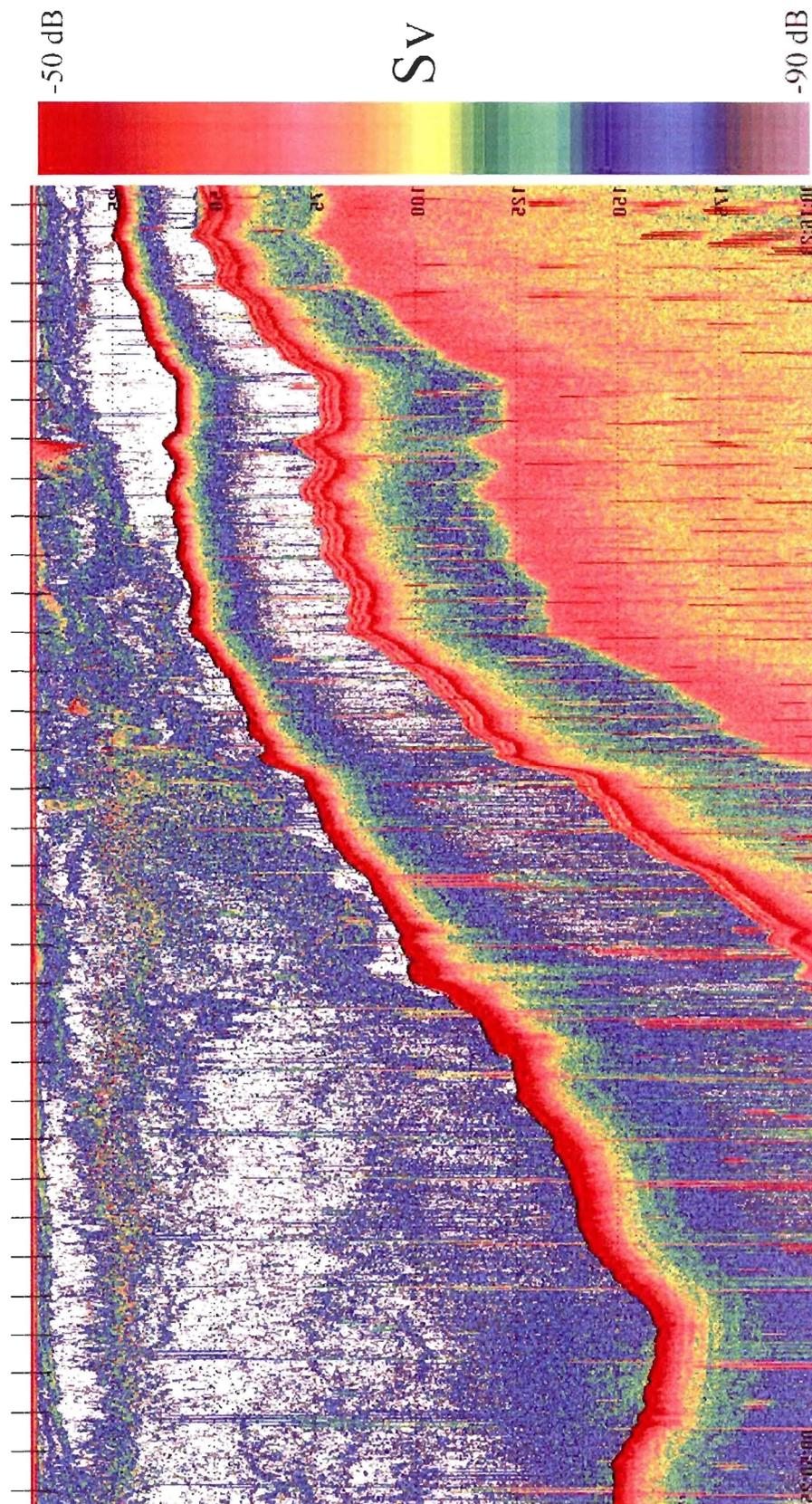
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 19h39 – 20h16



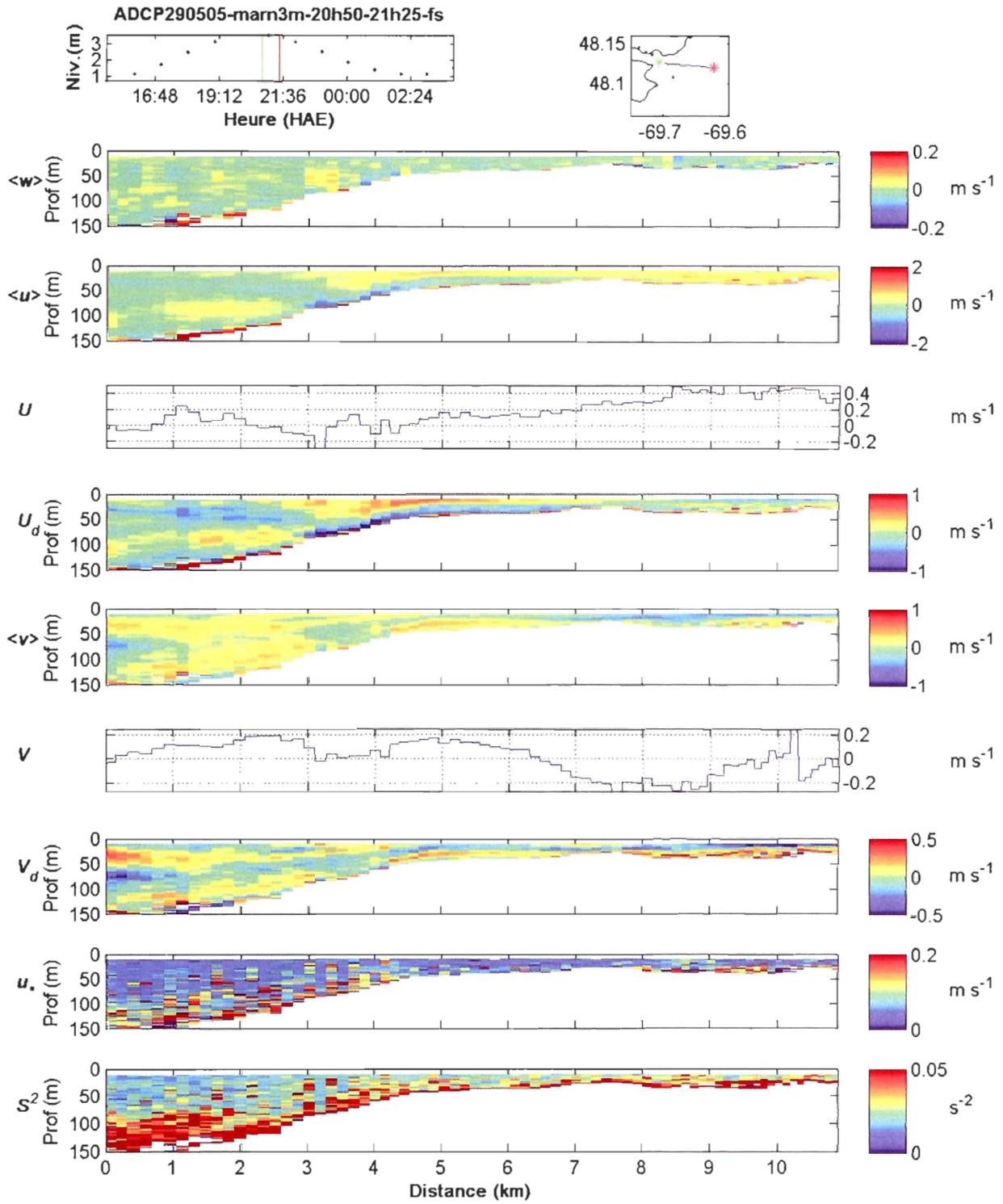
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 20h16 – 20h50



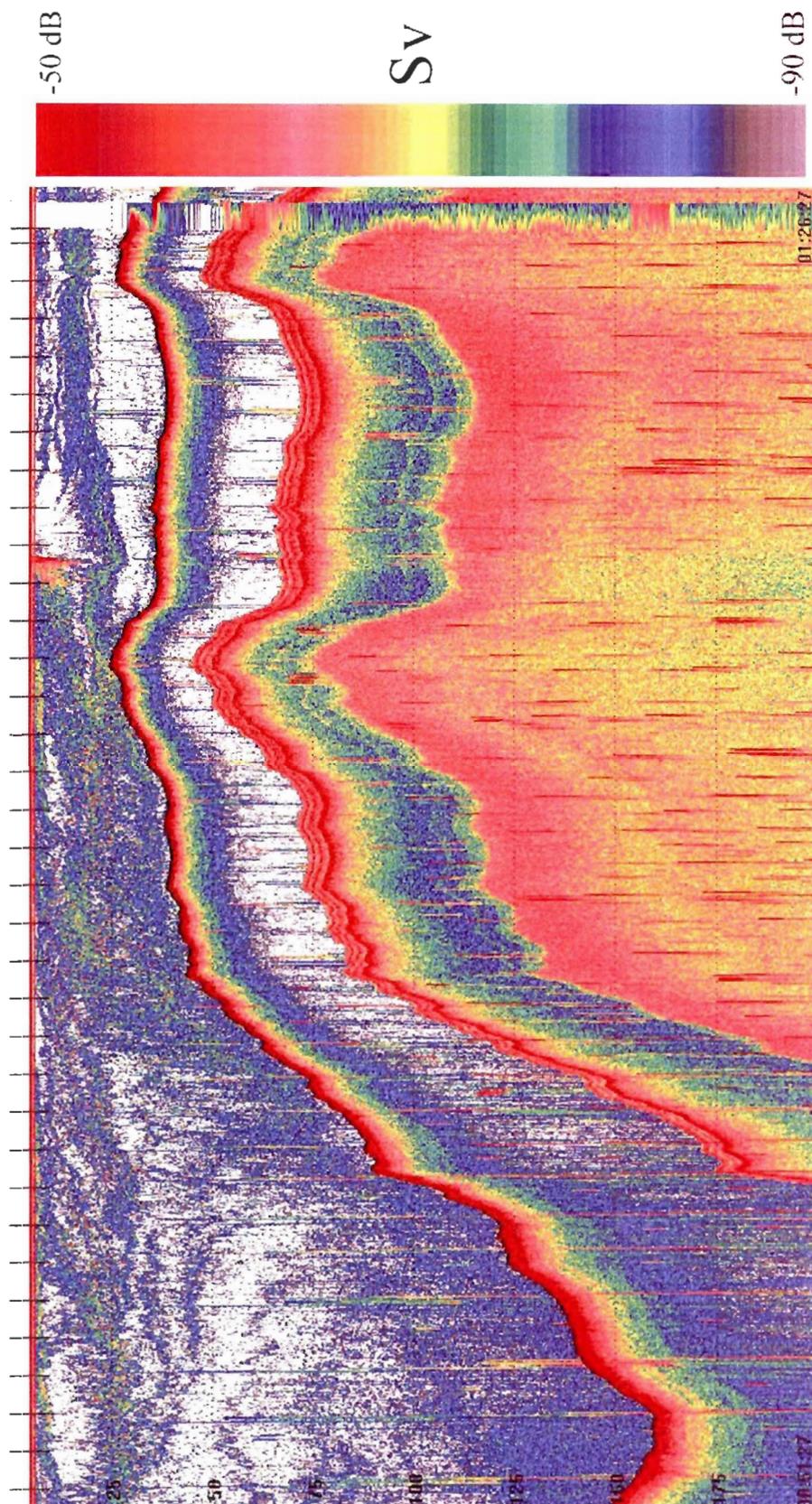
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 20h16 – 20h50



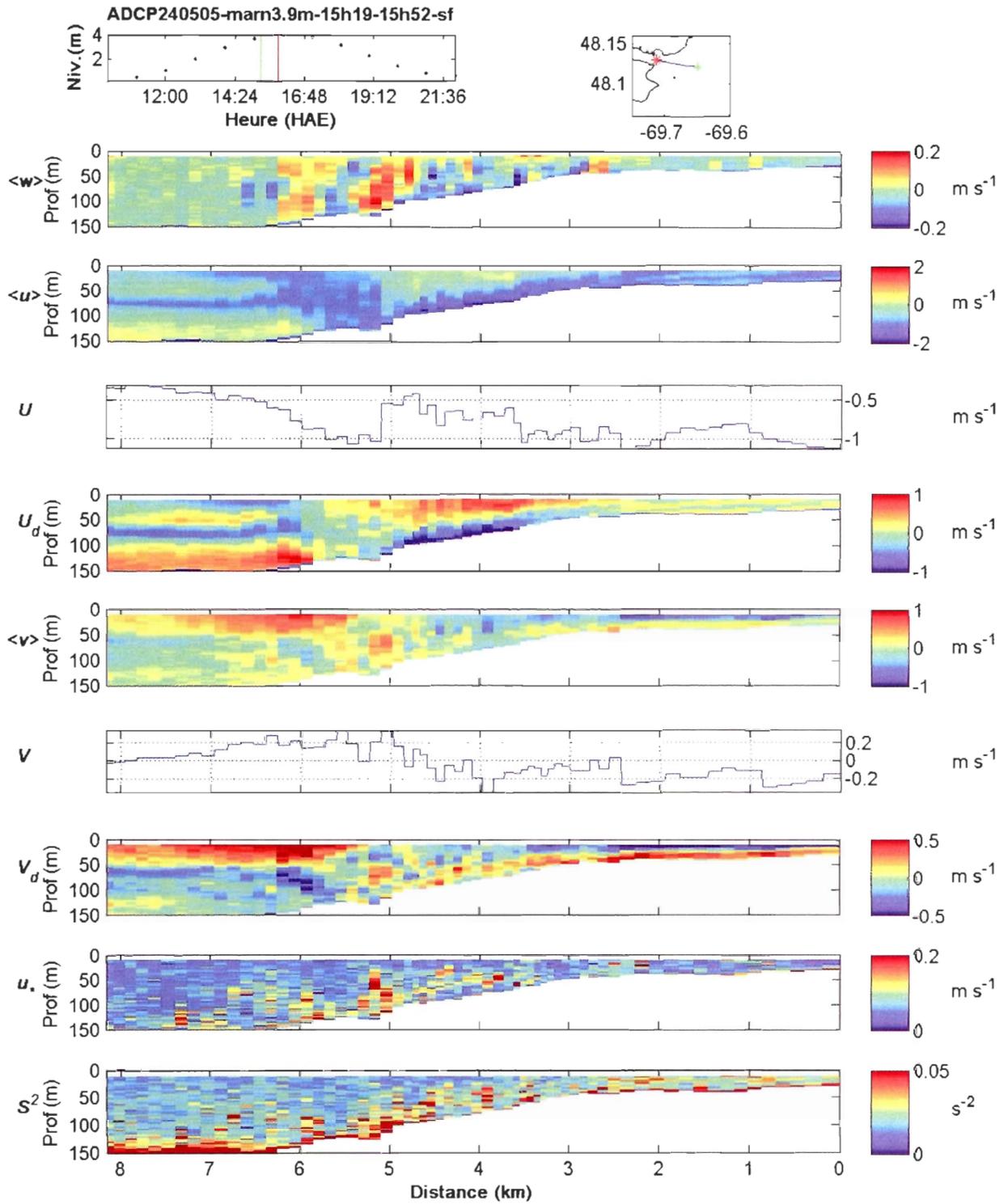
Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
 ADCP 20h50 – 21h25



Annexe 4c – ADCP et échosondeur, marnage 3m, le 29 mai 2005.  
Échosondeur 20h50 – 21h25

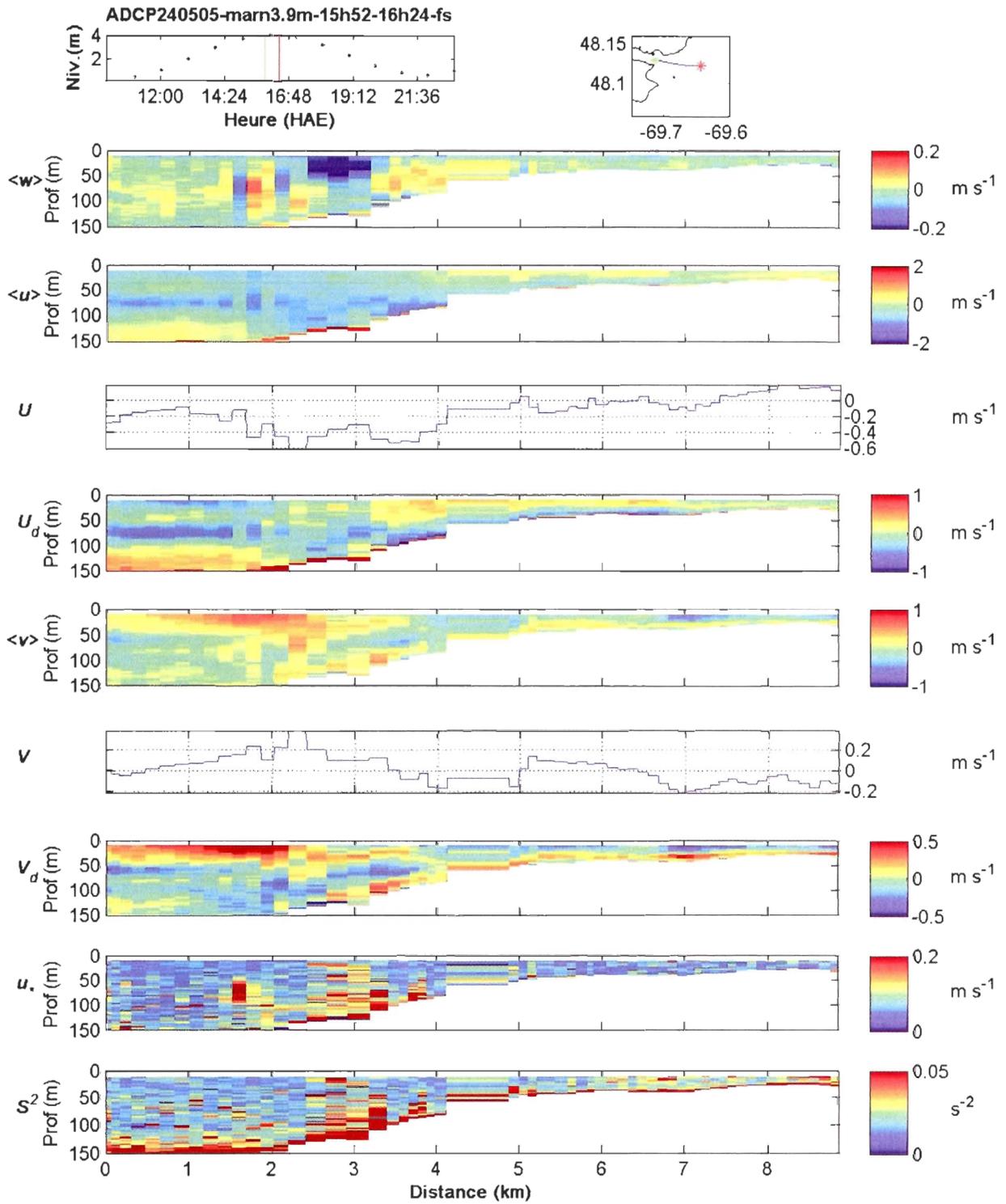


Annexe 4d – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 mai 2005.  
 ADCP 15h19 – 15h52

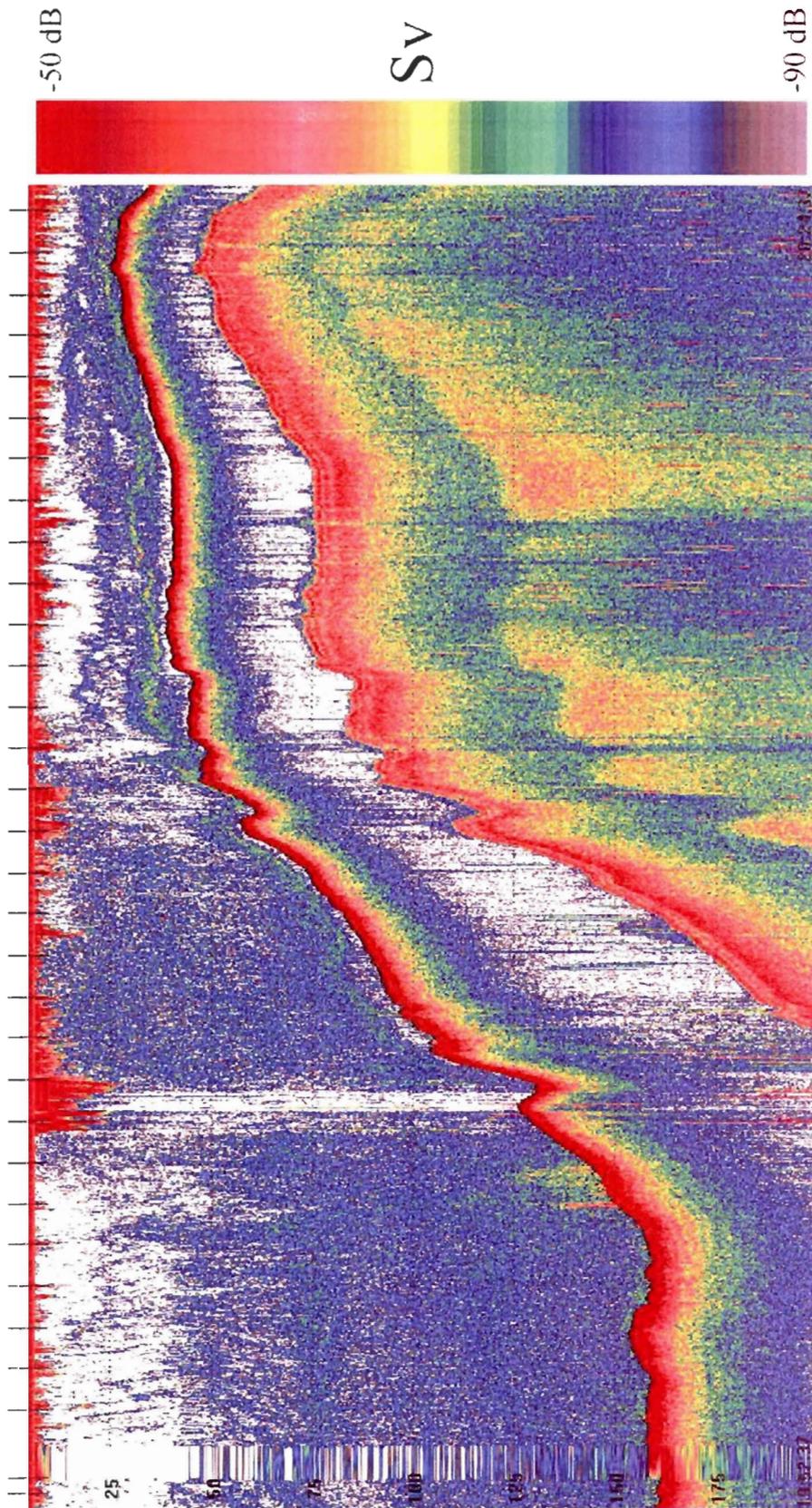




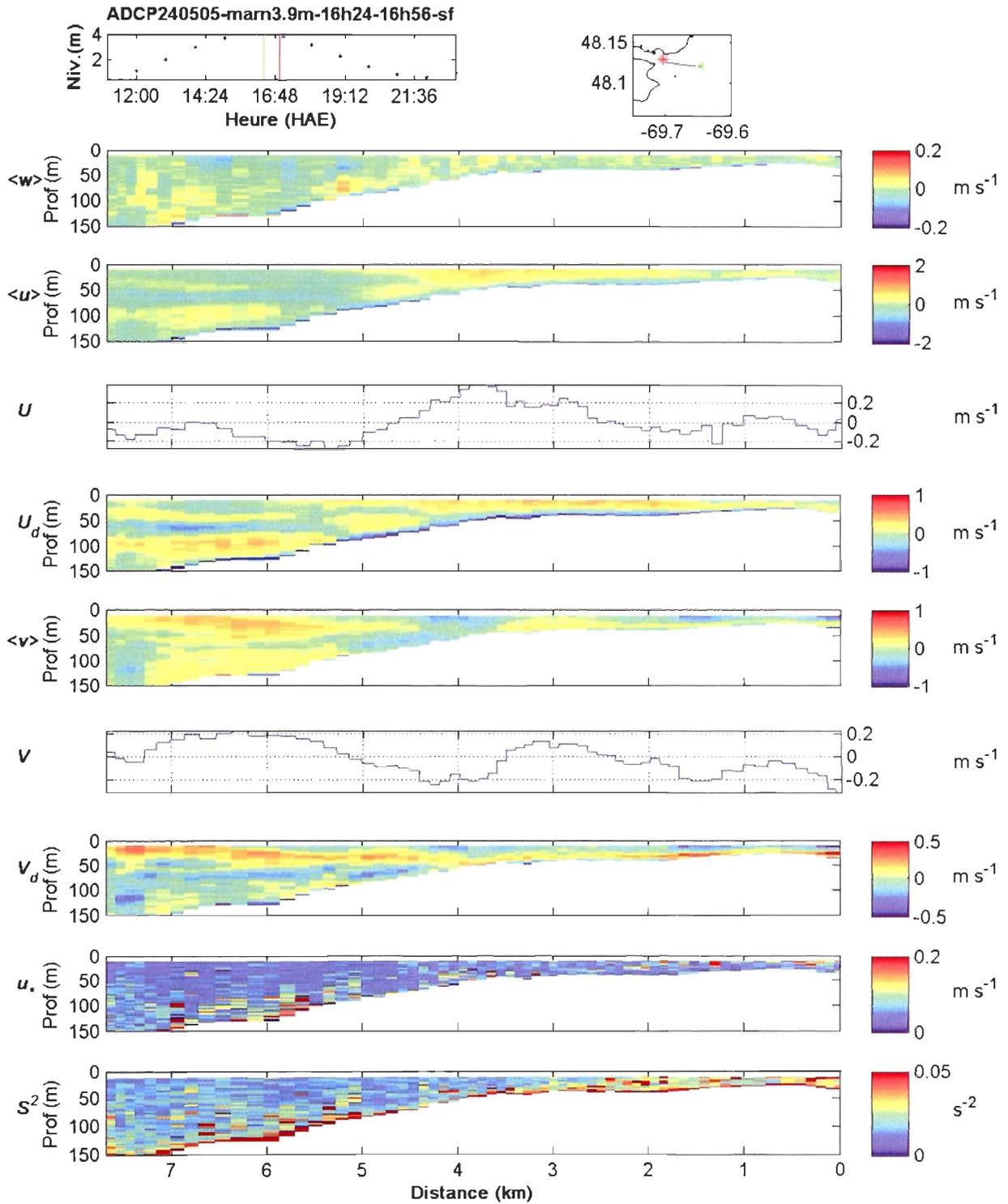
Annexe 4d – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 mai 2005.  
 ADCP 15h52 – 16h24



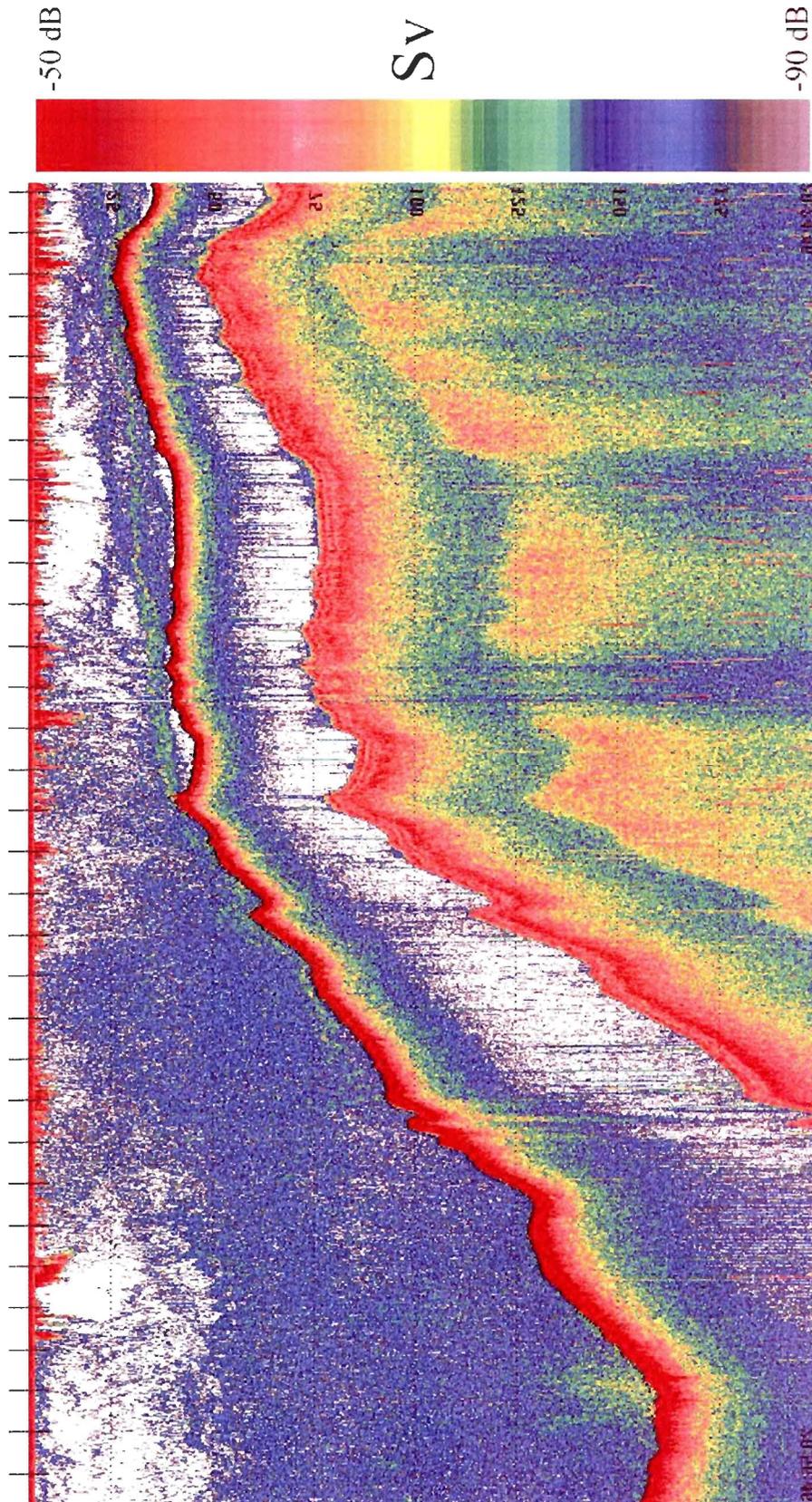
Annexe 4d – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 mai 2005.  
Échosondeur 15h52 – 16h24



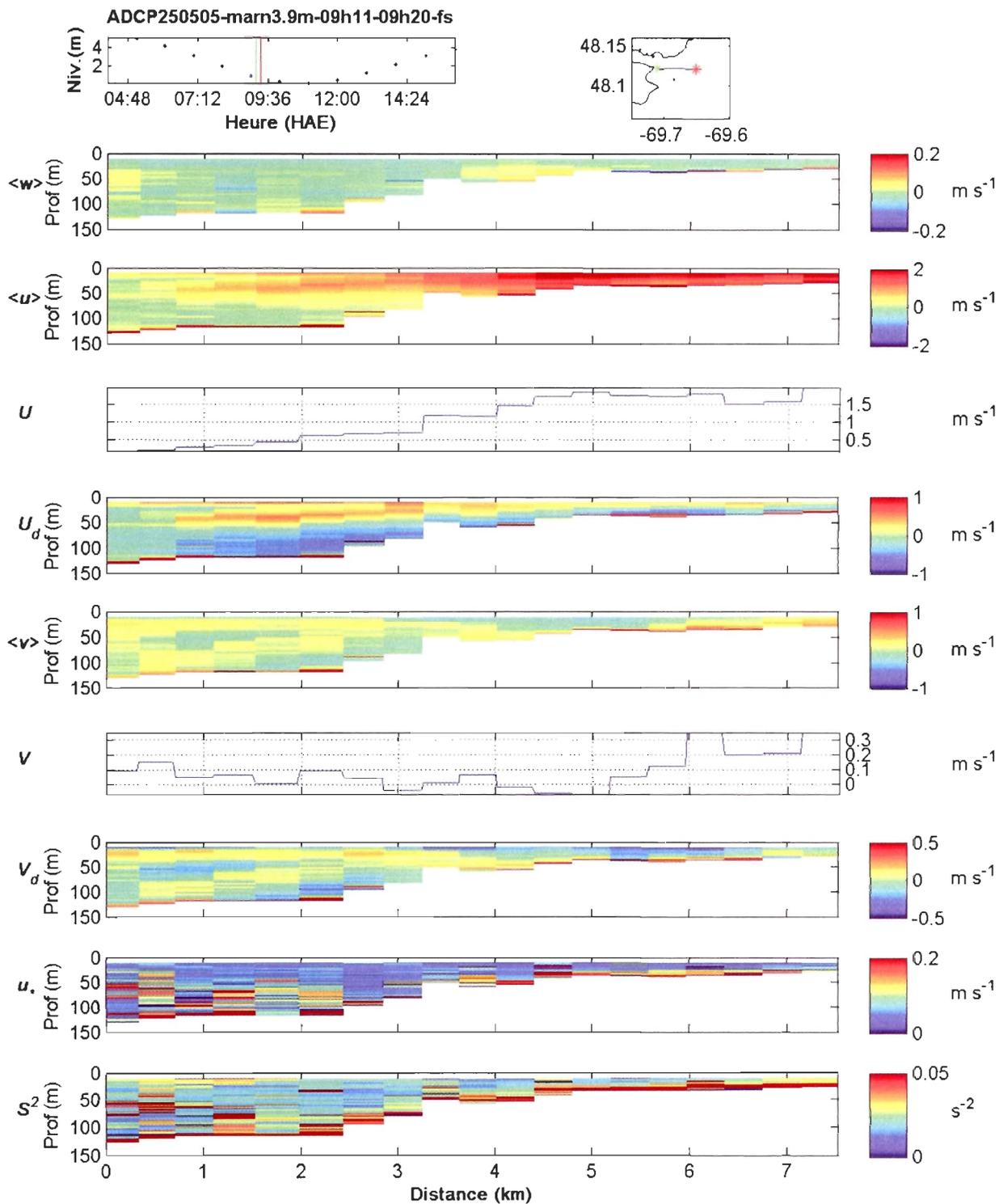
Annexe 4d – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 mai 2005.  
 ADCP 16h24 – 16h56



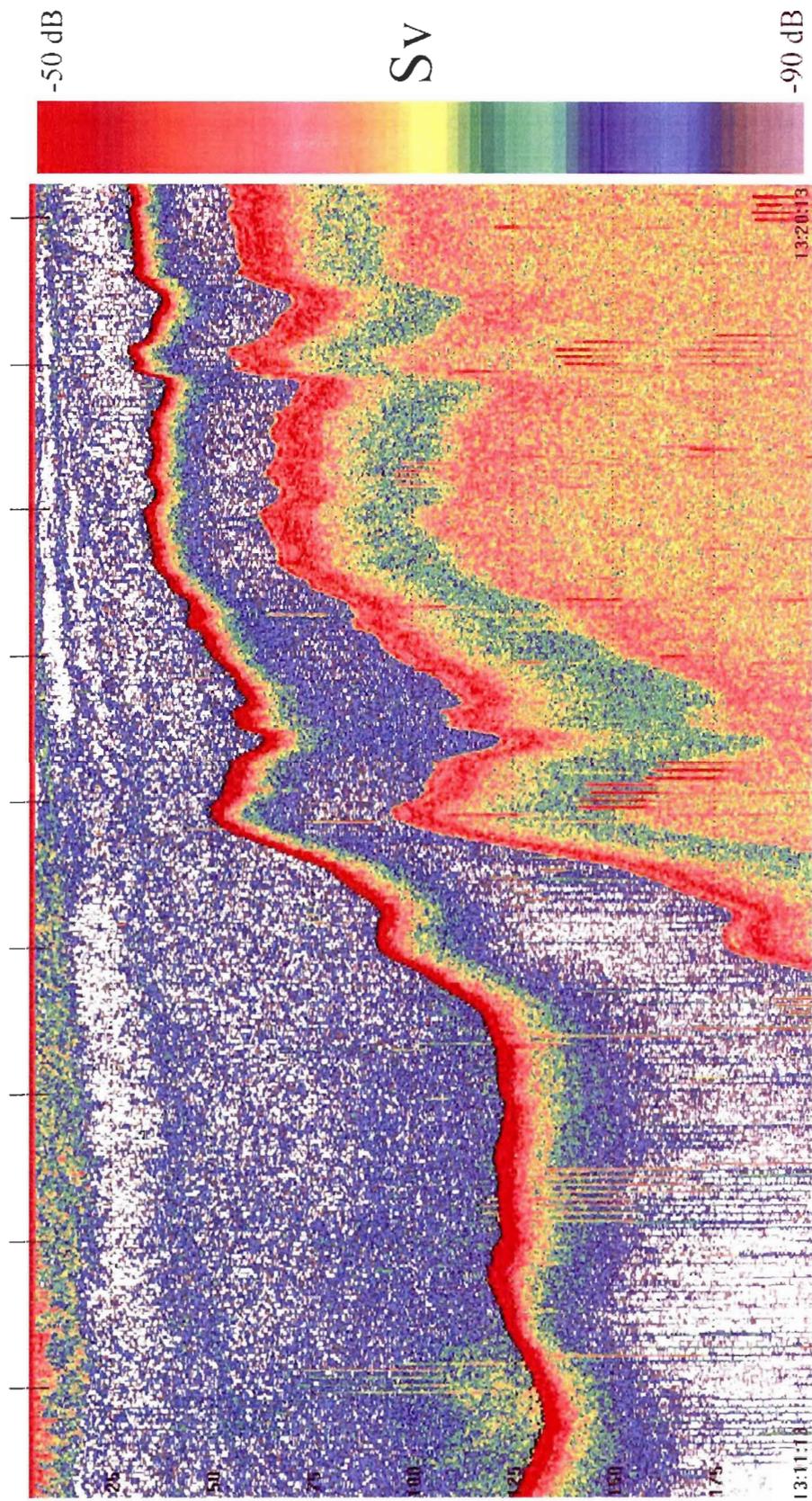
Annexe 4d – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 mai 2005.  
Échosondeur 16h24 – 16h56



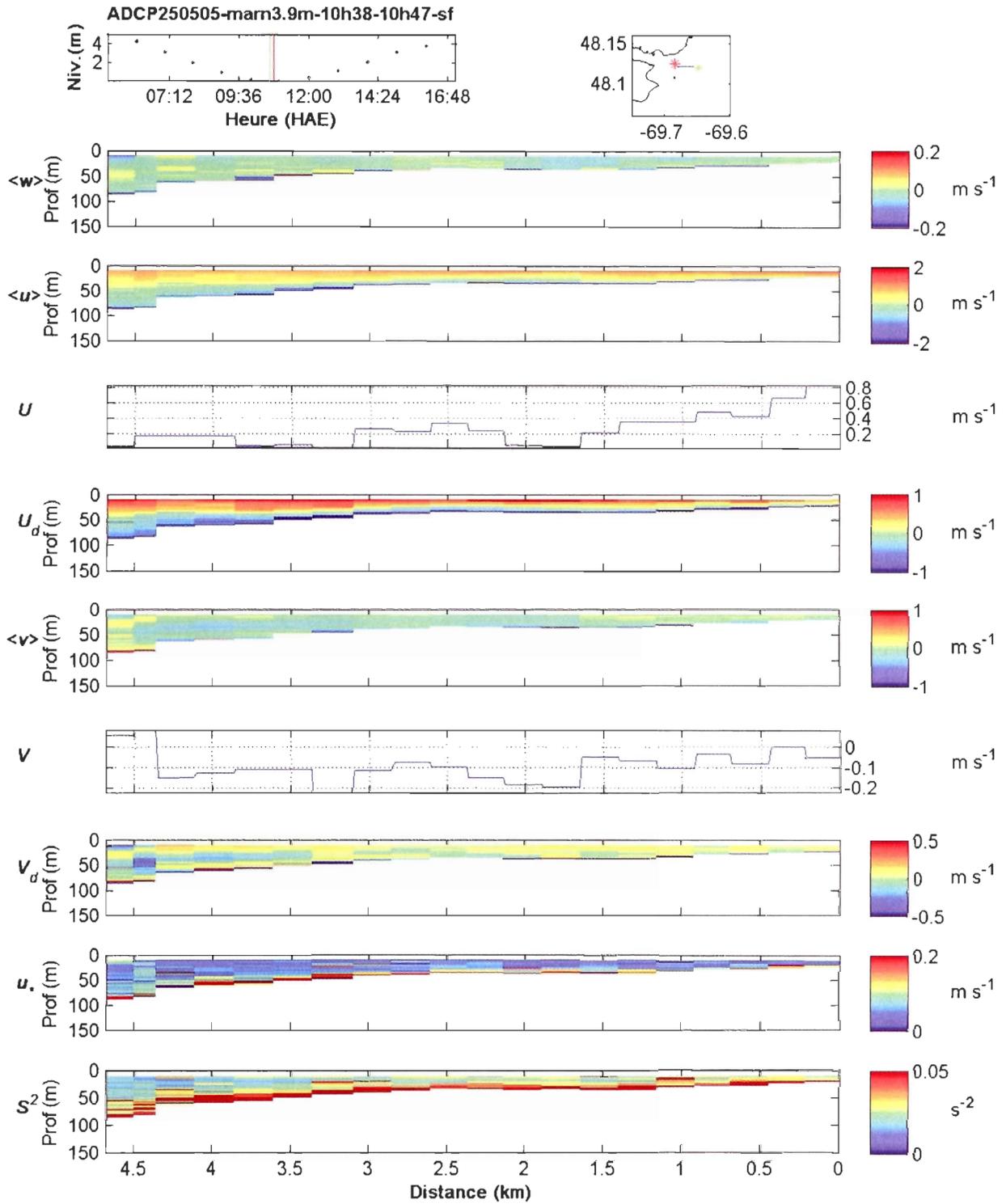
Annexe 4e – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 09h11 – 09h20



Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 09h11 – 09h20

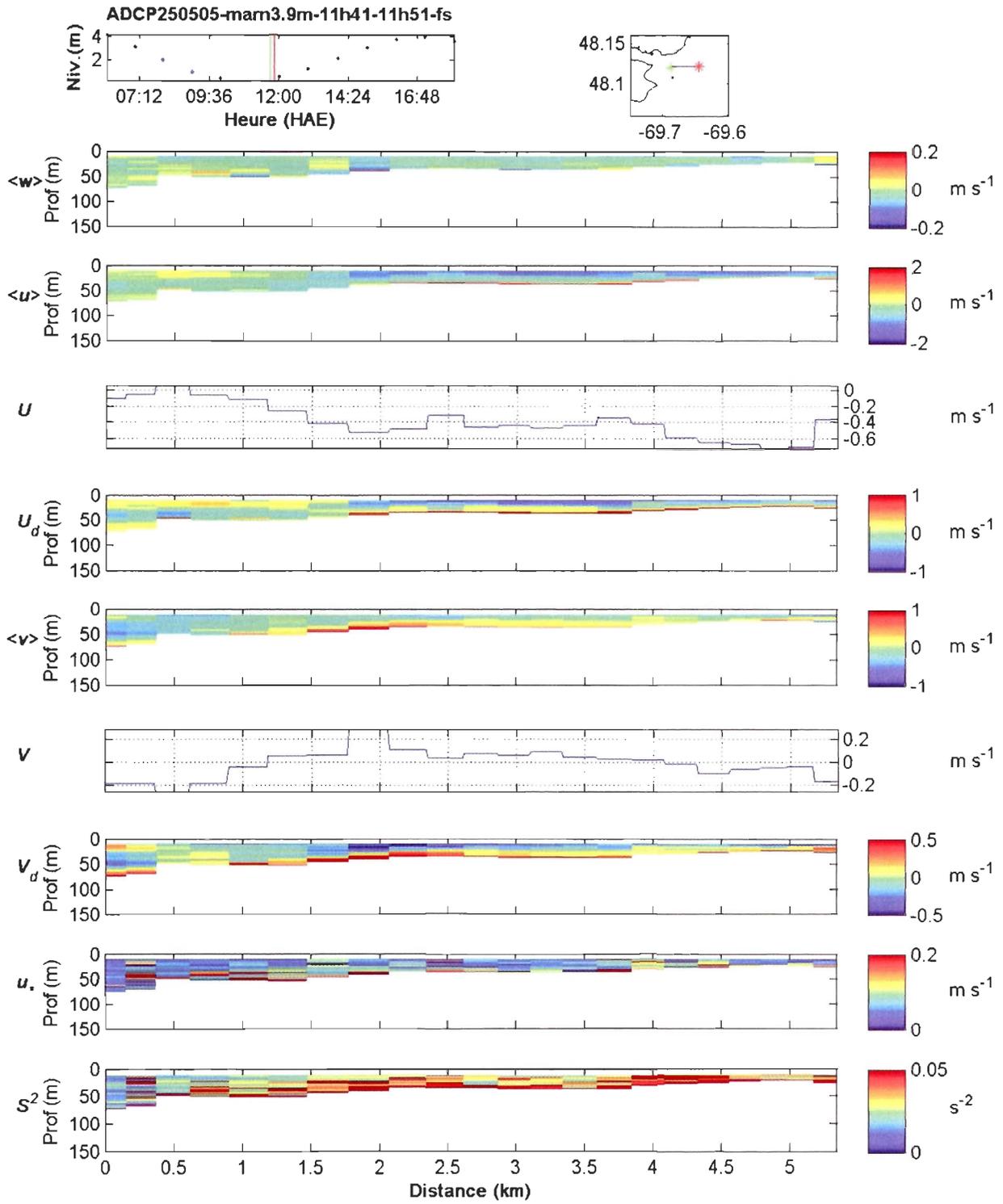


Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 10h38 – 10h47

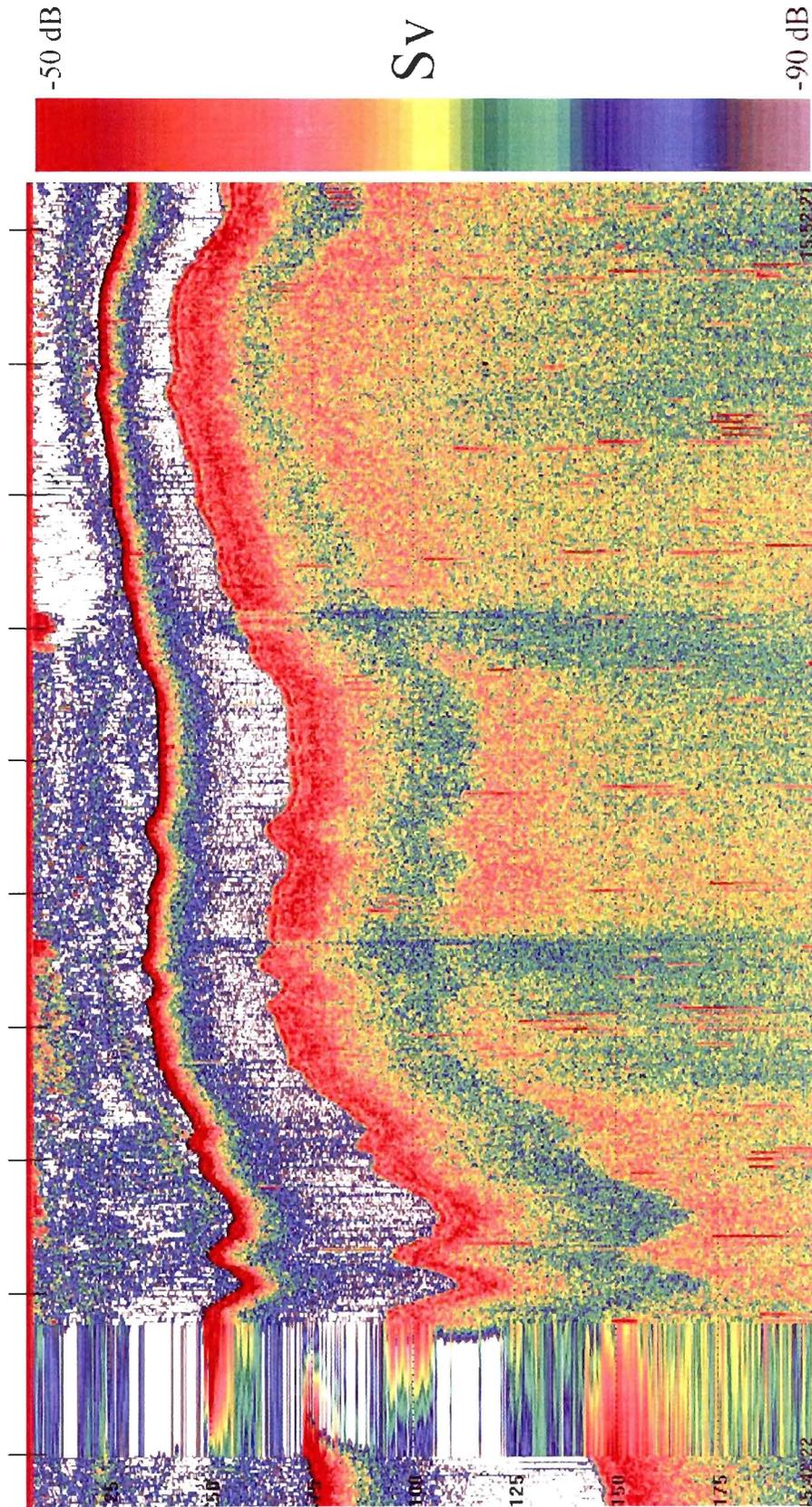




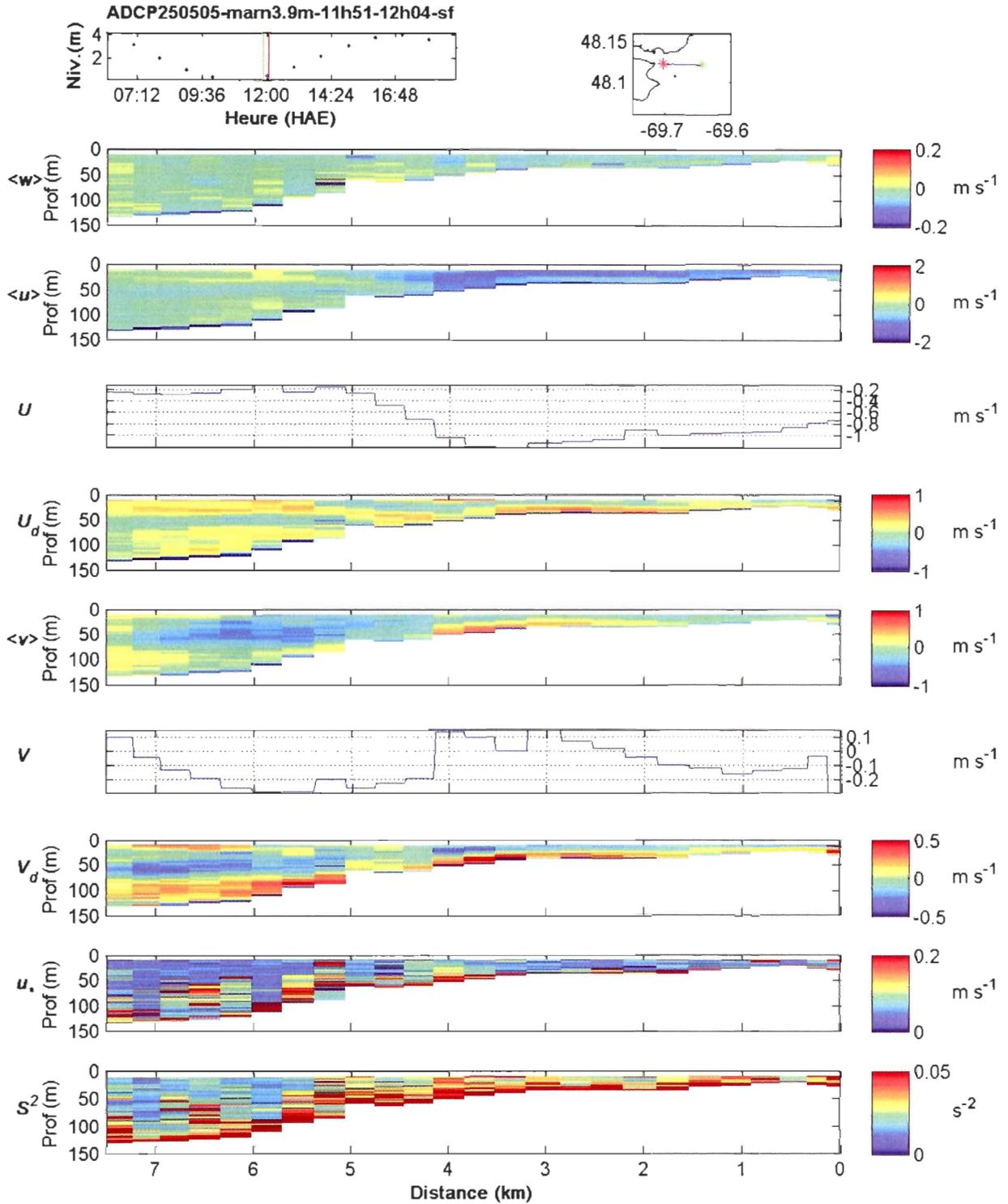
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 11h41 – 11h51



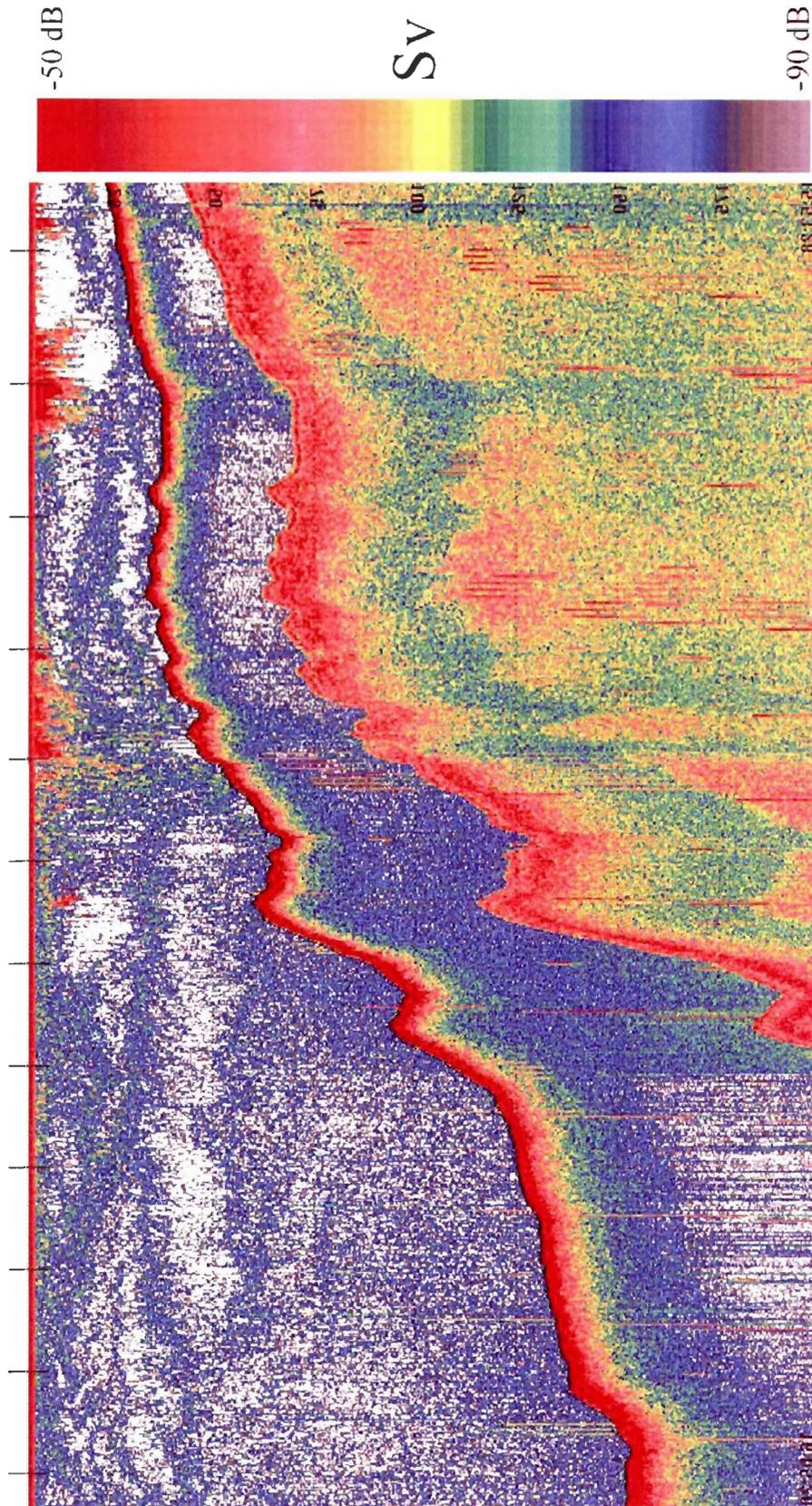
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 11h41 – 11h51



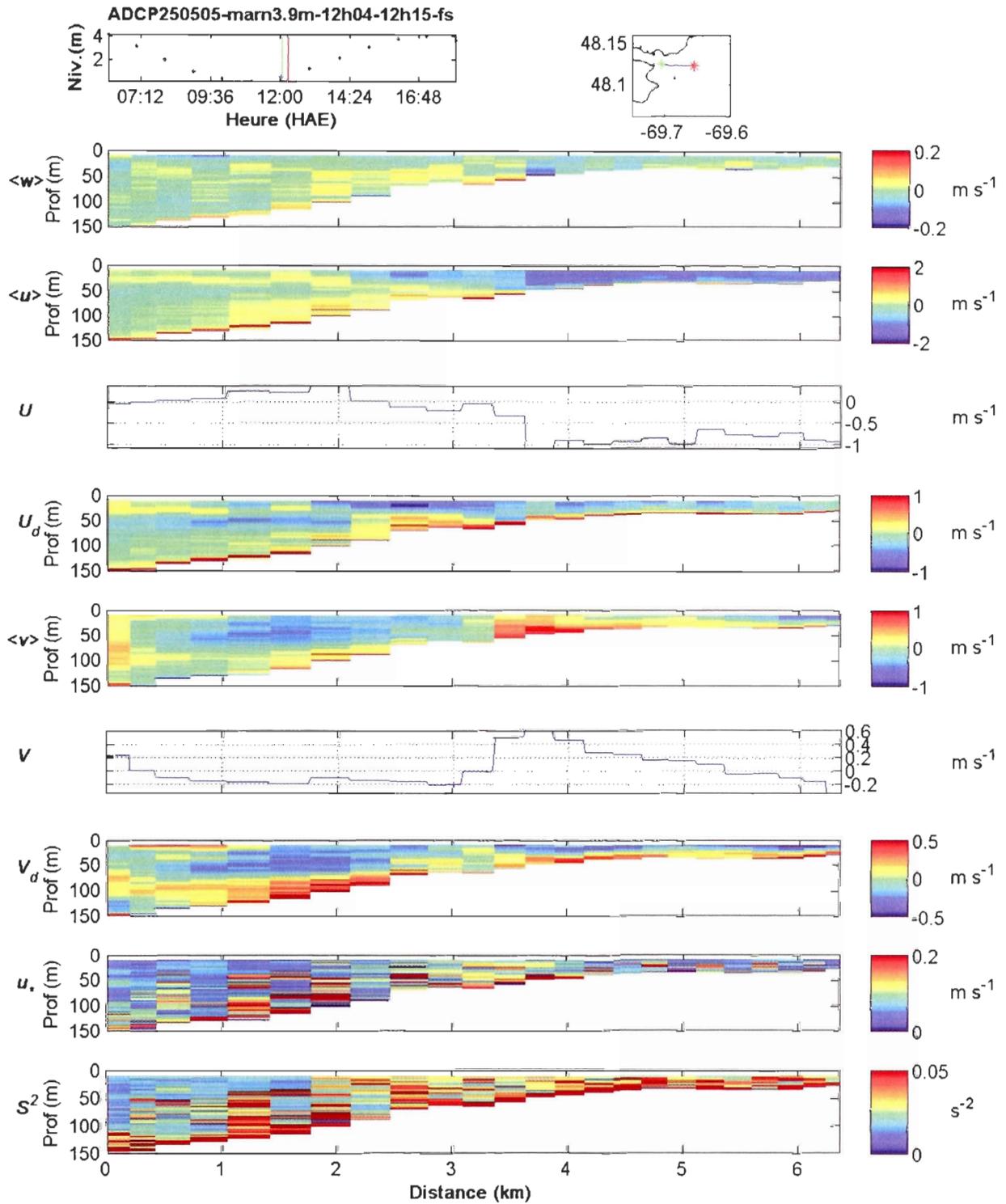
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 11h51 – 12h04



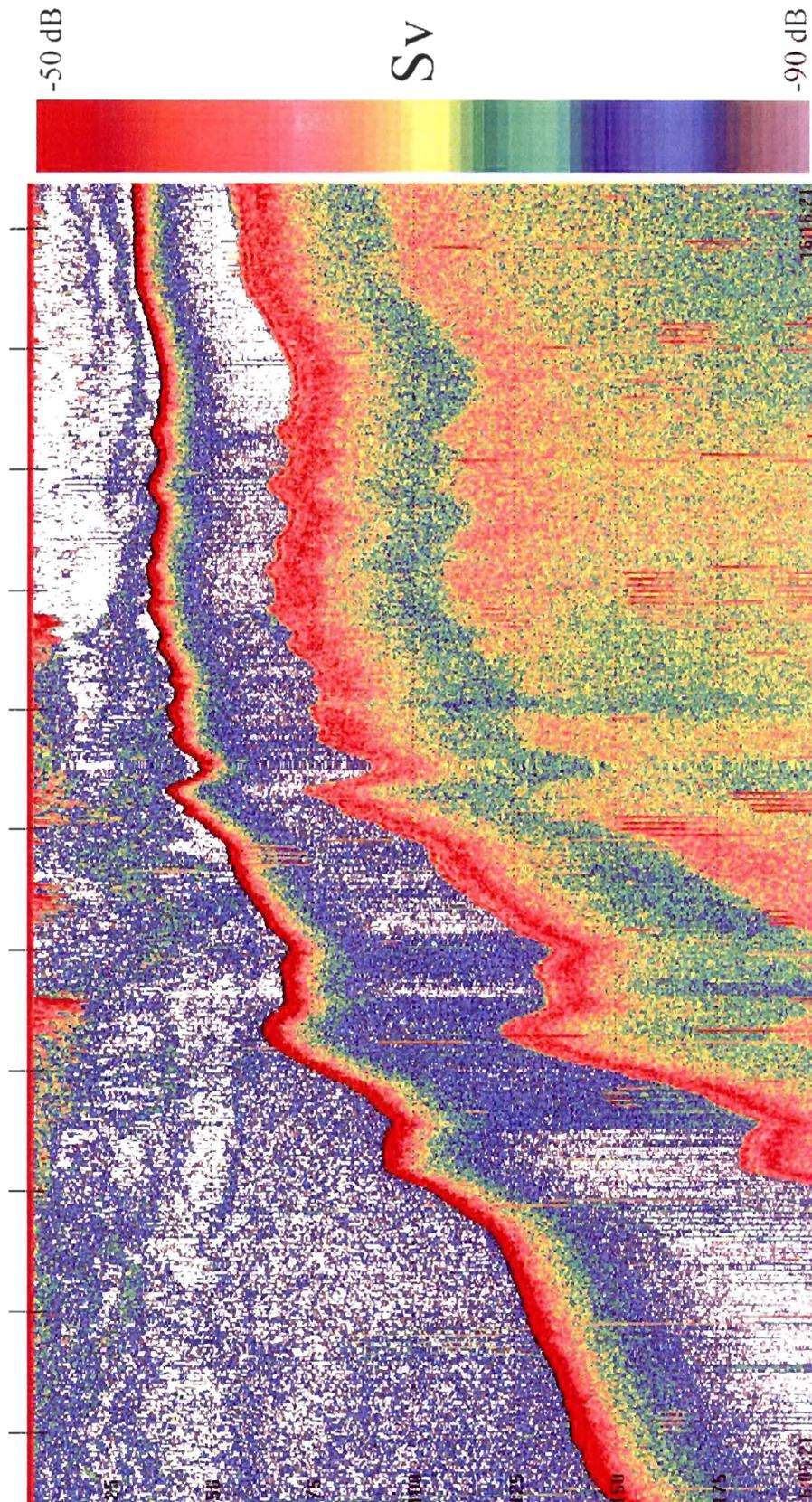
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 11h51 – 12h04



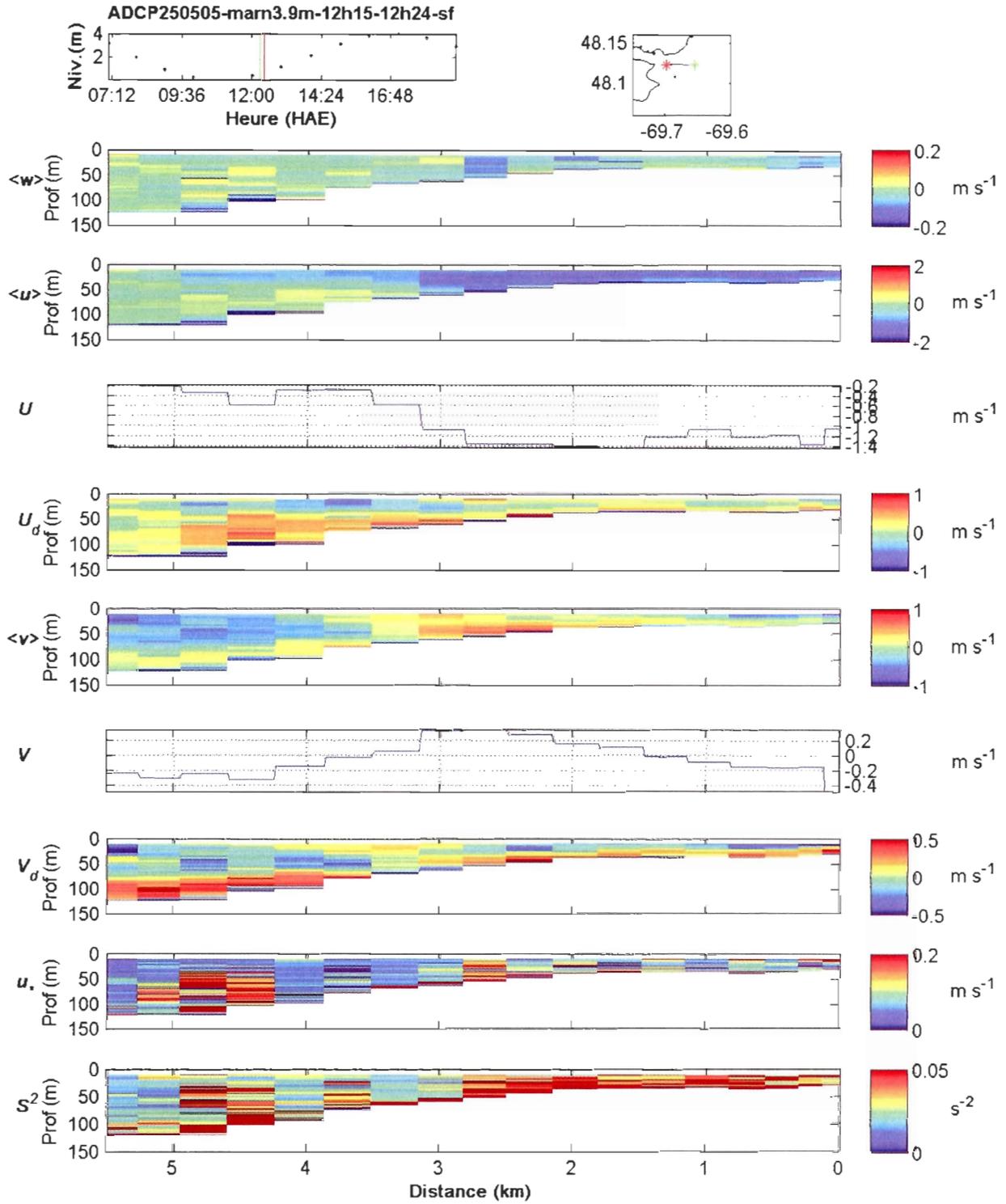
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 12h04 – 12h15



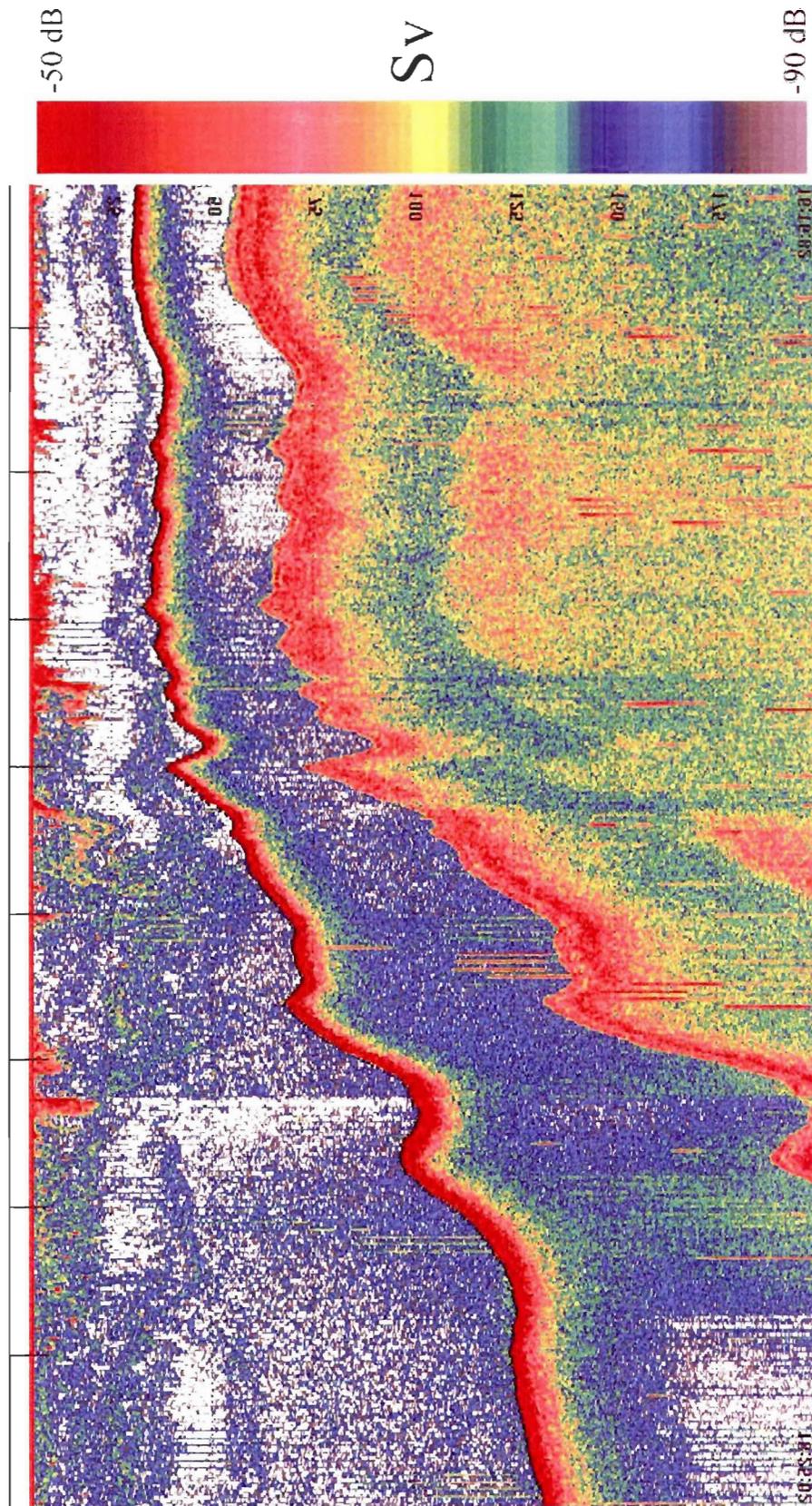
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 12h04 – 12h15



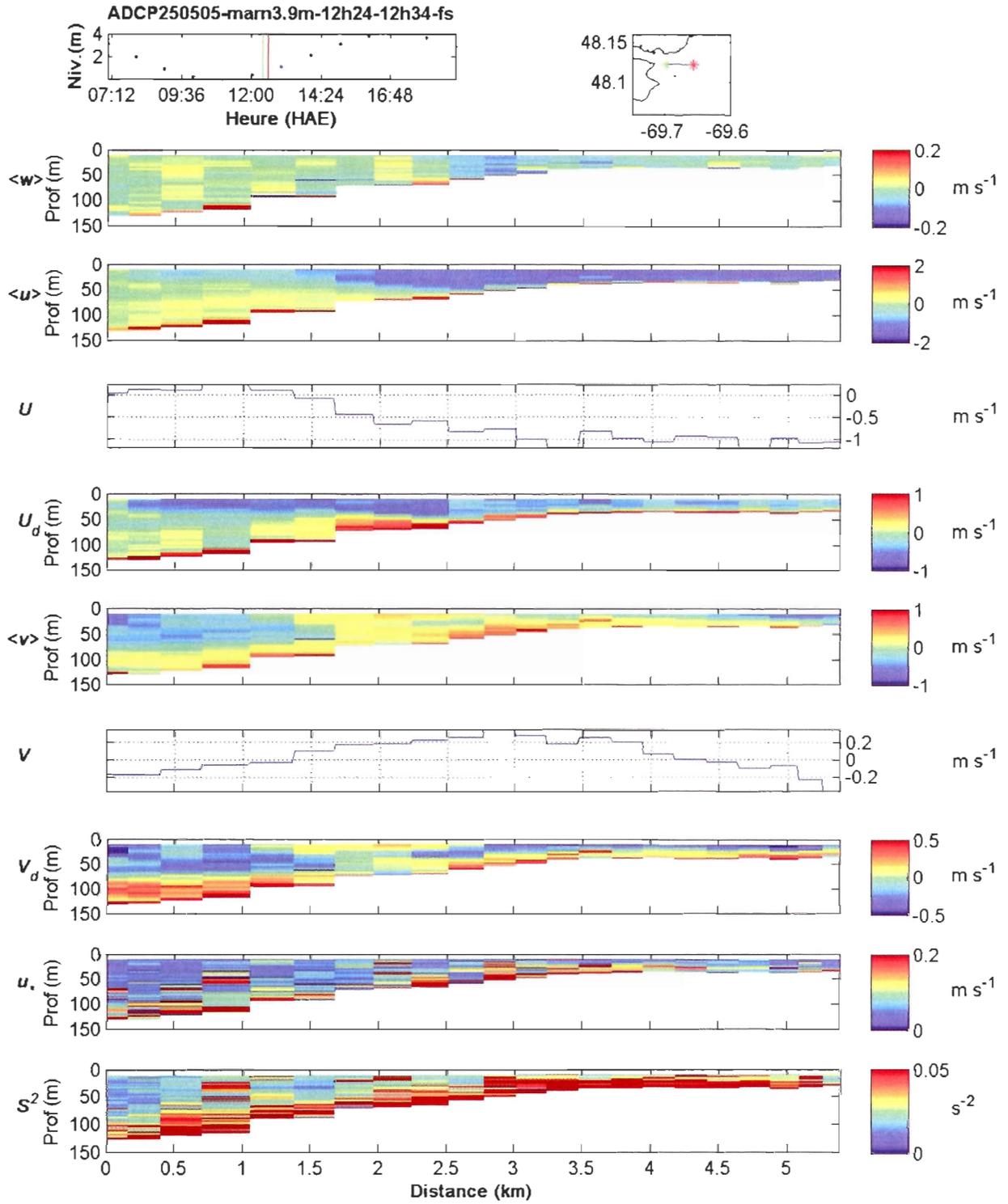
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 12h15 – 12h24



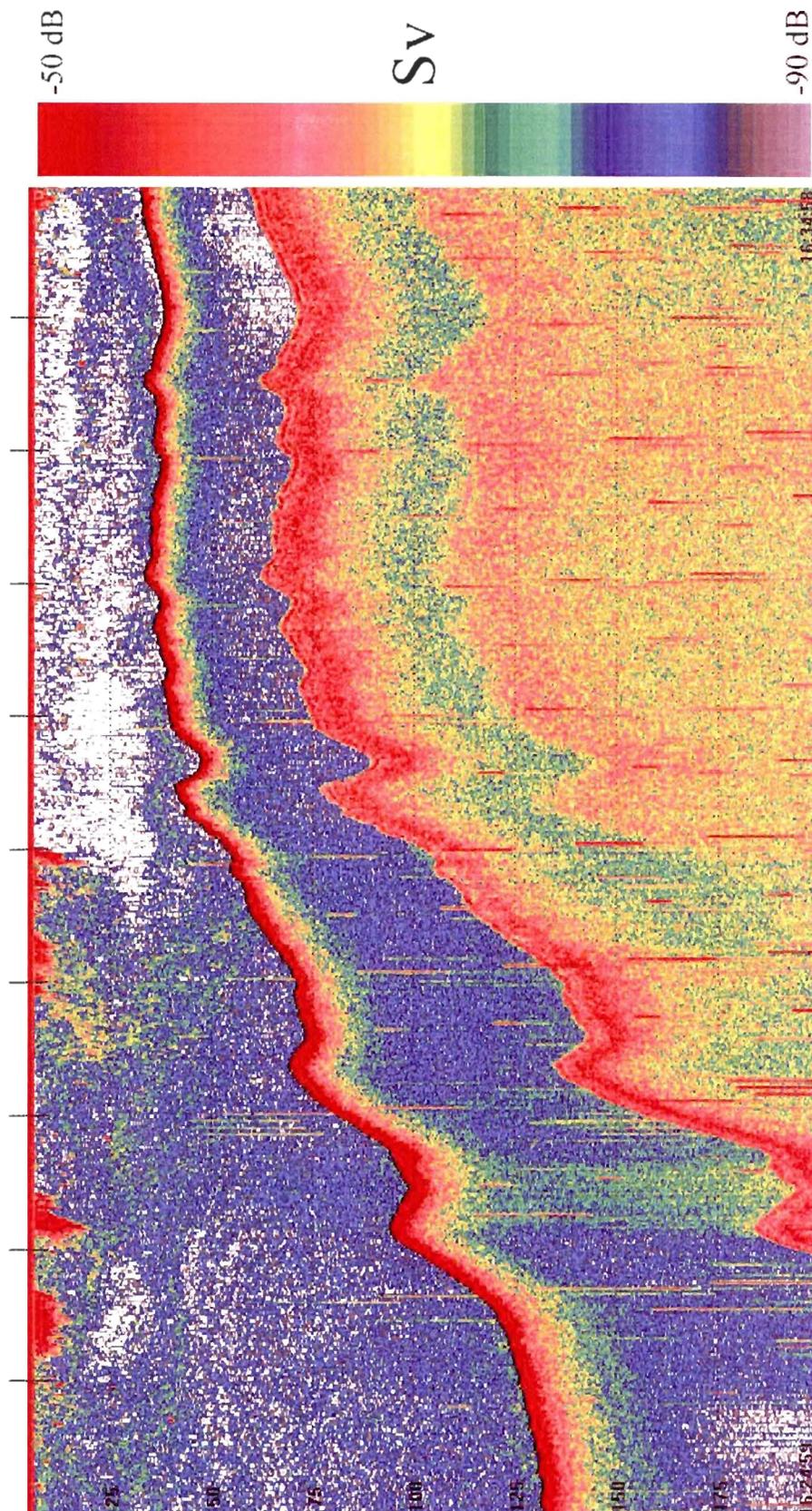
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 12h15 – 12h24



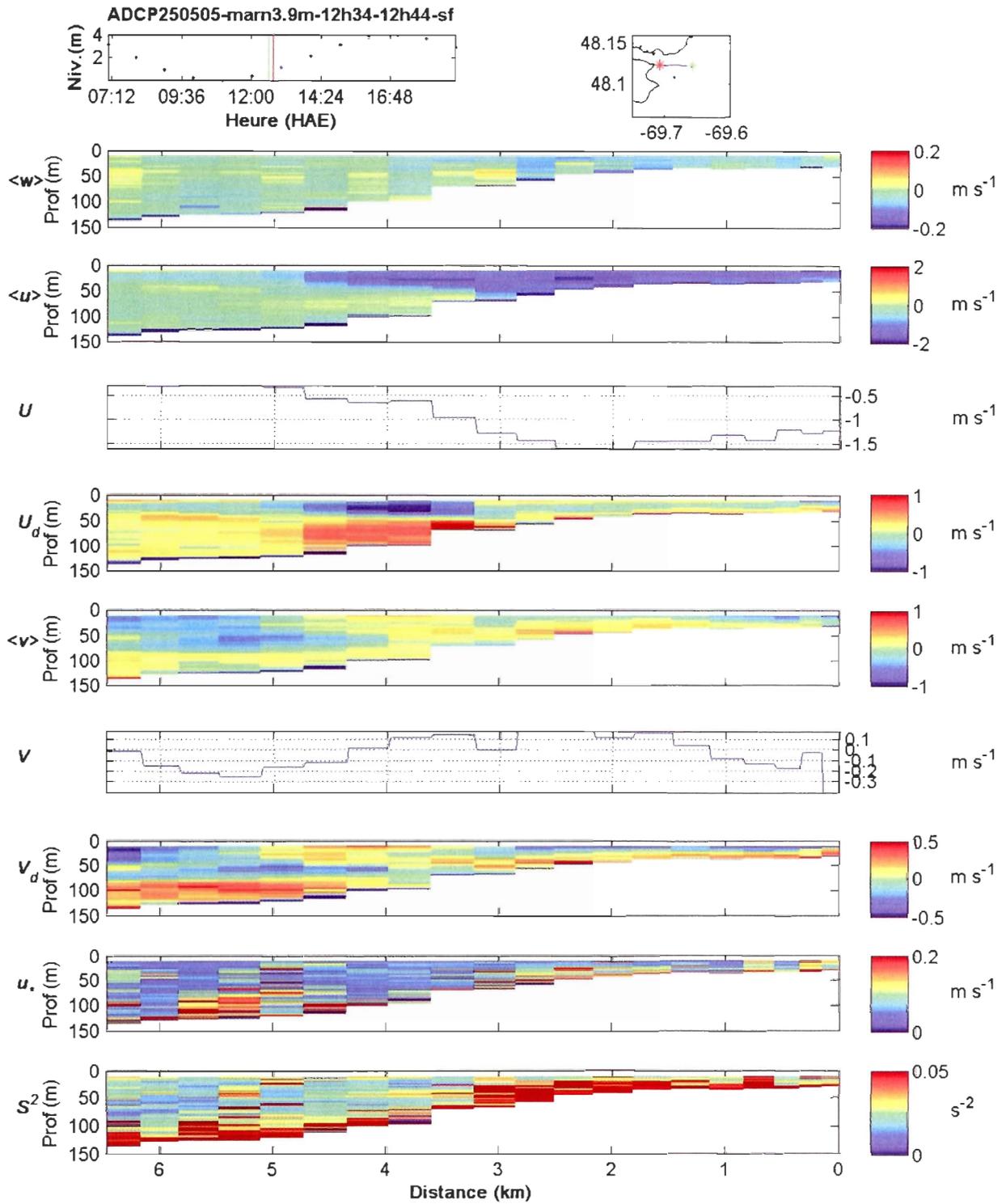
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 12h24 – 12h34



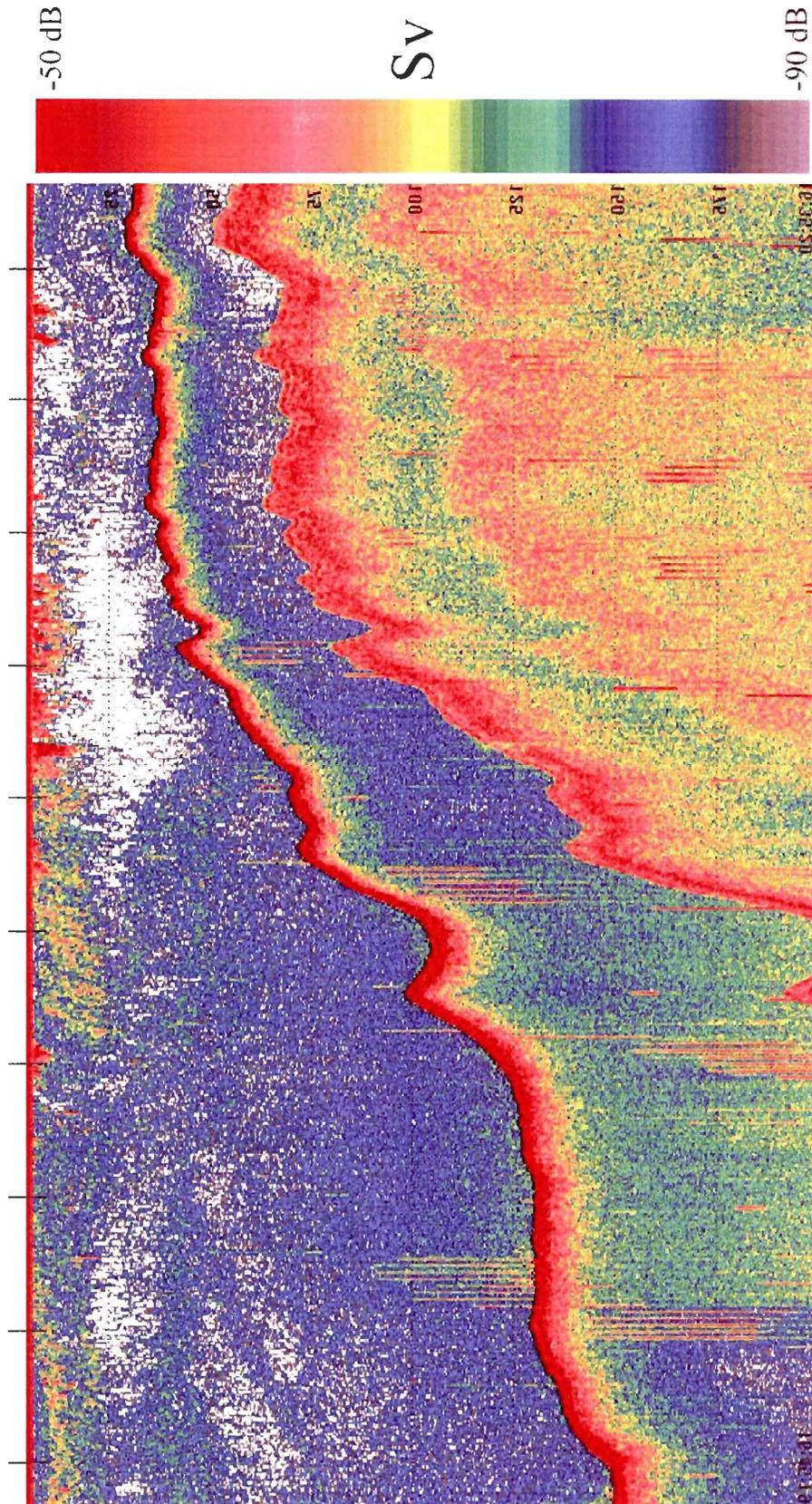
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 12h24 – 12h34



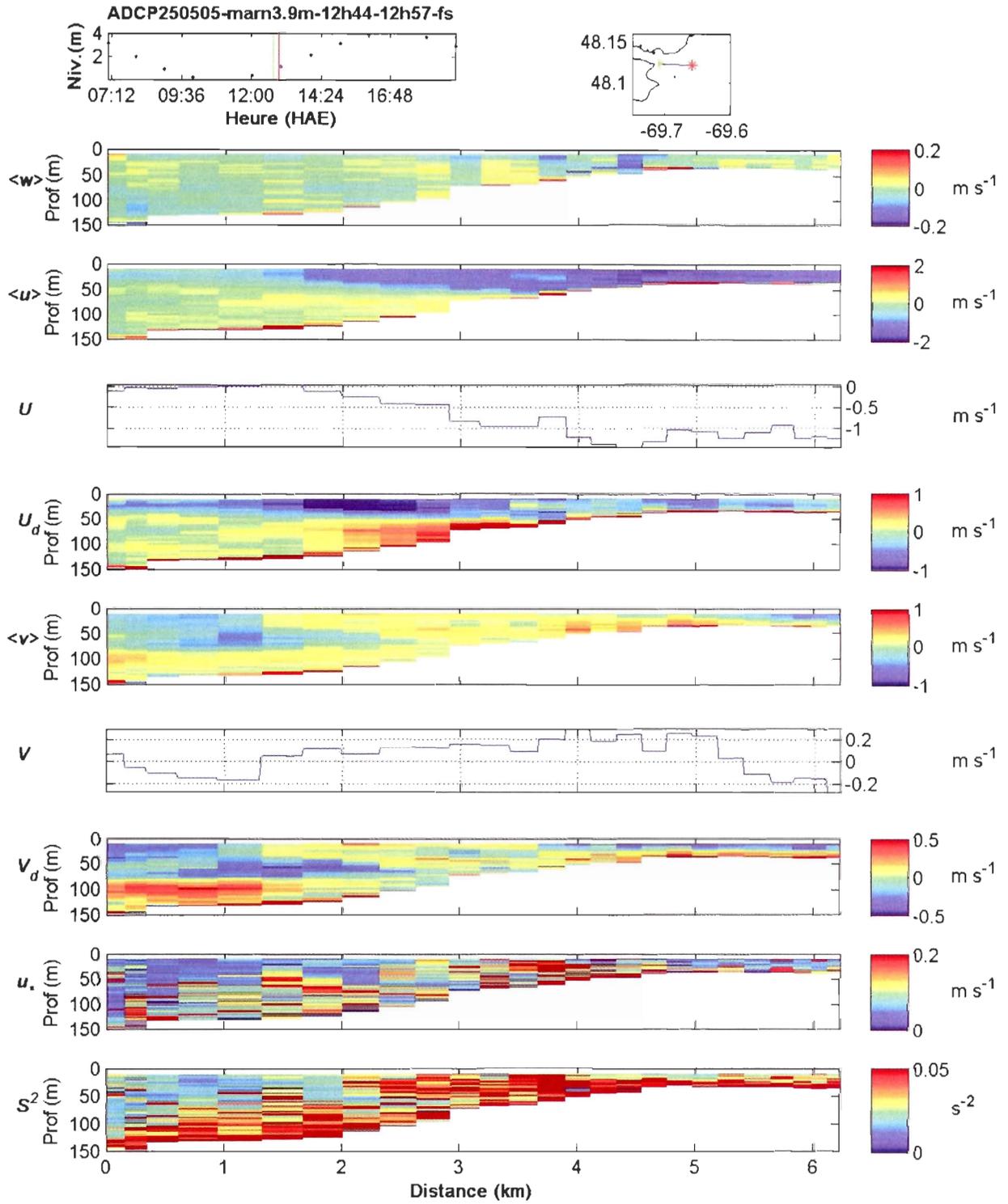
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 12h34 – 12h44



Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 12h34 – 12h44

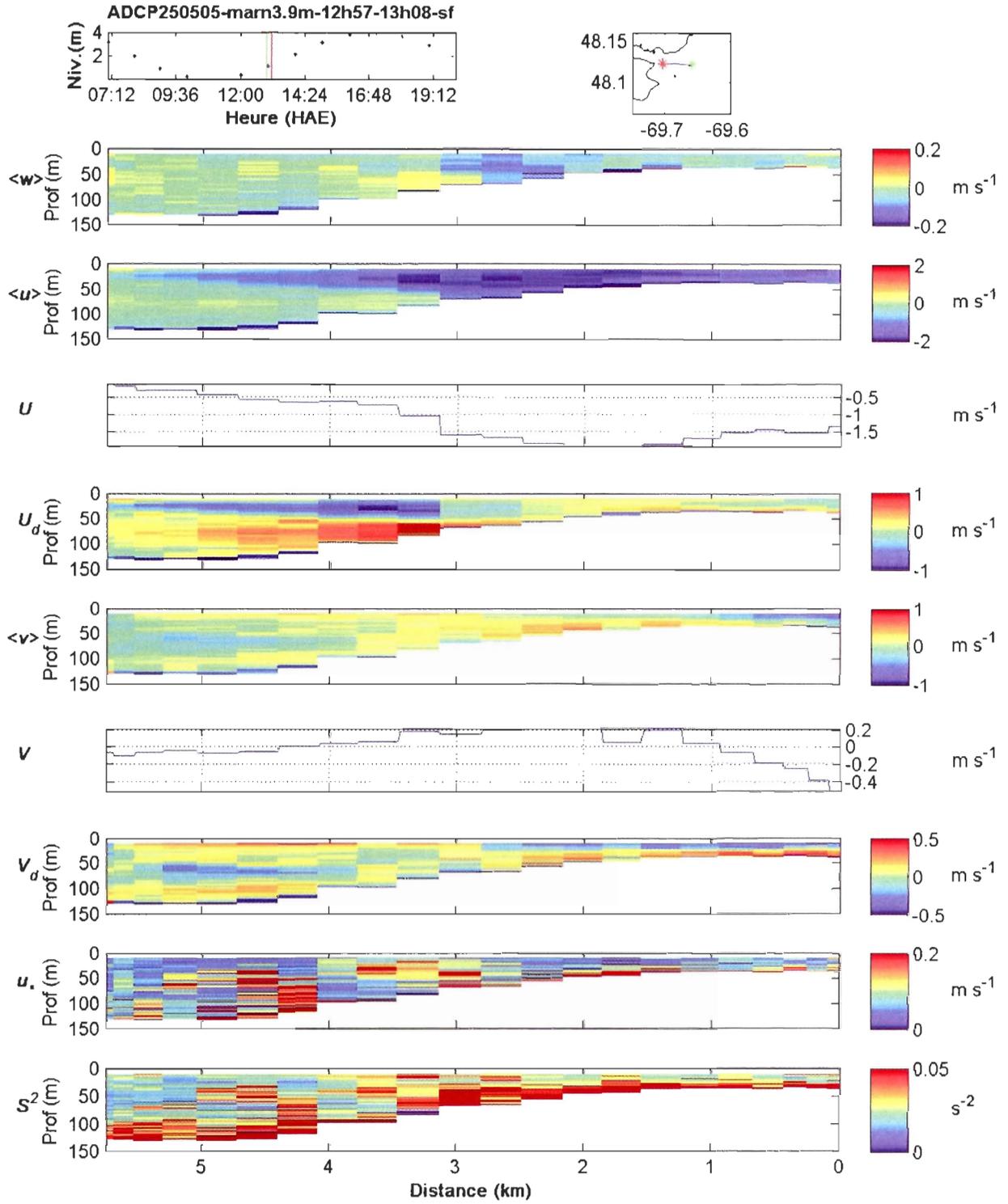


Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 12h44 – 12h57

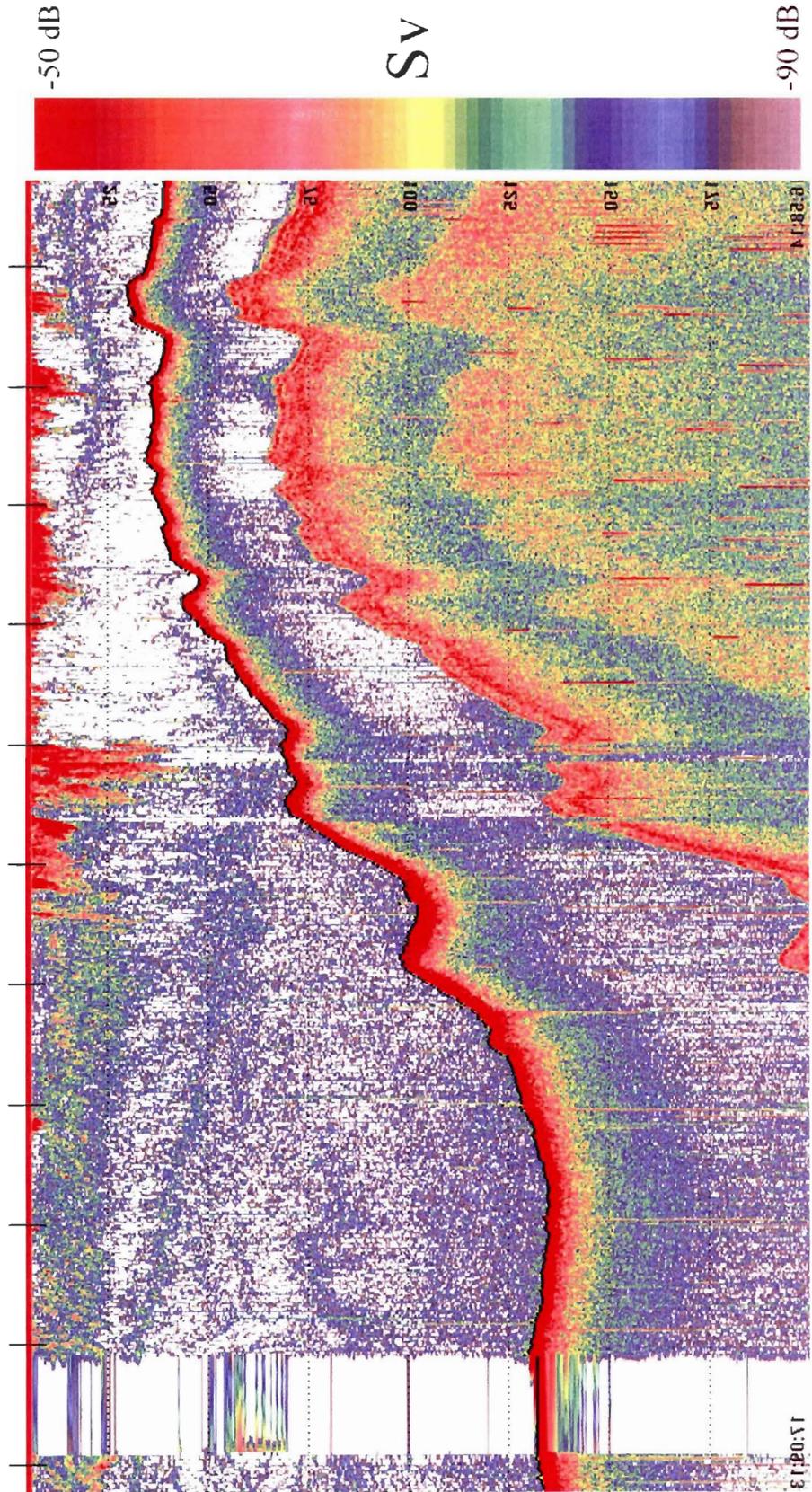




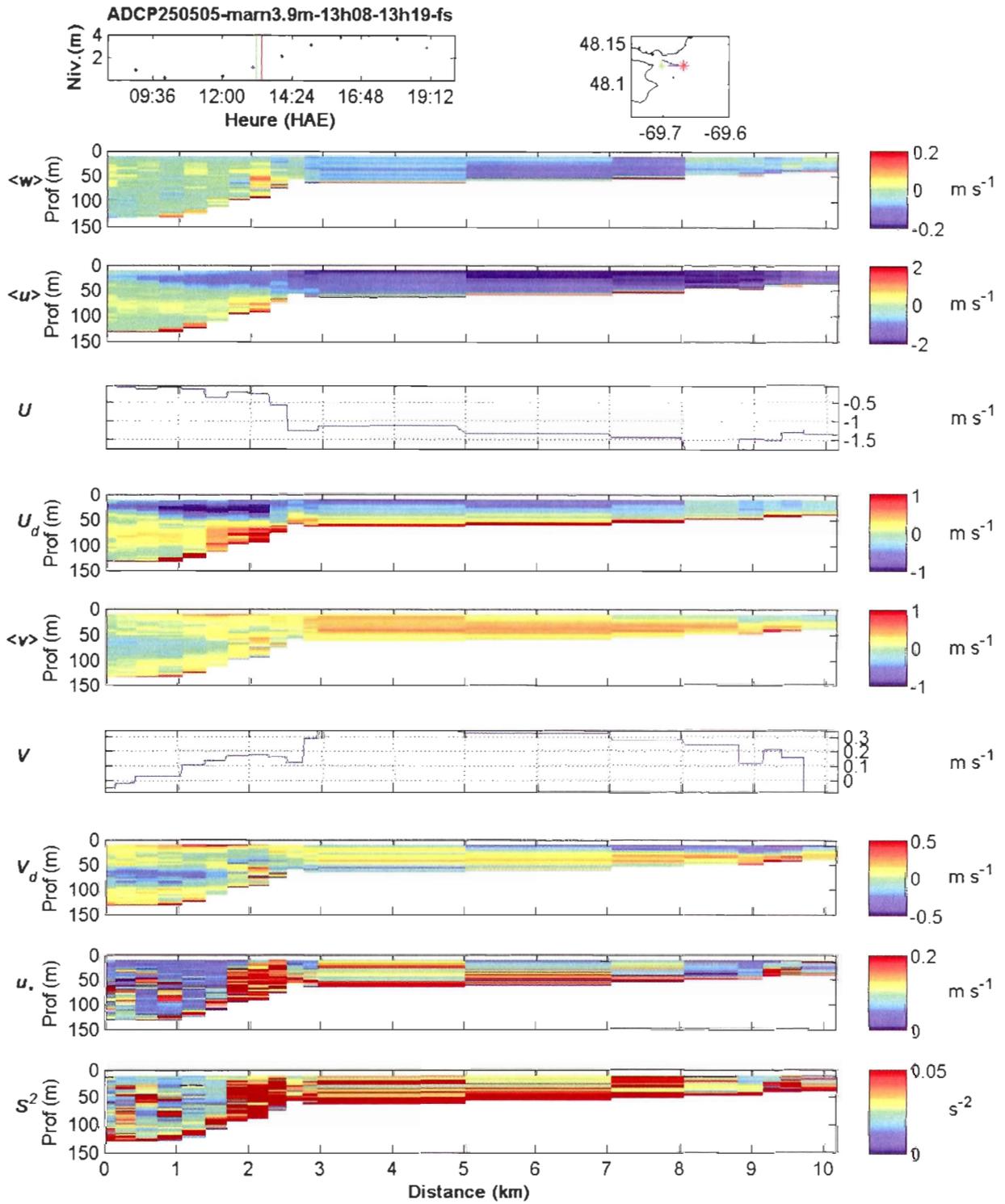
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 12h57 – 13h08



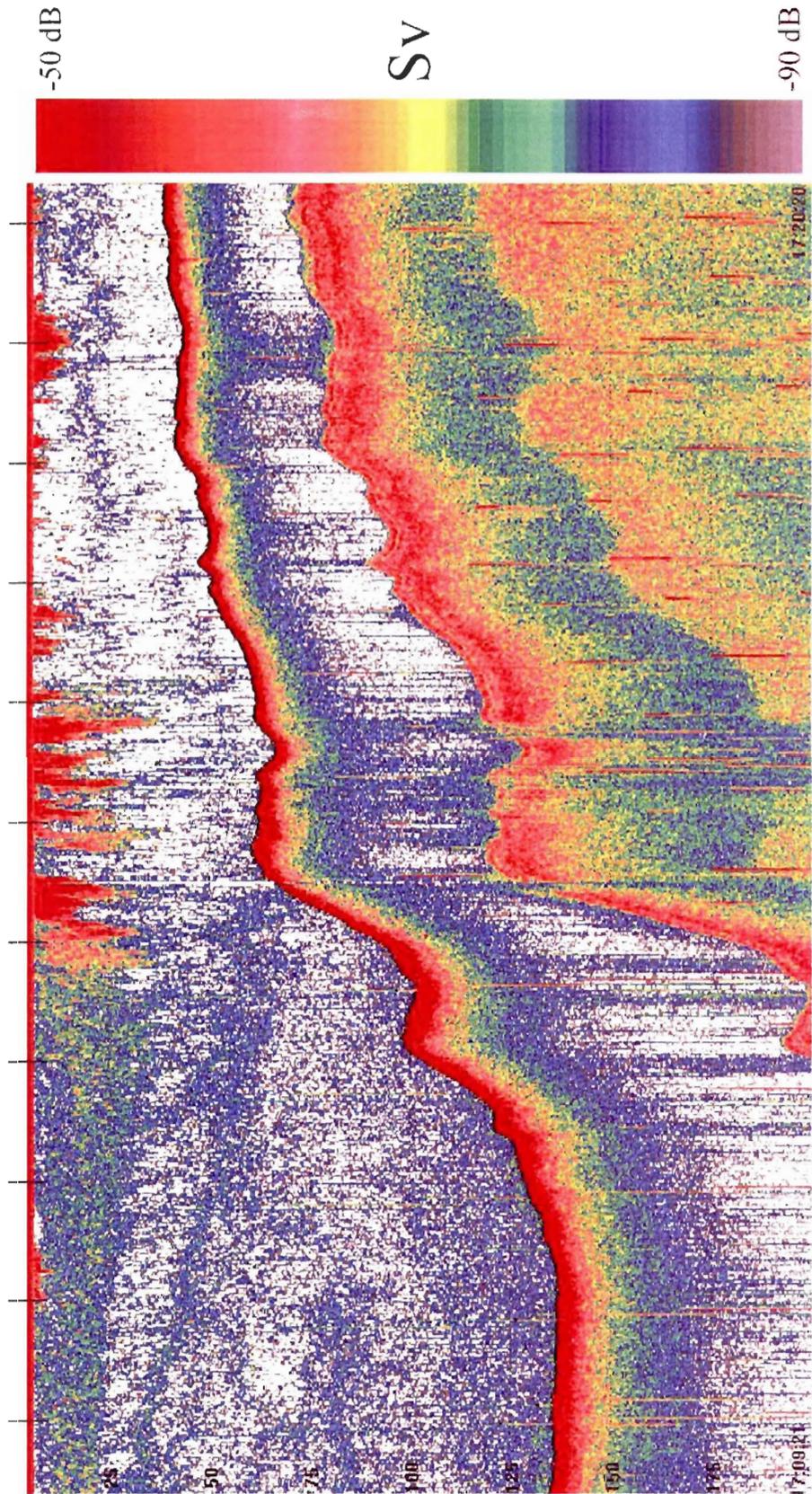
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 12h57 – 13h08



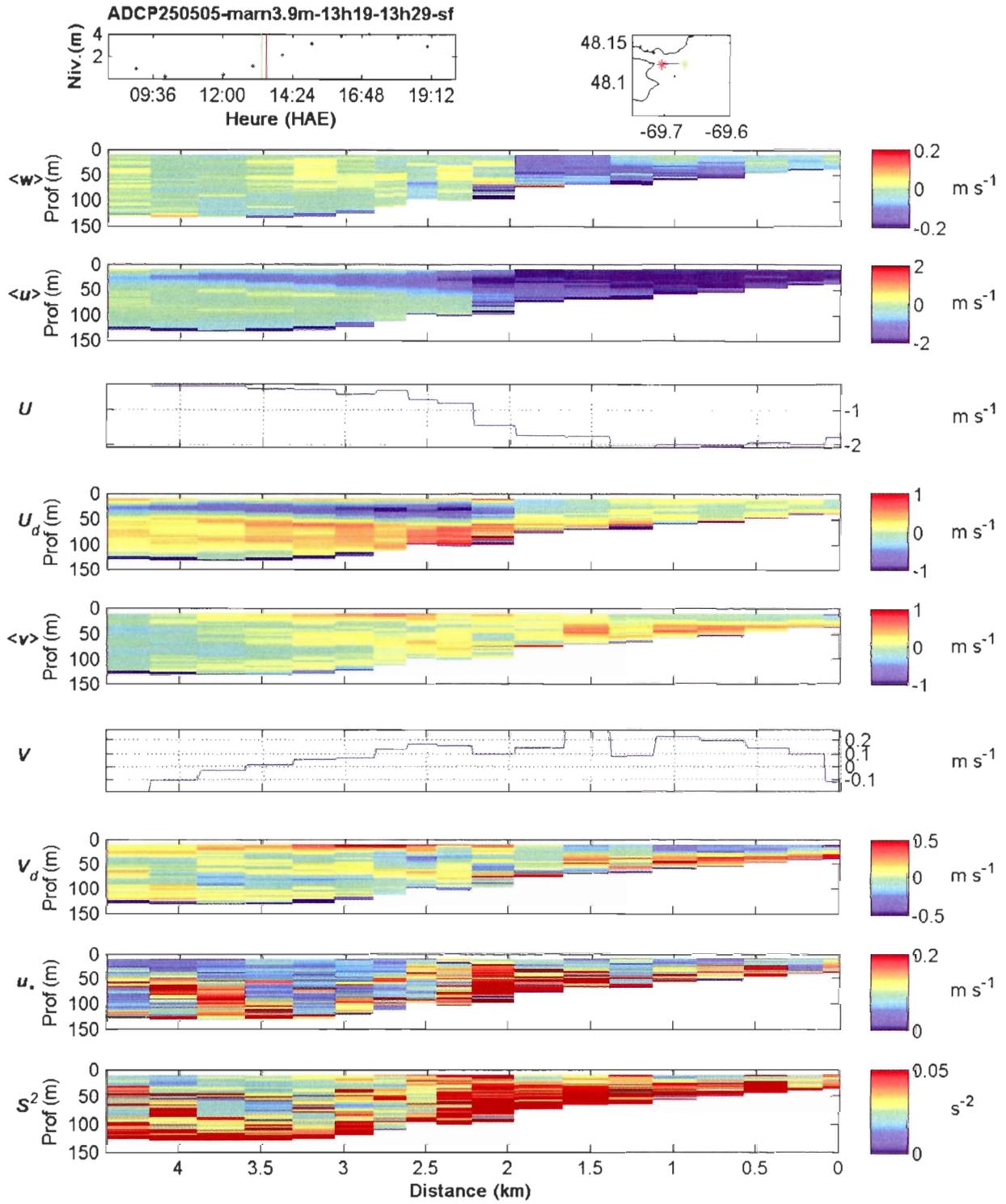
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 13h08 – 13h19



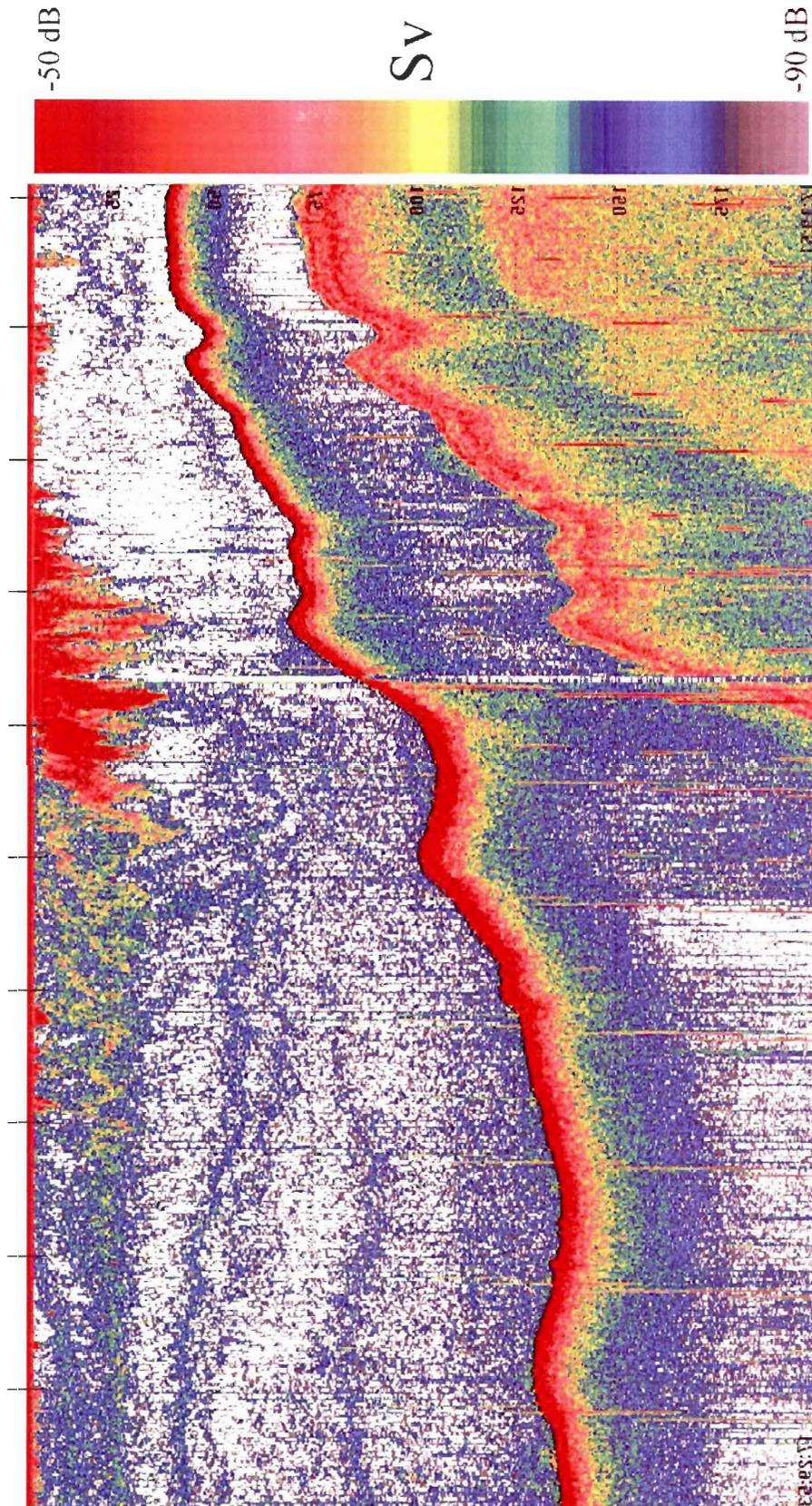
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 13h08 – 13h19



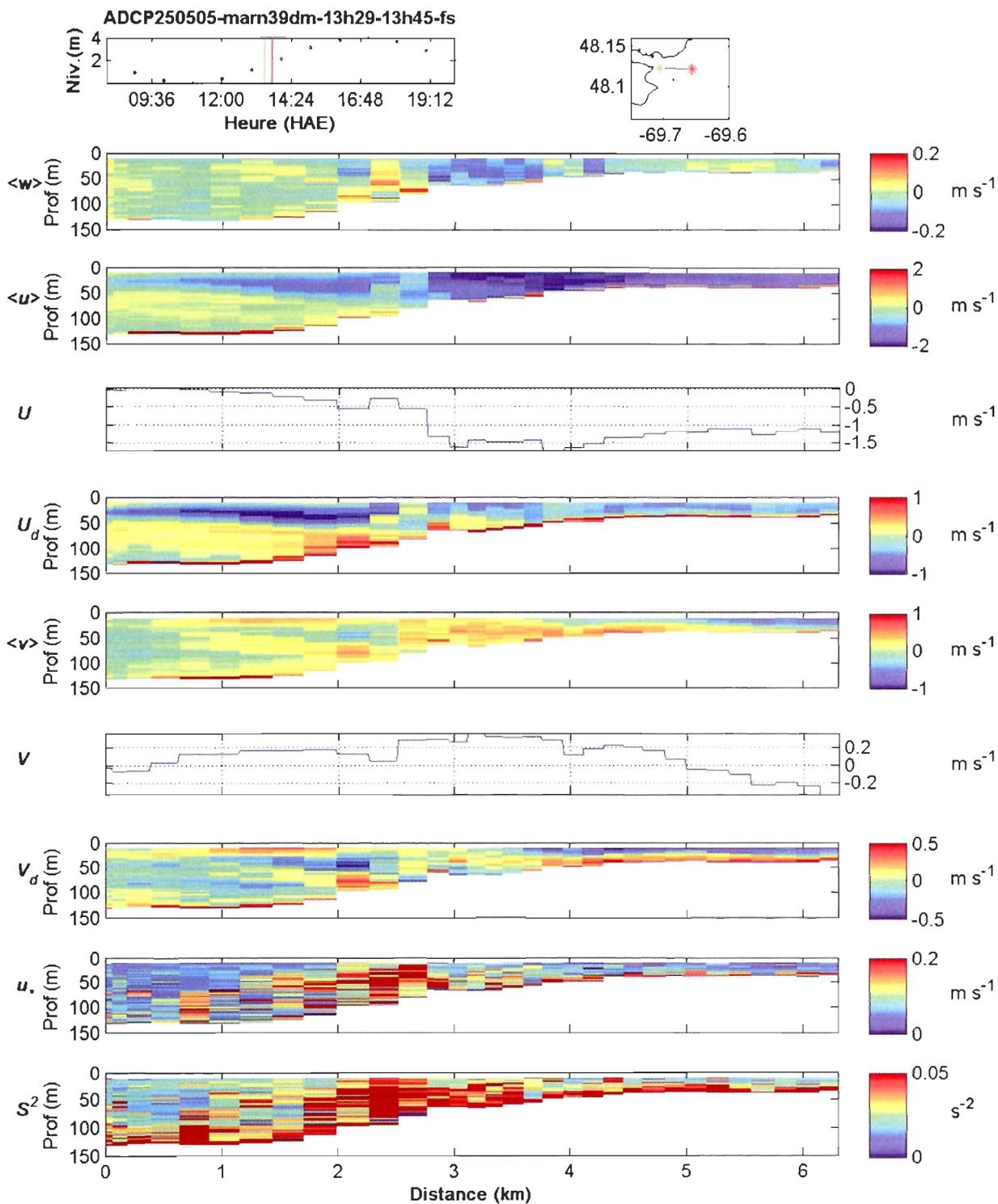
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 13h19 – 13h29



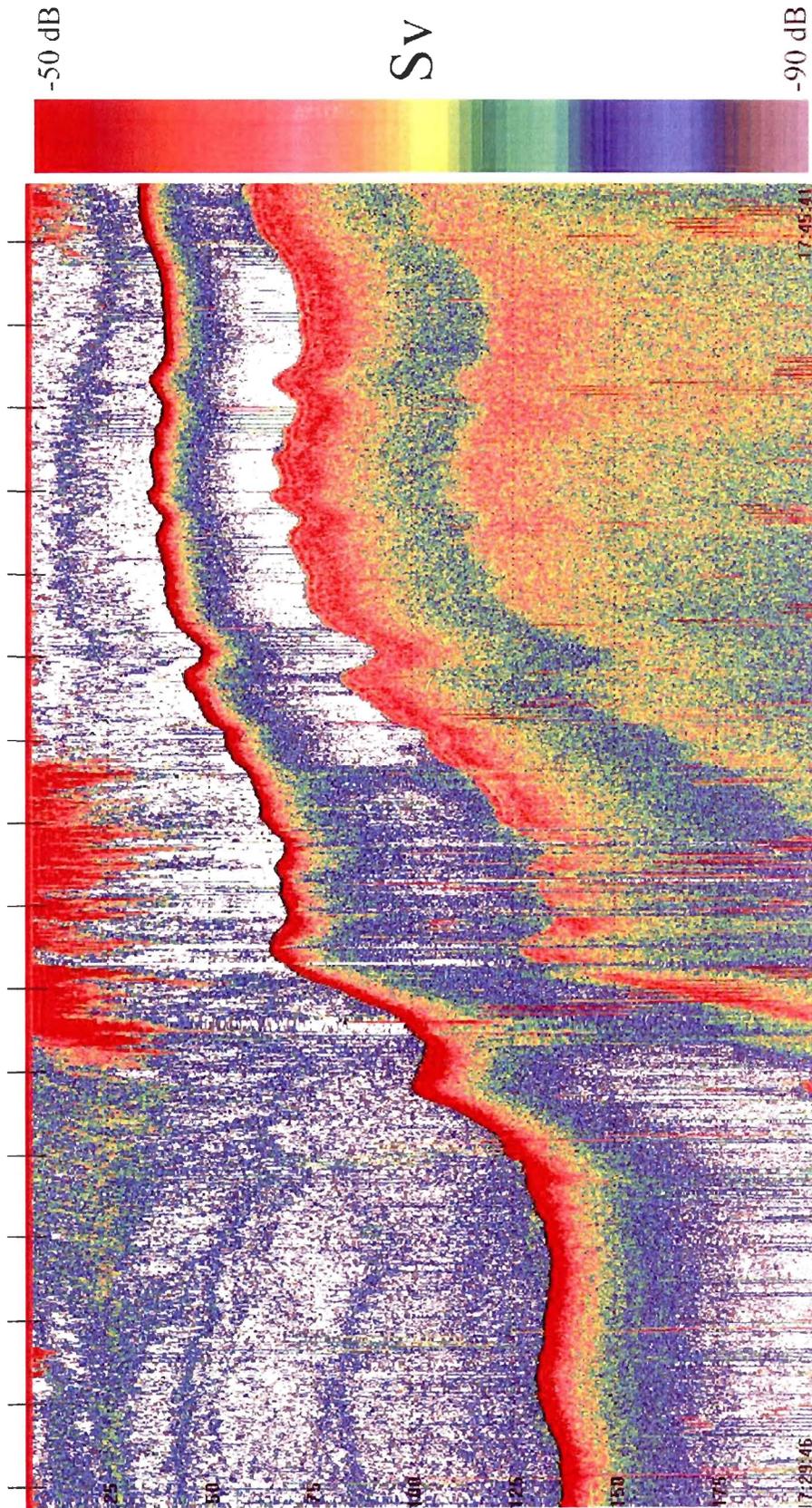
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 13h19 – 13h29



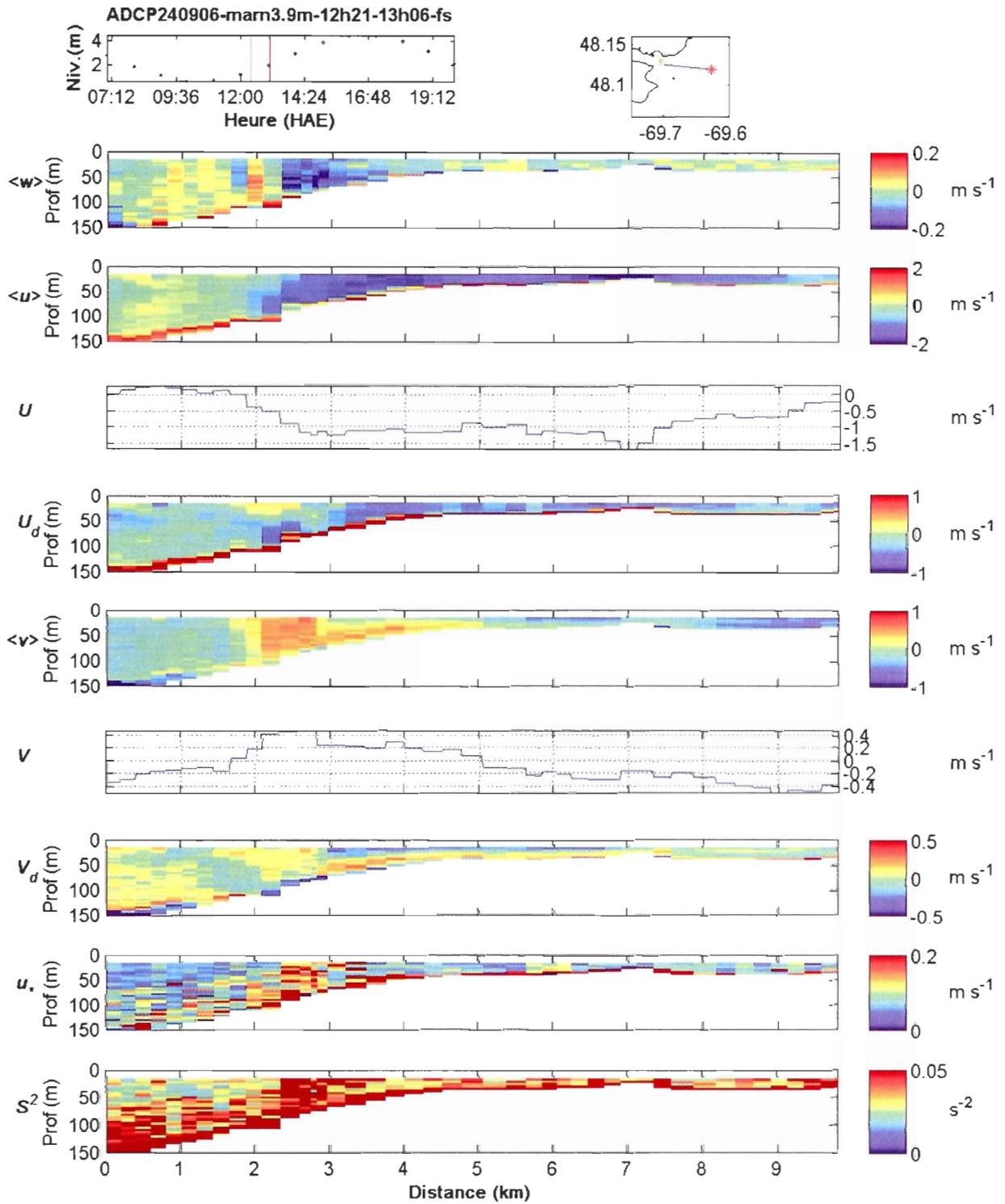
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
 ADCP 13h29 – 13h45



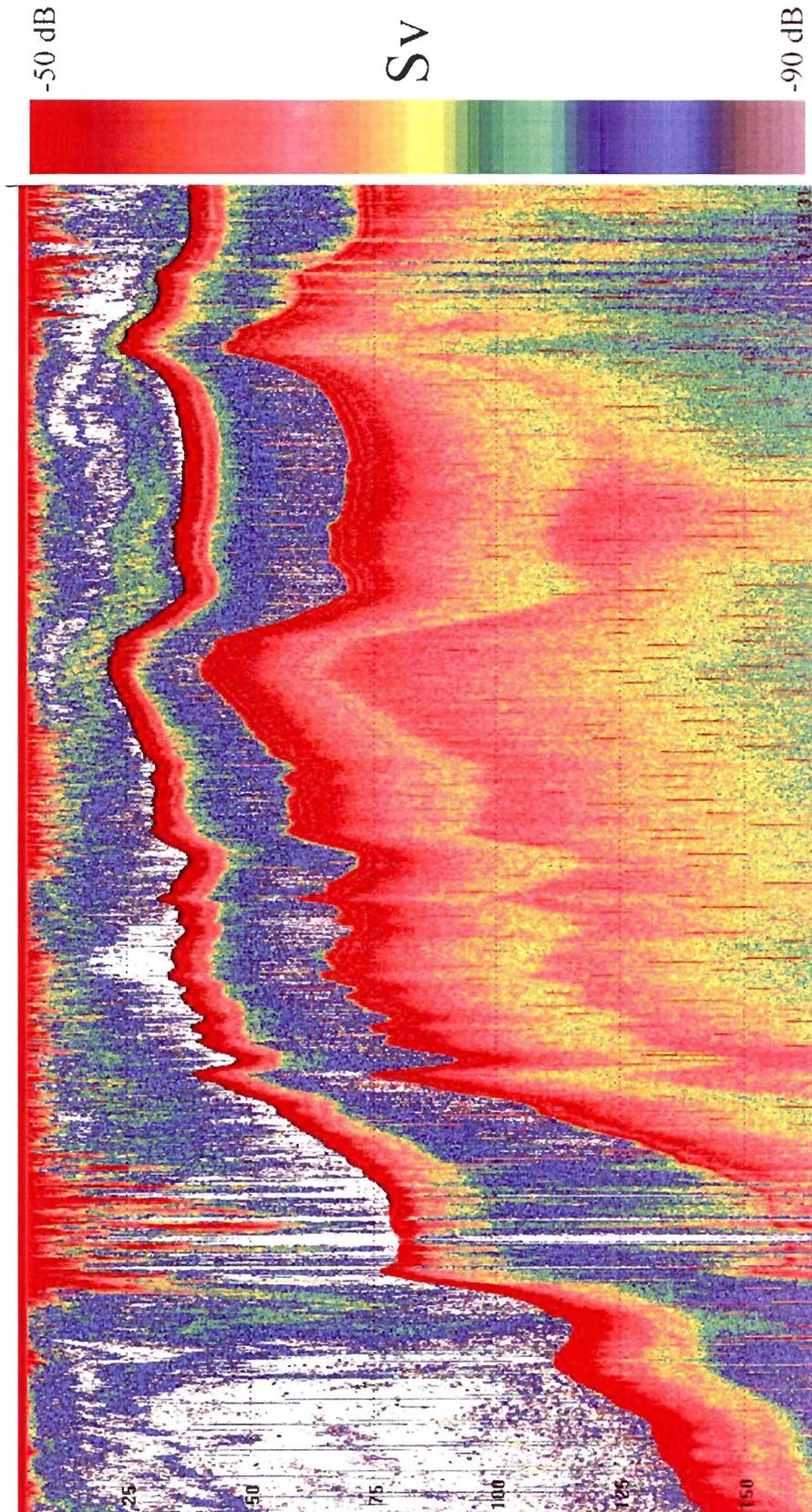
Annexe 4e (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 25 mai 2005.  
Échosondeur 13h29 – 13h45



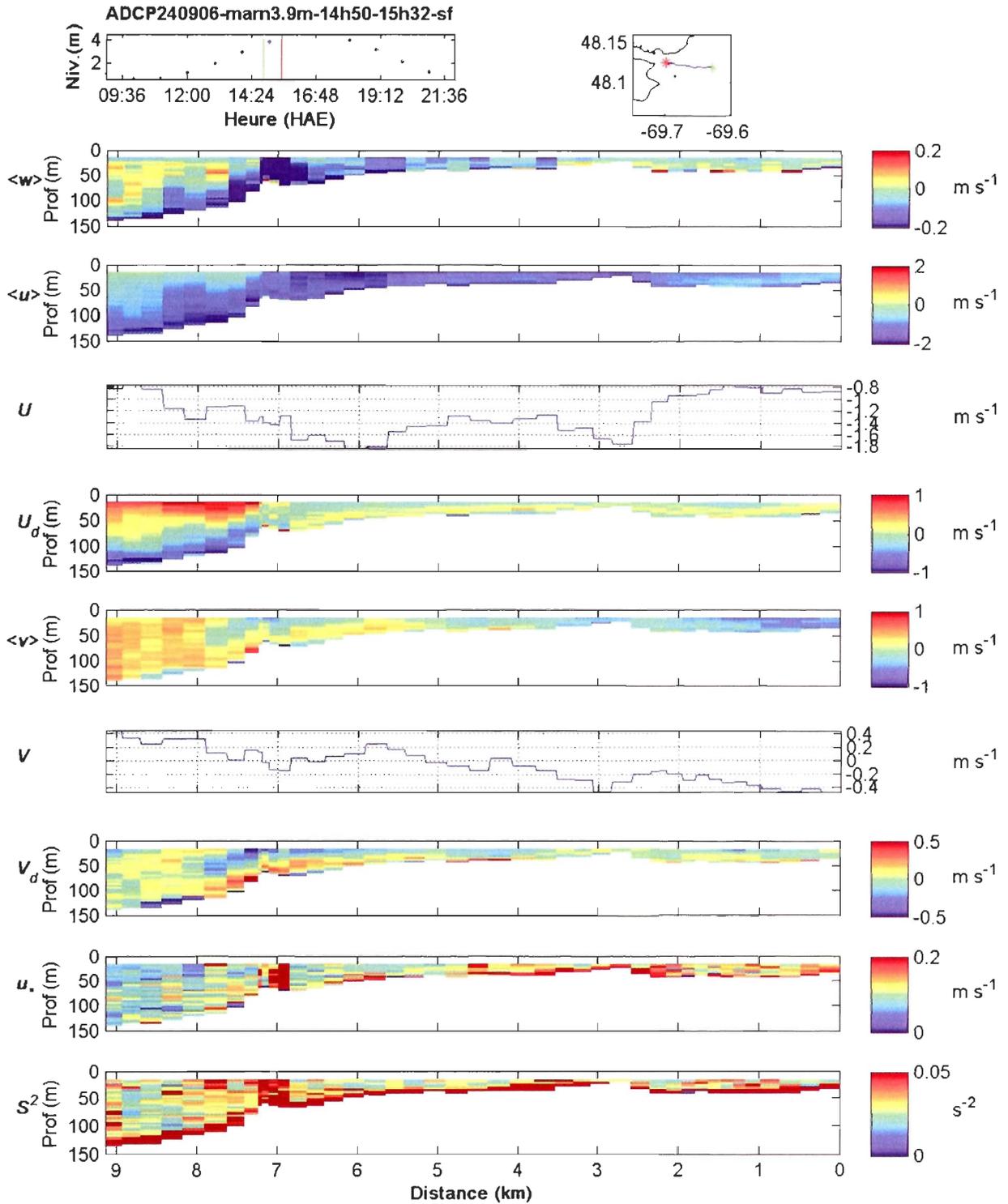
Annexe 4f – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
 ADCP 12h21 – 13h06



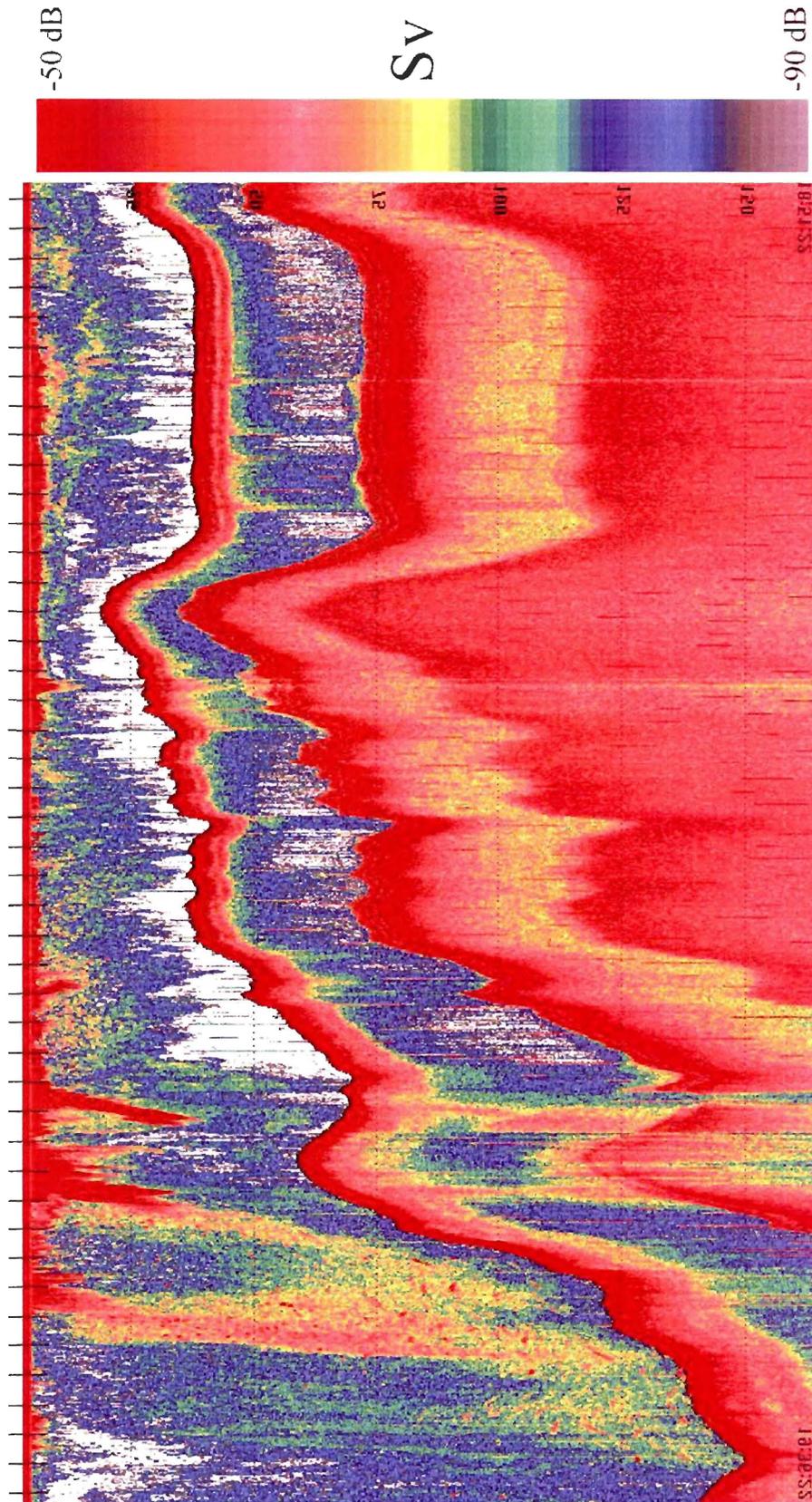
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
Échosondeur 12h21 – 13h06



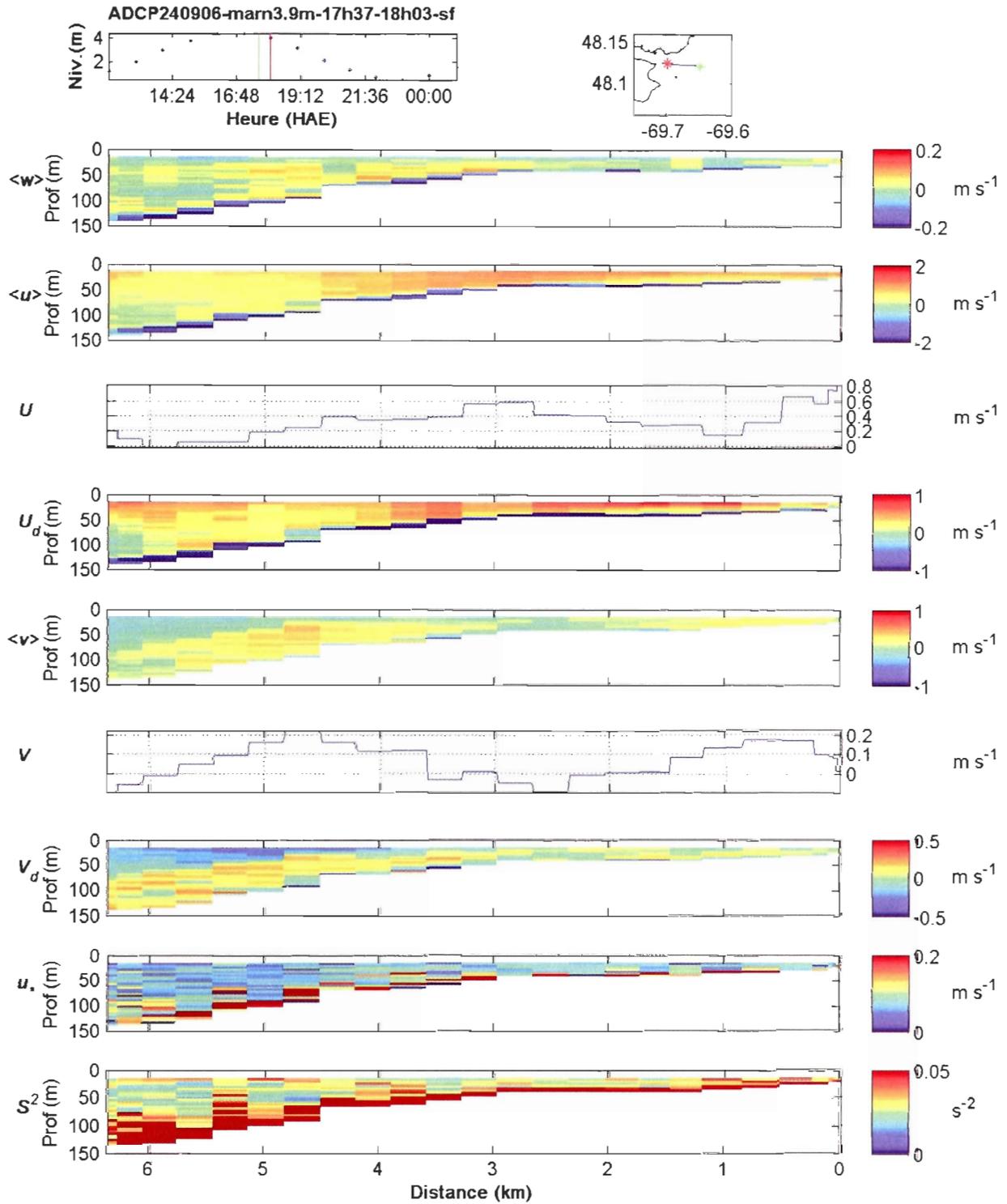
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
 ADCP 14h50 – 15h32



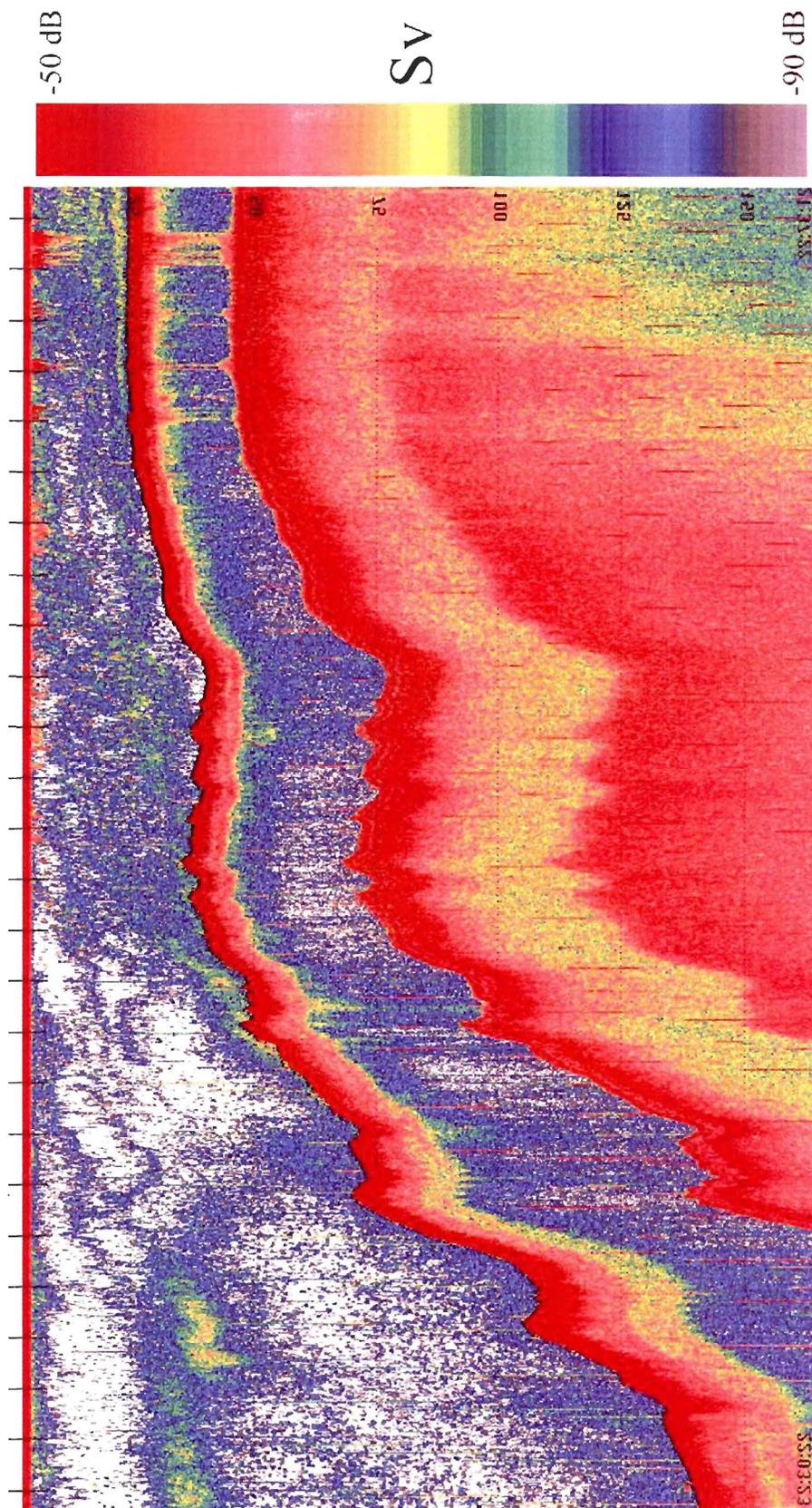
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
Échosondeur 14h50 – 15h32



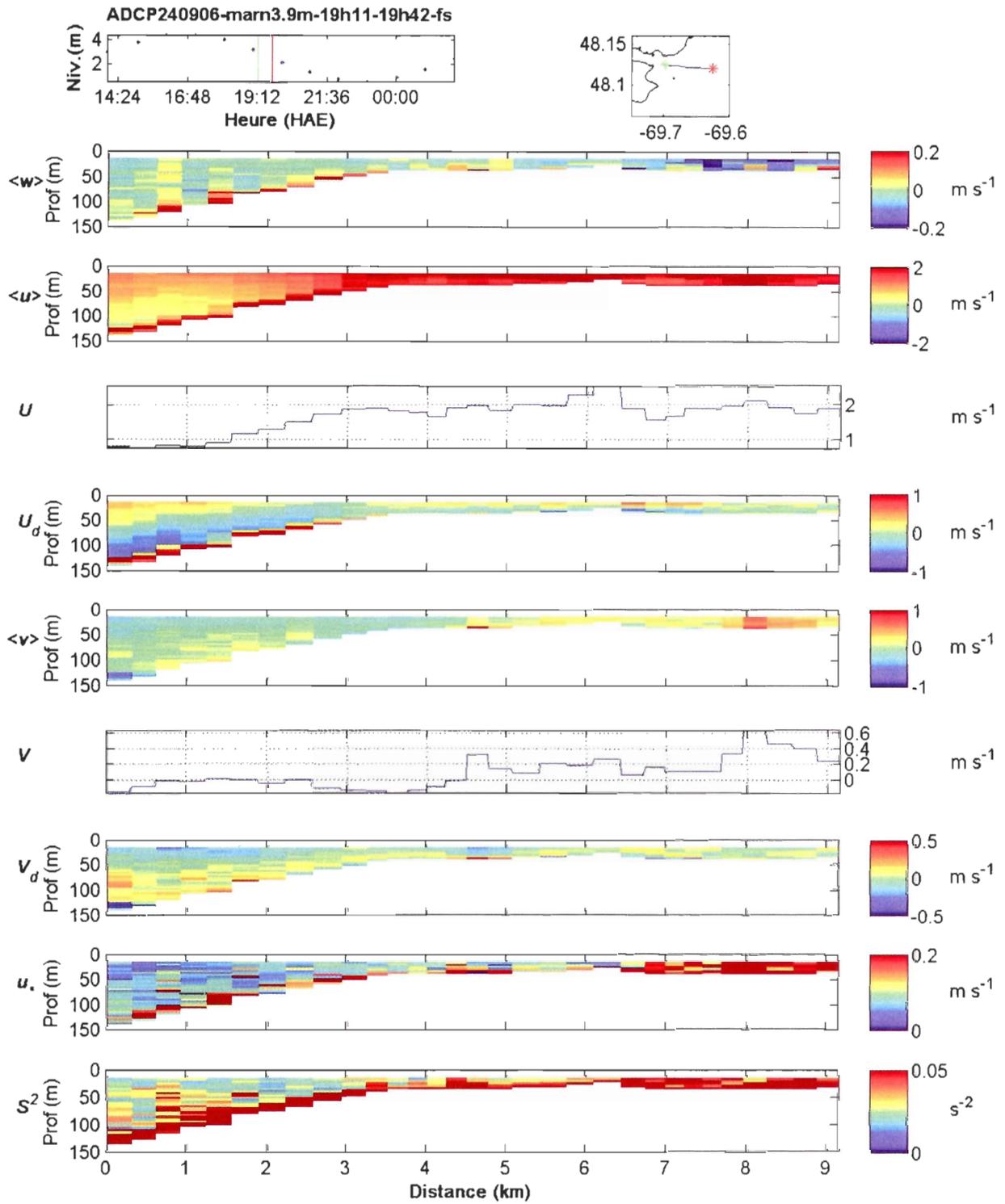
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
 ADCP 17h37 – 18h03



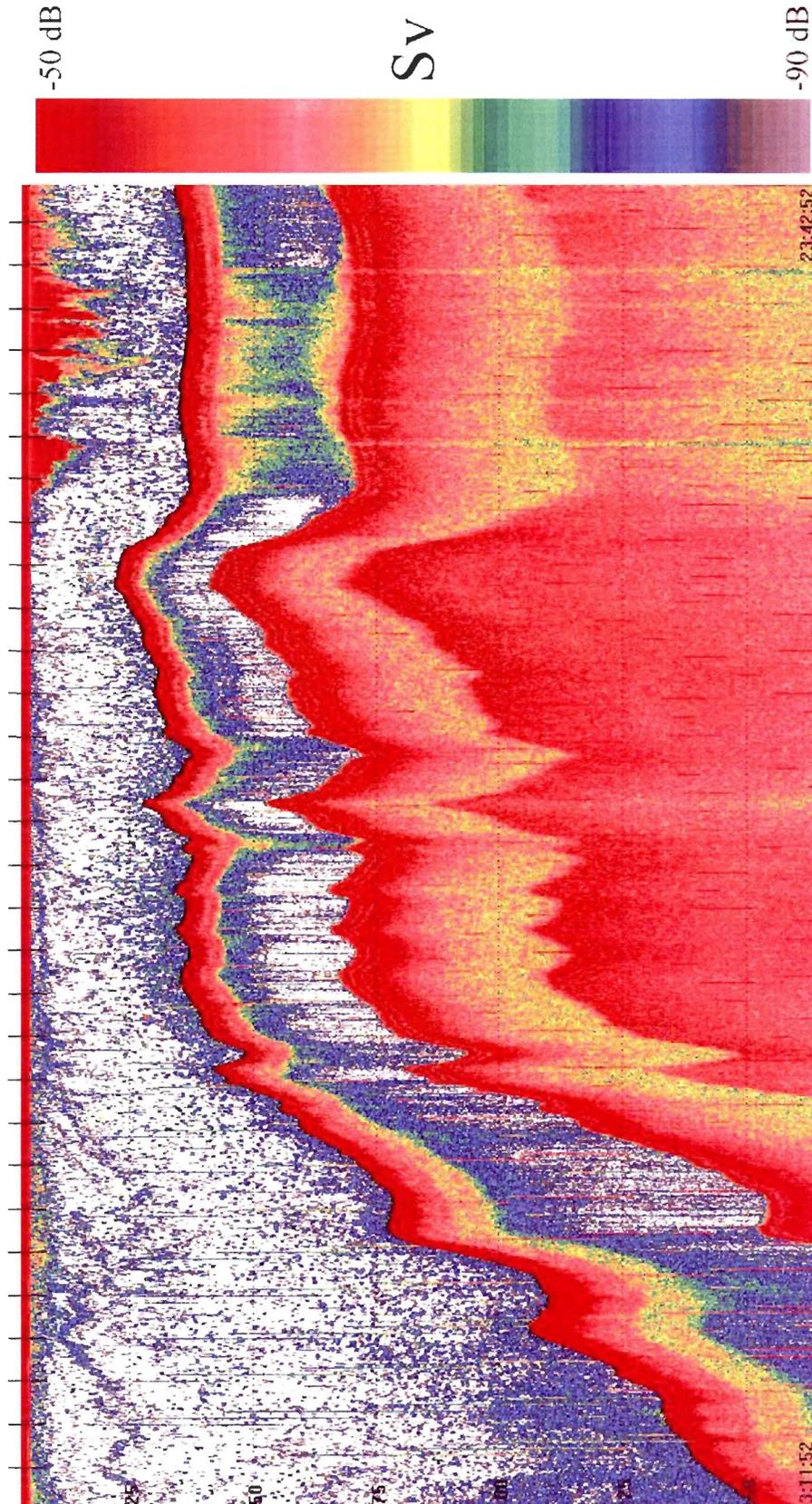
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
Échosondeur 17h37 – 18h03



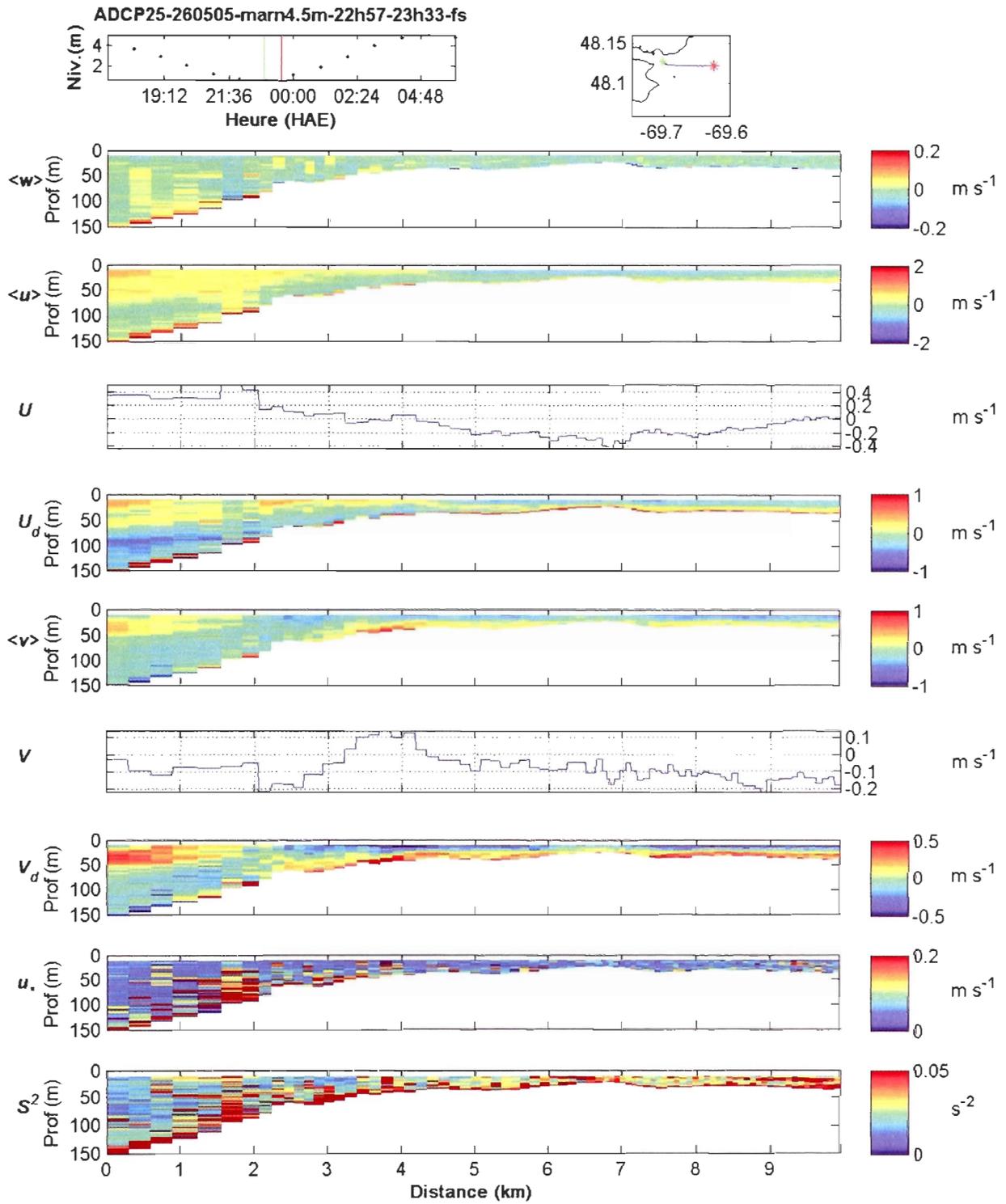
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2005.  
 ADCP 19h11 – 19h42



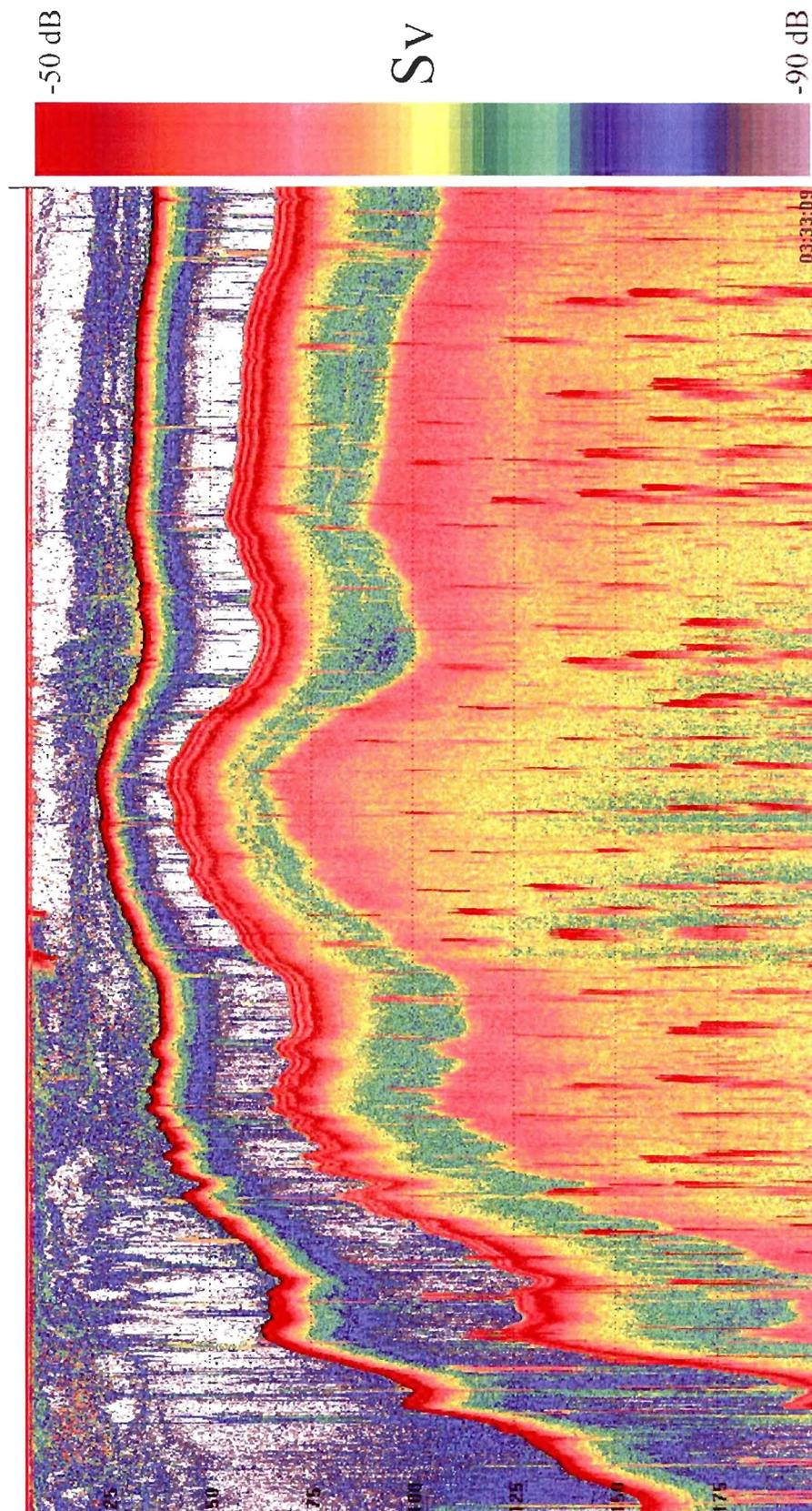
Annexe 4f (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 3,9m, le 24 septembre 2006.  
Échosondeur 19h11 – 19h42



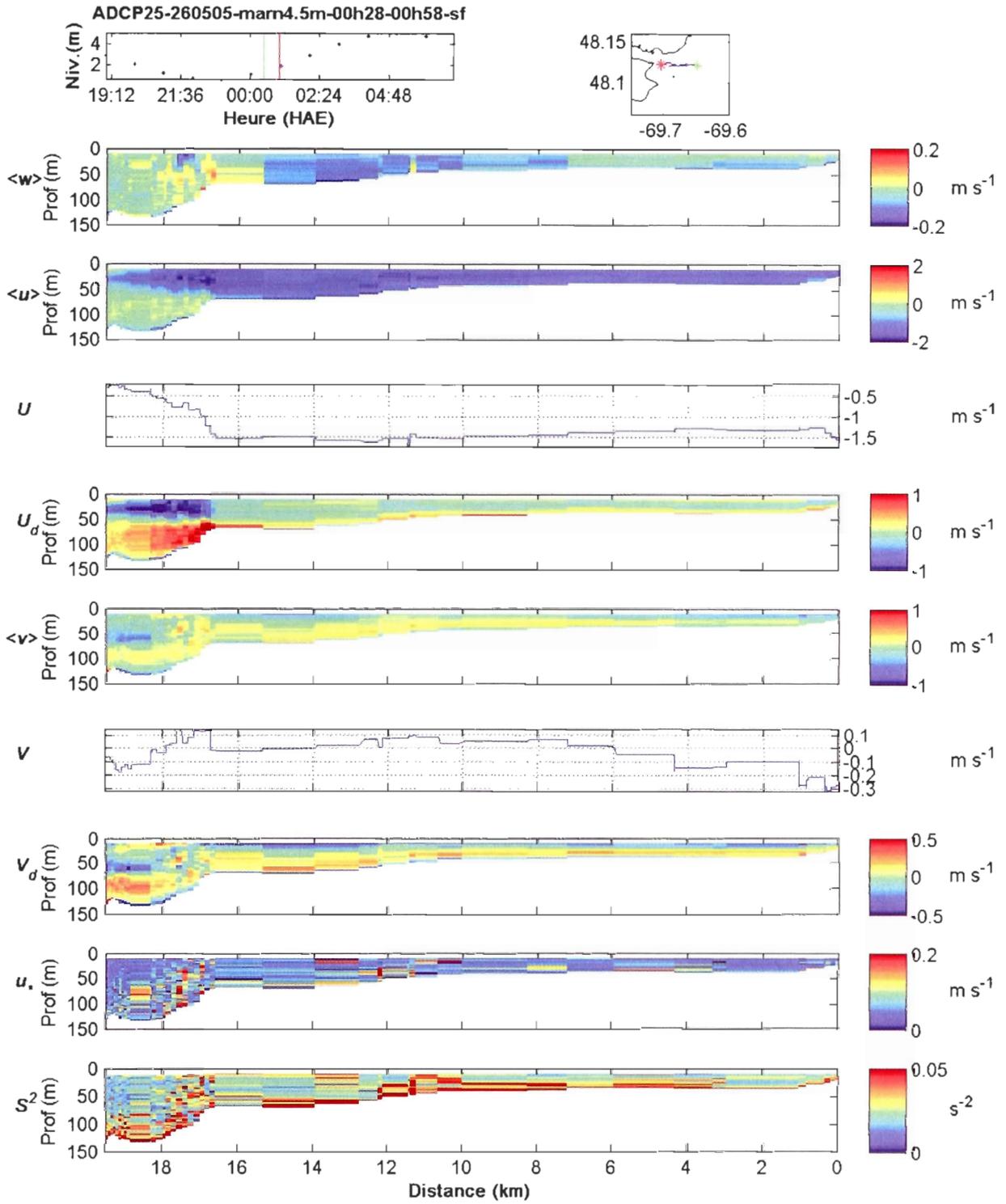
Annexe 4g – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
 ADCP 22h57 – 23h33



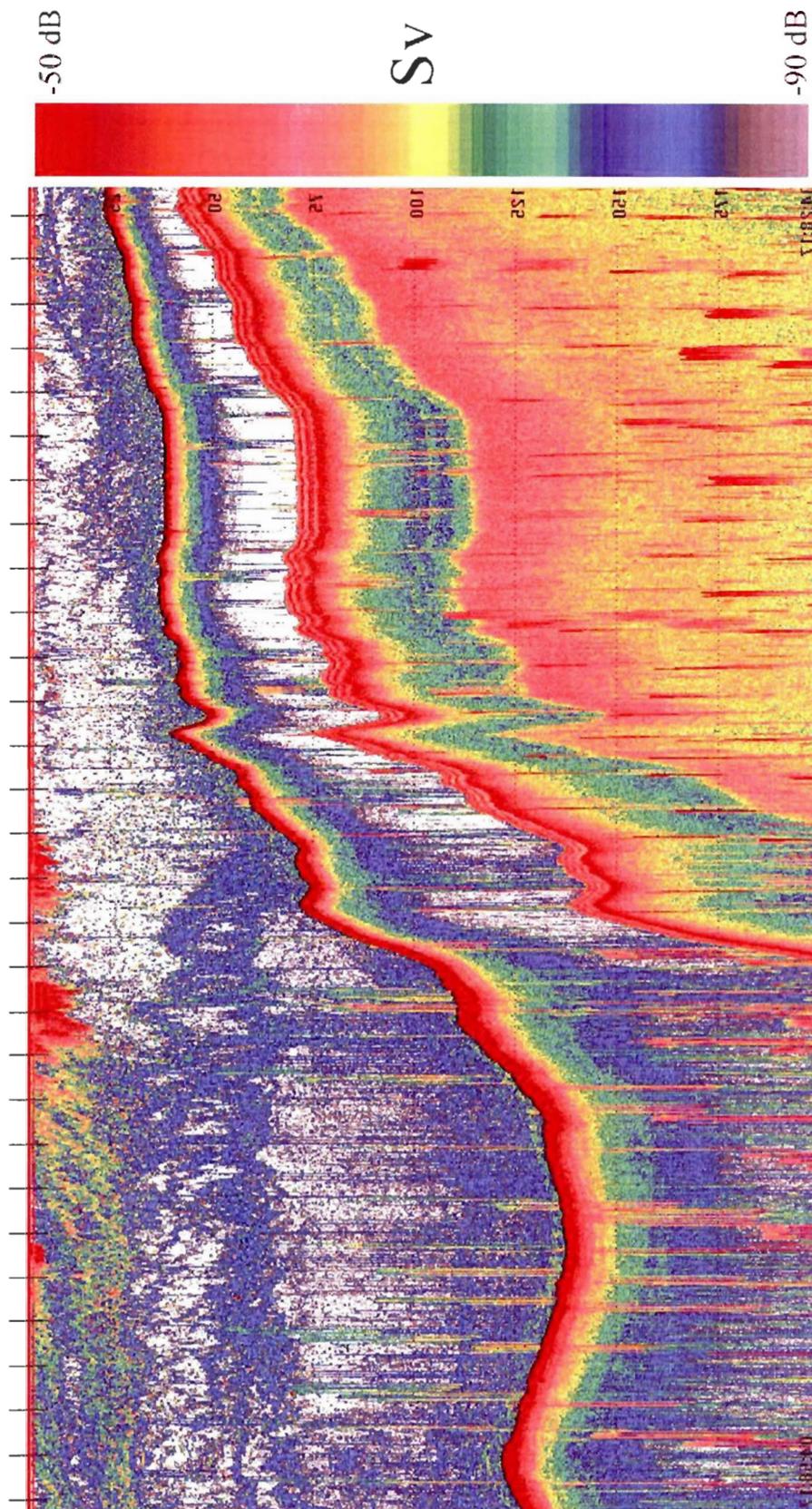
Annexe 4g (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
Échosondeur 22h57 – 23h33



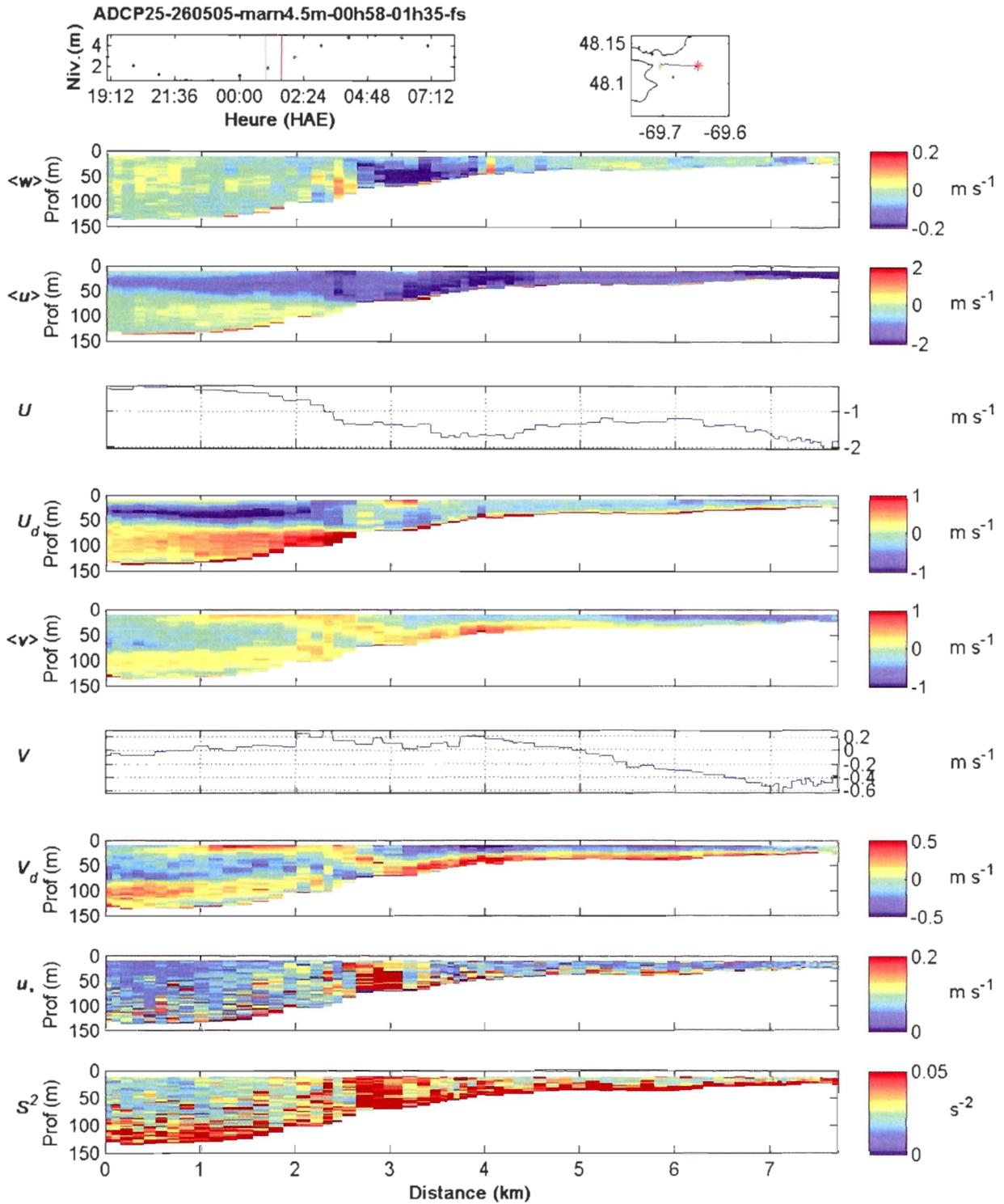
Annexe 4g (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
 ADCP 00h28 – 00h58



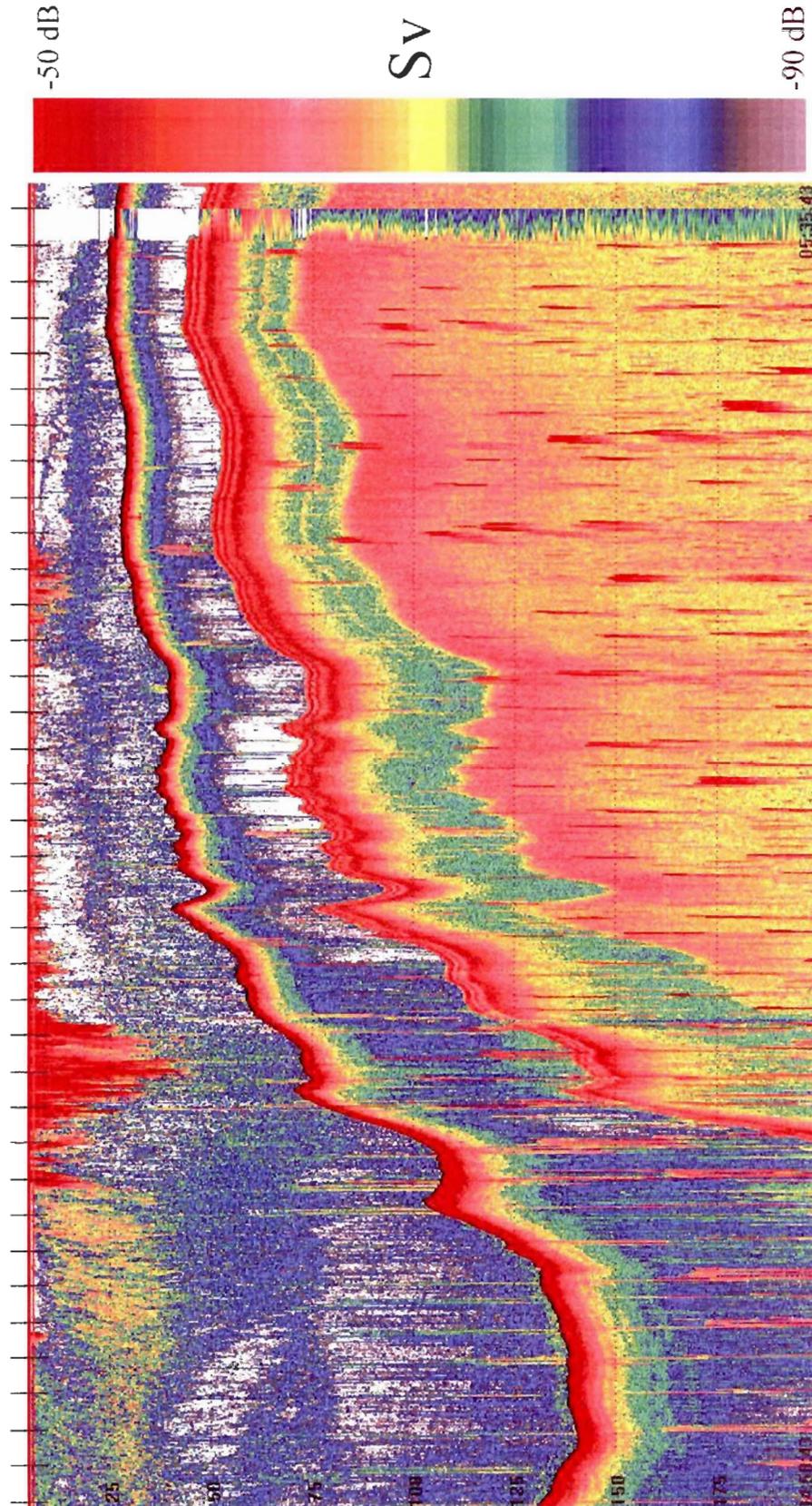
Annexe 4g (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
Échosondeur 00h28 – 00h58



Annexe 4g (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
 ADCP 00h58 – 01h35



Annexe 4g (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
Échosondeur 00h58 – 01h35



Annexe 4g (suite) – ADCP et échosondeur, marnage 4,5m, les 25 et 26 mai 2005.  
 ADCP 02h31 – 03h21

