

ARDA

ASSOCIATION DE RECHERCHE ET DE DEVELOPPEMENT
POUR L'AQUACULTURE

97500 ST PIERRE ET MIQUELON

RAPPORT D'ÉTUDE

MODELISATION COURANTOLOGIQUE DANS L'ARCHIPEL DE SAINT PIERRE ET MIQUELON

Septembre 2006



SEAMER

36 Quai de la Douane - F 29200 BREST

TABLE DES MATIERES

1	<u>DONNEES GENERALES</u>	1
1.1	CADRE GEOGRAPHIQUE	1
1.2	COURANTOLOGIE	2
1.3	METEOROLOGIE	4
1.4	HYDROLOGIE	4
1.5	LA MAREE	6
2	<u>MATERIELS ET METHODES : LES MODELES HYDRODYNAMIQUES</u>	8
2.1	GENERALITES	8
2.2	TYPE DE MODELE ET LOGICIEL	9
2.3	EMPRISES ET MAILLAGES	10
2.4	DONNEES BATHYMETRIQUES	12
2.4.1	CONDITIONS AUX LIMITES	12
2.4.2	CONDITIONS METEOROLOGIQUES	13
3	<u>RESULTATS DES SIMULATIONS</u>	14
3.1	MAREE DE GRANDE VIVE EAU	14
3.1.1	COURANTS DE MAREE	14
3.1.2	VITESSE MAXIMUM DU COURANT DE MAREE	22
3.1.3	COURANTS RESIDUELS	24
3.1.4	INDICE DE STRATIFICATION	27
3.2	EFFETS DU VENT	30
3.2.1	GENERALITES ET CARACTERISTIQUES DES SIMULATIONS	30
3.2.2	COURANT MAXIMUM	31
3.2.3	COURANT RESIDUEL	36
4	<u>CONCLUSION</u>	41
5	<u>ANNEXES</u>	44
5.1	LES COURANTS DE MAREE EN VIVE EAU	45
5.2	LES COURANTS DE MAREE EN VIVE EAU : AU NORD DE MIQUELON	57
5.3	ÉQUATIONS MATHÉMATIQUES	69

MODELISATION COURANTOLOGIQUE DANS L'ARCHIPEL DE SAINT PIERRE ET MIQUELON

1 Données générales

1.1 Cadre géographique

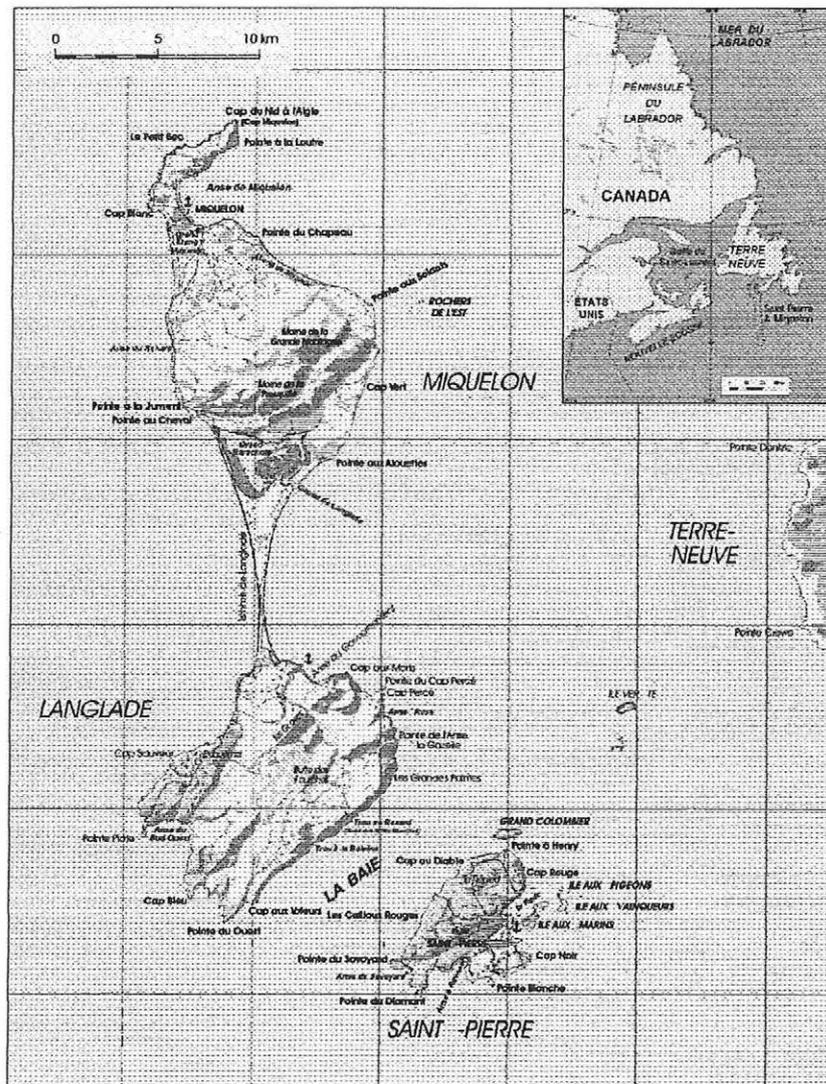


Figure 1 : L'archipel de Saint Pierre et Miquelon

L'archipel de Saint-Pierre et Miquelon est situé au Sud de l'île de Terre-Neuve, par 56°20' de longitude Ouest et 47° de latitude Nord. Il s'étend sur une distance Nord-Sud de 46 km environ et sa superficie totale est de 242 km² (Saint-Pierre : 25 km², Miquelon : 110 km², Langlade : 91 km²).

Ces îles appartiennent à la partie Nord du banc de Saint-Pierre, lui-même entouré à l'Ouest par le Chenal Laurentien (profondeur d'environ 450 m) qui relie le golfe du Saint-Laurent à l'Atlantique au travers du détroit de Cabot. Ce chenal présente une ramification vers le Nord-est en direction de la baie de l'Hermitage (profondeur 350 m). L'archipel est donc bordé à faible distance de fonds supérieurs à 100 m (voir également figure 11), sauf au Sud-est, entre Saint-Pierre et la péninsule Burin (secteur d'Île Verte, banc Gulnare et banc Cock) où le chenal est partiellement interrompu par des hauts fonds.

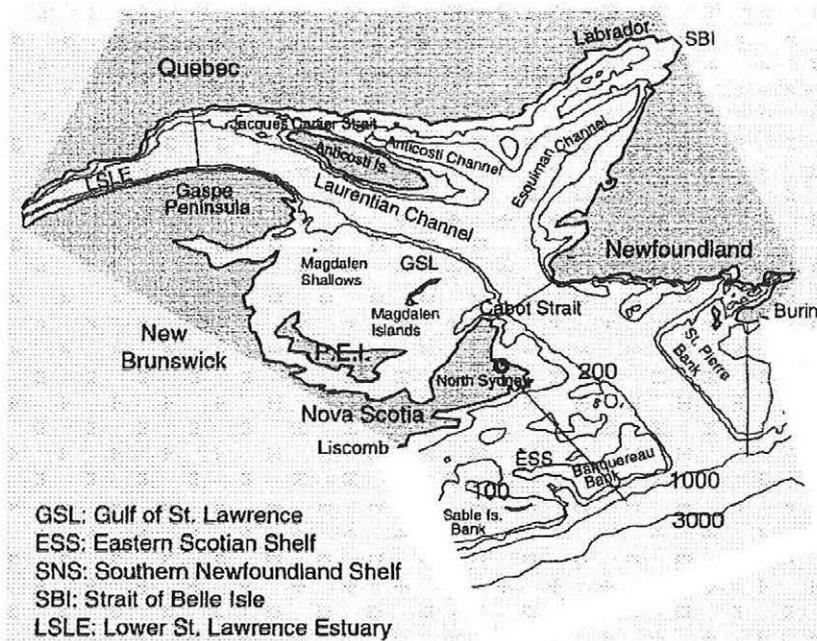


Figure 2 : Carte bathymétrique générale (in ref 2)

1.2 Courantologie

Le chenal Laurentien est la connexion principale entre l'océan atlantique et la baie du Saint-Laurent. Le secteur de Saint-Pierre est ainsi une zone de confluence entre le courant du Labrador en provenance du Nord dont une partie transite par le détroit de Belle-Isle (Nord de Terre-Neuve) et une autre partie longe la côte Sud de Terre-Neuve en direction de l'Ouest, et les eaux douces d'origine continentale (Saint-Laurent).

La figure 3 (ci-dessous) donne une vision générale schématique de ce mouvement des grandes masses d'eau.

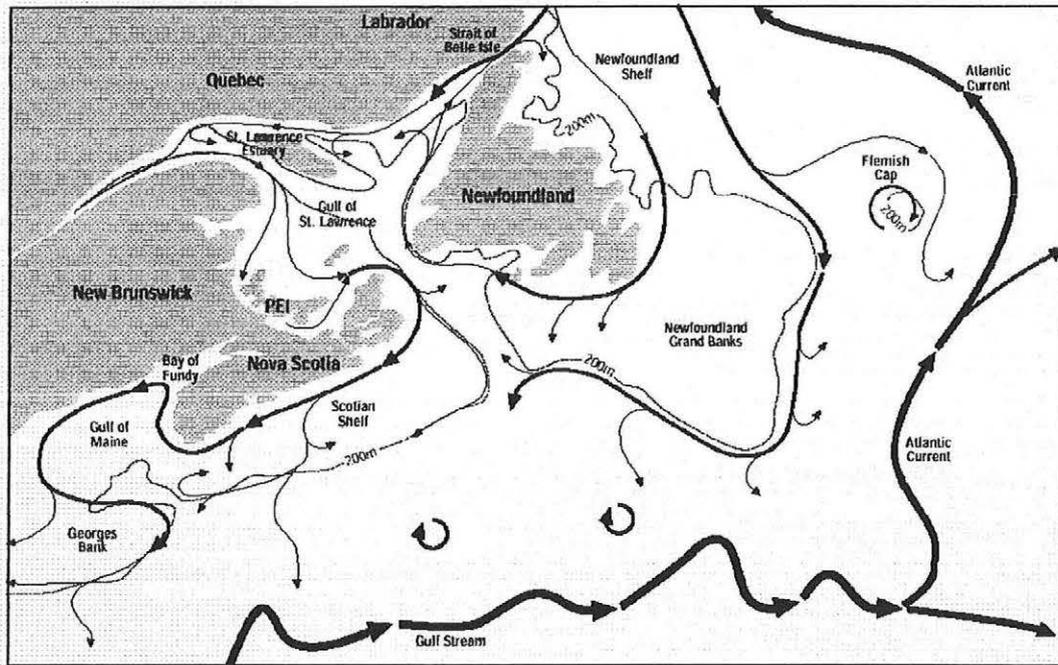


Figure 3 : Schéma général de la circulation régionale

La figure 4 donne une représentation de cette courantologie dans les eaux de surface, telle que révélée par modélisation mathématique.

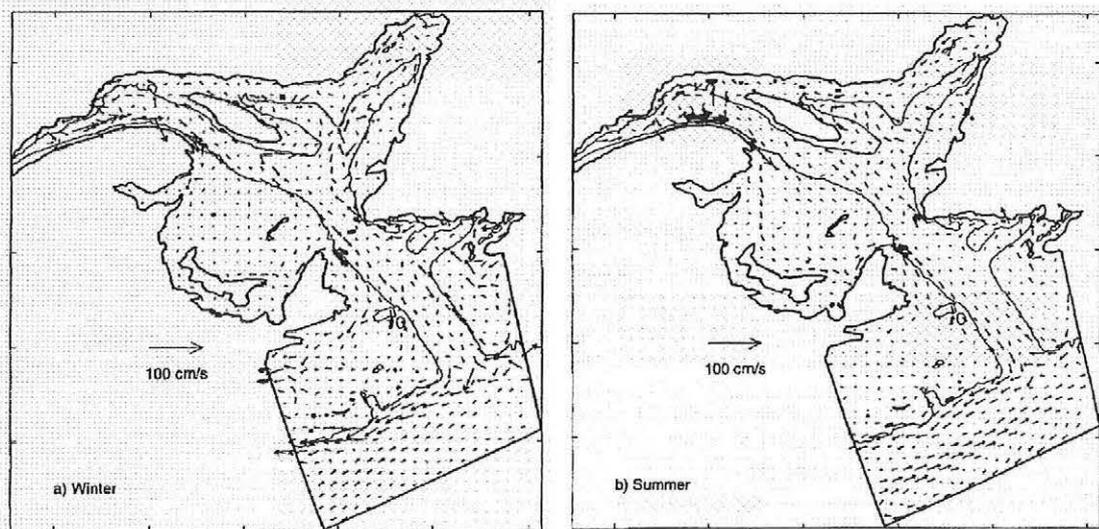


Figure 4 : Courants moyens calculés en sub-surface (5 à 30 m), en hiver (G) et en été (D) (ref 2)

Ces mouvements généraux concernent la macroéchelle, voire l'échelle climatique. D'autres mouvements de mésoéchelle, dont l'origine est essentiellement liée à la météorologie et à la marée, s'y superposent. De nombreux tourbillons topographiques leur sont associés. Ils reflètent notamment la complexité bathymétrique du secteur. La présente modélisation en donnera une description précise à l'échelle de l'archipel.

1.3 Météorologie

Le vent, dont la direction dominante est à l'Ouest dans cette région, est un important moteur de la courantologie.

Selon la synthèse publiée par Afanasyev et al¹ (illustration ci-dessous), les vents faiblissent fortement au printemps. En été, ils prennent une direction Sud-ouest, voire Sud-sud-ouest en zone littorale. En automne, ils se renforcent et prennent une direction Ouest. Ils atteignent leur force maximum en hiver, aux alentours de janvier ou février. Ils sont alors orientés à l'Ouest-nord-ouest.

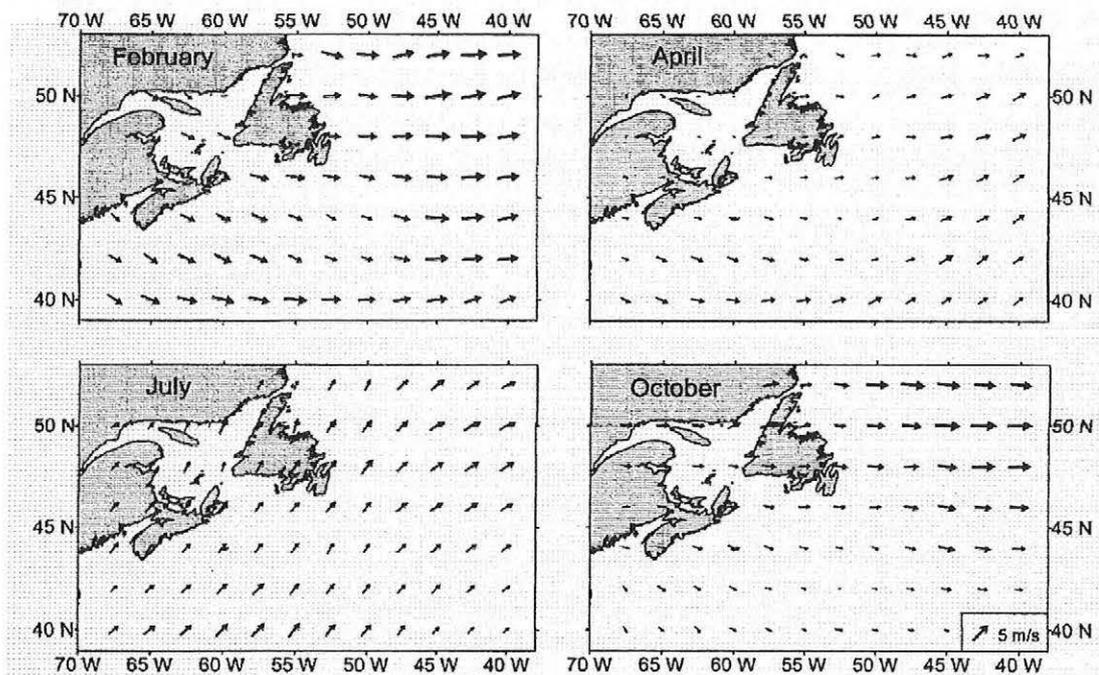


Figure 5 : Le vent synoptique durant les quatre saisons, selon ref 1.

1.4 Hydrologie

L'hydrologie du secteur est complexe. Elle a fait l'objet de nombreuses études à l'échelle régionale (Nouvelle Écosse – Terre Neuve). Celles-ci révèlent des structures verticales variant entre un système bi-couche en hiver, lorsqu'une eau un peu moins froide et surtout moins salée s'écoule au-dessus d'une eau plus froide et plus salée, et un système tri-couche en été.

¹ AFANASYEV, Y., NEZLIN, P., KOSTIANOY, A., 2001. Patterns of seasonal dynamics of remotely sensed chlorophyll and physical environment in the Newfoundland region. Remote sensing of Environment 76, 268-282.

A ce moment, une eau superficielle plus chaude s'étend au-dessus de la première (in G. Han et al²).

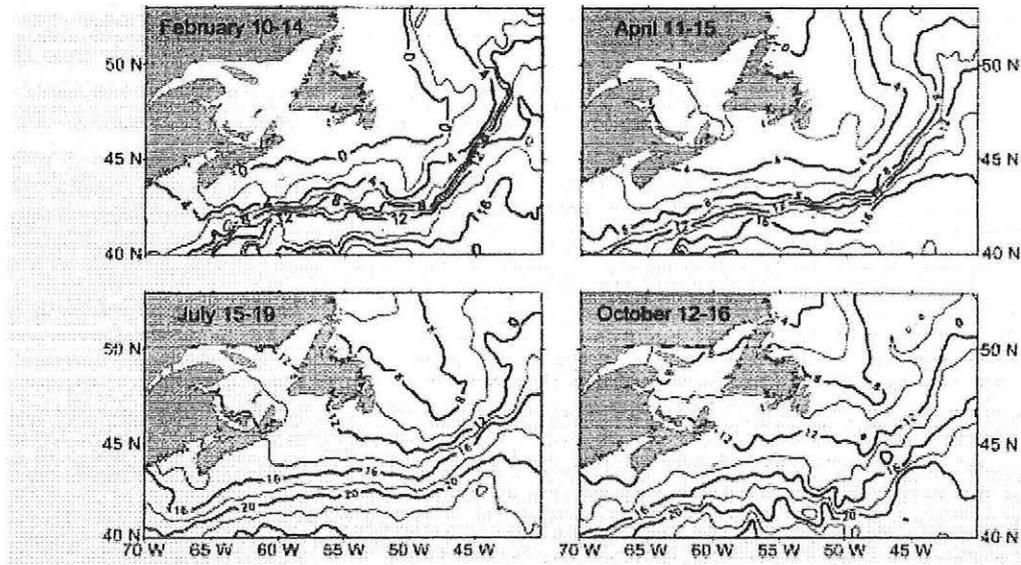


Figure 6 : Température des eaux superficielles (ref 1)

A l'échelle locale de l'archipel, situé à l'écart des eaux du Saint-Laurent et par des profondeurs plus faibles il semble (figure 7) que la structure hydrologique varie entre un système relativement homogène en hiver (température entre 0° et 3°C en surface comme au fond et salinité de 31 à 32‰) et un système stratifié en été (température de 12°C en surface et salinité de 33‰ au fond et 32‰ en surface).

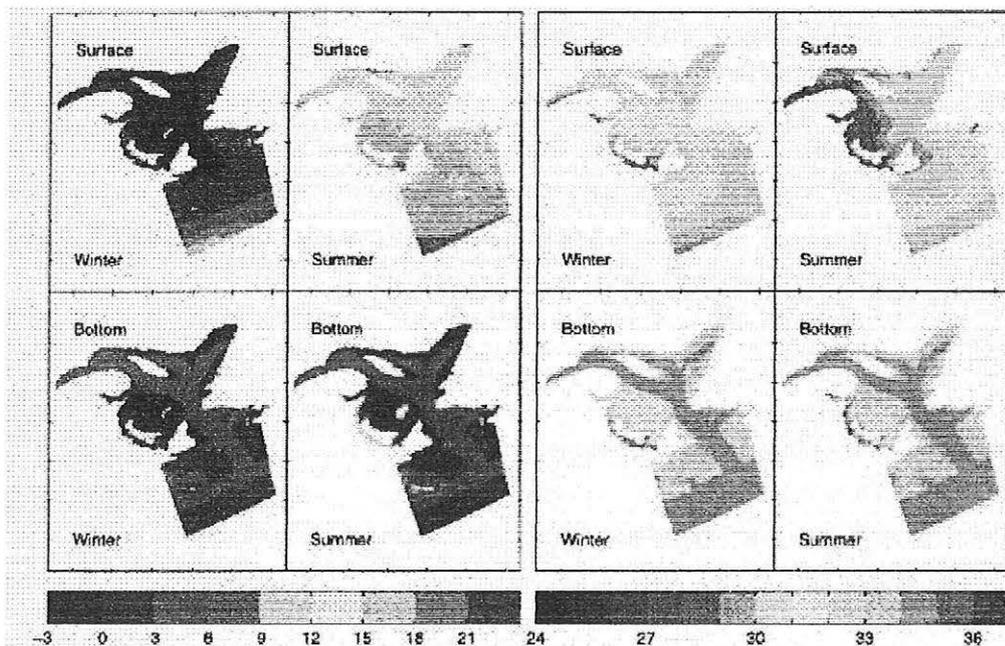


Figure 7 : Structure hydrologique moyenne (ref 2)

² HAN, G., LODER, J. W., SMITH, P., 1999: Seasonal-Mean Hydrography and Circulation in the St. Lawrence and on the Eastern Scotian and Southern Newfoundland Shelves. *Journal of Physical Oceanography* 29, 1279-1301.

1.5 La marée

La marée est de type semi-diurne, mais présente une inégalité diurne sensible. Les six principales ondes à Saint-Pierre sont : M2 (amplitude 60.3 cm), S2 (amplitude 17.1 cm), N2 (amplitude 10.1 cm), O1 (amplitude 7.3 cm), K1 (amplitude 6.1 cm) et Q1 (amplitude 1.5 cm).

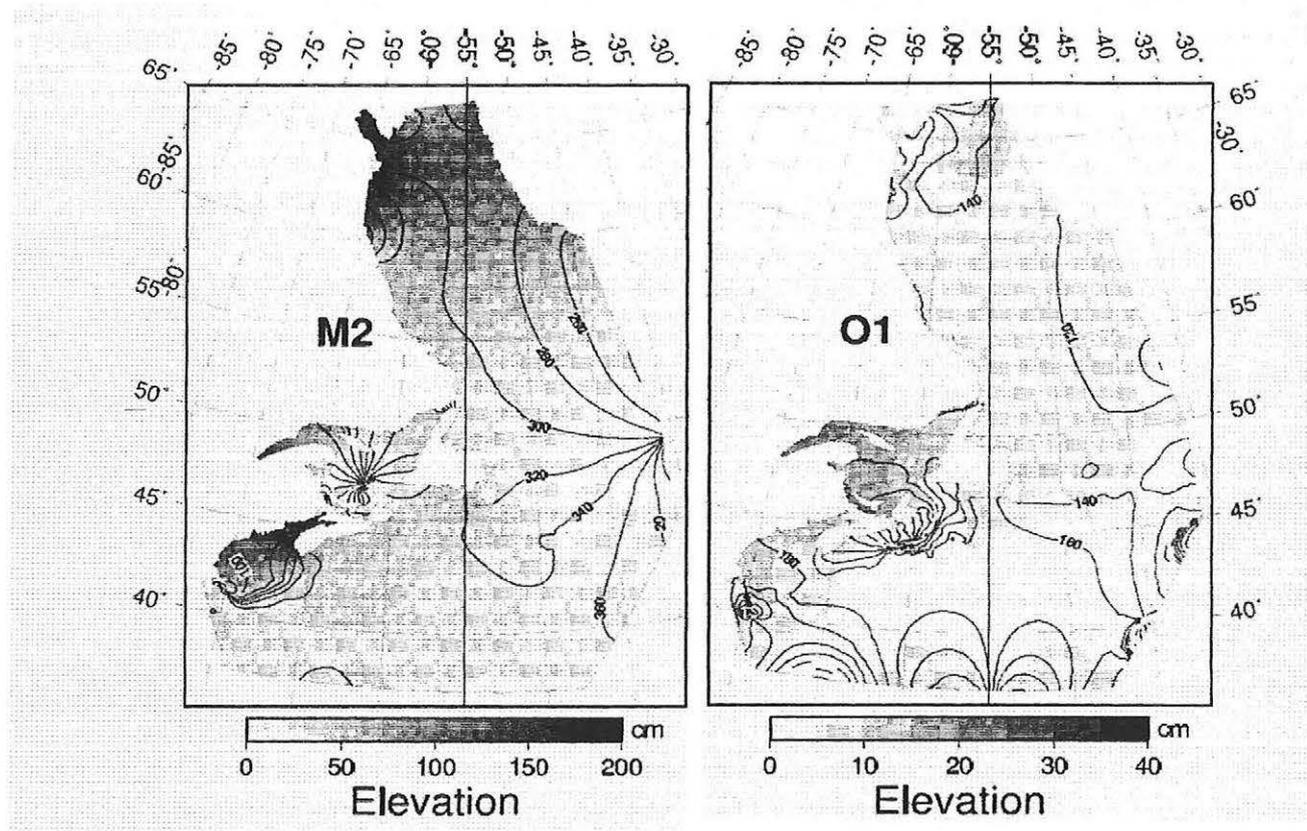


Figure 8 : Amplitudes et phases des ondes M2 et O1, selon ref³

La figure ci-dessus montre les phases et amplitudes des deux principales ondes semi-diurnes et diurnes, selon Dupont et al³.

On relève particulièrement la présence d'un point amphidromique à l'intérieur du golfe du Saint-Laurent, pour les ondes semi-diurnes et d'un point amphidromique situé au large de la Nouvelle Écosse et de Terre-Neuve, pour les ondes diurnes.

La somme des ondes diurnes vaut ainsi 14.9 cm à Saint-Pierre et celle des ondes semi-diurnes 87.5 cm. Leur quotient de 0.17 n'est pas très éloigné de la limite des ondes semi-diurnes à inégalités diurnes, fixée à 0.25. Le marnage maximum est

³ DUPONT, F., HANNAH, D., GREENBERG, J., CHERNIAVSKY, J. AND NAIMIE, C., 2002. Modelling System for Tides. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 221: vii+72p.

d'environ 2.10 m et le niveau moyen déterminé par le SHOM est de 1.26 m au-dessus des plus basses mers.

La figure ci-dessous (fig. 9) présente la chronologie des niveaux de marée durant le mois de septembre 2006, pris à titre d'exemple d'une séquence intégrant les fortes marées de l'équinoxe d'automne.

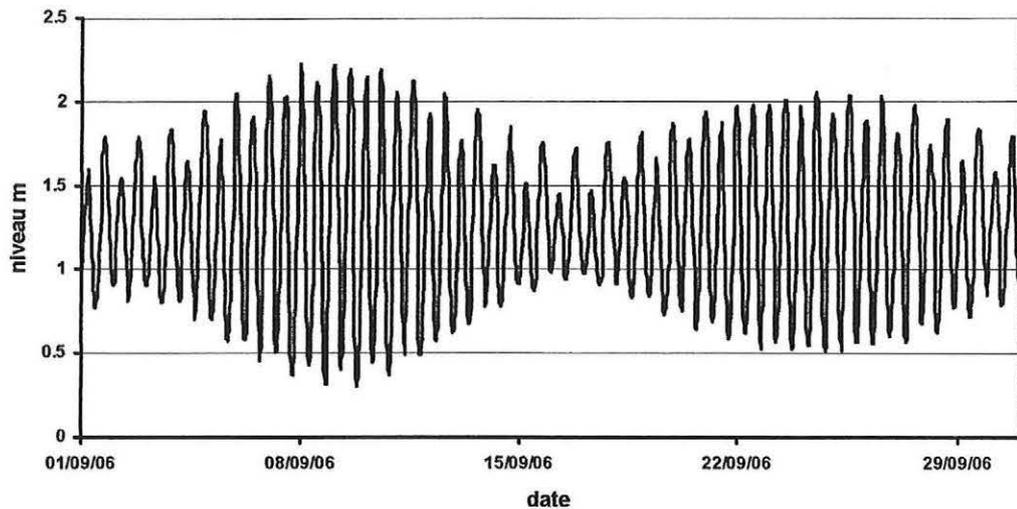


Figure 9 : La marée à Saint-Pierre en septembre 2006

Outre l'alternance vive eau – morte eau due à la combinaison des ondes $\frac{1}{2}$ diurnes lunaires et solaires, on y relèvera l'importance de l'inégalité diurne, particulièrement sensible en morte eau.

Cette amplitude de marée est assez importante pour générer des courants de l'ordre de un nœud (voir plus loin) qui dominent largement les courants généraux cités plus haut. Ils engendrent également des courants résiduels (par effets non linéaires et interactions avec la bathymétrie) de l'ordre de 5 à 10 cm/s, voire davantage. Il en résulte une courantologie instantanée très complexe qui sera décrite par la modélisation mathématique.

2 Matériels et méthodes : Les modèles hydrodynamiques

2.1 Généralités

L'étude de l'hydrodynamique côtière (courants, niveaux, agitation) ainsi que le mouvement des sédiments et la dispersion des micro-organismes ou des substances chimiques (dissoutes ou en suspension) s'effectue aujourd'hui essentiellement par modélisation mathématique.

Le procédé se fonde sur la résolution numérique des équations (mathématiques) de la mécanique des fluides (équations dites de Navier-Stokes), appliquées au milieu marin littoral. Elles décrivent les mouvements hydrauliques de l'océan et des cours d'eau (courants et dispersion) sous l'effet combiné de tous les facteurs agissants : marées, vent, houle, débits fluviaux, gradients de densité, etc.

On utilise pour cela un code de calcul spécifique, dénommé modèle mathématique, qui fonctionne comme suit : L'aire d'étude est d'abord décrite par un maillage des profondeurs. Puis, à partir de la connaissance des niveaux d'eau sur son périmètre et des indications de météorologie et de débit des rivières ou émissaires, les équations citées plus-haut sont résolues numériquement. On détermine ainsi, en chaque instant, les courants et les hauteurs d'eau dans toute la zone. On en déduit simultanément le déplacement et la dilution des substances présentes dans la masse d'eau, notamment le sel, le contenu thermique et les éventuels matières ou micro-organismes qui auront été rejetés.

Les conditions hydrodynamiques sur le périmètre de la zone d'étude sont des données impératives. N'étant pas directement disponibles, elles sont elles-mêmes le résultat d'une modélisation de plus grande emprise. A partir d'un premier modèle, plus vaste que la région étudiée, et par le recours à des modèles intermédiaires, on définit de proche en proche les conditions ambiantes nécessaires au fonctionnement du modèle de détail. C'est la méthode dite des modèles Gigognes qui sera utilisée ici.

Les équations (tridimensionnelles et non linéaires) de Navier-Stokes sont rigoureusement insolubles de manière analytique. On en recherche donc une solution approchée par des méthodes numériques. Mais même ainsi, la tâche demeure complexe et lourde. On s'efforce donc de recourir aux simplifications que permettent la problématique et les caractéristiques du site d'application.

C'est ainsi que s'introduit la distinction entre modèles bidimensionnels et tridimensionnels.

Modèles bidimensionnels

Les modèles bidimensionnels (horizontaux) résultent d'une opération de "moyenne" des équations hydrodynamiques sur la coordonnée verticale. Ils expriment donc toutes les grandeurs qui interviennent dans les calculs (vitesse, concentration, turbidité, température, etc.) par leur valeur moyenne entre la surface et le fond. Leur fidélité au système naturel dépend donc de la représentativité de ces moyennes vis à vis des valeurs réelles, mesurables au sein de l'écoulement, c'est à dire de la faiblesse des gradients verticaux. Ces modèles sont bien adaptés à la description des mouvements barotropes induits par la marée, mais ils ne le sont que partiellement pour les courants créés par le vent, les gradients de densité et la houle.

Modèles tridimensionnels

Le modèle tridimensionnel possède, relativement au modèle bidimensionnel, l'avantage d'effectuer le calcul de chaque variable (courants et concentrations dans la masse d'eau) en plusieurs points répartis entre la surface et le fond.

Le résultat est donc préférable (plus exact) à celui du modèle bidimensionnel lorsqu'un gradient vertical significatif existe. C'est particulièrement le cas des courants dus au vent ou aux gradients de densité. Sinon, le résultat est identique. La contrepartie est un fonctionnement plus lourd, d'un facteur à peu près égal au nombre de niveaux de calcul, c'est à dire de l'ordre de 10.

L'informatique moderne autorise cette performance. Mais l'avantage du modèle 3D peut être annulé par la lourdeur du calcul qui imposera, à travail égal, d'effectuer des simulations moins nombreuses ou d'une durée plus courte que pour un modèle bidimensionnel.

2.2 Type de modèle et logiciel

Dans le cas présent, compte tenu de l'intérêt principal porté aux effets de marée, on se limitera à une modélisation bidimensionnelle.

Le modèle sera construit sur la base du logiciel MARS_Seamer. Il s'agit d'un progiciel complet de calcul des écoulements à surface libre et de leurs conséquences environnementales. Il a été longuement développé dans les universités de Brest et de Marseille, puis au sein d'Ifremer et désormais de Seamer. MARS capitalise aujourd'hui plus d'une trentaine d'années de développements et justifie de très nombreuses applications, ainsi que de la participation à des campagnes de validation et à plusieurs bancs d'essais internationaux, notamment de l'Union Européenne⁴.

Comme déjà indiqué, le code de calcul correspond à la résolution des équations universelles de l'hydrodynamique en version 2D ou en version 3D. Ces équations dérivent d'un très petit nombre de considérations théoriques, à savoir le bilan du moment des forces (entre l'inertie d'une particule élémentaire et les forces qui lui sont

⁴ Par exemple : Programmes d'inter comparaison de modèles mathématiques sur le site de la Mer du Nord : NOMADS 1 et NOMADS2, programme MMARIE : « Application of High Performance Computing Techniques for the Modeling of Marine Ecosystems » réf. MAST2 – CT94 – 0106.

appliquées) et le principe de continuité (conservation de la masse dans un volume élémentaire au sein du fluide).

Le premier est généralement connu sous le nom de seconde loi de Newton. Il conduit aux équations du mouvement. Le second conduit aux équations de continuité qui sont applicables au fluide et à tout scalaire transporté au sein de la masse d'eau.

Le développement détaillé de ces systèmes mathématiques universellement acceptés, déborde du présent rapport. Il peut être trouvé dans de nombreux ouvrages didactiques. On rappellera seulement ici, en annexe, le système final obtenu.

Par option dans l'interface d'activation de MARS, l'utilisateur résout au choix le système 3D complet (10 équations) ou le système simplifié 2D (équations 4 à 8).

2.3 Emprises et maillages

Pour obtenir une description générale de la courantologie dans l'archipel et une plus grande précision dans le secteur Nord de Miquelon, on a réalisé un double modèle mathématique.

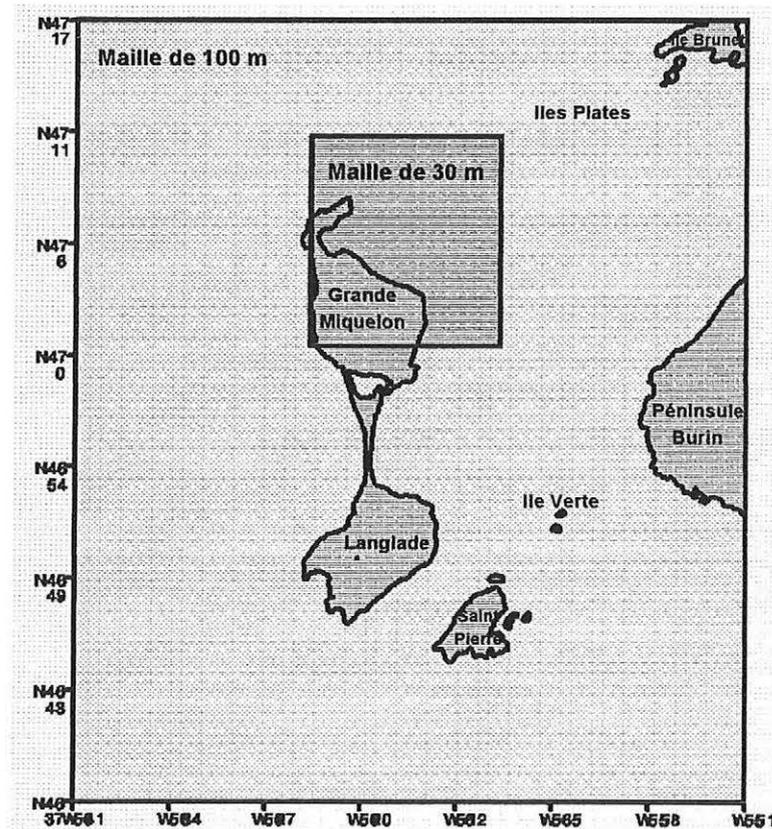


Figure 10 : Emprises des modèles mathématiques

Le premier modèle, dit "général", recouvre largement l'ensemble de l'archipel. Son emprise est de 62,8 km (distance Est-Ouest) par 73,8 km (distance Nord-Sud).

Les coordonnées géographiques des limites sont les suivantes :

Nord	47° 17' 33,2" Nord
Sud	46° 37' 45,3" Nord
Est	55° 51' 40,9" Ouest
Ouest	56° 41' 17,6" Ouest

La dimension du maillage est de **100 mètres**. La matrice de calcul comporte ainsi **463464 points** (628x738).

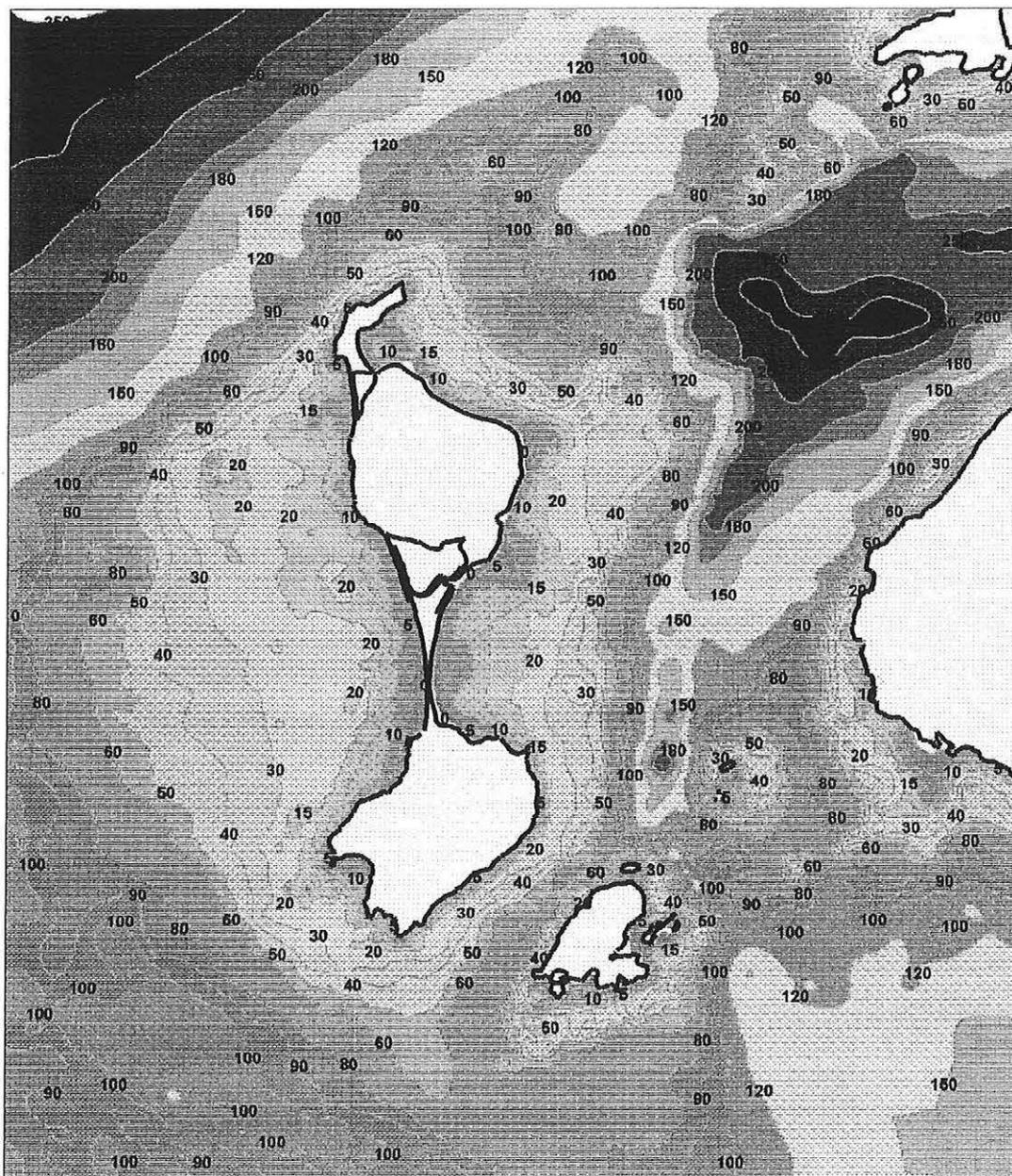


Figure 11 : La bathymétrie du modèle mathématique général

Le second modèle, dit "de détail", concerne la partie Nord de Miquelon. Son emprise est de 17,79 km (distance Est-Ouest) par 19,83 km (distance Nord-Sud).

Les coordonnées géographiques des limites sont les suivantes :

Nord	47° 11' 43,3" Nord
Sud	47° 01' 01,8" Nord
Est	56° 09' 48,2" Ouest
Ouest	56° 23' 53,3" Ouest

La dimension du maillage est de **30 mètres**. La matrice de calcul comporte ainsi **391 973 points** (593x661).

2.4 Données bathymétriques

Les données bathymétriques sont issues de la numérisation des cartes marines éditées par le SHOM (cartes n° 6620, 6726 et 6118).

La figure 11 présente le MNT obtenu.

2.4.1 Conditions aux limites

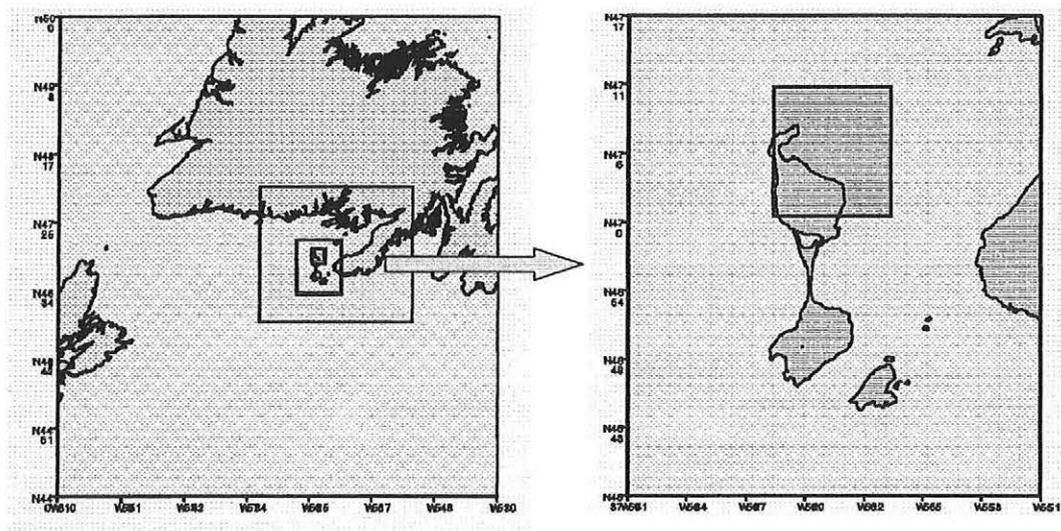


Figure 12 : Imbrication des modèles de l'étude dans les modèles d'approche

Les conditions aux limites marines sont obtenues par emboîtement des modèles de l'étude dans des modèles d'approche, selon la procédure Gigogne décrite plus haut. La figure 12 ci-dessus présente l'emprise du premier modèle et du modèle intermédiaire qui permettent leur activation.

Les conditions de marée introduites aux limites du premier modèle sont extraites de l'atlas de Schwiderski⁵. Six ondes sont prises en considération : M2, N2, S2, K1, O1 et Q1. Elles permettront d'utiliser le modèle mathématique pour toute situation réelle dont on précisera la date. On pourra également simuler des situations fictives pour lesquelles on ne retiendra que l'une (ou quelques-unes) des ondes, par exemple M2.

2.4.2 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques sont des hypothèses de chaque simulation. Elles peuvent correspondre à des situations réelles ou à des situations schématiques. Dans les applications présentées ci-après on se réfèrera à trois situations distinctes :

- Vent nul,
- Vent de Sud-sud-ouest (210°) de 5 m/s,
- Vent de Ouest-nord-ouest (280°) de 5 m/s.

Sur la base des informations générales données plus haut, ces deux dernières situations correspondent respectivement aux conditions moyennes d'été et d'hiver.

⁵ SCHWIDERSKI, E. Global Ocean Tides, 1979. Naval surface weapons center. Silver Spring, Maryland 20910.

3 Résultats des simulations

3.1 Marée de grande vive eau

Pour mettre en lumière les effets de marée, on se réfèrera à la marée de grande vive-eau d'équinoxe du 9 septembre 2006. On supposera simultanément un vent nul.

3.1.1 Courants de marée

3.1.1.1 Champs horaires

Les figures 36 à 47 présentent les champs de courants calculés d'heure en heure à l'échelle de l'archipel. Les figures 48 à 59 précisent la courantologie du Nord de Miquelon. Un montage vidéo animé accompagne ce rapport. Il aidera à visualiser la cinétique du phénomène.

On note d'abord la complexité de ces champs de courants.

De manière générale, à l'échelle de l'archipel, les courants se renversent aux alentours de PM+3h30 et de BM+3h30. Le flot (courant qui se dirige dans le sens de propagation de l'onde) encadre la pleine mer (grossièrement de BM+3h30 à PM+3h30) et le jusant (dirigé en sens inverse) se produit aux alentours de la basse mer. C'est la caractéristique d'une onde progressive, telle qu'on la rencontre au large. Elle matérialise la prédominance des forces d'inertie devant celles de frottement.

Le flot est dirigé vers le Nord ou le Nord-ouest et le jusant vers le Sud ou le Sud-est.

Ce phénomène s'observe habituellement à bonne distance de la côte, dans les zones profondes. C'est bien le cas ici, à l'extérieur de l'archipel et dans les principaux chenaux.

Par contre, en bordure de littoral, dans des zones peu profondes, le frottement est plus fort et l'inertie plus faible, de sorte que le décalage temporel entre renverses et étales se réduit.

C'est le cas au Sud de Langlade, dans le secteur du Cap Bleu où le flot débute à BM+2h et le jusant à PM+2h. C'est également le cas au Sud de Saint-Pierre ainsi qu'à l'Est de l'isthme de Langlade et au Sud-est de Miquelon. Il se crée alors momentanément des contre-courants côtiers.

Mais, l'archipel constitue surtout un obstacle placé en travers du courant général de marée. Celui-ci est donc contraint à diverger en amont des îlots et à converger en aval. Il tend alors à créer des tourbillons par décollement de la couche limite latérale. Ces tourbillons naissent de petite taille, puis s'amplifient si la bathymétrie le permet.

Ils persistent un peu au-delà de la renverse du courant principal qui leur a donné naissance. C'est notamment le cas du Cap Miquelon qui provoque en flot un tourbillon cyclonique (sens de la montre) au Nord du cap. Celui-ci disparaît à PM+5h et se trouve remplacé par un autre tourbillon de sens inverse (anticyclonique) à l'Est du cap. Il persistera à son tour jusqu'à BM+5h.

On observe des phénomènes semblables, bien que moins développés devant la pointe aux Soldats (Miquelon), ainsi que devant la Pointe Plate (Langlade) et la Pointe à Henry (Saint-Pierre).

Enfin, signalons le cas particulier de La Baie, chenal séparant Langlade de Saint-Pierre, qui se trouve orienté en travers du courant général. La plupart des phénomènes mentionnés ci-dessus s'y produisent et se superposent. Au long du littoral de Langlade, le courant est soit nul (BM à BM+2h) soit orienté au Nord-est. Plus près de Saint-Pierre (à un mille environ) il est toujours orienté au Sud-ouest. Entre ces deux veines, soit à un mille à peu près de Petite Miquelon, le courant est toujours très faible, sinon nul. Quant à la bordure littorale de Saint-Pierre, pourtant profonde, elle n'est le siège que d'un courant souvent très faible, majoritairement orienté au Sud-ouest, mais momentanément dirigé en sens inverse de PM à PM+2h.

Dans ce contexte général, le modèle de détail permet d'affiner la courantologie dans le secteur Nord de Miquelon.

Au centre de la zone, soit à 3 milles environ au Nord de la Pointe aux Soldats et à la même distance du Cap du Nid à l'Aigle, les renverses se produisent à PM+4h30 et BM+4h.

Durant cette période (de PM+5h à BM+5h) qui correspond au jusant au large, le courant au long de la côte Nord de Miquelon (du fond de l'Anse de Miquelon à la Pointe aux Soldats) est toujours dirigé à l'Est et sa vitesse varie peu (de l'ordre de 15 cm/s). De manière symétrique, le courant au long de la côte entre le fond de l'anse de Miquelon et le cap du Nid à l'Aigle est toujours orienté au Nord-est. Devant ce cap, on observe la naissance du tourbillon déjà mentionné qui grandit progressivement, s'éloigne de la pointe et disparaît à BM+4h.

Cette divergence du courant littoral en fond de baie est compensée par un courant de direction inverse (vers le Sud-ouest) au centre de la baie, soit à égale distance de ces deux rives.

De BM+5h à PM+5h, le courant au large correspond au flot. C'est également ce qui est observé ici, au Nord de la zone. On retrouve bien le courant de Nord-ouest déjà mentionné, ainsi que la génération d'un tourbillon au Nord du Cap du Nid à l'Aigle qui selon la dynamique habituelle, grandit, s'écarte progressivement de la côte et disparaît à PM+5h. Il laisse alors la place au début de jusant.

On observe également la formation d'un tourbillon semblable au Nord de la Pointe aux Soldats et des Rochers de l'Est. Mais il est remarquable de constater qu'au long du littoral (de l'Anse de Miquelon à la Pointe aux Soldats) le courant ne se renverse pas. Il demeure dans la même direction Est que précédemment. Il constitue alors un contre-courant.

Le même phénomène se produit au long du cap du Nid à l'Aigle. Le courant demeure au Nord-est. Ce courant littoral est ainsi un courant permanent engendré par la marée.

3.1.1.2 Vitesse au point fixe

Pour fournir une vision complémentaire des champs synoptiques décrits ci-dessus, on précise dans les pages suivantes, les courants relevés en quelques points fixes, dans le secteur Nord de Miquelon. L'emplacement de ces 6 points est présenté ci-dessous.

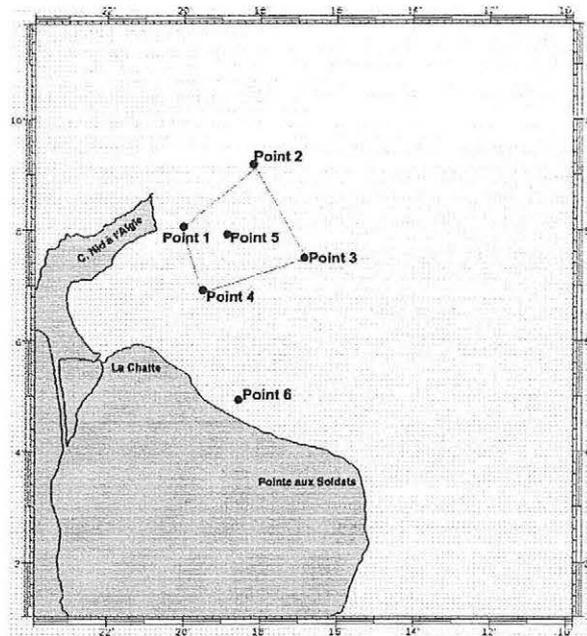


Figure 13 ; Emplacement des points de présentation des courants

Les quatre premiers correspondent aux angles du périmètre retenu pour l'ensemencement de coquilles juvéniles. Le cinquième est le centre de ce polygone et le sixième se situe au long de la côte dans le secteur de Mirande.

Des points ne sont distants que de 1 à 2 milles, mais on constate que les courants y sont très différents.

Au point 1, la vitesse est essentiellement dirigée vers le Nord et le maximum coïncide approximativement avec la pleine mer. La composante E-W, toujours faible, se renverse quatre fois par marée.

Au point 2, les renverses des deux composantes se produisent simultanément, signifiant que le courant s'annule totalement aux environs de PM-1h et BM-2h. La phase de courant de Sud-est a donc une durée plus grande que celle de Nord-ouest. Elle présente également deux maxima : courant plutôt à l'Est, puis courant plutôt au Sud.

Au point 3, les renverses sont également simultanées et les composantes à peu près symétriques traduisent un courant alternatif. Comme ci-dessus, le courant de Sud-est a une durée plus grande que celui de Nord-ouest. L'intensité y est plus faible (≤ 20 cm/s).

Au point 4, la phase de courant de Nord-ouest encadre la pleine mer et sa durée (7h30) est supérieure à celle du courant de Sud-est.

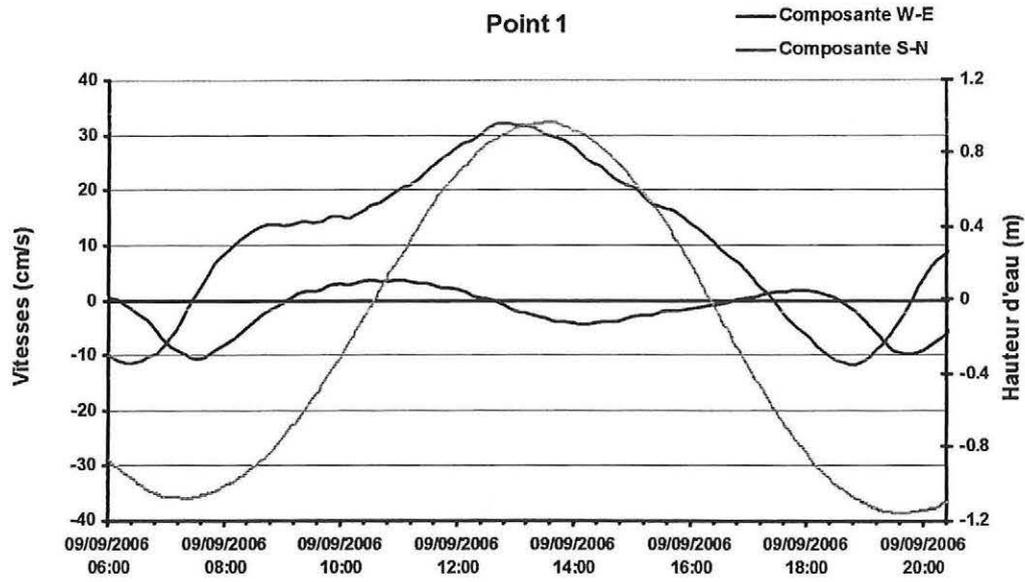


Figure 14 : Le courant de marée dans l'extrémité Ouest du polygone d'ensemencement

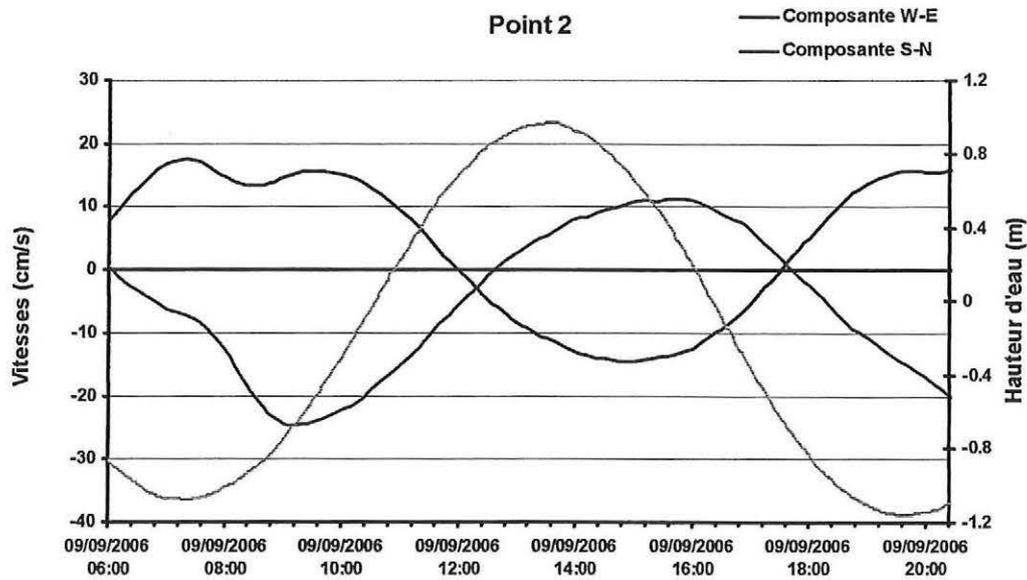


Figure 15 : Le courant de marée dans l'extrémité Nord du polygone d'ensemencement

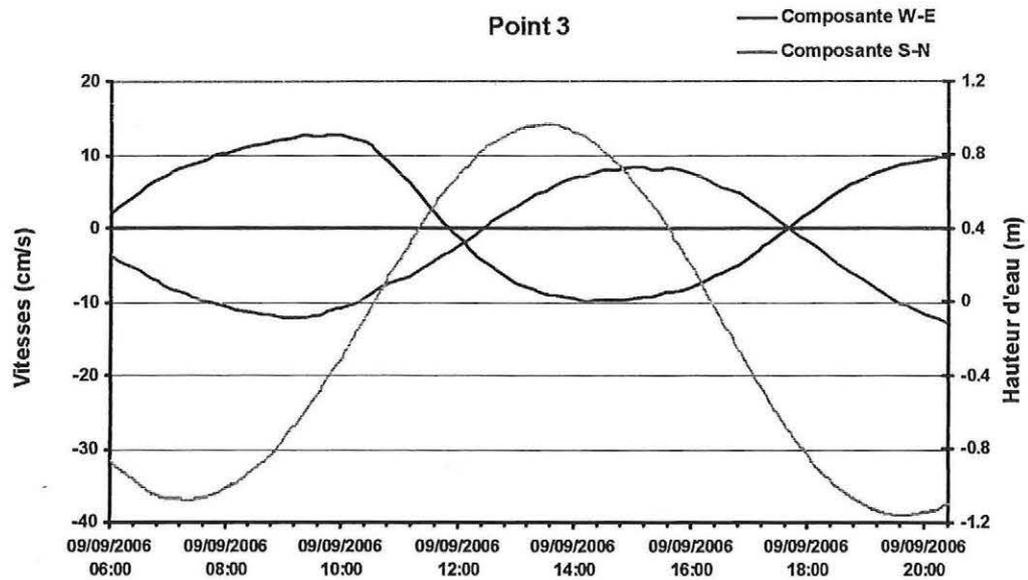


Figure 16 : Le courant de marée dans l'extrémité Est du polygone d'ensemencement

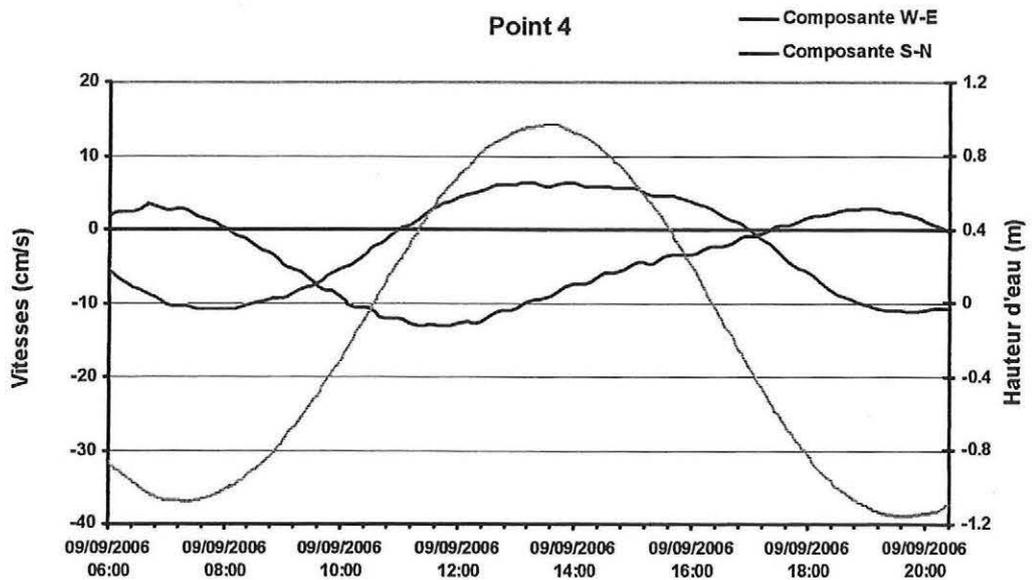


Figure 17 : Les courant de marée dans l'extrémité Sud du polygone d'ensemencement

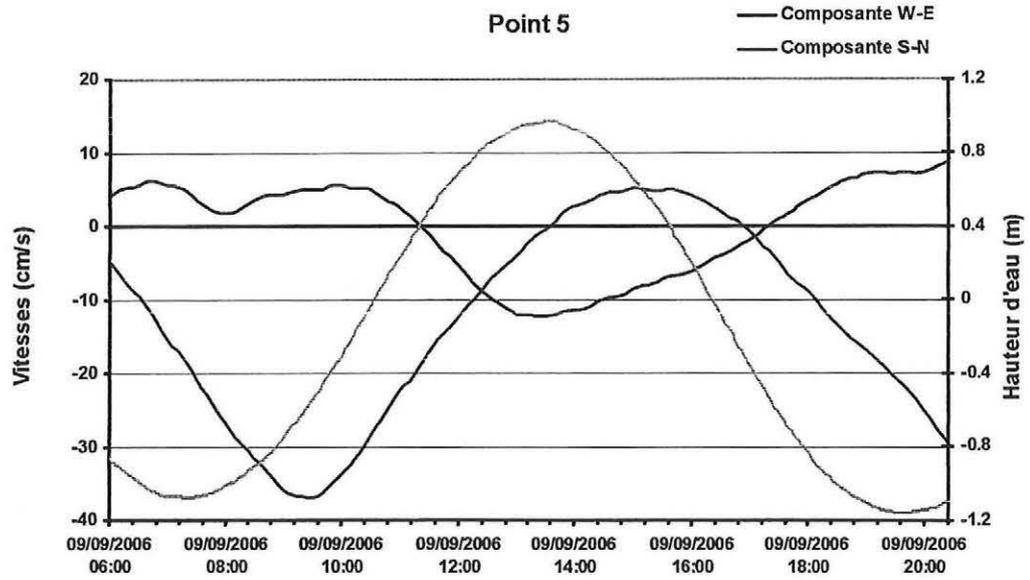


Figure 18: Le courant de marée au centre du polygone d'ensemencement

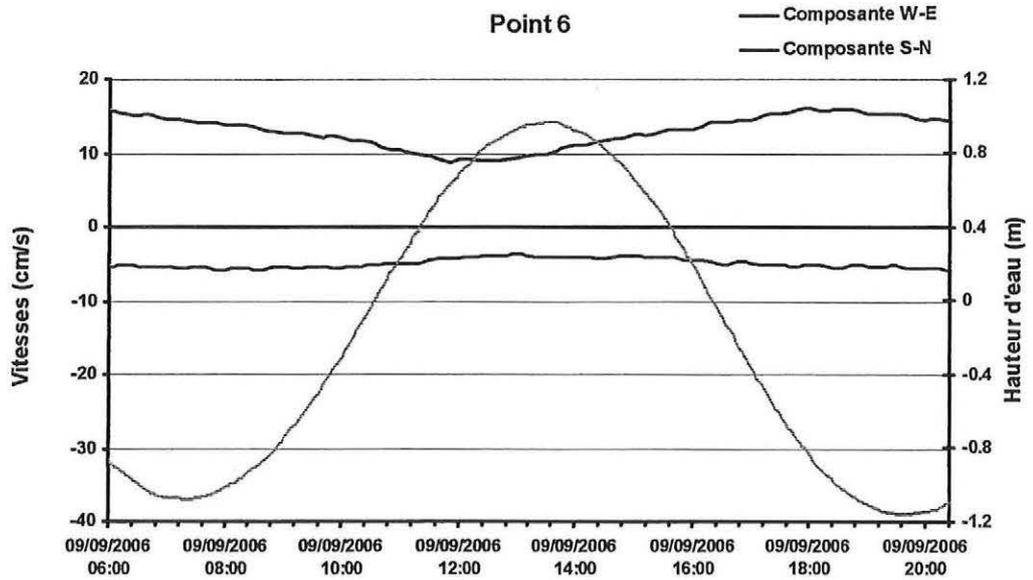


Figure 19: Le courants de marée au long de la cote près de Mirande

Au point 5, la phase de courant de Sud est intense et dure 9heures !

En 6, le courant est faible, et presque constant. Pourtant dans cette simulation, le seul facteur extérieur est la marée.

3.1.1.3 Trajectoires

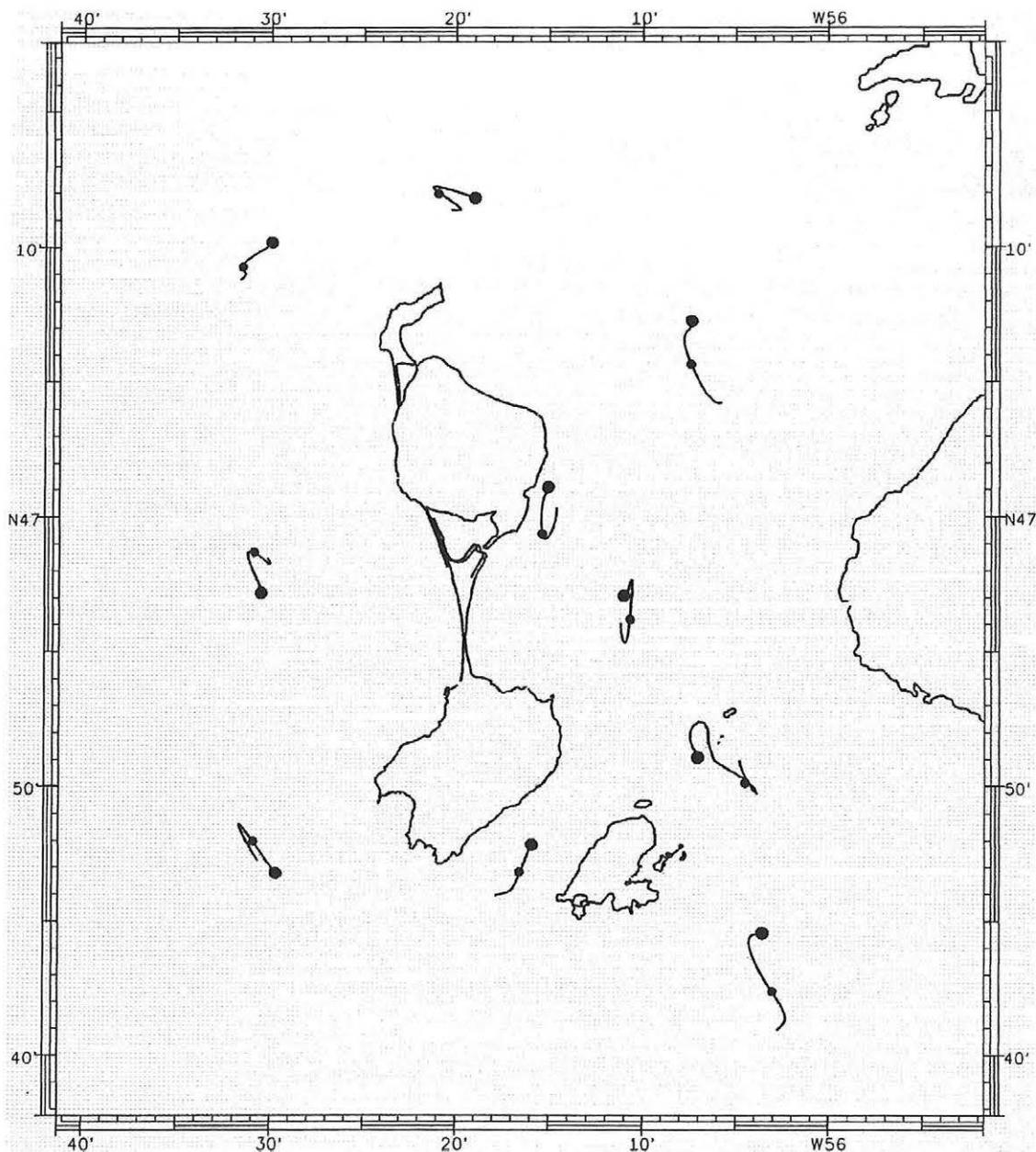


Figure 20 : Trajectoires de marée pour un départ à pleine mer

Les trajectoires présentées correspondent à des départs à pleine mer repérés sur ces planches par une pastille noire. La basse mer est repérée par une pastille de plus faible dimension. La trajectoire est interrompue à la basse mer suivante.

Ces trajectoires matérialisent à la fois l'amplitude du déplacement, en distinguant les phases de marée montante et de marée descendante, et la dérive résiduelle. On retrouve la grande variabilité spatiale déjà mentionnée :

- Courant presque alternatif avec une résiduelle Ouest au Nord de Miquelon,
- Courant presque permanent avec une dérive Sud autour de Saint-Pierre, ainsi qu'à l'Est de Miquelon,
- Forte dérive vers le Nord, à l'Ouest de Langlade, etc.

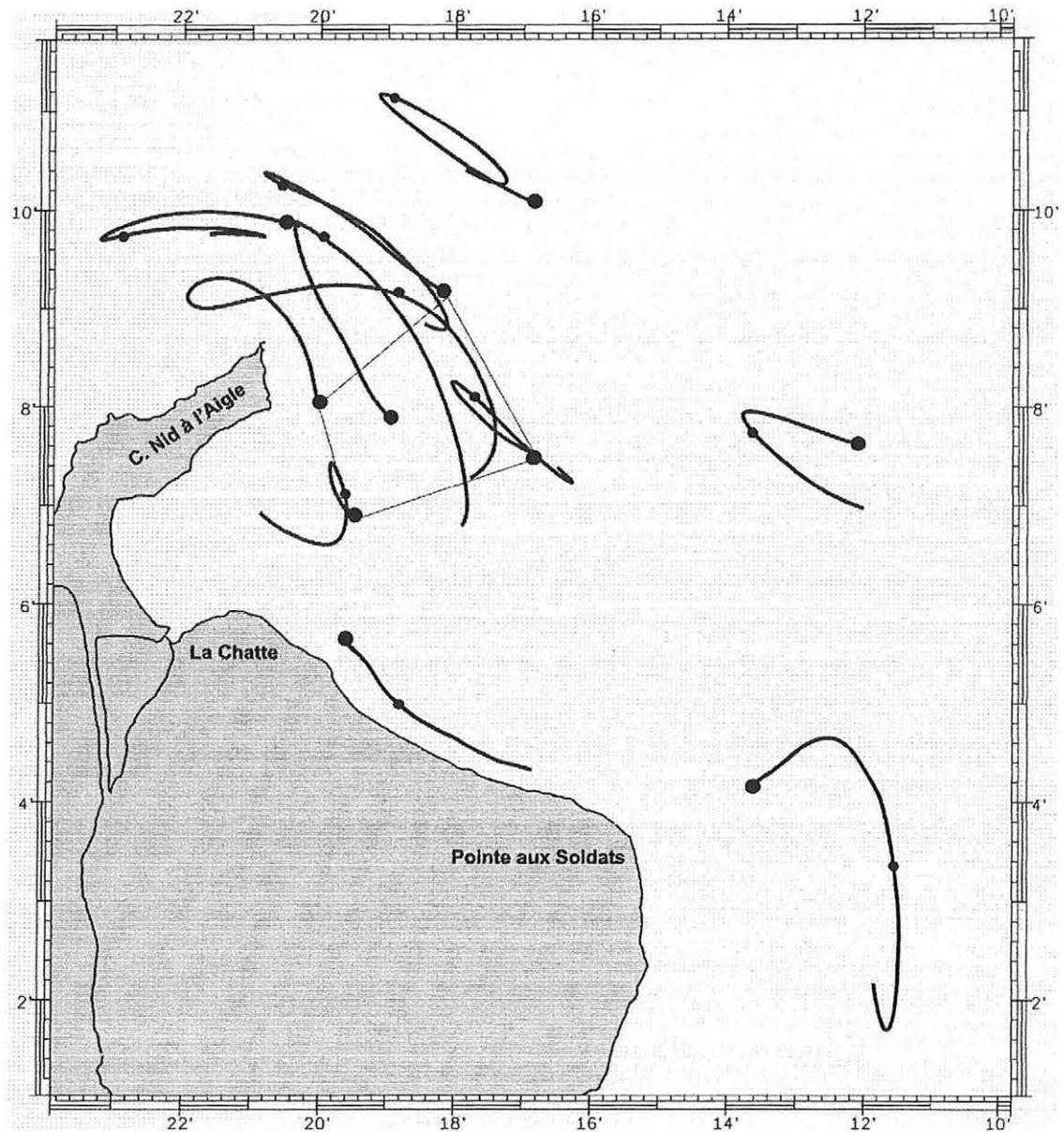


Figure 21 : Trajectoires de marée pour un départ à pleine mer, au Nord de Miquelon

La même représentation dans la région Nord de Miquelon permet de retrouver la complexité de la courantologie du secteur : Dérive littorale sans renverse dirigée vers la Pointe aux Soldats, forte dérive vers le Sud à l'Est de l'île et surtout complexité des trajectoires dans la baie de Miquelon.

3.1.2 Vitesse maximum du courant de marée



Figure 22 : Vitesse maximum du courant de marée

L'intensité maximum du courant de marée est un paramètre intéressant. Il permet une synthèse partielle de l'impact des courants instantanés, notamment pour les efforts ressentis par des structures en place (bouées, cages, etc.), ainsi que par les fonds.

On peut, aussi en déduire, dans une certaine mesure, la capacité éventuelle des courants à déplacer des sédiments ou des animaux benthiques.

On identifie (figure 22) les zones à forts courants, notamment le secteur des îlots de l'île Verte et le chenal qui les séparent de Saint-Pierre, ainsi que les hauts fonds au Sud-ouest de la pointe du Diamant (Saint-Pierre) et des pointes Plates et du Ouest (Langlade). Au Nord de Miquelon, les valeurs les plus fortes se produisent au Nord-est du Cap du Nid à l'Aigle (environ 1.5 nœud, vers le Sud-est), ainsi qu'à l'Est de la Pointe aux Soldats (0.65 m/s dans le Sud-est).



Inversement, le secteur Nord de Miquelon, hors du voisinage des caps du Nid à l'Aigle et de la Pointe aux Soldats, ne s'avère parcouru que de courants faibles, généralement inférieurs à 0.2 m/s. Le maximum est orienté au Sud-est, sauf à

l'intérieur de la baie de Miquelon proprement dite et à proximité du cap du Nid à l'Aigle.

3.1.3 Courants résiduels



Figure 24 : Courant résiduel de marée dans l'archipel

Le courant résiduel de marée représente le cheminement à long terme des masses d'eau. Les quelques trajectoires montrées plus haut en ont déjà fourni une vision partielle. Mais il est intéressant d'en donner une vision complète, ici, sous le seul effet de la marée.

Au large, par grandes profondeur, ces courants sont habituellement négligeables. Mais ici, compte tenu de la complexité des champs de courants instantanés (forts gradients), les composantes résiduelles peuvent être très importantes et dominer largement la circulation générale, et même les effets de vent.



Figure 25 : Courant résiduel de marée au Nord de Miquelon

Le concept de courant résiduel (au sens de Lagrange, c'est à dire en suivant le déplacement des particules) est très complexe*. On démontre notamment que même dans un système parfaitement périodique (marée constante et absence d'effets météorologiques), le mouvement résiduel en un endroit donné, n'est pas unique. Il dépend de l'instant de départ des particules. Ces notions débordent du présent travail, et pour simplifier, on utilisera ici le formalisme de la vitesse résiduelle de transport, c'est à dire le quotient du débit résiduel au point fixe, par la hauteur d'eau moyenne en ce point.

$$\vec{V}_{rt} = \frac{\int_T \vec{v} H dt}{\int_T H dt}$$

Ce paramètre simple est une bonne approximation de la moyenne du courant résiduel réel (courant de Lagrange en coordonnées barycentriques). Il est également représentatif du déplacement des particules les plus fines transportées en suspension, telles les vases, les micro-organismes ou les larves d'animaux, par exemple.

A l'échelle de l'archipel, on observe des mouvements particulièrement rapides dans le secteur de Saint-Pierre (à l'Est de l'île ou dans la partie centrale de la baie), à l'Ouest de Miquelon (secteur des Veaux Marins), ainsi qu'aux environs de la pointe aux Soldats. On relève également des zones à très faible courant résiduel, notamment de part et d'autre de l'isthme de Langlade.

Dans le secteur Nord de Miquelon, les calculs mettent en évidence la trace des tourbillons du Cap du Nid à l'Aigle et un cheminement assez rapide au long du littoral, en direction de la Pointe aux Soldats. Des tourbillons, bien que parcourus assez rapidement, ont tendance à piéger les eaux qu'ils renferment et à les confiner (ici, partiellement).

Dans l'anse de Miquelon, proprement dite, on observe que l'eau se renouvelle lentement, par un courant résiduel d'Ouest, selon son axe central. Elle repart ensuite au long du rivage, soit en direction du Cap du Nid à l'Aigle, où une fraction sera piégée dans le tourbillon puis reviendra par le centre de la baie, soit vers l'Est en direction de la Pointe aux Soldats où elle sera définitivement évacuée vers le Sud de l'archipel.

*SALOMON J.C., BRETON M., 1991. Courants résiduels de marée dans la Manche. *Oceanologica Acta*, vol. Sp., 11 : 47-53.

SALOMON J.C. et al, 1996. The lagrangian barycentric method to compute 2D and 3D long term dispersion in tidal environments. In : *Mixing in Estuaries and Coastal Seas*, Charitha Pattiaratchi Ed, Coastal and Estuarine Studies vol 50, American Geophysical Union, Washington, DC. Pages 59-76.

3.1.4 Indice de stratification

Par construction, un modèle bidimensionnel ne peut décrire une éventuelle stratification verticale des masses d'eau. Mais il peut fournir des indications sur la "potentialité" d'un secteur à présenter cette particularité dans des circonstances favorables. Le raisonnement se fonde sur la densité d'énergie turbulente disponible pour dissiper par mélange une stratification qui résulterait d'un réchauffement superficiel ou d'un gradient de salinité.

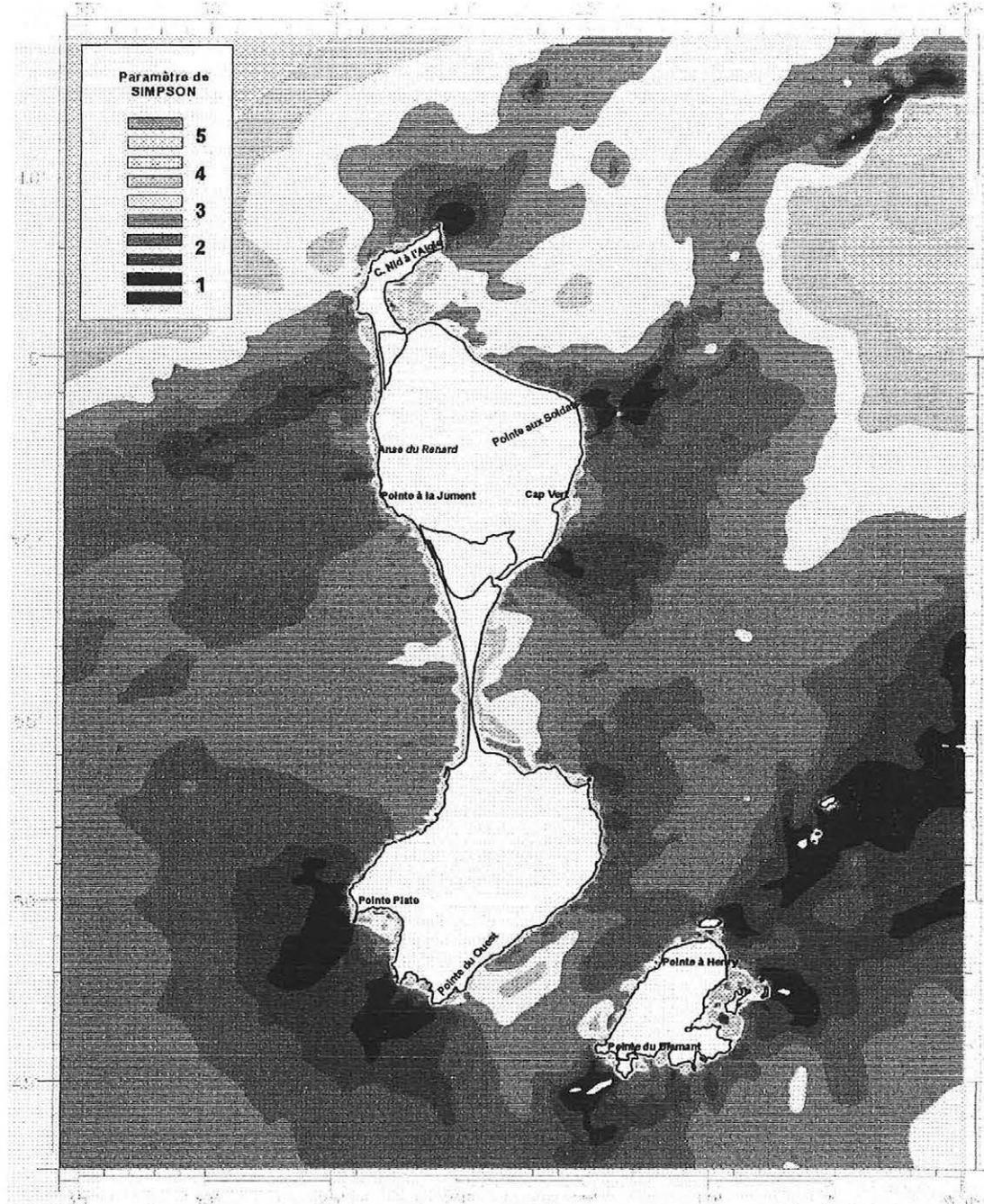


Figure 26 : Indice de stratification dans l'archipel

La force de frottement de fond étant proportionnelle au carré de la vitesse instantanée, la densité d'énergie turbulente disponible dans le fluide est proportionnelle au rapport V^3/H . Par usage, on se référera au rapport S (dit de Simpson), qui s'exprime comme suit :

$$S = \text{Log} \left(\frac{H}{C_d V^3} \right)$$

C_d est le coefficient de frottement de fond, V est la vitesse du courant et H la hauteur d'eau (moyenne).

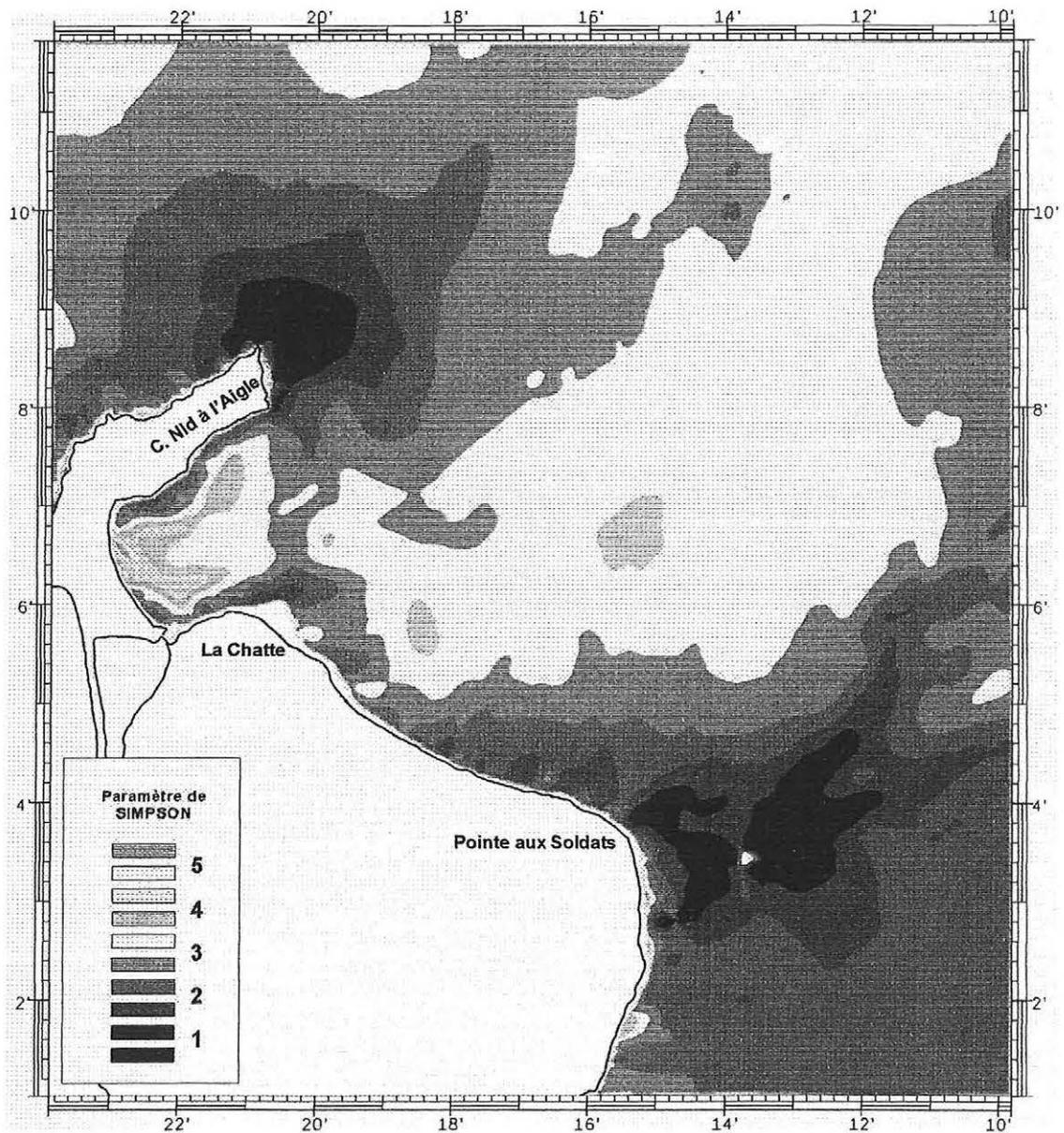


Figure 27 : Indice de stratification au Nord de Miquelon

Selon des observations faites en Manche, si ce coefficient est inférieur à 1, c'est à dire si la turbulence est prépondérante, la masse d'eau sur la zone concernée reste hydrologiquement homogène en permanence. Si le paramètre est supérieur à 2, le flux de chaleur absorbé par la surface libre domine et la colonne d'eau peut se stratifier pendant la période estivale.

Il n'est pas certain que ces valeurs critiques obtenues de manière empirique en Manche demeurent valables pour la région de Terre-Neuve. Les conclusions resteront donc partiellement qualitatives. La cartographie de ce paramètre révélant des tendances plus que de véritables classement.

Les résultats obtenus rappellent certains traits des cartes de vitesses maximales. Les secteurs à forts courants et faible profondeur seront effectivement le siège de déstratifications, en toutes circonstances (Cap du Nid à l'Aigle, Rochers de l'Est, extrémité Sud de Langlade et de Saint-Pierre, secteur de l'île verte, etc.).

Ils mettent également en évidence des secteurs susceptibles de se stratifier, principalement en été. C'est notamment le cas de l'anse de Miquelon où le coefficient S atteint des valeurs très élevées, de l'ordre de 4. Il est très vraisemblable que ce secteur se stratifie au printemps dès les premiers beaux jours.

3.2 Effets du vent

3.2.1 Généralités et caractéristiques des simulations

Après la marée, le vent est généralement le second moteur le plus important de la courantologie sur les façades océaniques. Il crée simultanément une pente de la surface libre à moyenne échelle qui se traduit par des courants barotropes, ainsi que des mouvements différentiels sur la verticale, notamment des mouvements verticaux près des côtes. La première composante peut être assez bien décrite par un modèle bidimensionnel, la seconde ne le serait que par un calcul tridimensionnel.

On utilisera ici le modèle bidimensionnel général pour déterminer l'impact du vent sur la courantologie générale. On se situera pour cela en condition de marée moyenne.

Deux simulations sont proposées ci-dessous :

- La première traduit la situation moyenne d'été. Elle combine une marée moyenne (marnage 1.25 m) et un vent uniforme et constant de 5 m/s (18 km/h) dans la direction 210°,
- La seconde représente une situation moyenne d'hiver. Elle combine la même marée moyenne (marnage 1.25 m) et un vent uniforme et constant de 5 m/s dans la direction 280°.

On a extrait de ces simulations les cartographies des vitesses maximales et des courants résiduels.

3.2.2 Courant maximum

En été, les courants instantanés restent dominés par la marée. La comparaison du courant maximum enregistré avec la situation de marée pure (figure n° 22) montre surtout une diminution générale de l'intensité des vitesses, approximativement dans le rapport des marnages (rapport de 0.6). Mais l'effet du vent se fait également sentir un peu partout et modifie ce schéma, parfois d'une manière surprenante :

- De part et d'autre de Miquelon (à l'Est comme à l'Ouest), le courant qui avait jusqu'ici une prédominance de jusant (Sud), se trouve désormais dominé par le flot (Nord), ce qui est logique,
- Dans le chenal de la Baie (entre Saint-Pierre et Langlade) le courant de Sud-ouest fort est quasiment interrompu,
- En bordure Nord du Cap Miquelon, la vitesse maximum est désormais orientée à l'Est, alors qu'elle était précédemment orientée à l'Ouest, ce qui peut paraître surprenant, mais traduit certainement un mouvement général de plus grande échelle, emmenant les eaux de la baie Fortune vers le Nord,
- A l'échelle de la baie de Miquelon, on n'observe guère d'impact du vent, mais presque exclusivement une diminution d'intensité correspondant à la diminution d'amplitude de la marée. On rappelle Toutefois qu'il ne s'agit ici que du résultat d'un modèle bidimensionnel. Celui-ci est inapte à décrire l'effet d'un vent perpendiculaire à la côte, ce qui est le cas ici. Dans la réalité, il est très probable que le vent de Sud-ouest poussera les eaux de surface vers le Nord-est et inversement pour les eaux du fond. La résultante moyenne est à peu près nulle, ce que retrouve bien le modèle bidimensionnel.

En hiver, à force égale, le vent d'Ouest-nord-ouest, considéré représentatif de cette période, semble avoir moins d'effet sur les courants instantanés que le vent d'été. On retrouve donc un schéma des vitesses maximum qui pour l'essentiel reprend celui de la marée seule. On retrouve notamment la prédominance du jusant (vers le Sud) à l'Est de Miquelon et le courant de Sud-ouest entre Langlade et Saint-Pierre.

3.2.2.1 Vitesse maximum en été

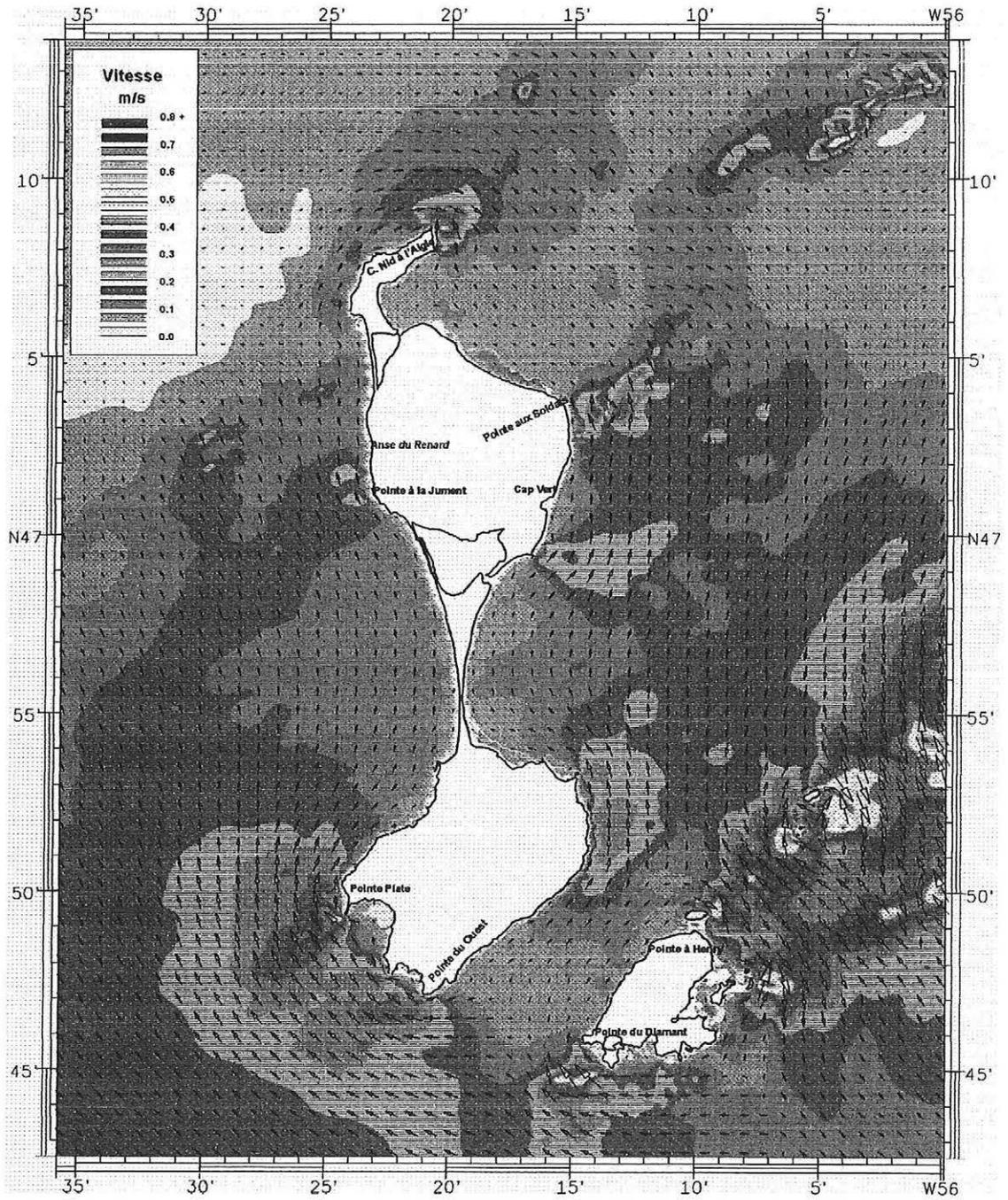


Figure 28 : Carte des vitesses maximales en marée moyenne et vent d'été

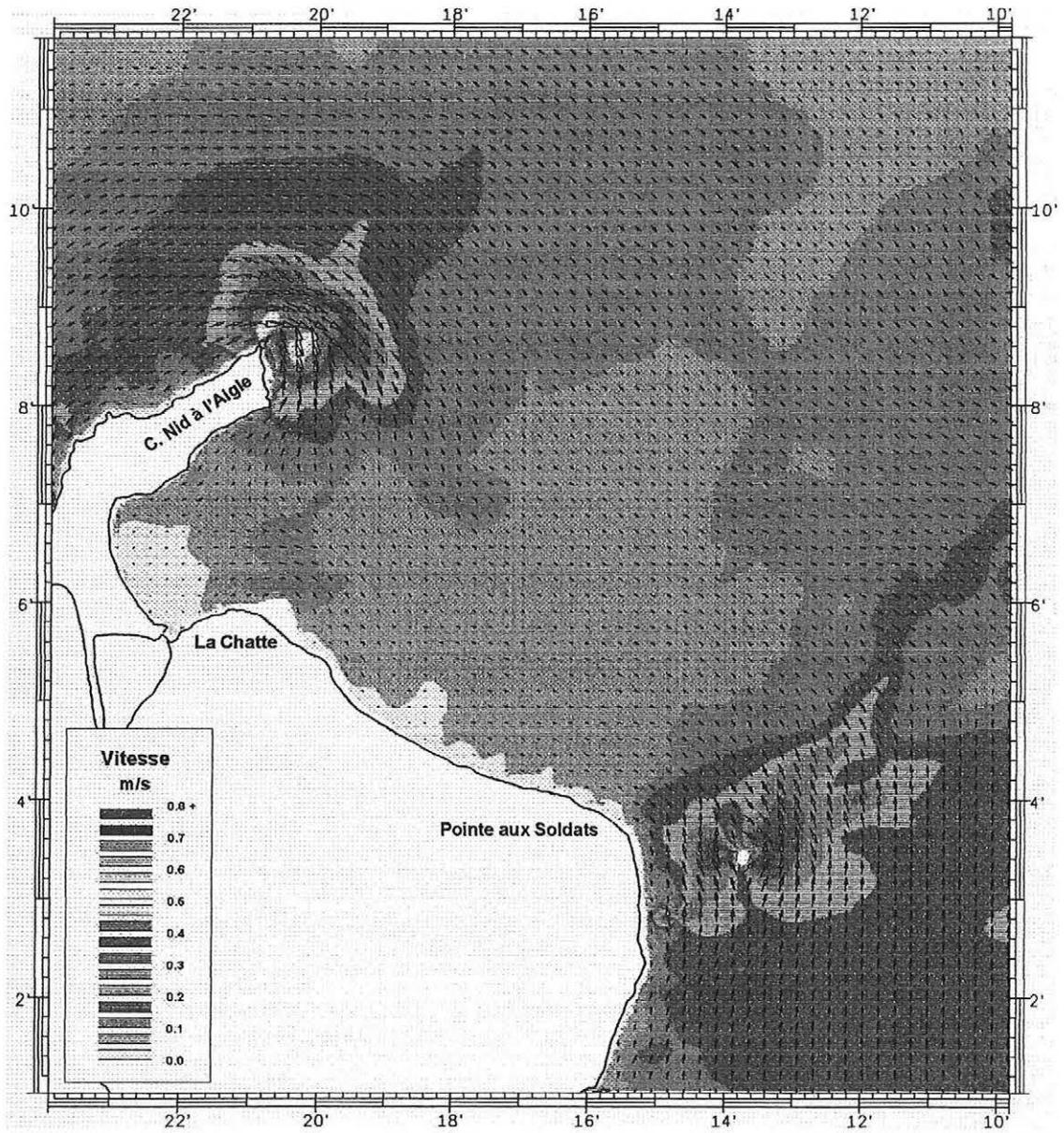


Figure 29 : Carte des vitesses maximales en marée moyenne et vent d'été, au Nord de Miquelon

3.2.2.2 Vitesse maximum en hiver

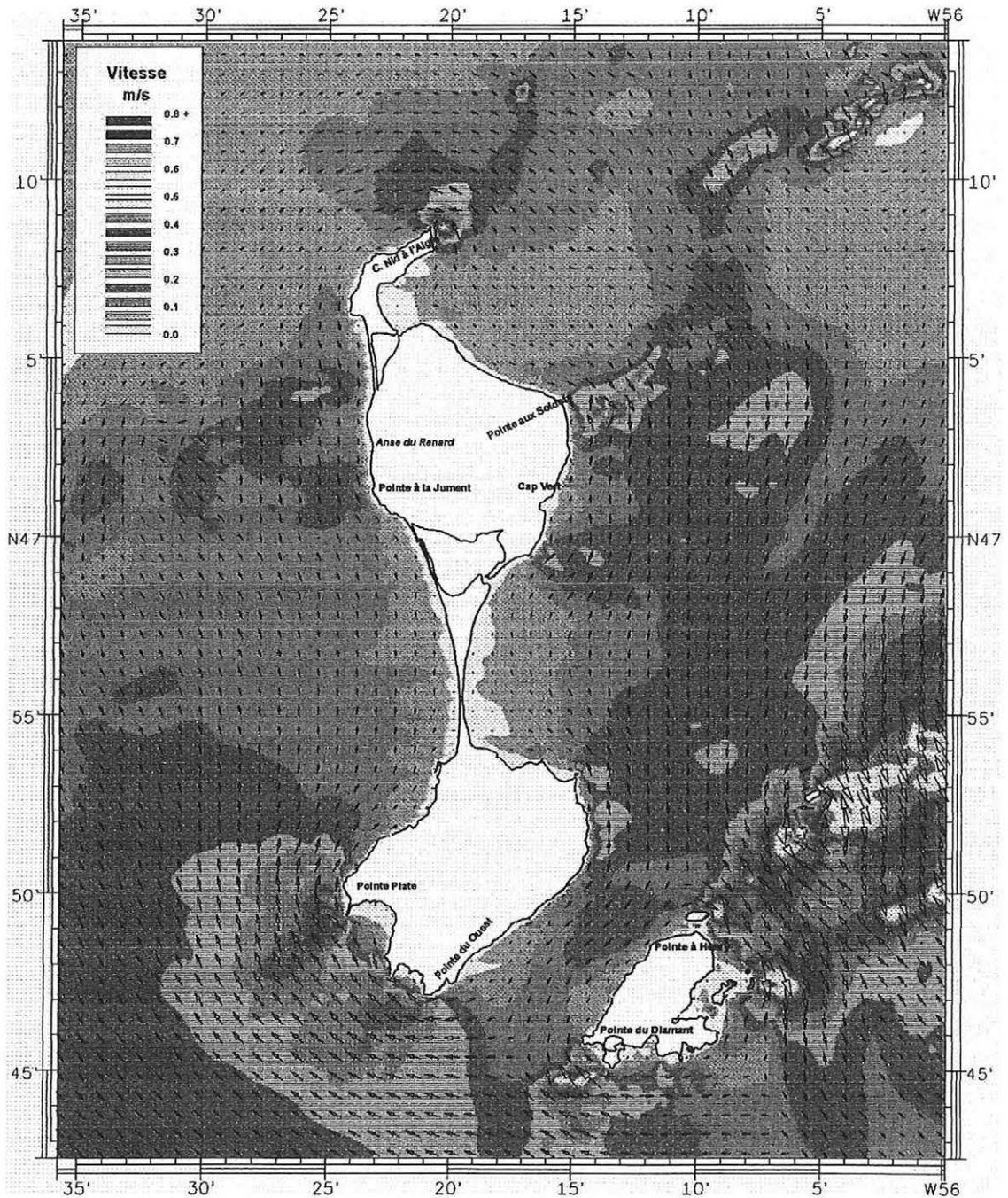


Figure 30 : Carte des vitesses maximales en marée moyenne et vent d'hiver

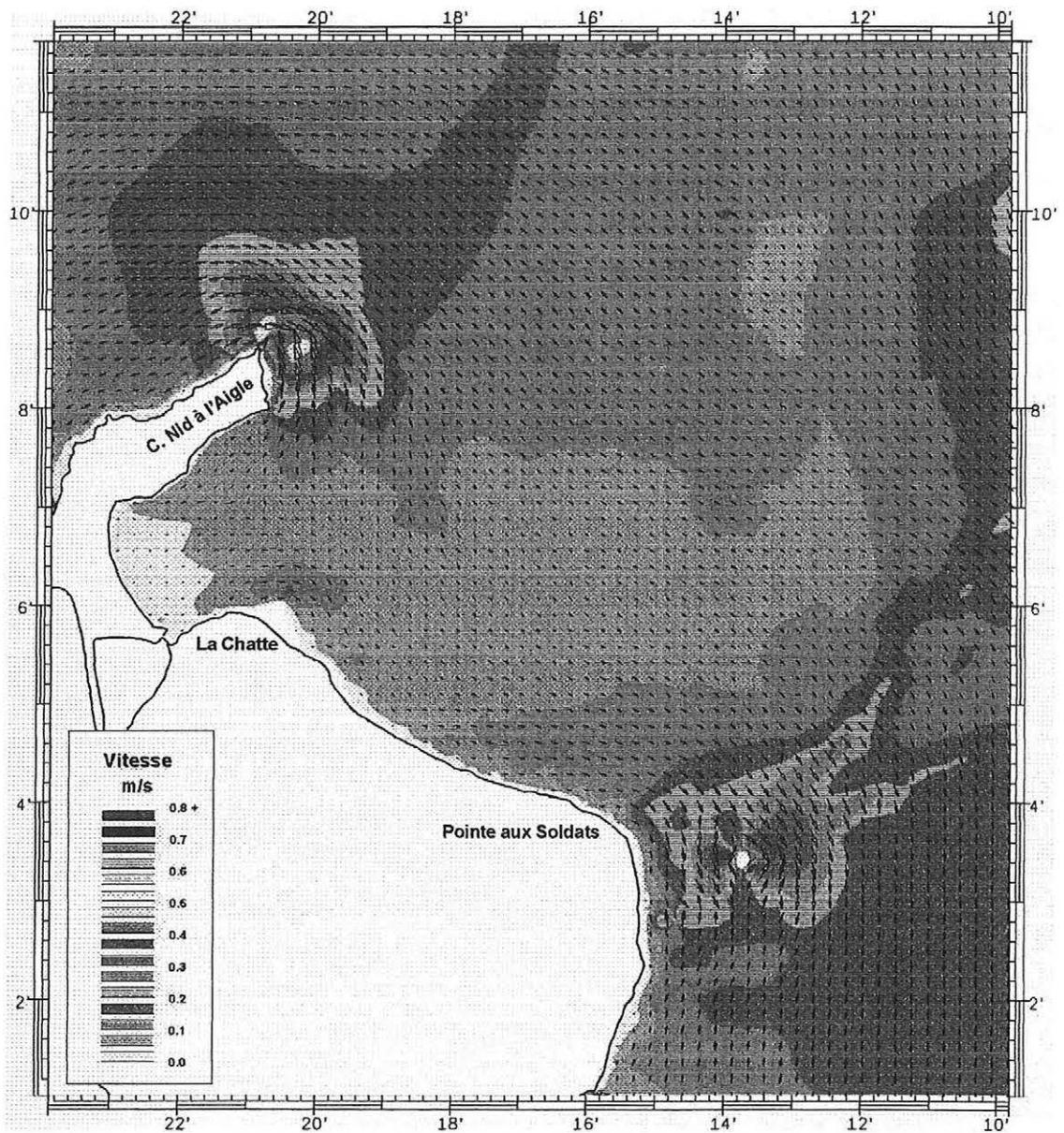


Figure 31 : Carte des vitesses maximales en marée moyenne et vent d'hiver, au Nord de Miquelon

3.2.3 Courant résiduel

Le courant résiduel est beaucoup plus sensible à l'effet du vent que le courant instantané.

En été, les effets de rectification de marée (interaction de la marée et de la bathymétrie), grossièrement proportionnels au carré de l'amplitude, sont désormais très atténués. C'est notamment le cas sur les hauts fonds ainsi qu'à proximité des caps.

On observe surtout un mouvement général vers le Nord qui longe la petite et la grande Miquelon, en s'accéléralant sur les hauts fonds. Ainsi, le courant devient désormais assez rapide de part et d'autre de l'isthme de Langlade. Par contre, à l'est de Saint-Pierre et sur les hauts-fonds de l'île verte, l'effet de marée demeure prépondérant (pour cette force de vent).

Au Nord de Miquelon, les tourbillons résiduels du Cap du Nid à l'Aigle se trouvent atténués et la dérive des eaux s'effectue en direction du Nord, approximativement dans le lit du vent.

La même remarque vaut pour l'hiver. Les courants résiduels sont très peu influencés par le vent d'Ouest. On retrouve donc le courant général dirigé vers le Sud, très faible de part et d'autre de l'isthme de Miquelon, mais rapide de part et d'autre de Saint-Pierre et au Nord-est de Miquelon, ainsi qu'à l'Ouest (secteur des Veaux Marins).

Dans l'anse de Miquelon proprement dite, le vent d'Ouest contrarie un peu le courant central d'Ouest qui renouvelle l'eau du fond de baie, mais on retrouve bien le double tourbillon de la pointe du Nid à l'Aigle ainsi que le courant d'Est au long de la côte de la Chatte aux Rochers de l'Est.

3.2.3.1 Courant résiduel en été



Figure 32 : Carte des courants résiduels en marée moyenne et vent d'été

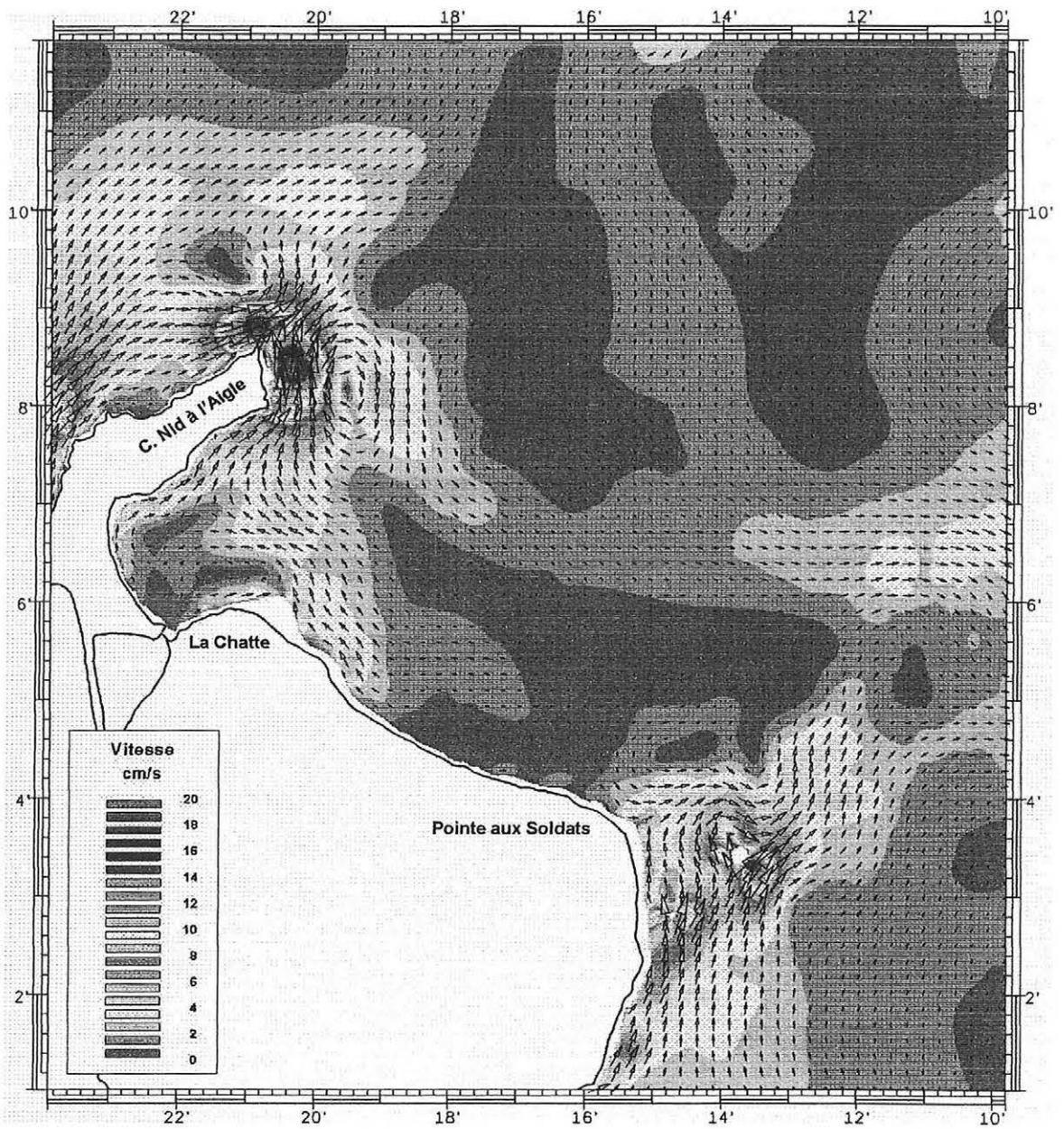


Figure 33 : Carte des courants résiduels en marée moyenne et vent d'été, au Nord de Miquelon

3.2.3.2 Courant résiduel en hiver

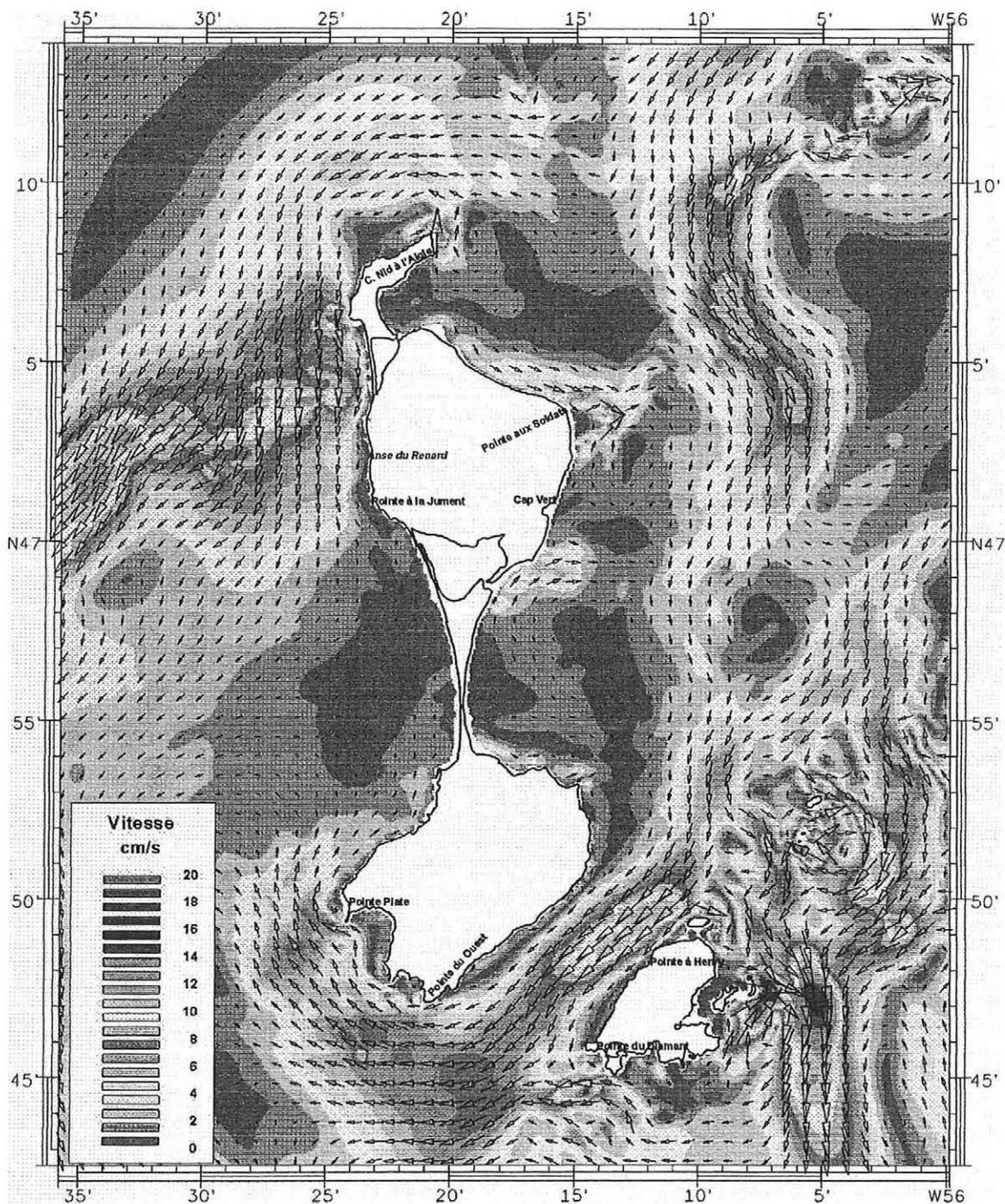


Figure 34 : Carte des courants résiduels en marée moyenne et vent d'hiver

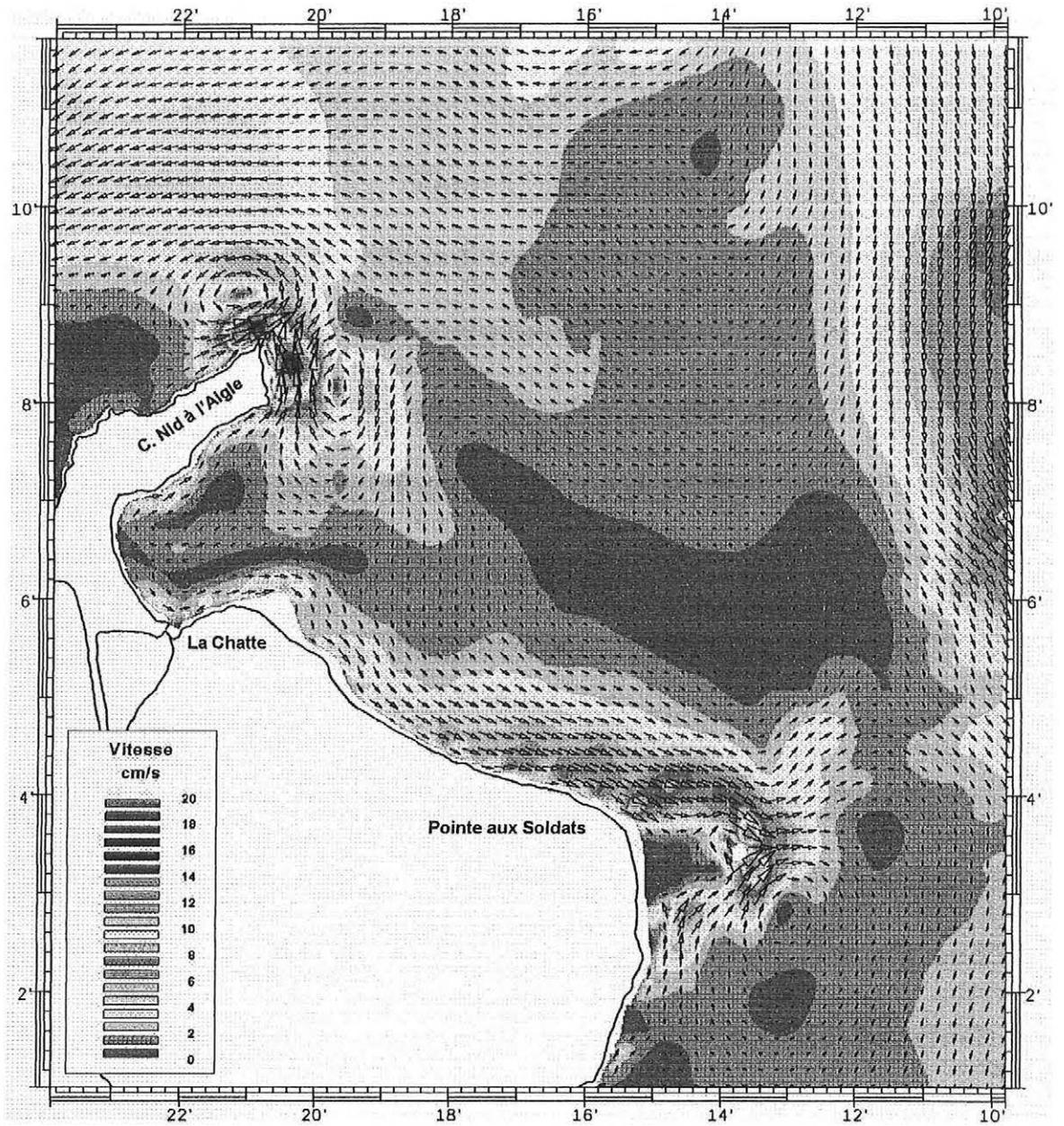


Figure 35 : Carte des courants résiduels en marée moyenne et vent d'hiver, au Nord de Miquelon

4 Conclusion

Situé à l'extrémité Nord du banc de Saint-Pierre et entouré à faible distance de profondeurs importantes, l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon possède une bathymétrie tourmentée. Bien qu'étant partiellement abrité des courants généraux par l'île de Terre-Neuve et notamment la presqu'île de Burin, il est donc le siège d'une courantologie très complexe due essentiellement à la marée et dans une moindre mesure au vent.

La marée, de type semi-diurne et d'une amplitude assez modeste a au large une structure d'onde progressive. Elle crée dans l'archipel des courants d'un ordre de grandeur un nœud qui interagissent avec la bathymétrie pour créer de nombreuses structures littorales (contre-courants, tourbillons, etc.).

A l'échelle de l'archipel, les courants se renversent aux alentours de PM+3h30 et de BM+3h30. Le flot encadre la pleine mer et le jusant se produit aux alentours de la basse mer. Le flot est dirigé vers le Nord ou le Nord-ouest et le jusant vers le Sud ou le Sud-est.

En bordure de littoral, le déphasage entre renverses et étales se réduit. C'est le cas au Sud de Langlade, au Sud de Saint-Pierre ainsi qu'à l'Est de l'isthme de Langlade et au Sud-est de Miquelon. Il se crée alors momentanément des contre-courants côtiers.

Mais, l'archipel est surtout un obstacle en travers du courant général de marée. Celui-ci contourne les différentes îles et îlots, créant des courants hétérogènes et notamment des tourbillons derrière les obstacles. C'est notamment le cas du Cap Miquelon, de la pointe aux Soldats, de la Pointe Plate et de la Pointe à Henry.

Dans le chenal de La Baie, contre-courants et tourbillons se superposent. Au long du littoral de Langlade, le courant est soit nul soit orienté au Nord-est. Plus près de Saint-Pierre il est toujours orienté au Sud-ouest. Entre ces deux veines, il est toujours très faible, sinon nul. Quant à la bordure littorale de Saint-Pierre, elle n'est le siège que d'un courant souvent très faible, majoritairement orienté au Sud-ouest, mais momentanément dirigé en sens inverse.

Dans ce contexte général, le modèle de détail permet d'affiner la courantologie dans le secteur Nord de Miquelon.

Au centre de la zone, les renverses se produisent à PM+4h30 et BM+4h. Durant cette période qui correspond au jusant au large, le courant au long de la côte Nord est toujours dirigé à l'Est et sa vitesse varie peu. De manière symétrique, le courant côtier entre le fond de l'anse de Miquelon et le Cap du Nid à l'Aigle est toujours orienté au Nord-est. Devant ce cap, naît un tourbillon qui grandit progressivement, s'éloigne de la pointe et disparaît à BM+4h.

La divergence du courant littoral en fond de baie est compensée par un courant de direction Sud-ouest à égale distance des deux rives.

De BM+5h à PM+5h, au Nord de la zone, le courant correspond au flot (ici, courant de Nord-ouest). Un tourbillon apparaît au Nord du Cap du Nid à l'Aigle qui selon la dynamique habituelle, grandit, s'écarte progressivement de la côte et disparaît à PM+5h. Il laisse alors la place au jusant.

Il est remarquable de constater que depuis l'Anse de Miquelon jusqu'à la Pointe aux Soldats, le courant ne se renverse pas. Il demeure orienté à l'Est. De même, au long du Cap du Nid à l'Aigle, le courant reste au Nord-est. Ces courants littoraux sont ainsi des courants permanents de marée.

Les courants au point fixe et les trajectoires donnent une vision complémentaire de ces champs synoptiques. On y retrouve la grande variabilité spatiale déjà mentionnée : Courant presque alternatif avec une résiduelle Ouest au Nord de Miquelon, courant presque permanent avec une dérive Sud autour de Saint-Pierre, ainsi qu'à l'Est de Miquelon, forte dérive vers le Nord, à l'Ouest de Langlade, etc.

La même représentation dans la région Nord de Miquelon précise ces résultats, notamment la dérive littorale sans renverse dirigée vers la Pointe aux Soldats, la forte dérive vers le Sud à l'Est de l'île et surtout la complexité des trajectoires dans la baie de Miquelon.

La cartographie de l'intensité maximum du courant de marée met en lumière les zones à forts courants, particulièrement le secteur des îlots de l'île Verte et le chenal qui les séparent de Saint-Pierre, ainsi que les hauts fonds au Sud-ouest de la pointe du Diamant et des pointes Plates et du Ouest. Au Nord de Miquelon, les courants les plus forts se produisent au Nord-est du Cap du Nid à l'aigle (environ 1.5 nœud, vers le Sud-est), ainsi qu'à l'Est de la Pointe aux Soldats (0.65 m/s dans le Sud-est).

A l'inverse, le secteur Nord de Miquelon, hors du voisinage des caps du Nid à l'Aigle et de la Pointe aux Soldats, n'est le siège que de courants faibles, généralement inférieurs à 0.2 m/s. Le maximum est orienté au Sud-est, sauf à l'intérieur de la baie de Miquelon proprement dite et à proximité du cap du Nid à l'Aigle.

Ces courants de marée engendrent des courants résiduels de l'ordre de 5 à 10 cm/s, voire davantage. A l'échelle de l'archipel, ils sont particulièrement rapides dans le secteur de Saint-Pierre, à l'Ouest de Miquelon et aux environs de la pointe aux Soldats. On note par contre des zones à très faible courant résiduel, notamment de part et d'autre de l'isthme de Langlade.

Dans le secteur Nord de Miquelon, on retrouve la trace des tourbillons du Cap du Nid à l'Aigle et un cheminement littoral assez rapide, en direction de la Pointe aux Soldats.

Dans l'anse de Miquelon, proprement dite, l'eau se renouvelle lentement, par un courant résiduel d'Ouest, selon son axe central. Elle repart ensuite au long du rivage, soit en direction du Cap du Nid à l'Aigle, soit vers l'Est en direction de la Pointe aux Soldats où elle est définitivement évacuée vers le Sud de l'archipel.

L'indice de stratification de Simpson révèle que les secteurs à forts courants et faible profondeur seront effectivement le siège d'une homogénéisation permanente des masses d'eau (Cap du Nid à l'Aigle, Rochers de l'Est, extrémité Sud de Langlade et de Saint-Pierre, secteur de l'île verte, etc.). A l'inverse, l'anse de Miquelon où le coefficient atteint des valeurs très élevées (de l'ordre de 4) sera très vraisemblablement stratifié au printemps dès les premiers beaux jours.

Le vent modifie davantage cette courantologie en été (direction Sud-ouest), qu'en hiver (direction Nord-ouest).

En été, les courants instantanés restent dominés par la marée, mais le vent les modifie, parfois d'une manière surprenante :

- De part et d'autre de Miquelon, le courant qui avait une prédominance de jusant (Sud), se trouve dominé par le flot (Nord),
- Dans le chenal de la Baie (entre Saint-Pierre et Langlade) le courant de Sud-ouest fort est quasiment interrompu,
- En bordure Nord du Cap Miquelon, la vitesse maximum est désormais orientée à l'Est.

A l'échelle de la baie de Miquelon, cette modélisation bidimensionnelle ne met pas en évidence l'impact du vent.

A force égale, le vent moyen d'hiver (direction Ouest-nord-ouest) a moins d'effet que le vent d'été. On retrouve donc un schéma courantologique qui pour l'essentiel reprend celui de la marée seule.

Le courant résiduel est plus sensible à l'effet du vent que le courant instantané.

En été, on observe surtout un mouvement général vers le Nord qui longe la petite et la grande Miquelon, en s'accéléralant sur les hauts fonds. Ainsi, le courant devient désormais assez rapide de part et d'autre de l'isthme de Langlade.

Au Nord de Miquelon, la dérive des eaux s'effectue en direction du Nord, approximativement dans le lit du vent.

En hiver, les courants résiduels sont peu influencés par le vent d'Ouest. On retrouve le courant général dirigé vers le Sud, très faible de part et d'autre de l'isthme de Miquelon, mais rapide de part et d'autre de Saint-Pierre et au Nord-est de Miquelon, ainsi qu'à l'Ouest. Dans l'anse de Miquelon, le vent d'Ouest contrarie un peu le courant central d'Ouest qui renouvelle l'eau du fond de baie. On retrouve le double tourbillon de la pointe du Nid à l'Aigle ainsi que le courant d'Est au long de la côte, de la Chatte aux Rochers de l'Est.

Cette étude montre que la courantologie dans l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon, dominée par la marée est extrêmement complexe. Ce résultat est assez inattendu, compte tenu de l'amplitude de la marée, somme toute assez modeste. On retrouve dans la description ci-dessus des mécanismes auxquels on est plus habitués dans les secteurs à fort marnage, comme la Manche par exemple.

On ajoutera que la description des effets de vent n'est ici que partielle, compte tenu du type de modélisation pas vraiment adapté à cette problématique. Il faut donc s'attendre à ce que certains mécanismes aient été omis. La courantologie complète devrait être encore plus complexe. Une modélisation 3D pourrait le montrer.

Enfin, les mécanismes de dispersion n'ont pas été décrits ici. Ils sont probablement importants compte tenu des forts cisaillements de vitesse. Leur description pourrait apporter d'autres informations utiles pour la compréhension et la prévision des phénomènes de mélange et de renouvellement des eaux.

5 Annexes

5.1 Les courants de marée en vive eau

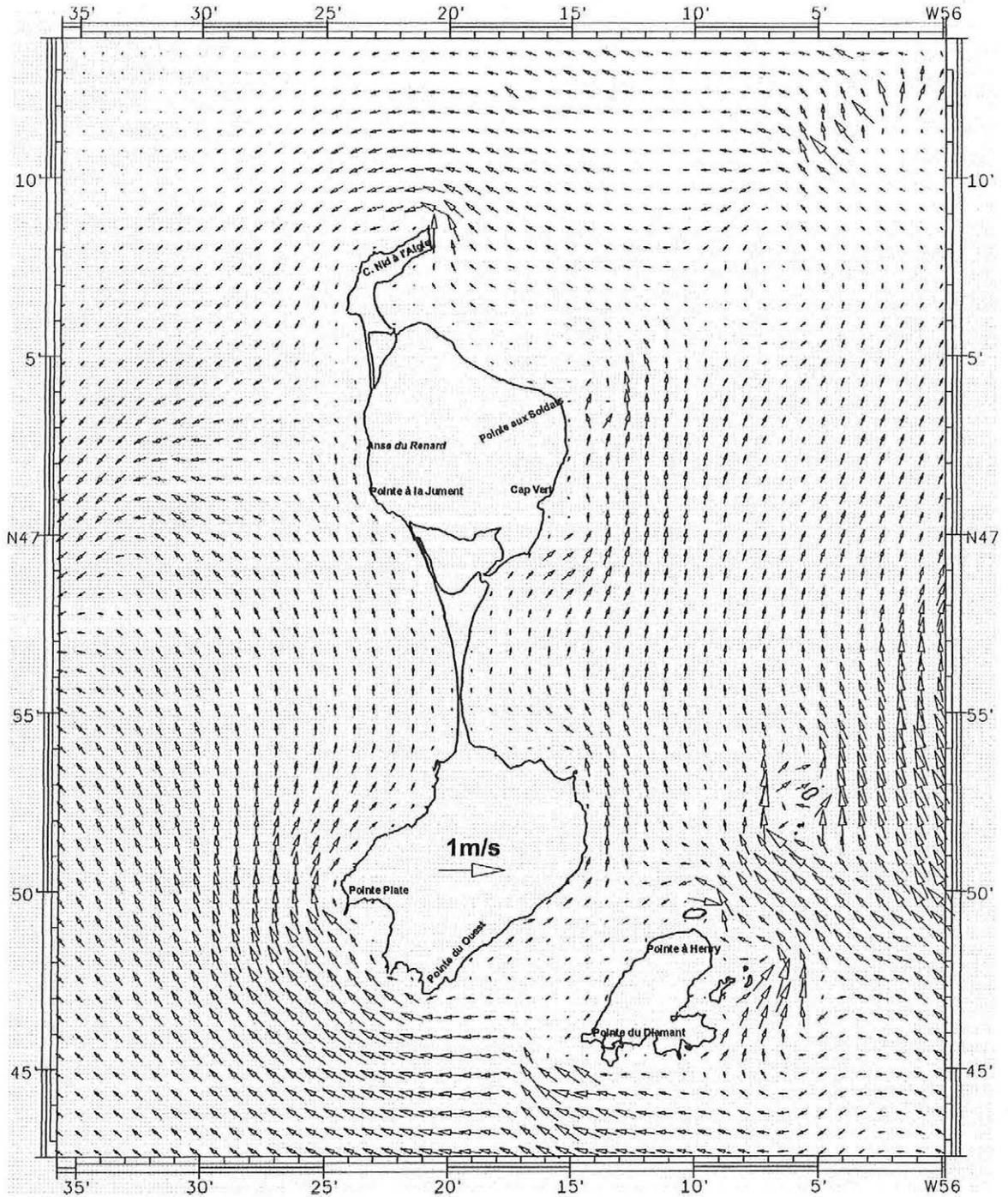


Figure 36 : Pleine mer

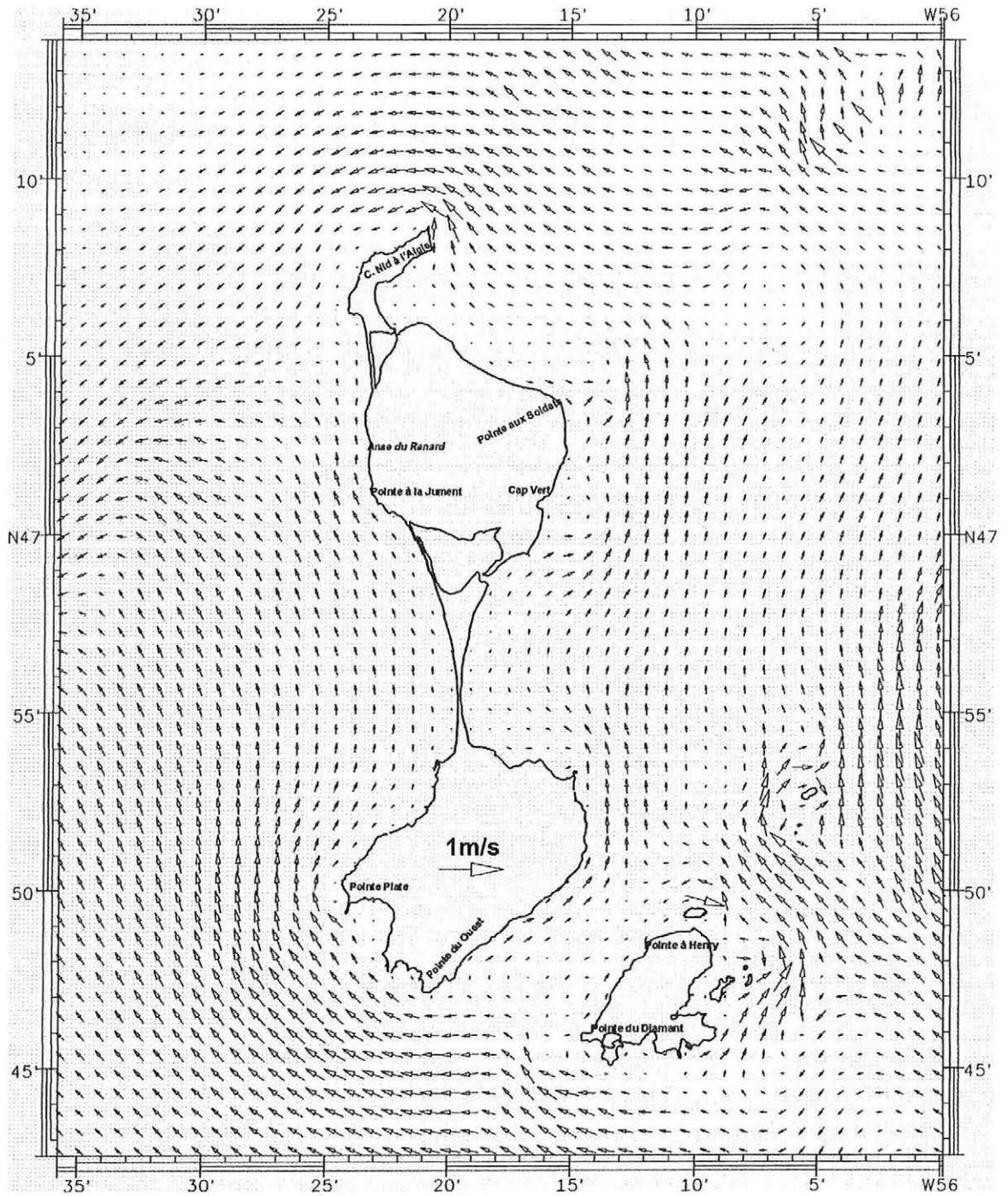


Figure 37 : Pleine mer + 1h

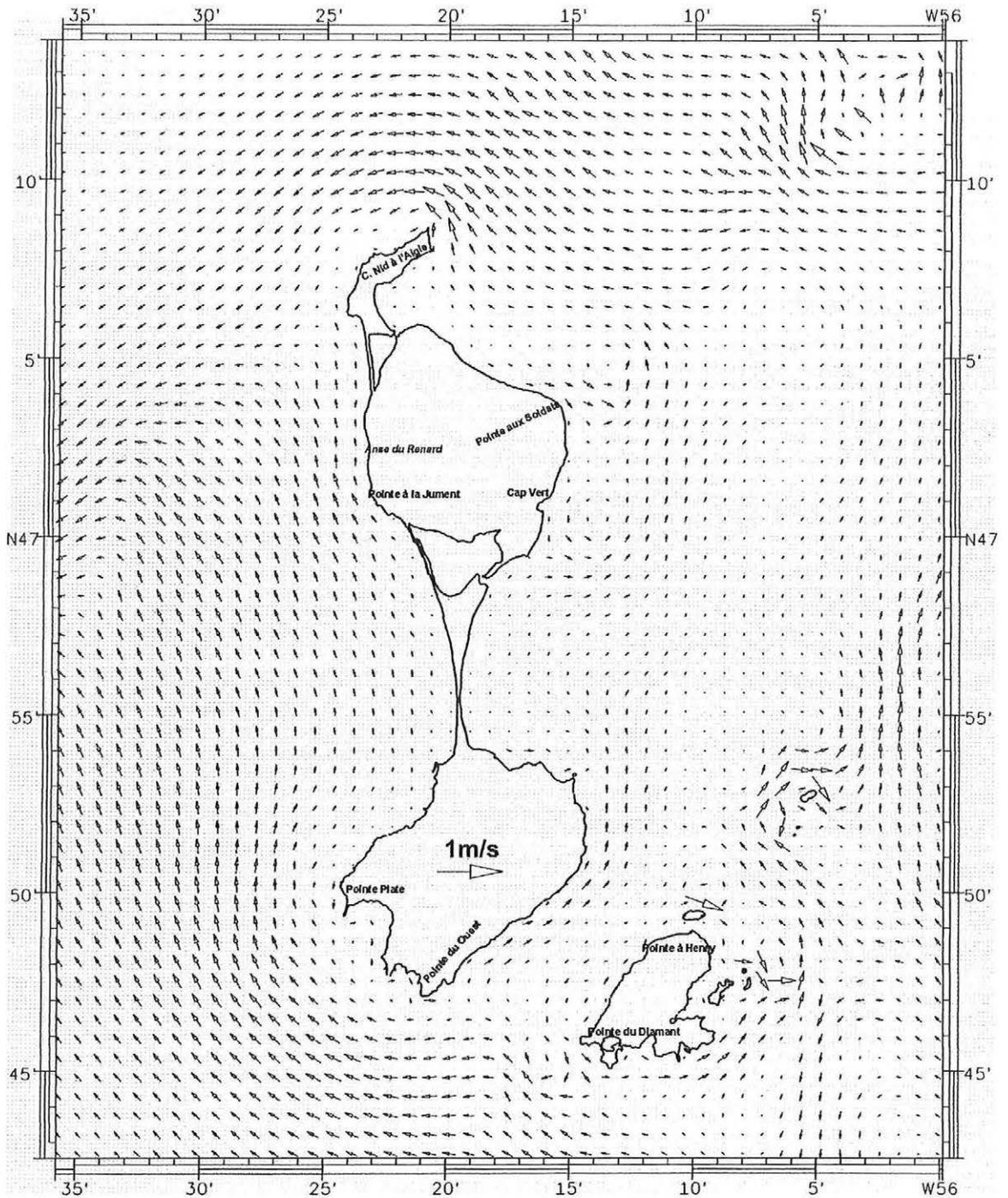


Figure 38 : Pleine mer + 2h

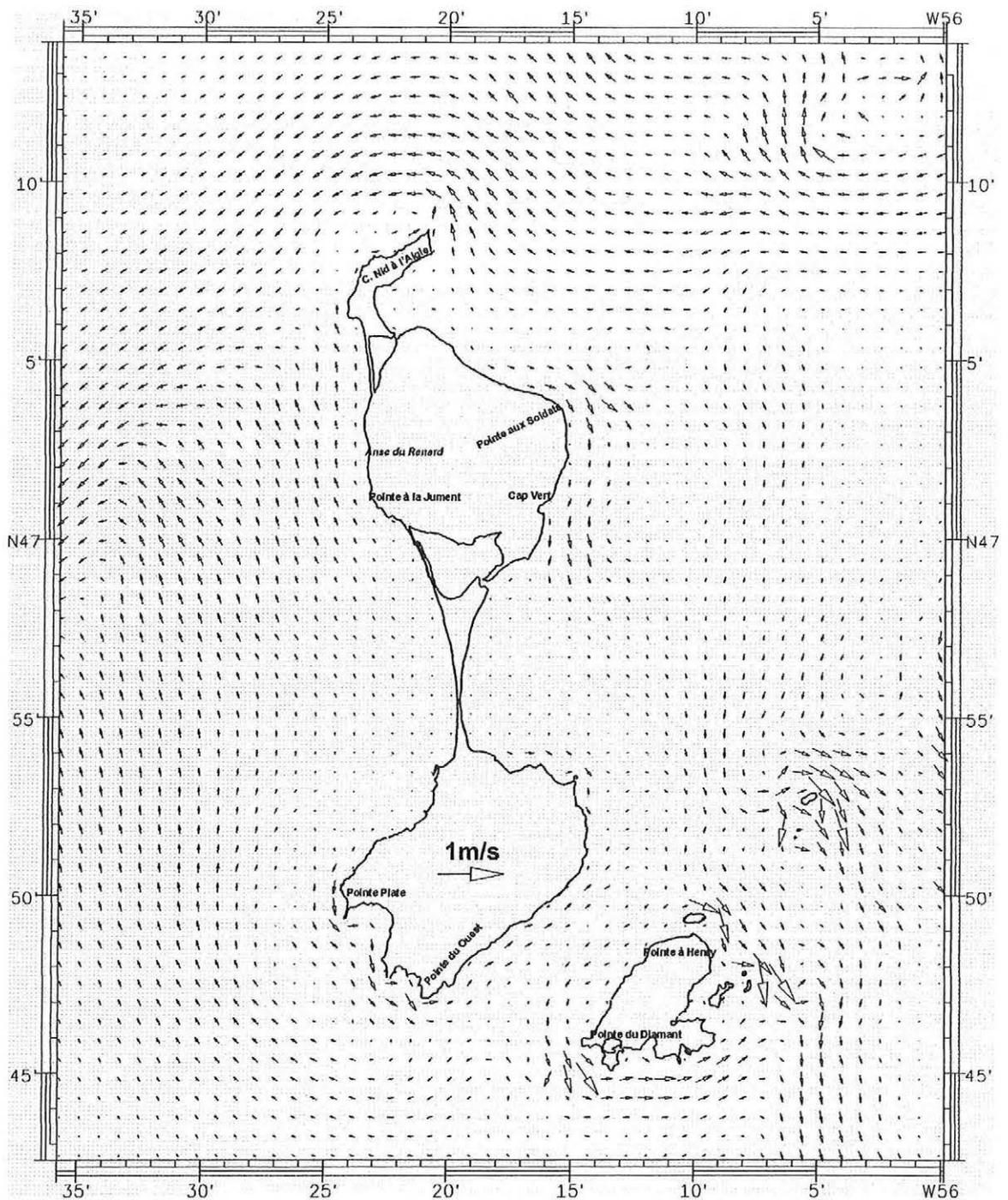


Figure 39 : Pleine mer + 3h

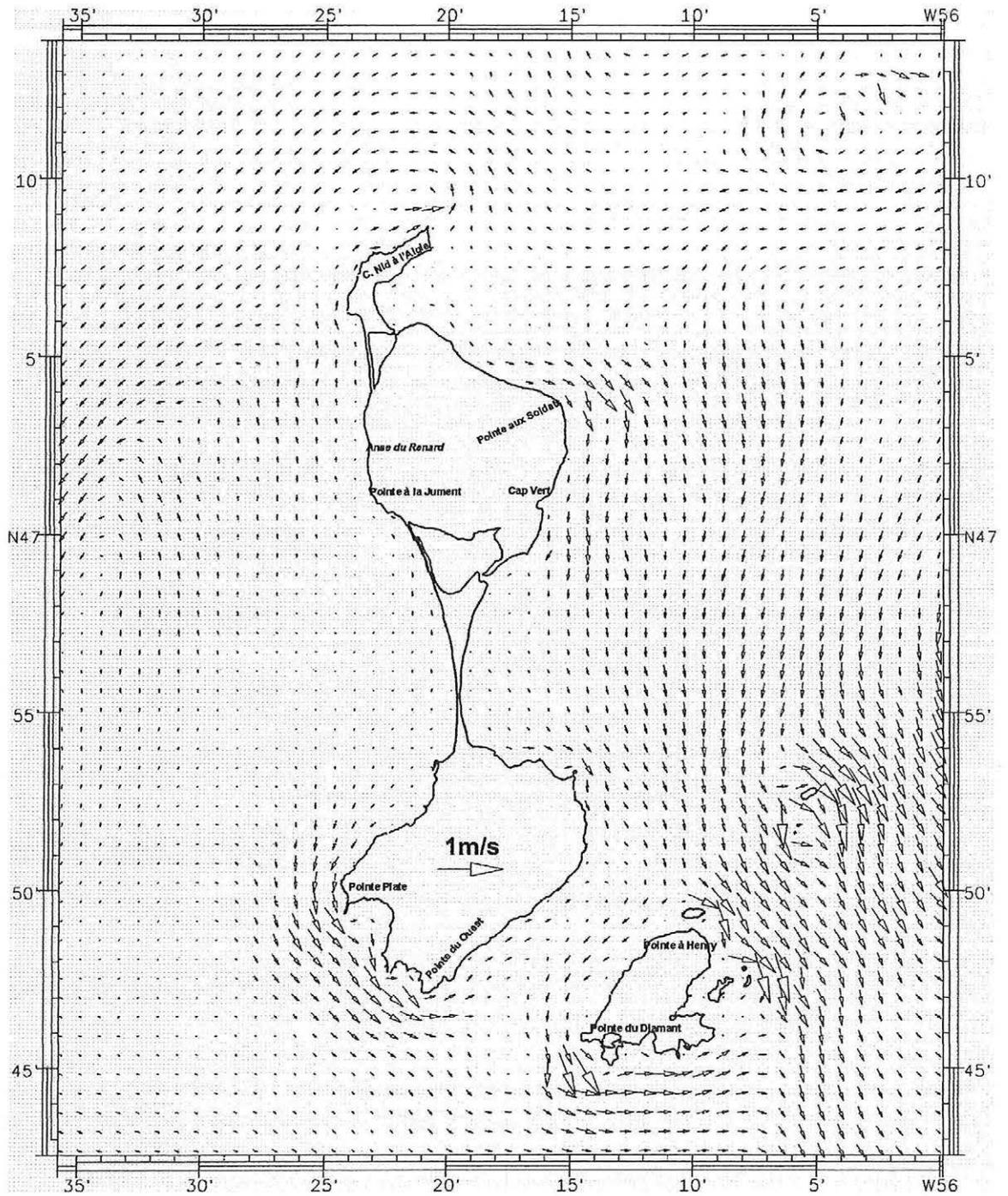


Figure 40 : Pleine mer + 4h

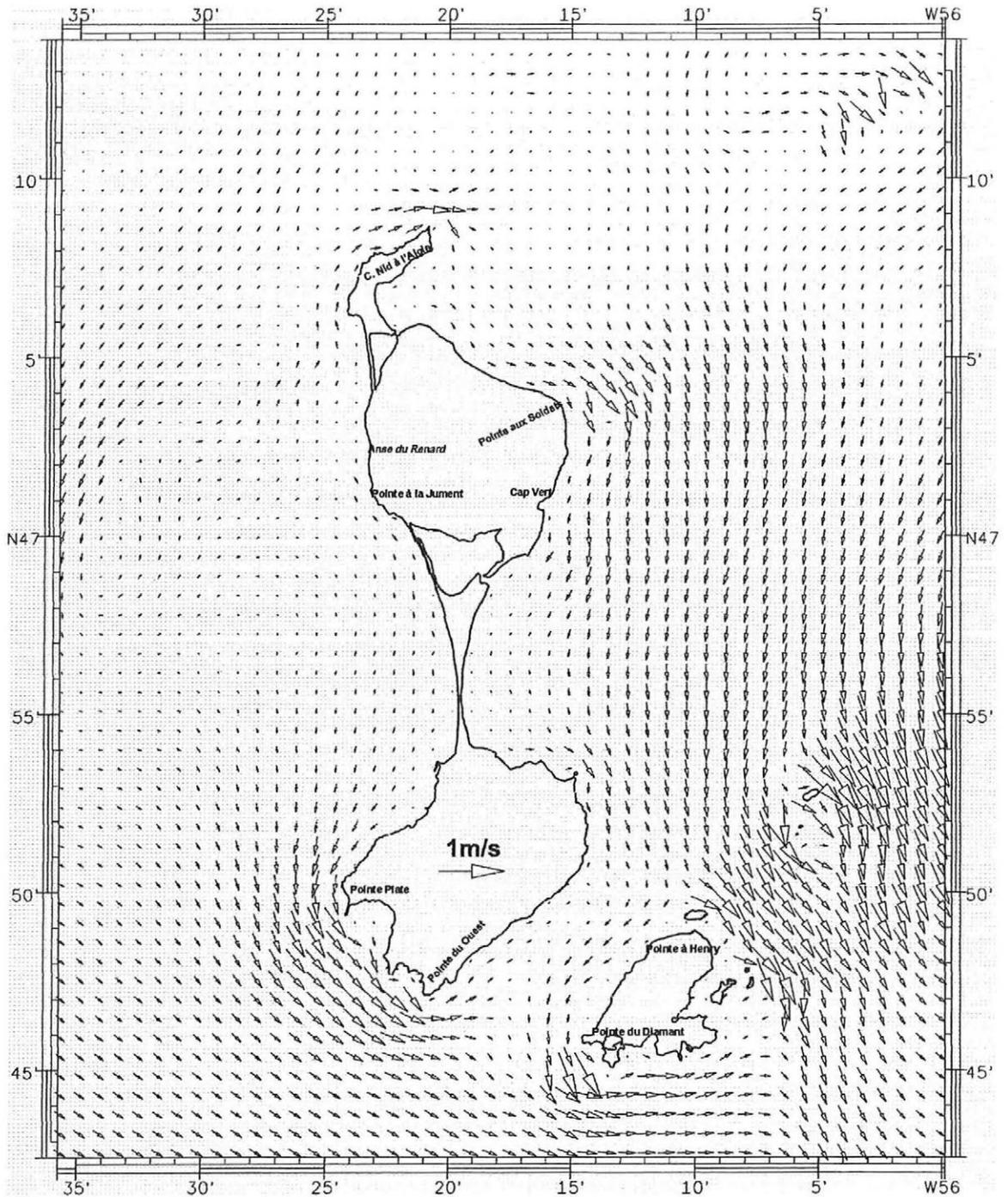


Figure 41 : Pleine mer + 5h

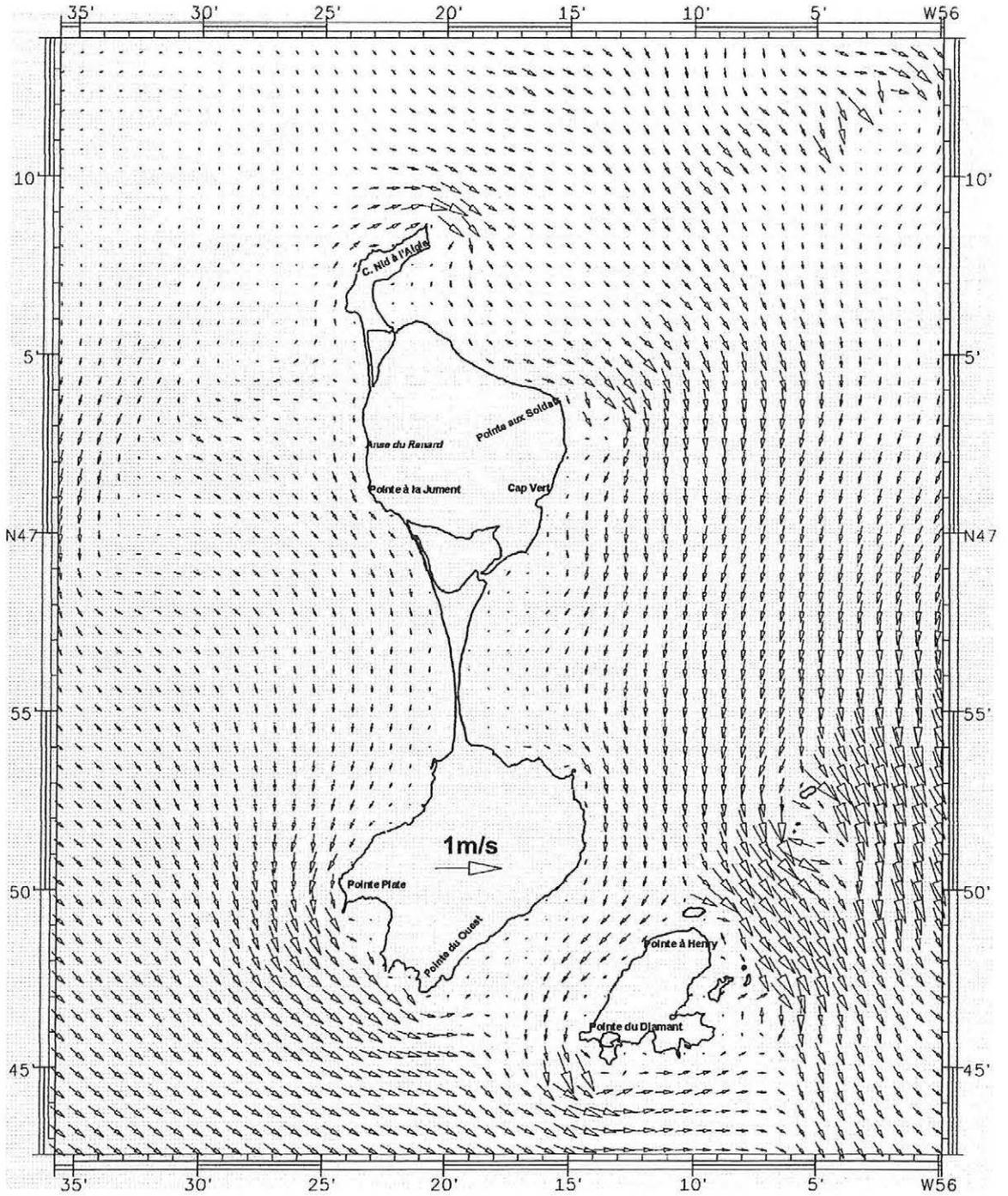


Figure 42 : Basse mer

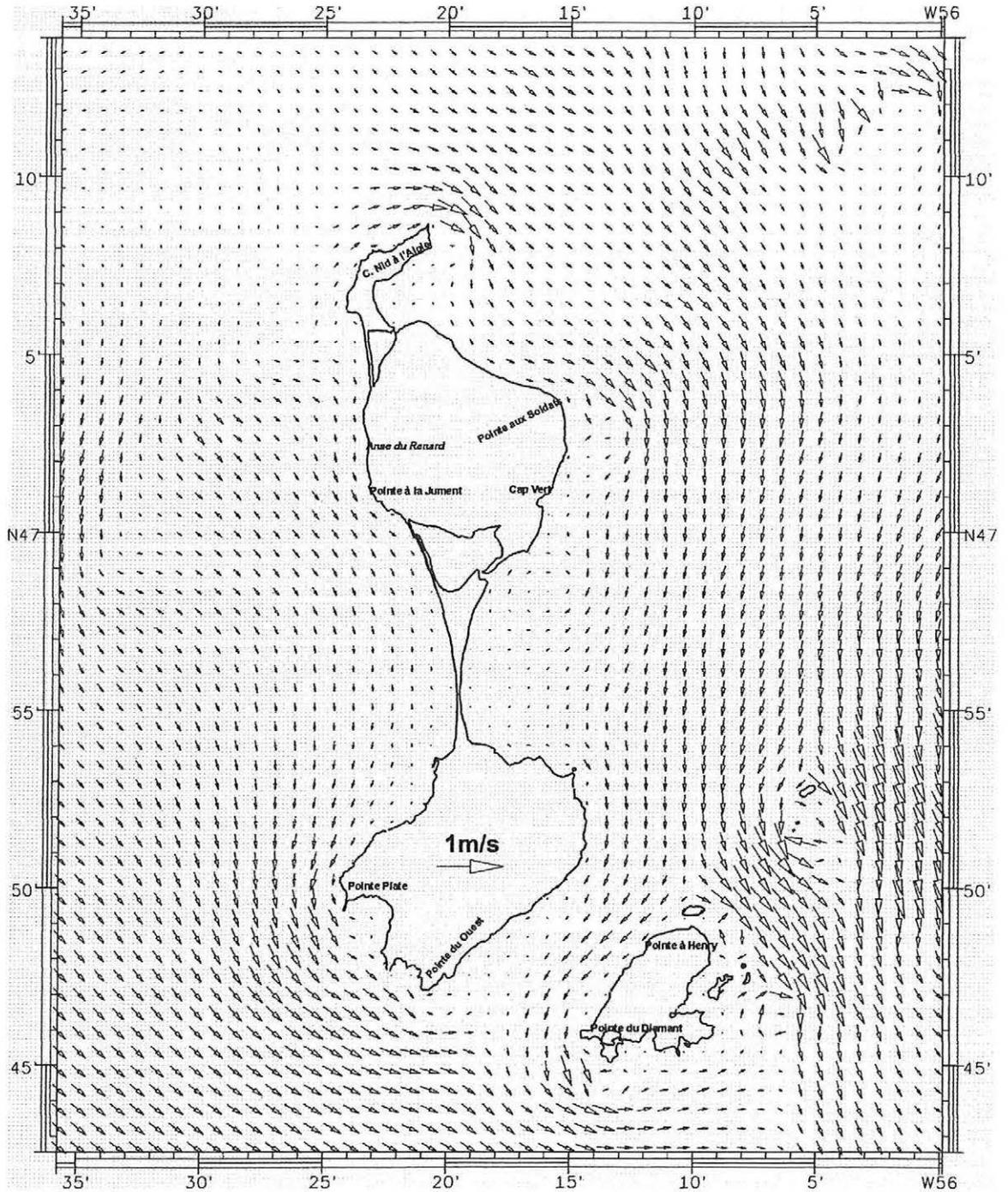


Figure 43 : Basse mer + 1h

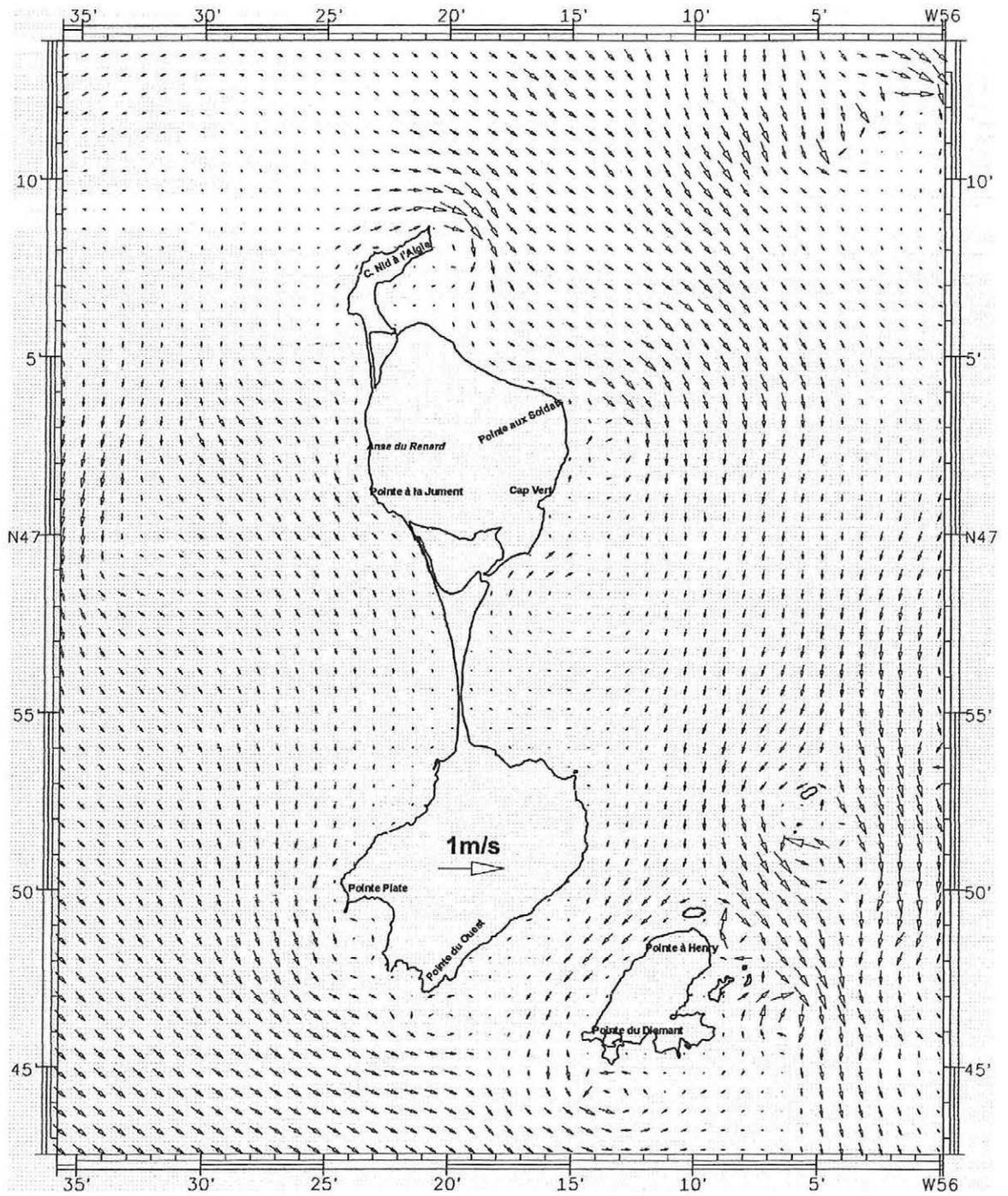


Figure 44 : Basse mer + 2h

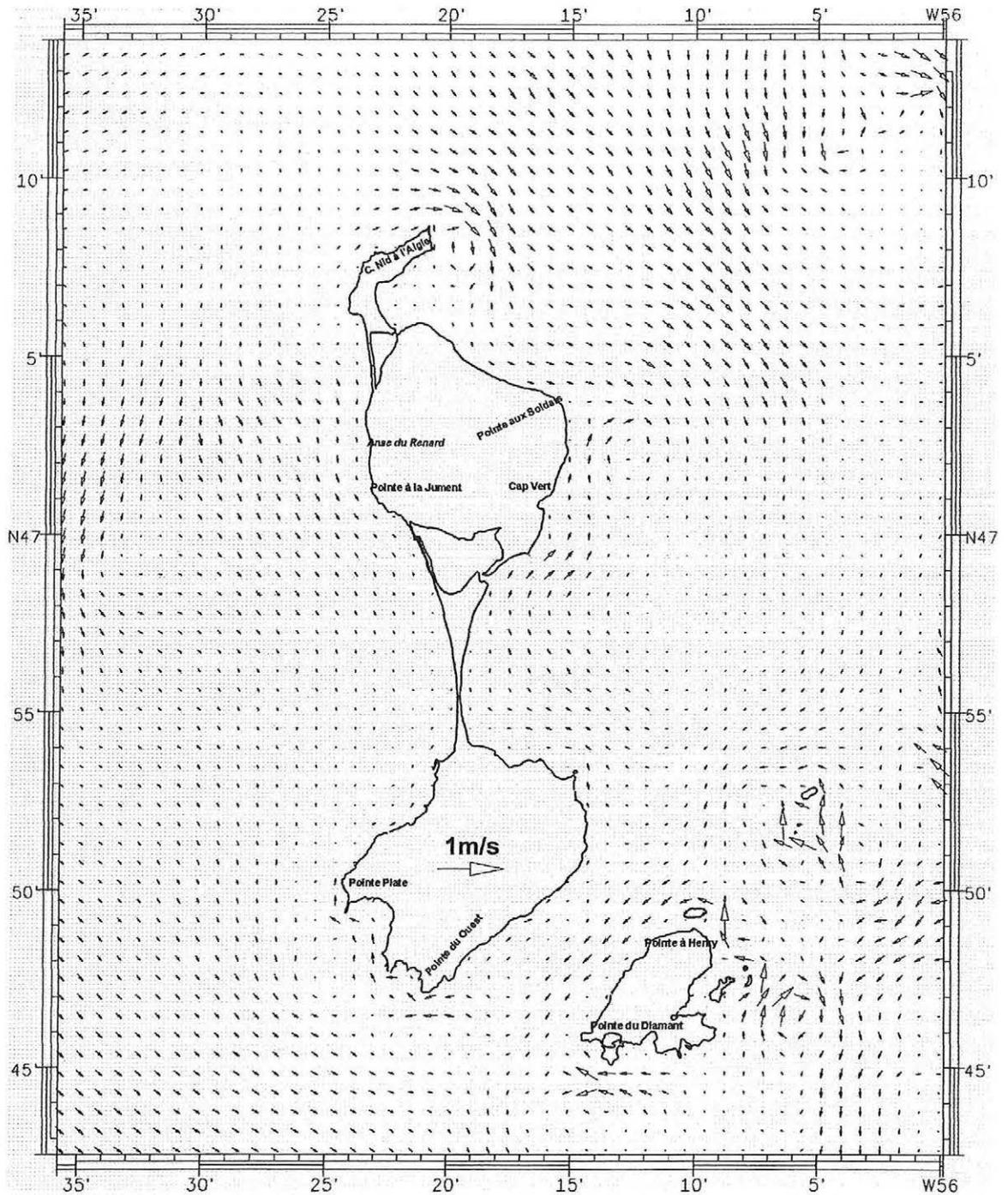


Figure 45 : Basse mer + 3h

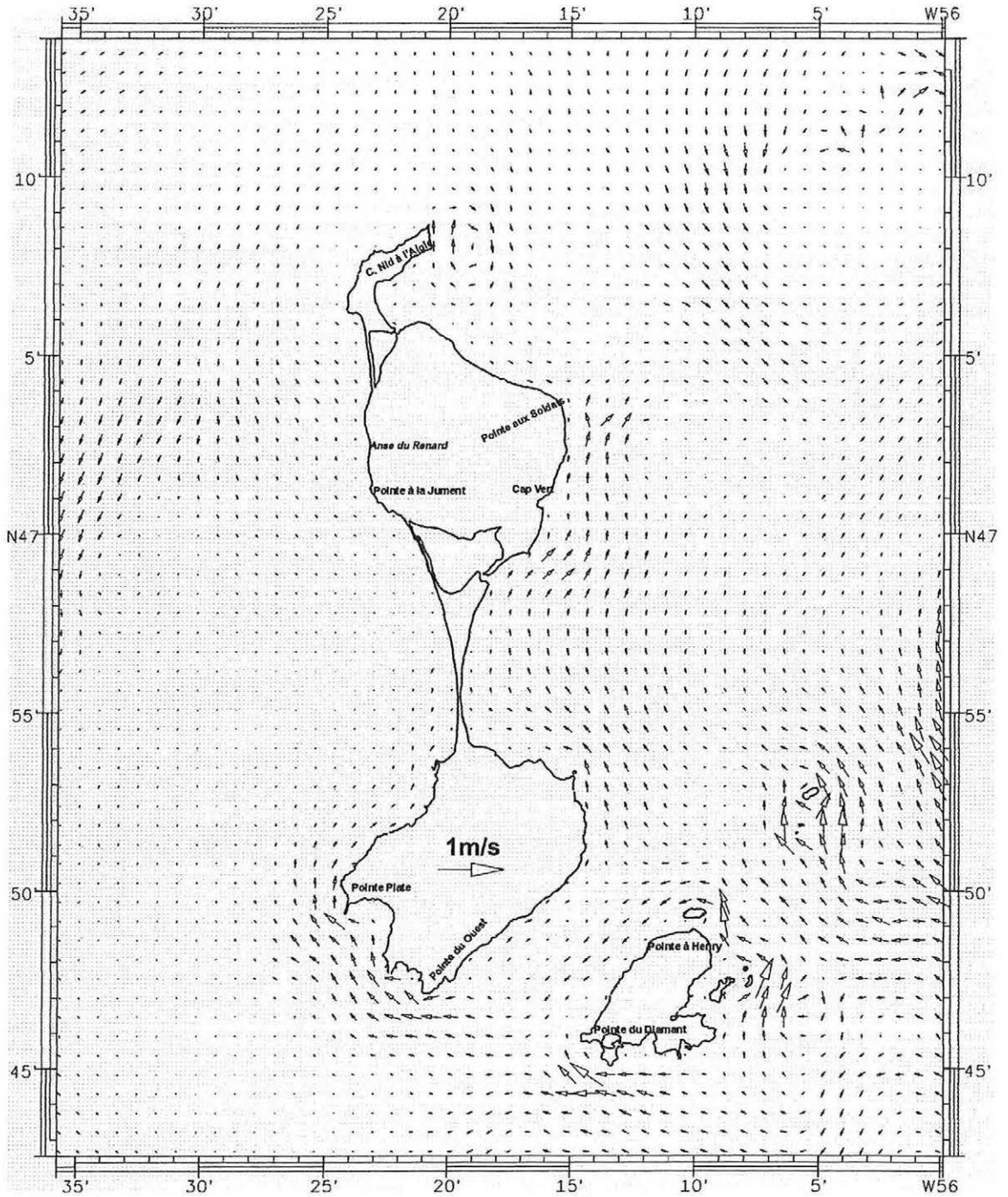


Figure 46 : Basse mer + 4h

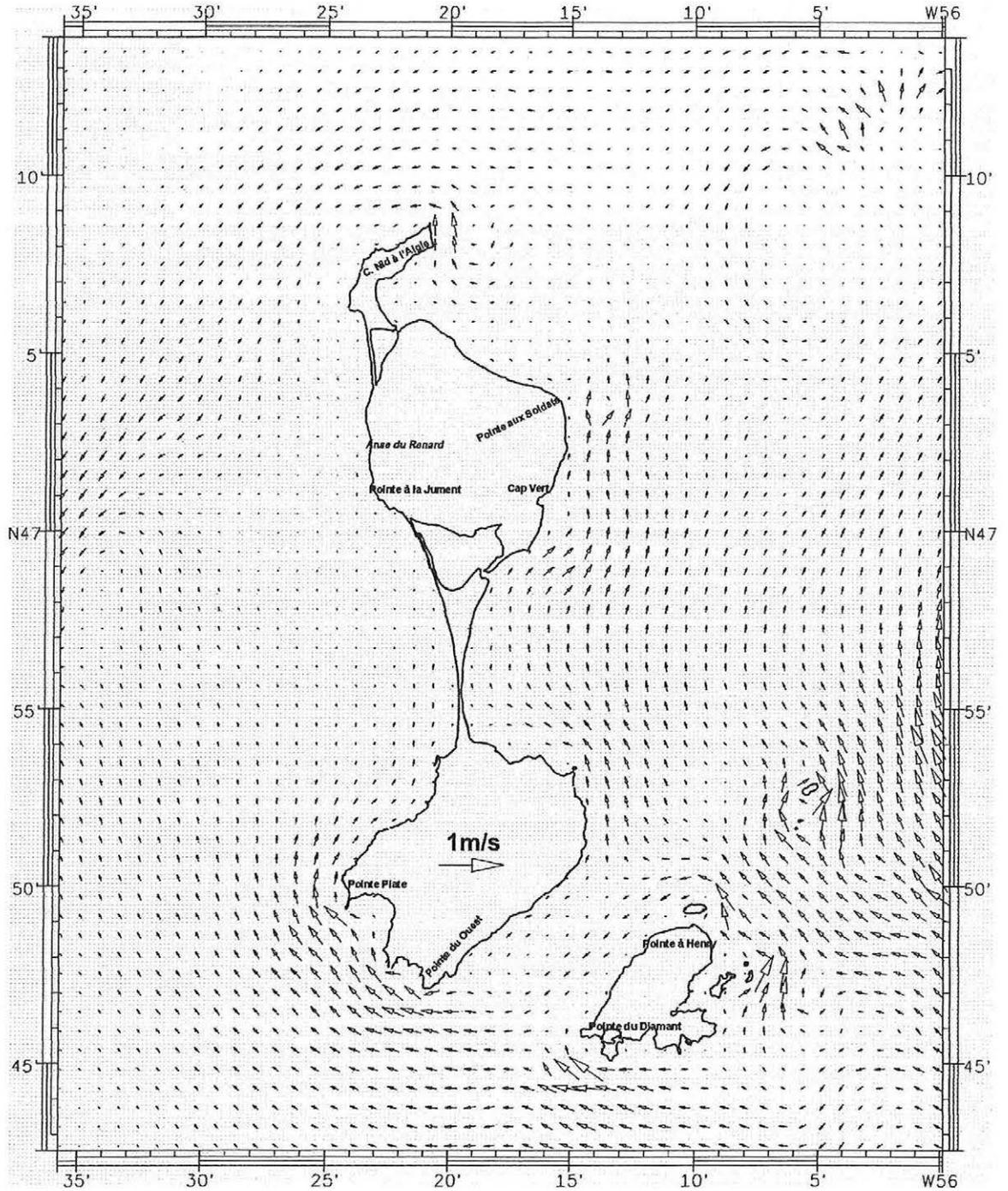


Figure 47 : Basse mer + 5

5.2 Les courants de marée en vive eau : au Nord de Miquelon

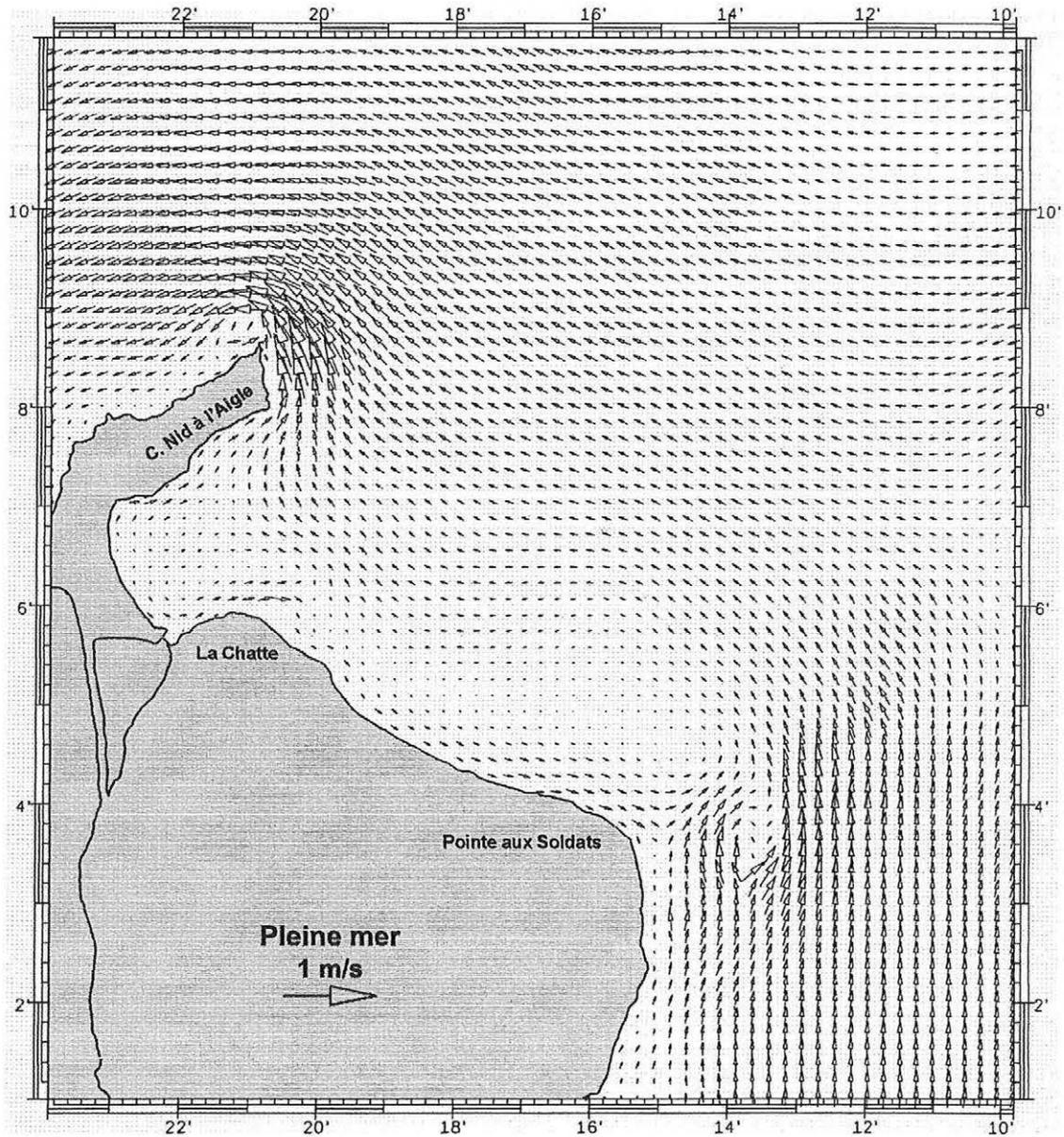


Figure 48

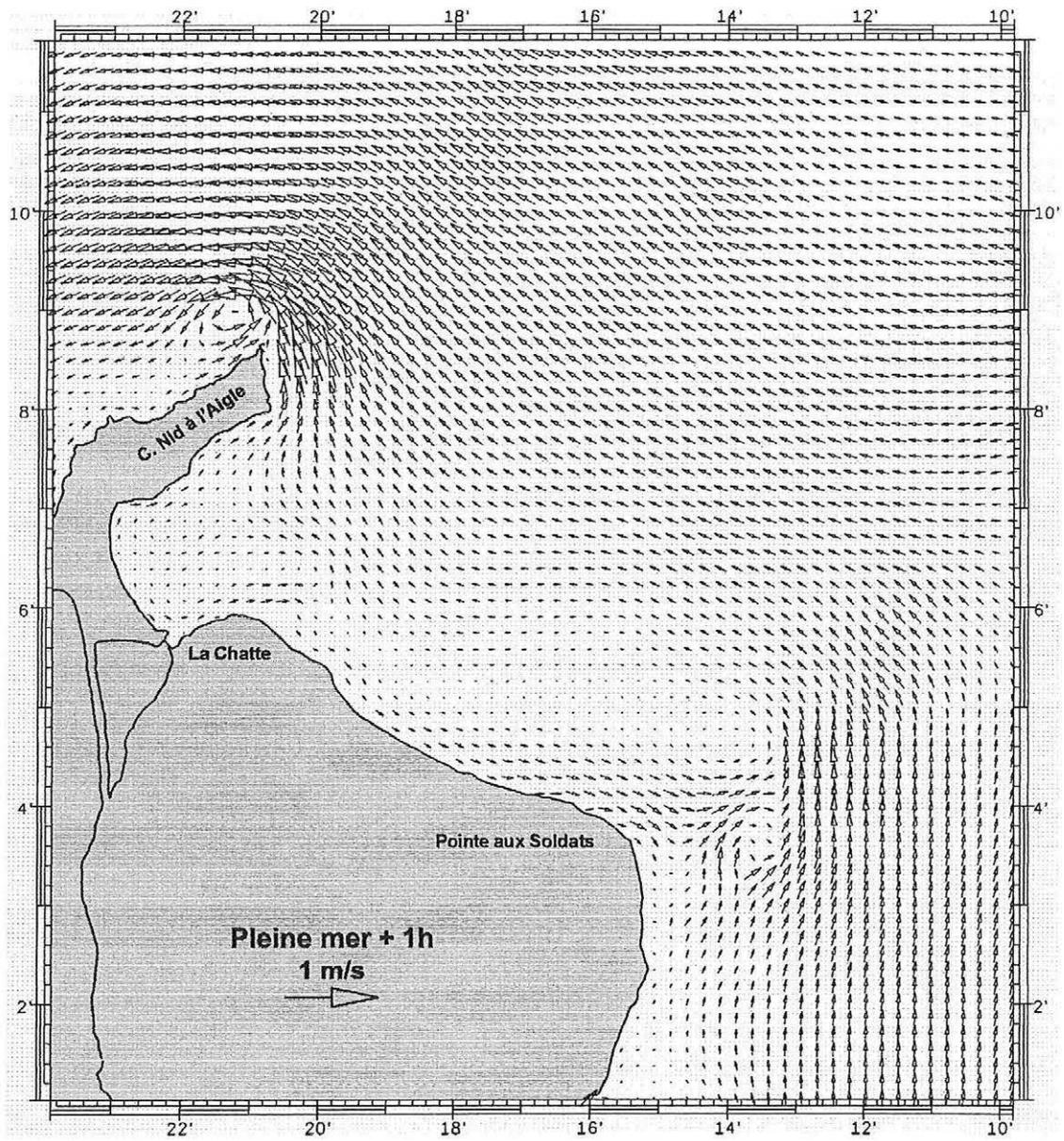


Figure 49

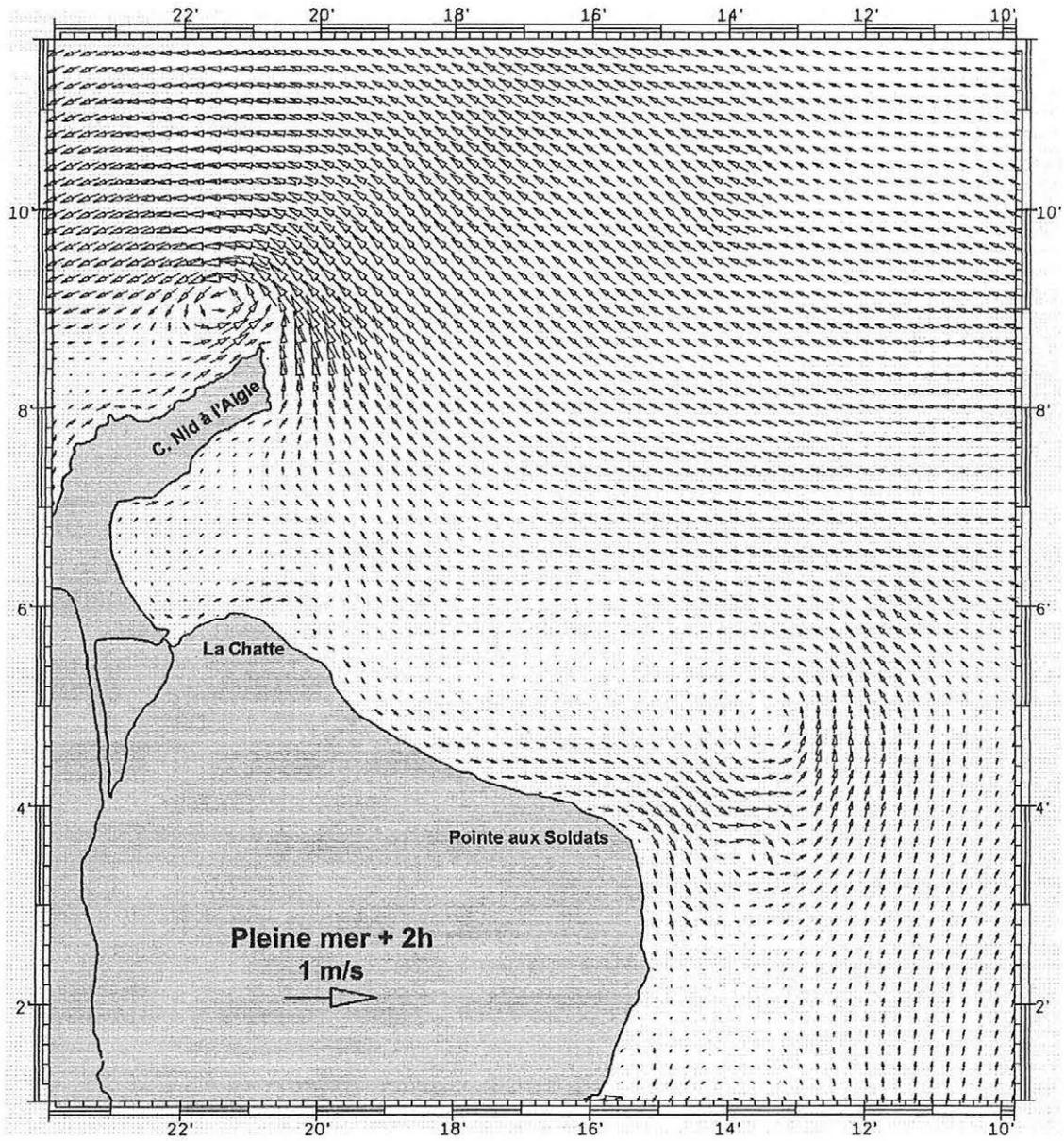


Figure 50

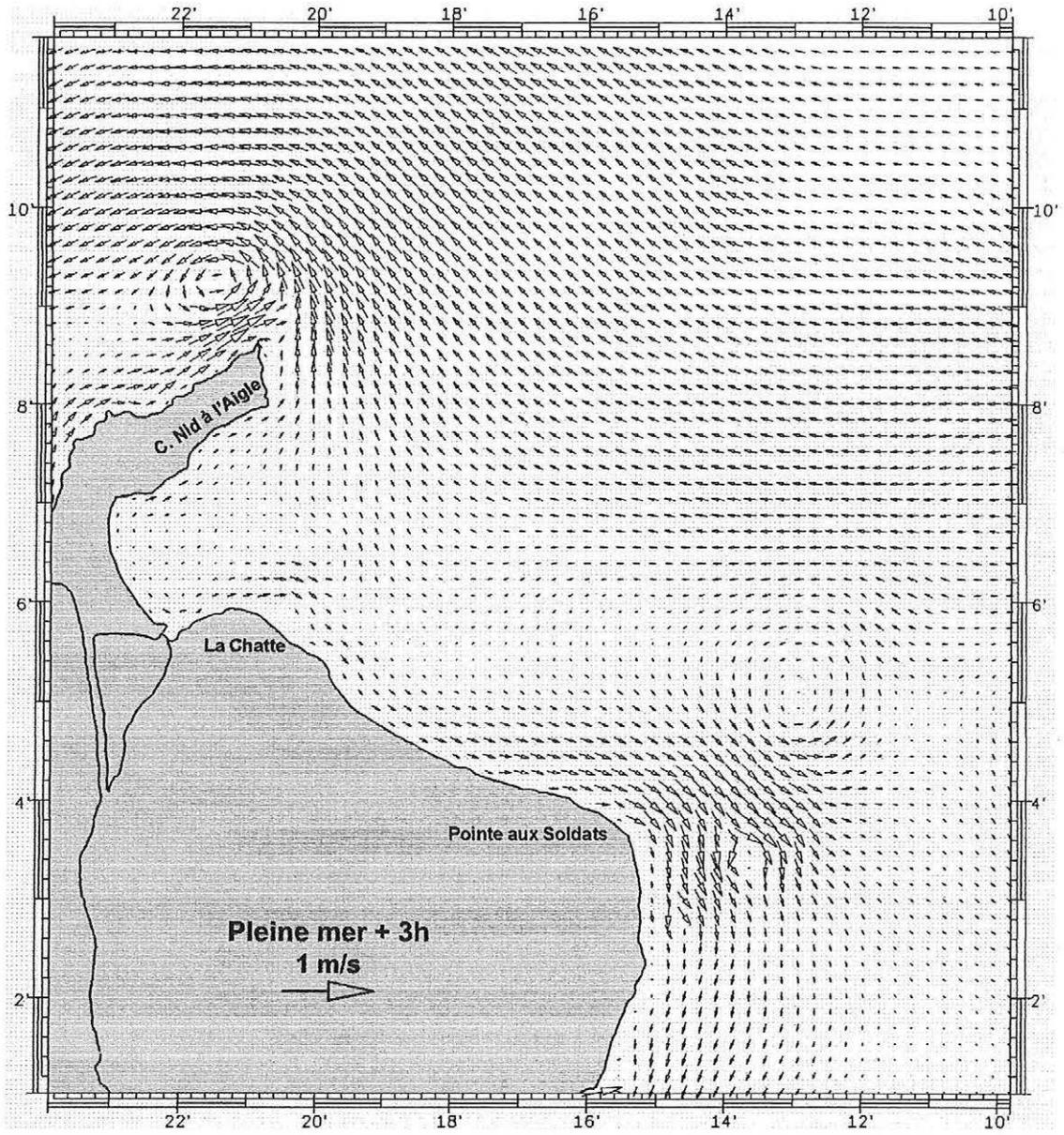


Figure 51

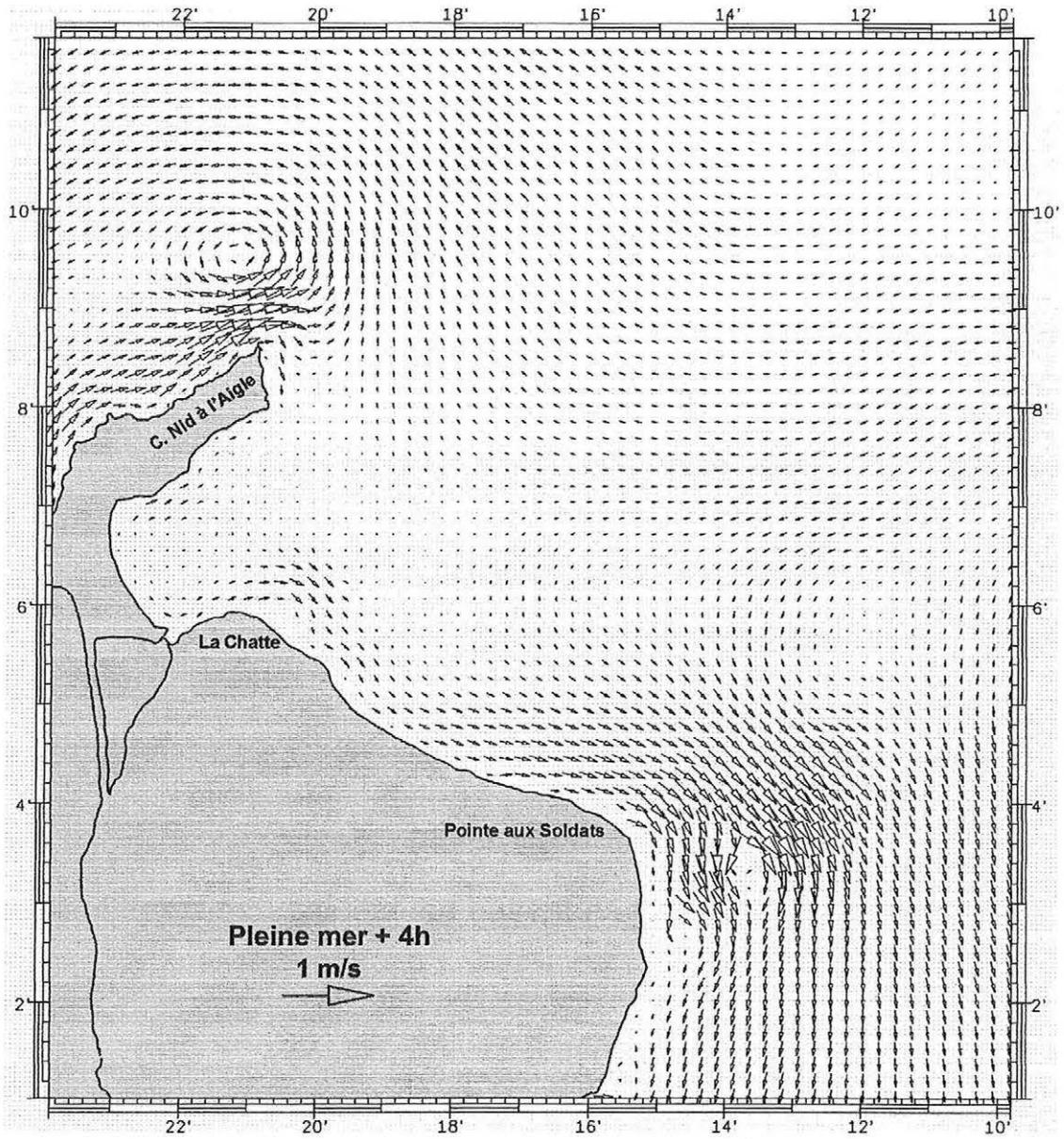


Figure 52

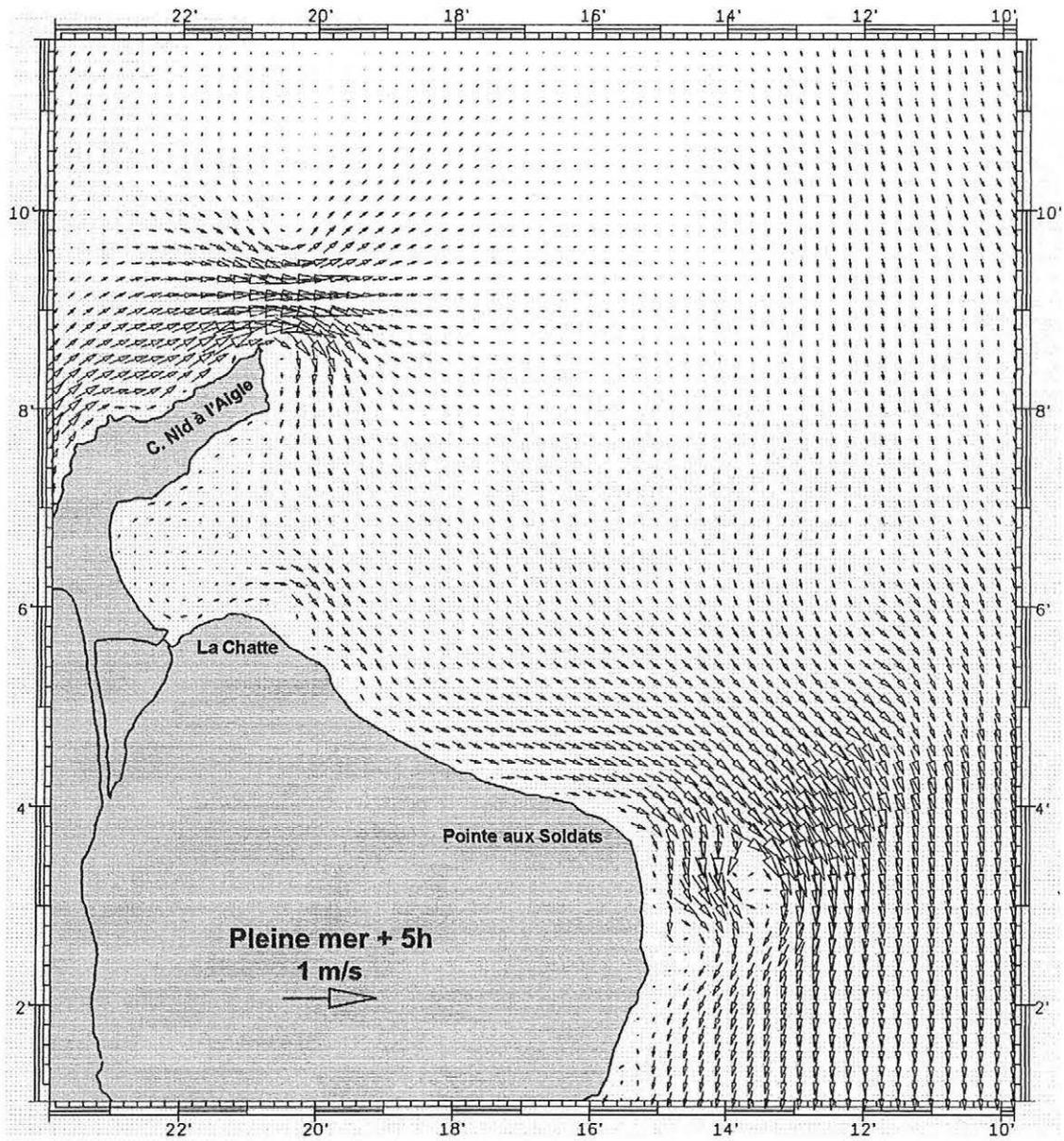


Figure 53

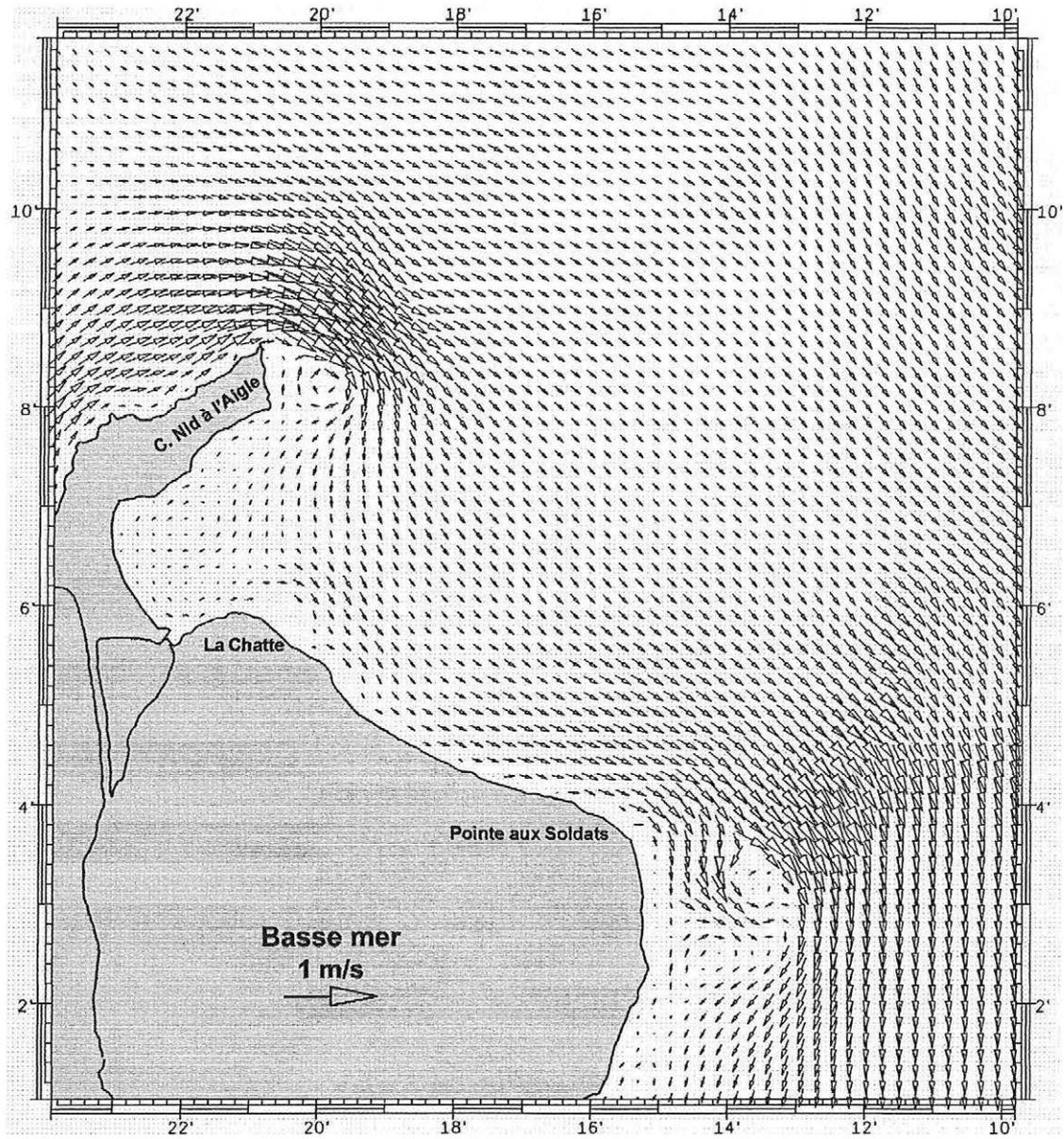


Figure 54

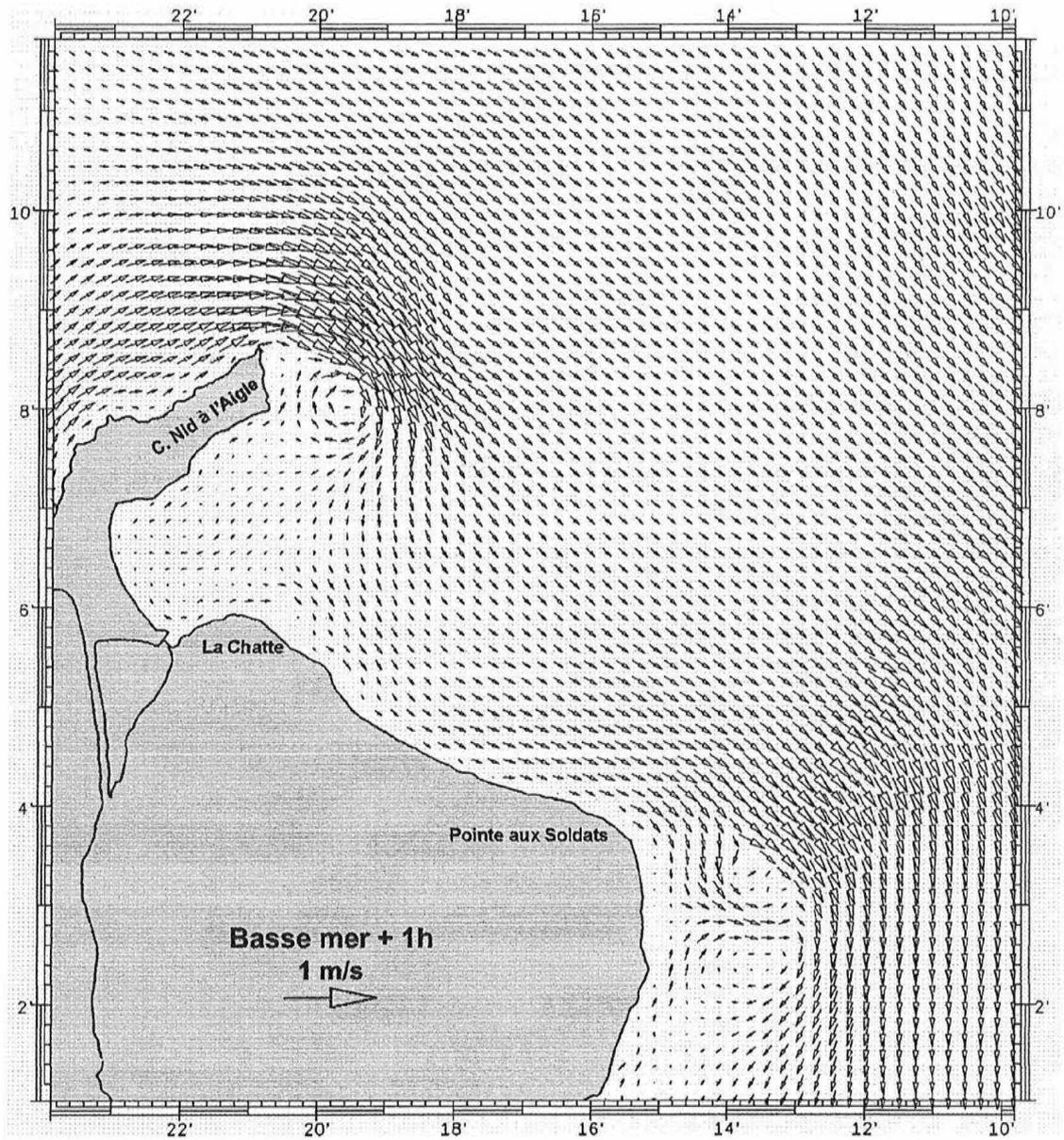


Figure 55

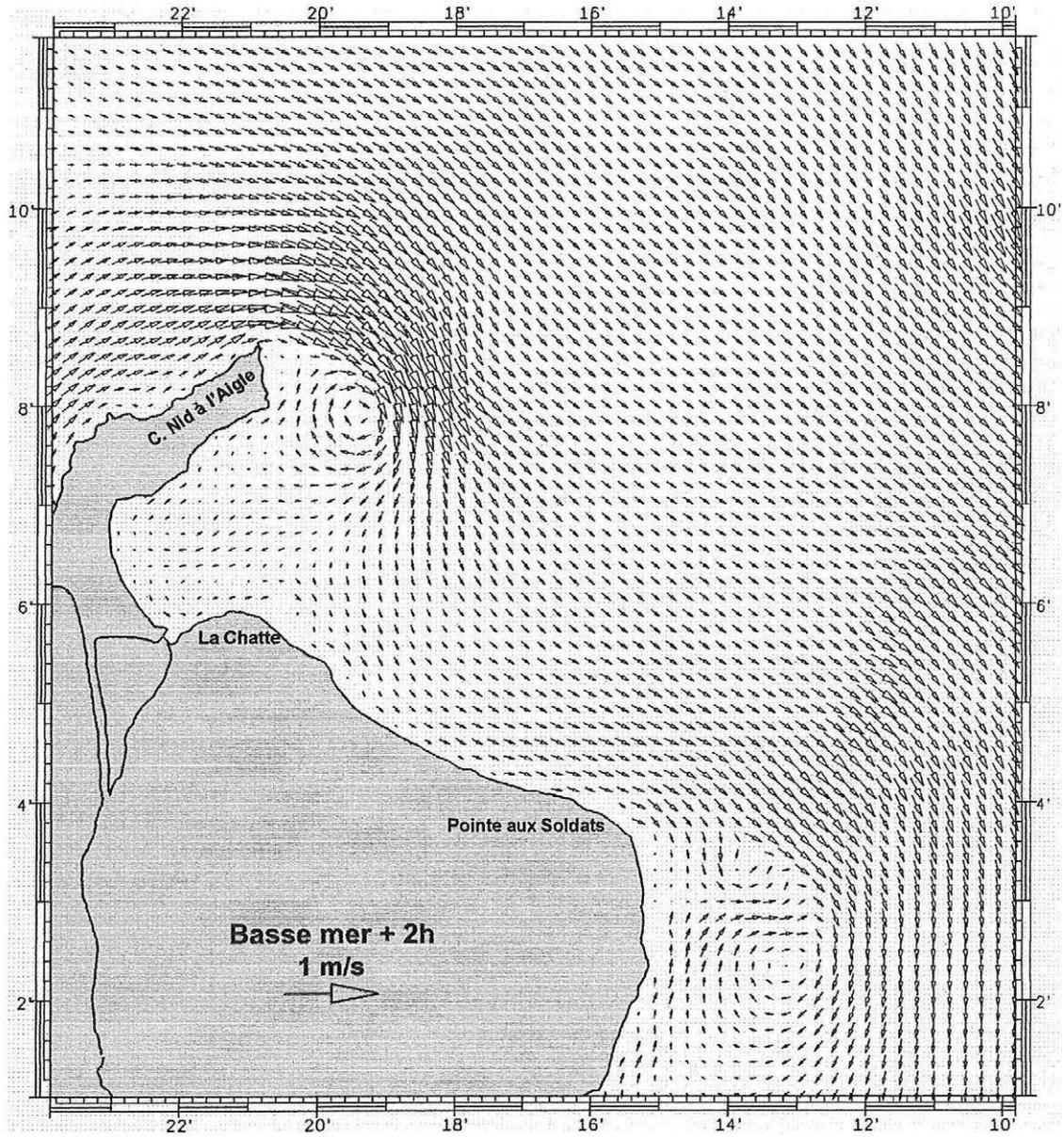


Figure 56

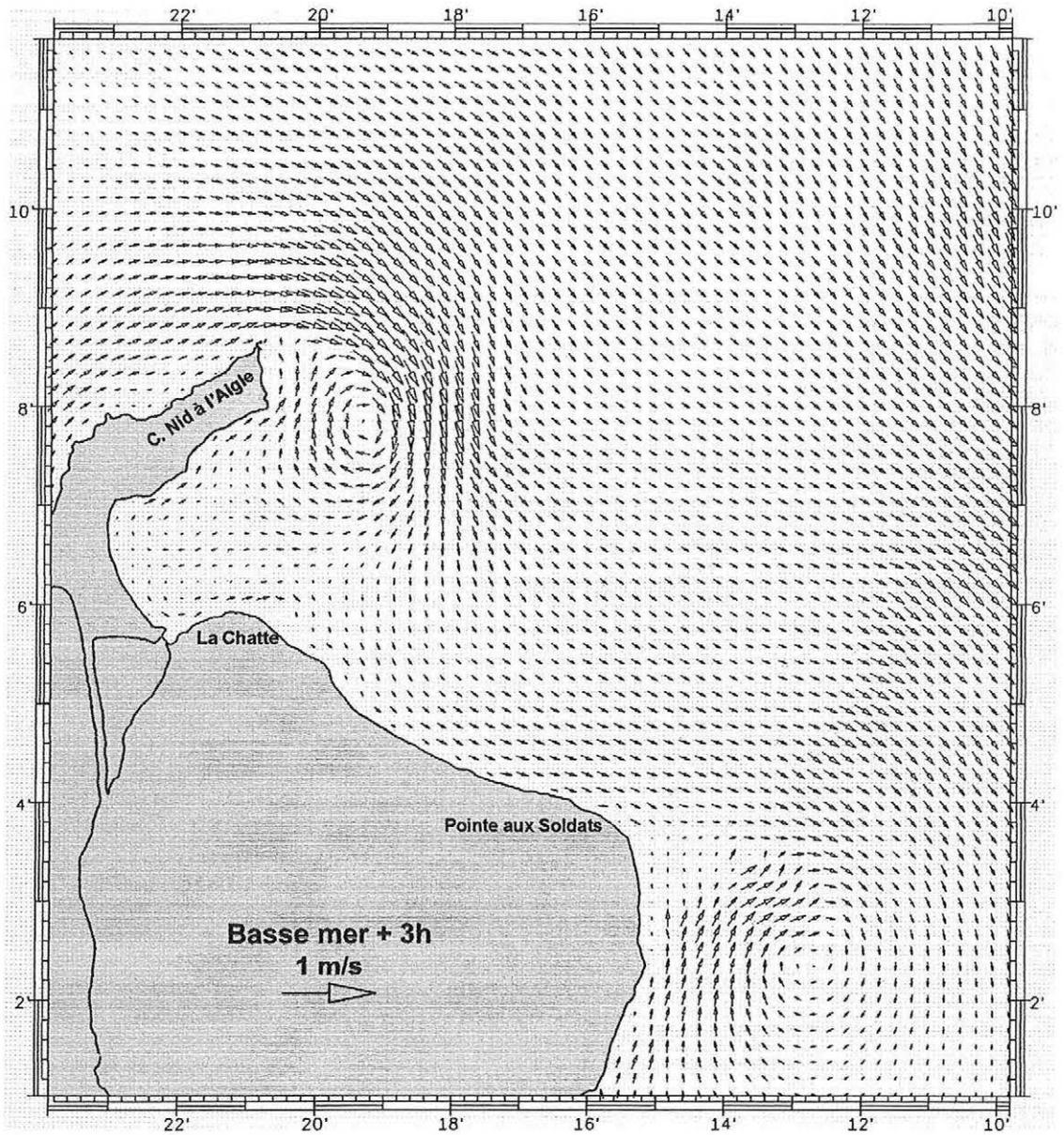


Figure 57

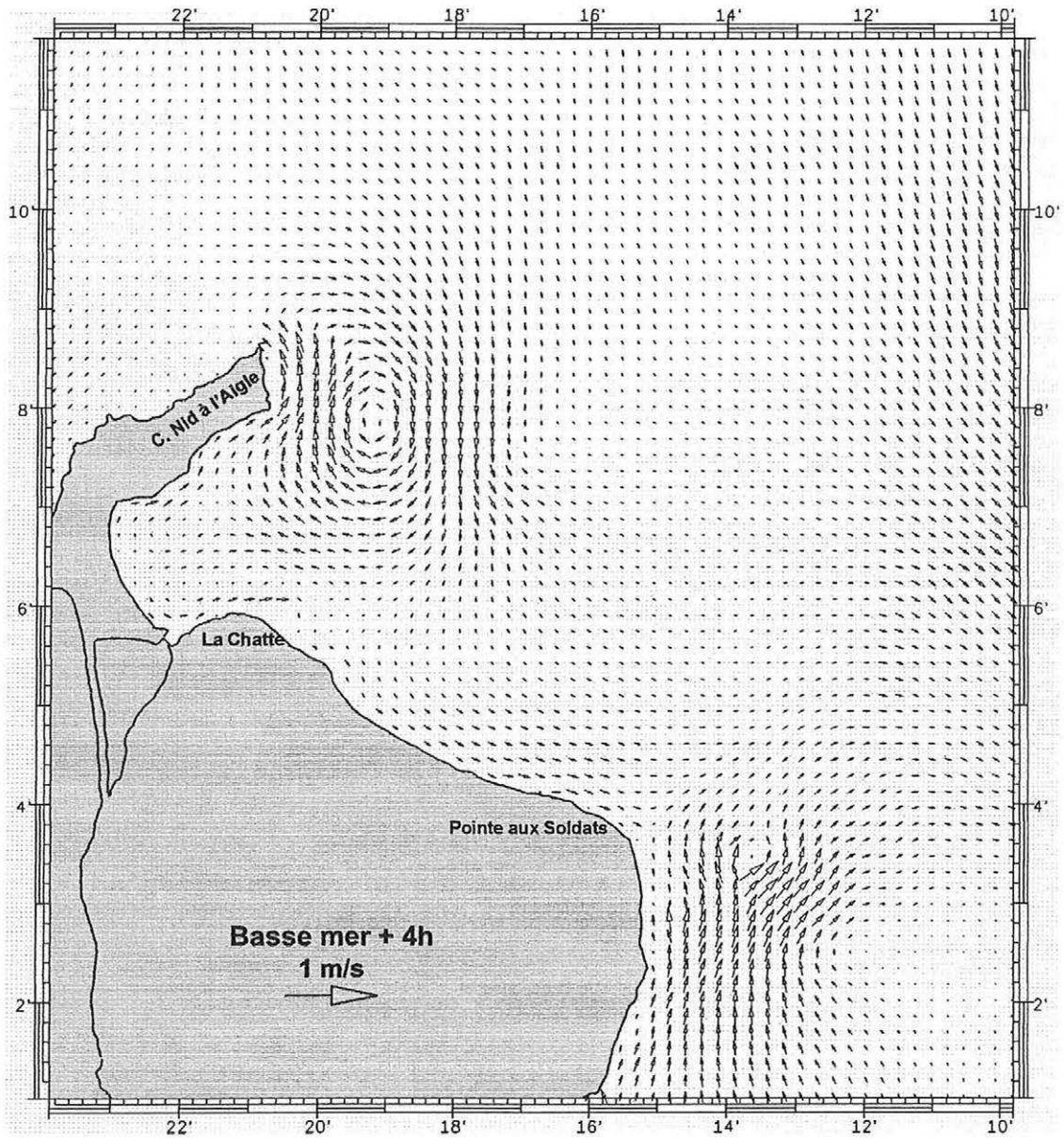


Figure 58

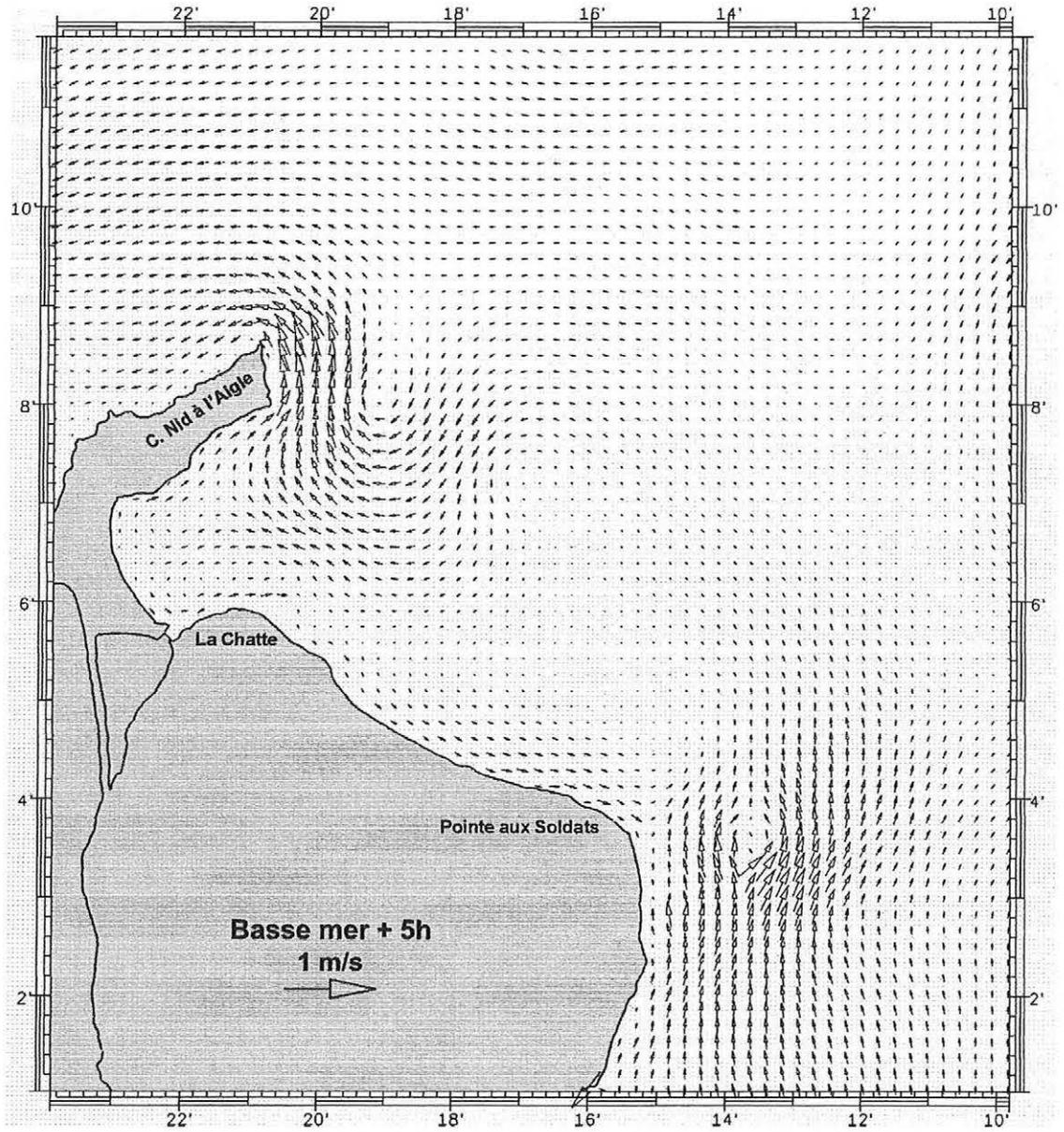


Figure 59

5.3 Équations mathématiques

Soient les notations suivantes :

- Un trièdre orthonormé direct (O, x, y, z)
- u, v et w : composantes de la vitesse selon Ox, Oy et Oz
- U et V : composantes de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau
- u_b : vitesse au fond
- f : facteur de Coriolis
- F : forces extérieures
- g : accélération de la pesanteur
- H : hauteur d'eau totale
- K : tenseur de dispersion
- N : tenseur de viscosité
- P_a : pression atmosphérique
- Ri : nombre de Richardson
- W : vitesse du vent
- ζ : cote de la surface
- ρ : masse volumique

Les équations mathématiques de l'hydrodynamiques sont les suivantes. Par option dans l'interface d'activation, MARS résoudra au choix le système 3D complet (10 équations) ou le système simplifié 2D (équations 4 à 8).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g}{\rho} \int \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\partial (N_{xx} \frac{\partial u}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (N_{xy} \frac{\partial u}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial (N_{xz} \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} + F_x = 0$$

équation 1 : Mouvement selon l'axe horizontal Ox (en 3D)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g}{\rho} \int \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\partial (N_{yx} \frac{\partial v}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (N_{yy} \frac{\partial v}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial (N_{yz} \frac{\partial v}{\partial z})}{\partial z} + F_y = 0$$

équation 2 : Mouvement selon l'axe horizontal Oy (en 3D)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

équation 3 : Continuité en 3D

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} - \frac{\partial \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} = 0$$

équation 4 : Advection et dispersion d'un constituant dissous

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial s}{\partial z} - \frac{\partial \left(K_x \frac{\partial s}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(K_y \frac{\partial s}{\partial y} \right)}{\partial y} - \frac{\partial \left(K_z \frac{\partial s}{\partial z} \right)}{\partial z} \text{ Source} = 0$$

équation 5 : Advection et dispersion d'un constituant transporté en suspension

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{H}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + k u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - k_a W_x W + \frac{\partial (N_{cis\ xx} \frac{\partial u}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (N_{cis\ xy} \frac{\partial u}{\partial y})}{\partial y} + F_x = 0$$

équation 6 : Mouvement selon Ox (en 2D)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{H}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + k v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} - k_a W_y W + \frac{\partial (N_{cis\ yx} \frac{\partial V}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (N_{cis\ yy} \frac{\partial V}{\partial y})}{\partial y} + F_y = 0$$

équation 7 : Mouvement selon Oy (en 2D)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0$$

équation 8 : Continuité (en 2D)