

Florian DELRIEU
MASTER 1 Ingénierie Mathématiques
2010/2011

Rapport de stage

**APPORT DES DONNÉES DE RADAR HF
POUR LA PRÉVISION DE DÉRIVE EN
MER**



Responsable du stage : Monsieur Pierre Daniel

Tuteur pédagogique : Monsieur Lucas Amodéi

Résumé

La division Marine et Océanographie de Météo-France a développé un Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbure : MOTHY. Ce modèle calcule des prévisions de dérive à partir des données bathymétrique, du vent, de la marée et des modèles océaniques. Le résultat obtenu est présenté sous forme de cartes ou d'animation. Il existe trois versions de ce modèle.

La première version, créée en 1994, permet de calculer la dérive des nappes de polluants, hydrocarbures ou produits chimiques. Elle a été utilisée lors de grands accidents maritimes comme ceux de l'Erika, du Prestige ou du Ievoli Sun pour citer les plus connus. Son utilisation est précisée dans le plan POLMAR. Les plans POLMAR constituent des plans d'intervention en cas de pollution accidentelle des milieux marins, permettant la mobilisation et la coordination des moyens de lutte préalablement identifiés.

En 1998, la version "objets flottants" est mise au point. Les objets flottants sont, en réalité, représentés par un parallélépipède rectangle dont on choisit la taille en fonction du type d'objets. Cette version est utilisée pour la dérive de conteneurs, de citernes mais aussi pour la dérive de voiliers, d'homme à la mer lors d'opération de recherche et de sauvetages.

Enfin, la dernière version, MOTHY Leeway, sortie en septembre 2009, s'applique à 63 cibles dérivantes telles que : personnes dans l'eau, différents types de radeaux de survie, embarcations diverses (de la planche à voile au cargo côtier). Cette version est basée sur le résultat d'expérimentations en mer menées par les gardes côtes américains et mise en oeuvre selon une technique élaborée par le service météorologique norvégien.

Le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) a fait l'acquisition d'un système de télédétection composé de deux radars Haute Fréquence (radars HF) qui couvrent une partie de la mer d'Iroise. Le système de traitement fournit les dernières observations de courant de surface faites par le radar. Le courant de surface inclut le courant induit par la marée et par les variations de température et la salinité de l'océan, ainsi que par le vent (courant moyen et courant résiduel induit par les vagues : dérive de Stokes). En pratique, la vitesse mesurée par le radar est très proche de la vitesse de dérive de l'eau au voisinage de la surface. La mesure de courant par radar HF fait d'ailleurs encore l'objet de recherches qui prennent en compte nécessairement les différentes sources de courant, la turbulence et les vagues.

L'objectif du stage était d'évaluer l'apport de ces nouvelles données pour améliorer la prévision de dérive, avec dans un premier temps une comparaison entre les résultats des différents modèles MOTHY et les résultats obtenus avec les données des radars HF, et dans un second temps une étude dans un cas réel pour vérifier l'efficacité des données des radars HF associées au modèle MOTHY dans différentes versions.

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps remercier mon responsable de stage Pierre Daniel qui m'a conseillé, aidé et beaucoup appris au cours de ces 13 semaines de stage. Il a été très disponible pour répondre à mes nombreuses questions.

Je tiens ensuite à remercier l'équipe de la division marine et océanographique de m'avoir accueilli dans leur service.

Pour finir je remercie Alexis, mon collègue de bureau, qui m'aura dépanné aussi souvent que possible.

Table des matières

I. Introduction

- 1. MOTHY.....2
- 2. Radars Hautes Fréquences en mer d'Iroise.....2

II. Présentation de l'entreprise

- 1. Météo-France en bref.....3
- 2. La météopole.....3
- 3. La division marine et océanographie de Météo-France.....3

III. MOTHY

- 1. Principe général.....5
- 2. MOTHY version hydrocarbures.....8
- 3. MOTHY version objets flottants.....9
- 4. MOTHY Leeway.....10

IV. Radars Haute Fréquence en mer d'Iroise

- 1. La mer d'Iroise.....12
- 2. Installations.....13
- 3. Principe de mesure.....13

V. Exploitation de données

- 1. Récupération des données des radars HF.....15
- 2. Programme Fortran pour la transformation du fichier.....15
- 3. Programme Fortran pour obtenir des fichiers lisibles par MOTHY.....16
- 4. Comparaison des directions et des vitesses des données MOTHY et radar HF....18
- 5. Conclusion.....35

VI. Test sur un cas réel

- 1. Explications du cas.....36
- 2. Résultats obtenus avec les données des radars HF intégrées à MOTHY.....38
 - a. MOTHY version objets flottants.....38
 - b. Conclusions modèle MOTHY version objets flottants.....41
 - c. MOTHY Leeway.....41
 - d. Conclusions modèle MOTHY version Leeway.....44
- 3. Conclusions et perspectives.....44

Conclusion générale.....45

Bibliographie.....46

Annexes.....47

I. Introduction

1. MOTHY

MOTHY est un Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures, créé en 1994 par la division Marine et Océanographie de Météo-France. Il permet de simuler la dérive d'hydrocarbures, de personnes, de bateaux ou d'objets divers. MOTHY est utilisé régulièrement lors d'accidents majeurs entraînant des pollutions, comme celles de l'Erika ou du Prestige pour la version hydrocarbures, ou lors de la perte de conteneurs, de voiliers, d'hommes à la mer pour la version objets flottant et la version Leeway. MOTHY est utilisé plus de 600 fois par an.

L'utilisation de MOTHY en cas de pollution est définie dans le cadre du plan POLMAR (pollution maritime) au niveau national et au niveau international dans le cadre du Système d'Intervention d'Urgence en cas de Pollutions. Lors d'opération de recherche et de sauvetage, les Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage (CROSS) peuvent demander une prévision de dérive qui les aidera à établir une zone de recherche.

2. Radar Haute Fréquence en mer d'Iroise

Afin de préparer les systèmes de prévision océaniques du futur, la Délégation Générale de l'Armement a financé un programme d'étude amont "Modélisation d'un théâtre d'Opération Navales", lancé en 2001. Ce programme comprend plusieurs volets dont l'un est l'expérimentation de nouveaux moyens de mesure pour le zone côtière. Le Service Hydrologique et Océanographique de la Marine (SHOM), qui pilote ce programme, a fait l'acquisition d'un système de télédétection composé de deux radars Hautes Fréquences.

Les mesures se font à l'aide de deux radars composés de deux installations. Tout d'abord un réseau d'émission de 4 antennes et un réseau de réception, situé à 200 mètres du premier réseau, constitué de 16 antennes. Un radar est situé sur la pointe de Garchine dans la commune de Porspoder et l'autre sur la pointe de Brézellec dans la commune de Cléden-Cap-Sizun. Les ondes, de faibles puissances (30 watts), sont émises par les 4 antennes. Les ondes radio sont réfléchies par la mer. Chacun des deux radars écoute l'écho correspondant à son signal émis avec un réseau de 16 antennes alignées. Cet écho est très faible, mais il possède une signature spécifique des vagues à la surface de la mer.

Le but du stage est d'évaluer l'apport de ces nouvelles données pour améliorer la prévision de dérive.

Dans une première partie, nous expliquerons le principe général de fonctionnement de MOTHY, ensuite le détails de l'obtention des mesures des radars HF. Dans un deuxième temps, nous comparerons les données obtenus avec les radars HF et les données obtenues avec le programme MOTHY. Pour terminer, nous testerons, sur un cas réel, l'apport des données des radars HF, leur efficacité et leur précision.

II. Présentation de l'entreprise

1. Météo-France en bref

Depuis le début du 17^{ème} siècle, la science météorologique a construit sa connaissance des phénomènes atmosphériques sur la base d'une démarche scientifique pluridisciplinaire, mariant mathématiques, physique ou chimie... C'est sur ce socle que Météo-France a bâti sa compétence scientifique, technique et opérationnelle.

Le domaine d'intervention de Météo-France s'étend de la connaissance du climat des siècles passés, à la prévision du temps et de l'évolution du climat de la Terre. Décrire le comportement de l'atmosphère et du système climatique fait appel à une science complexe dont les incertitudes sont inhérentes à une compréhension encore imparfaite des mécanismes mis en jeu. Autant de difficultés que les chercheurs de Météo-France tentent de lever.

La force de l'établissement public est de couvrir tous les champs de l'opérationnel à la recherche, à toutes les échelles de temps et d'espace. La fertilisation croisée entre les travaux des ingénieurs et des chercheurs constituent un atout majeur. Vigie du temps et du climat, Météo-France est un organisme scientifique et technique où se mêlent des enjeux liés à la science, à l'innovation et à l'opérationnel au service de tous.

Proche de son public et soucieux de répondre au mieux aux questions qu'il lui pose, l'établissement bâtit des réponses en collaborant avec tous les acteurs concernés : prévoir le temps avec précision, mesurer les impacts du changement climatique, accompagner les décisions des entreprises météo-sensibles, assister la navigation aérienne, alerter sur les risques de feux de forêts, suivre les nappes de pollutions marine, mesurer la qualité de l'air, les risques d'inondations.

2. La Météopole

Cœur scientifique, technique et opérationnel de Météo-France, implantée à Toulouse depuis 1982, la Météopole regroupe les services de recherche, de développement, de formation initiale permanente, de prévision, de climatologie, de production, et ceux en charge des systèmes d'observation et d'information. Soit environ 1000 collaborateurs de Météo-France.

Elle héberge également des partenaires œuvrant dans les domaines opérationnels et de recherches connexes. Ainsi, le Centre interarmées de soutien météorologique aux Forces (CISMF), le Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (SHAPI), le Centre européen de recherche et formation avancées en calcul scientifique (CERFACS), y sont présents.

La Météopole est partie prenante du pôle de compétitivité "Aéronautique, Espace et Systèmes embarqués" d'Aquitaine et Midi-Pyrénées et du Réseau thématique de recherche avancée "Sciences et technique pour l'aéronautique et l'Espace" (RTRA, STAE) de Toulouse.

Pôle d'excellence pour l'étude du climat, vigie du temps au service de la sécurité des personnes et des biens, la Météopole participe au rayonnement national et international de Météo-France. Engagée dans le développement durable, elle est aussi un acteur économique local et régional essentiel.

3. La division marine et océanographie de Météo-France

C'est au sein de cette équipe de Météo-France que j'ai effectué mon étude. Elle répond à la partie océanographique de la mission de recherche et de développement que doit remplir Météo-France. Ainsi, son personnel est chargé de développer les outils et les modèles opérationnels exploités par les prévisionnistes pour garantir la sécurité des personnes et des biens et pour la défense. Il est important d'insister sur le fait que leur travail est dédié à l'opérationnel. Ainsi, s'ils n'ont pas une obligation de résultats, tous les moyens actuels doivent être mis en œuvre pour obtenir les modèles les plus performants possibles. En effet, les sciences géophysiques étant éminemment incertaines, il est impossible de garantir à 100% un résultat, mais des travaux de recherches sont faits et doivent être utilisés au mieux.

Cette division reçoit principalement des financements de Météo-France, mais également d'autres établissements tel que le CNES, dans le cadre de projets scientifiques. Ses principales thématiques sont les modèles de dérive en mer, de vagues et de surcote, la télédétection et l'assimilation de données dans les modèles et le développement d'outils informatiques utilisés par les prévisionnistes. Elle est composée d'une quarantaine d'employés, principalement des ingénieurs et des techniciens formés et employés en tant que fonctionnaires par Météo-France, mais également d'un chercheur du CNRM (centre national de recherche météorologique) et d'un militaire. En plus des développeurs et des chercheurs, plusieurs prévisionnistes sont répartis à sept par poste, sur quatre postes, demandant une présence 24 heures sur 24.

Ma mission s'inscrit dans une démarche de développement et d'amélioration du modèle de dérive en mer, le modèle MOTHY.

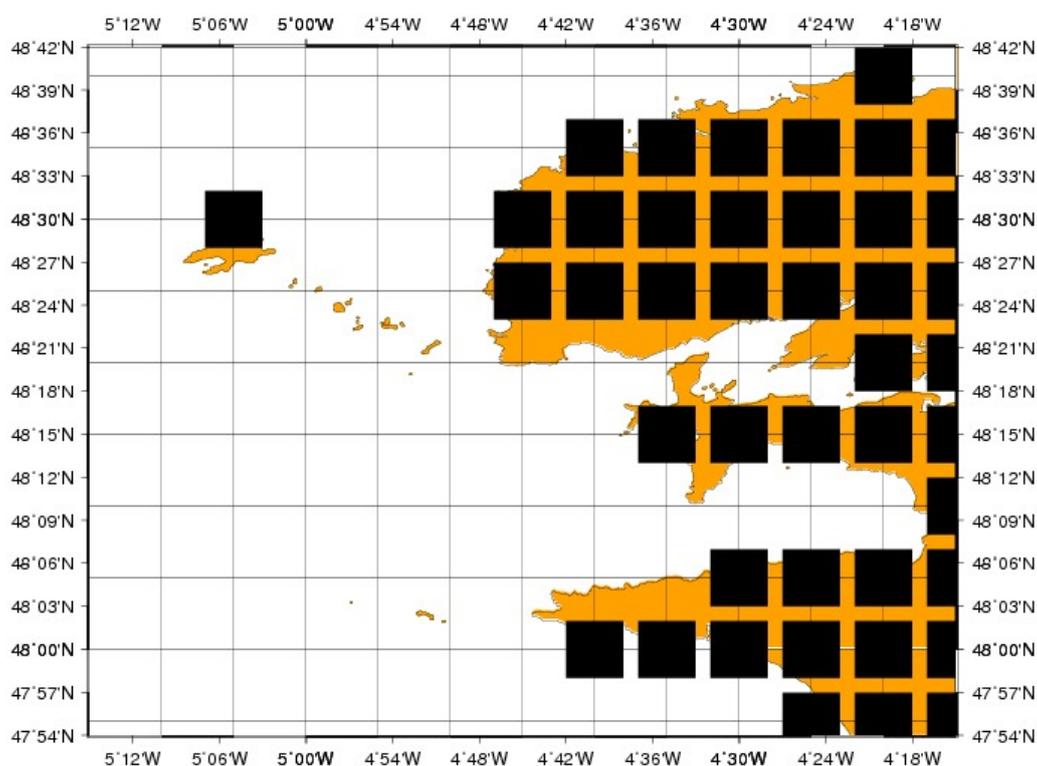
III. MOTHY

1. Principe général

Le modèle MOTHY (Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbures) a été créé en 1994 par Météo-France.

Il fonctionne dans le monde entier avec une maille de cinq milles, mais certaines zones ont été définies avec des mailles inférieures : maille de deux milles pour le golfe Arabo-Persique, maille d'un mille sur les côtes françaises et jusqu'à 0,1 mille pour les plus petites îles des DOM-TOM. Une résolution de cinq milles est moins précise et il est possible qu'un haut-fond, une pointe n'apparaisse pas dans MOTHY.

Voici un exemple de grille 5 minutes et une minute :

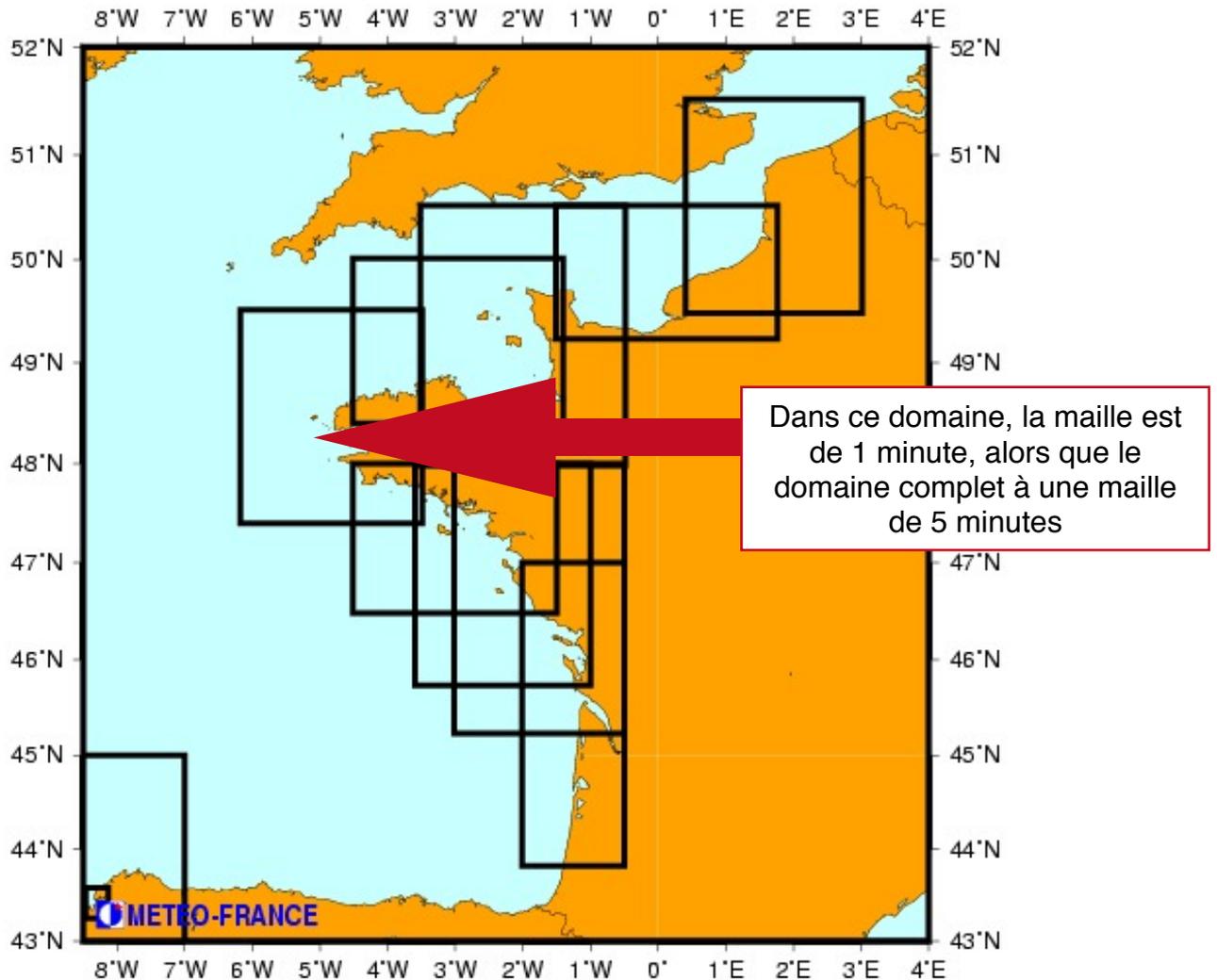


Grille 5 minutes



Grille 1 minute

Le modèle MOTHY en maille de 1 minute est imbriqué dans le modèle MOTHY en version 5 minutes, comme le montre les carte ci-dessous :



Il peut être mis en œuvre 24 heures sur 24 par le prévisionniste de Toulouse.

MOTHY calcule aussi la dérive à rebours, c'est à dire qu'il va calculer d'où vient l'objet dérivant.

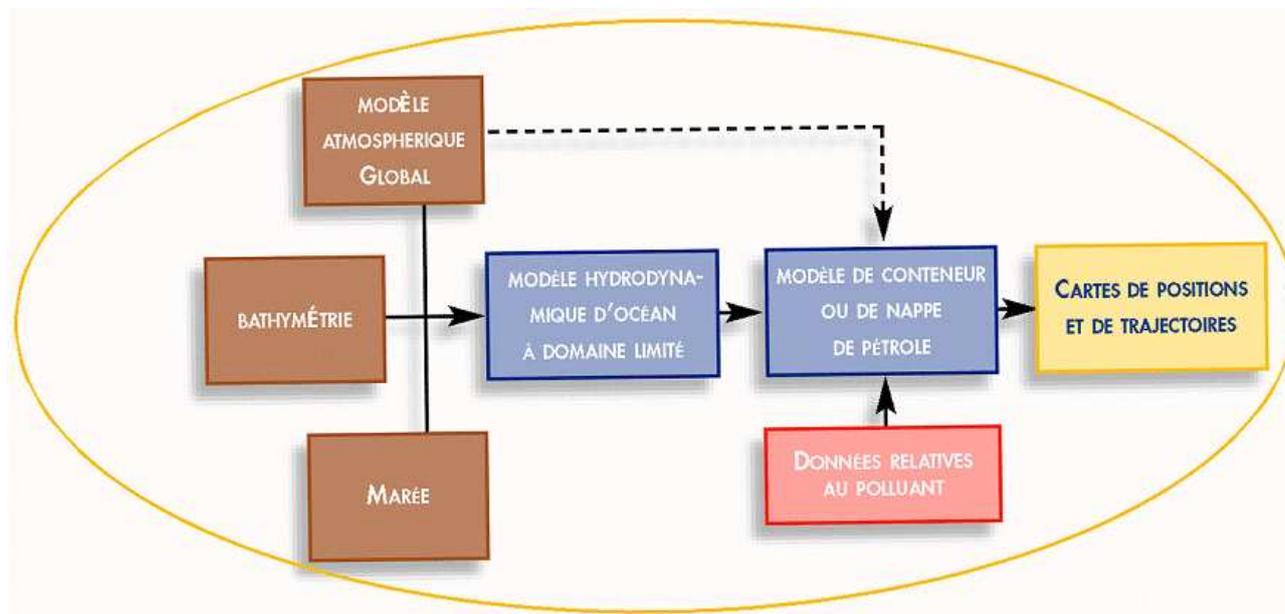


Schéma de fonctionnement de MOTHY

Les données "Bathymétrie" sont des données concernant la profondeur de l'océan. Selon les zones d'utilisation, ces données proviennent de différents centres. En ce qui nous concerne, les données proviennent du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

Les données "Marée" prennent en compte les seize ondes principales de marée.

Les données "Modèle atmosphérique global" (ou vent) sont obtenues par un modèle atmosphérique qui est un logiciel permettant de calculer les prévisions météorologiques. Cinq modèles peuvent être utilisés par MOTHY. Pour mon étude, le modèle utilisé est l'IFS (integrated forecasting system) du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, qui ont des analyses toutes les six heures.

Il y a une quatrième donnée qui peut intervenir, mais qui ne nous intéresse pas, il s'agit des "courants de grandes échelles" qui sont des données calculées par les modèles océaniques. Ces modèles permettent de décrire et prévoir l'océan, de la surface au fond, de façon opérationnelle comme la météorologie décrit l'atmosphère. Elles permettent d'améliorer considérablement les prévisions pour la Méditerranée.

Cette donnée ne nous intéresse pas car, en mer d'Iroise, les courants prédominants sont ceux dus aux vents et ceux dus aux marées.

Le courant est modélisé grâce au couplage d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel à domaine océanique limité et d'un modèle analytique unidimensionnel de viscosité turbulente. Le premier est un modèle barotrope qui calcule une grille de courants intégrés sur la profondeur (courants moyens de la colonne d'eau). Les calculs sont réalisés à partir d'un forçage atmosphérique de vent à dix mètres et de pression au niveau de la mer fourni par les analyses ou prévisions de modèle globaux comme CEP.

Le courant moyen de la colonne d'eau étant connu, on peut ensuite appliquer le modèle unidimensionnel de viscosité turbulente forcé par les courants intégrés sur la profondeur, la tension du vent en surface et le frottement au fond. Ceci permet de déterminer le courant proche de la surface qui agit sur le mouvement de l'objet.

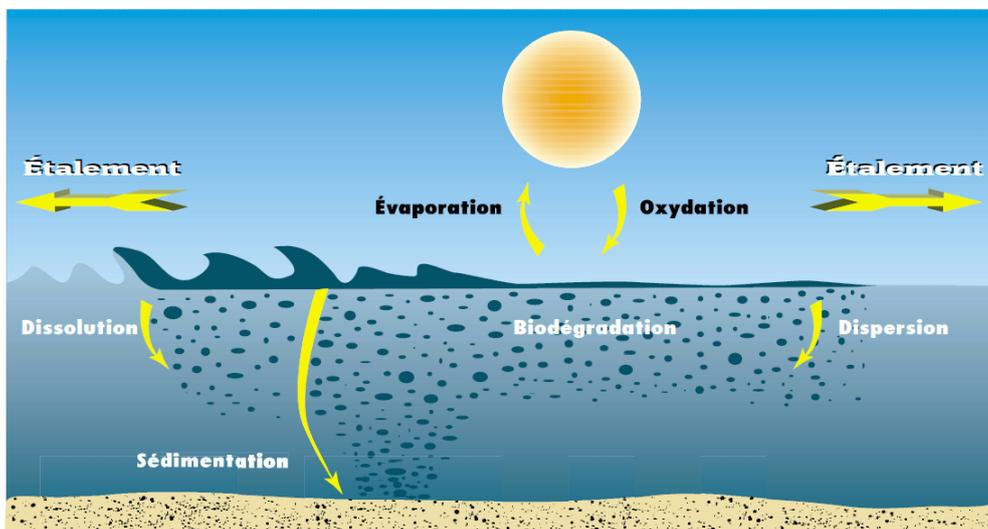
Le prévisionniste choisit quel modèle de vent et quelle donnée bathymétrique il va utiliser pour faire le calcul de dérive.

La demande de dérive impose la mise en place d'un scénario pour répondre aux questions concernant la position, les heures, l'état de la personne ou le type de polluant. Cette demande est envoyée ensuite à Météo-France. Le prévisionniste d'astreinte va lancer MOTHY, et en environ une demi heure, le demandeur de la dérive va récupérer les cartes de dérives.

2. MOTHY version hydrocarbures

Lors d'une marée noire, différents processus affectent la nappe d'hydrocarbure :

- L'étalement, qui est le dépôt d'une substance sur un support en une fine couche.
- La diffusion, qui désigne la tendance naturelle d'un système à rendre homogènes les éléments le constituant.
- L'évaporation, qui est un processus très important en terme de transfert de masse durant les premiers jours. Elle dépend de la composition du pétrole, de l'épaisseur de la nappe et de son étendue, de la température de l'air et de la mer, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire.
- La dissolution, qui n'affecte qu'une très petite partie de la nappe, en général moins de 1%. C'est la solubilité de l'hydrocarbure dans l'eau.
- L'émulsification, qui est le mélange huile/eau de mer, dû au brassage mécanique qui accroît de 2 à 5 fois le volume de la nappe, réduit l'évaporation et rend les opérations de nettoyage plus difficiles.
- La photo-oxydation, qui est l'oxydation par le soleil. Elle génère des composés solubles dans l'eau de mer.
- La biodégradation, qui est due aux micro-organismes.
- La sédimentation, qui est le dépôt d'hydrocarbure dans les sédiments du fond. Il est dû à l'augmentation de la densité du pétrole ou à l'agrégation avec des particules en suspension qui peut conduire à un mélange plus dense.
- La dispersion du pétrole, qui est la fragmentation en petites gouttelettes des nappes de pétrole en mer. Elle est considérablement augmentée en présence de vagues.



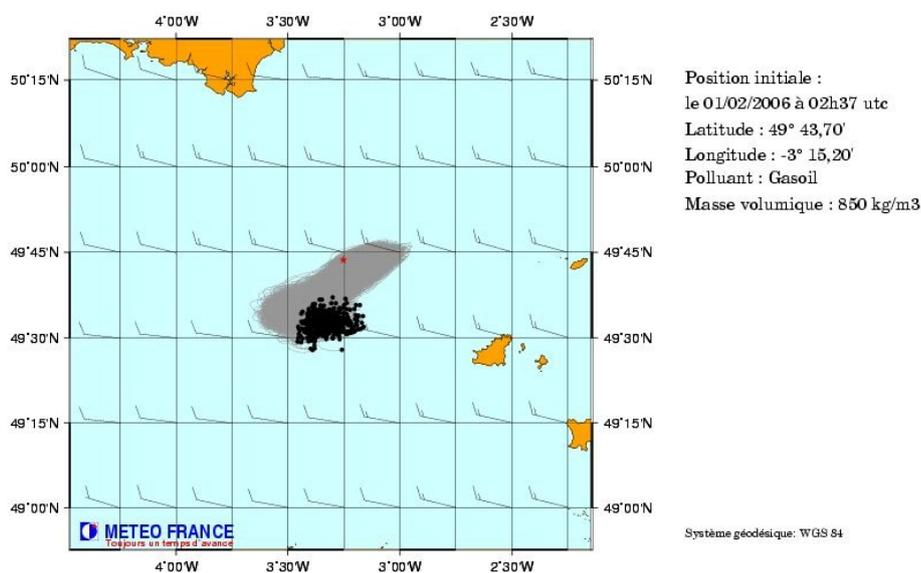
Processus affectant une nappe de pétrole à la surface de la mer

Dans MOTHY, les deux processus qui ont un impact sur la dérive sont pris en compte : la dispersion et la sédimentation. Les autres processus peuvent être calculés par un module indépendant.

MOTHY considère la nappe d'hydrocarbures comme étant composée d'un ensemble de particules indépendantes. Le modèle actuel prend en compte 480 gouttes dont les diamètres varient de 0,3 à 1,3mm.

Différents types d'hydrocarbures peuvent être choisis : le kérosène, le gasoil, l'essence, le fuel oil, le fuel oil numéro 6, le pétrole brut lourd ou léger. Le mieux étant de pouvoir donner la densité exacte de l'hydrocarbure.

MOTHY/ARPEGE : Prévision pour le 07/02/2006 à 00 utc



Carte obtenue avec le lancement de MOTHY version hydrocarbures

3. MOTHY version objets flottants

En 1998, une nouvelle version de MOTHY est créée, elle concerne les objets flottants. Ces objets flottants sont, en réalité, modélisés par un parallélogramme rectangle dont on peut choisir la taille.

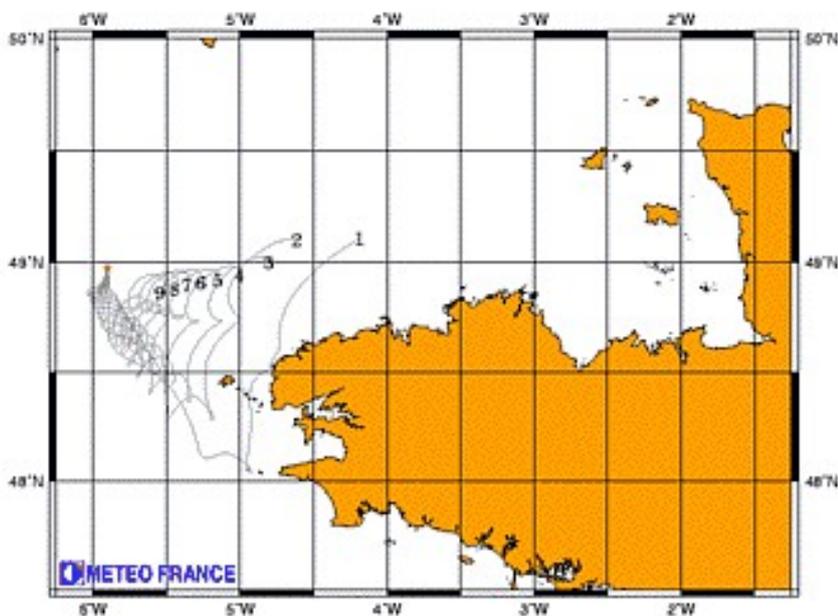
Les forces s'appliquant au parallélépipède sont les suivantes :

- La force due au vent s'appliquent sur la partie émergée.
- La force due au courant, appliquée sur la partie immergée.
- La force due aux vagues, supposée négligeable pour des objets de moins de 30 mètres.

Le paramètre essentiel est le taux d'immersion du parallélépipède. Donc pour un objet, MOTHY calcule neuf dérives de 20 à 100% d'immersion.

Sur la carte obtenue, nous avons neuf dérives différentes : la dérive n°0 correspond à 100% d'immersion et la dérive n°2 à une immersion de 20%.

Prevision pour le 9/2/1996 a 12 utc



Conteneurs de 20 pieds

- 1: immersion 10%
- 2: immersion 20%
- 3: immersion 30%
- 4: immersion 40%
- 5: immersion 50%
- 6: immersion 60%
- 7: immersion 70%
- 8: immersion 80%
- 9: immersion 90%

Carte obtenue avec le lancement de MOTHY version objets flottants

4. MOTHY Leeway

MOTHY Leeway est la dernière version, sortie en septembre 2009. Cette version a été réalisée grâce à des expérimentations menées par les Gardes Côtes Américains et mise en œuvre selon une technique élaborée par le service météorologique norvégien.

Les expérimentations des Gardes Côtes Américains ont permis de définir 63 cibles SAR (search and rescue, recherche et sauvetage), comme par exemple personne à la mer avec ou sans brassière de sauvetage, radeau de sauvetage avec ou sans tente, avec ou sans ancre flottante, différents types de voiliers, de navires de pêches...

Les expériences ont montré qu'il existe deux positions stables de dérive par rapport au vent : soit à droite du vent, soit à gauche du vent. En pratique, on ne peut pas déterminer de quel côté va partir l'objet. MOTHY Leeway calcule les deux possibilités.

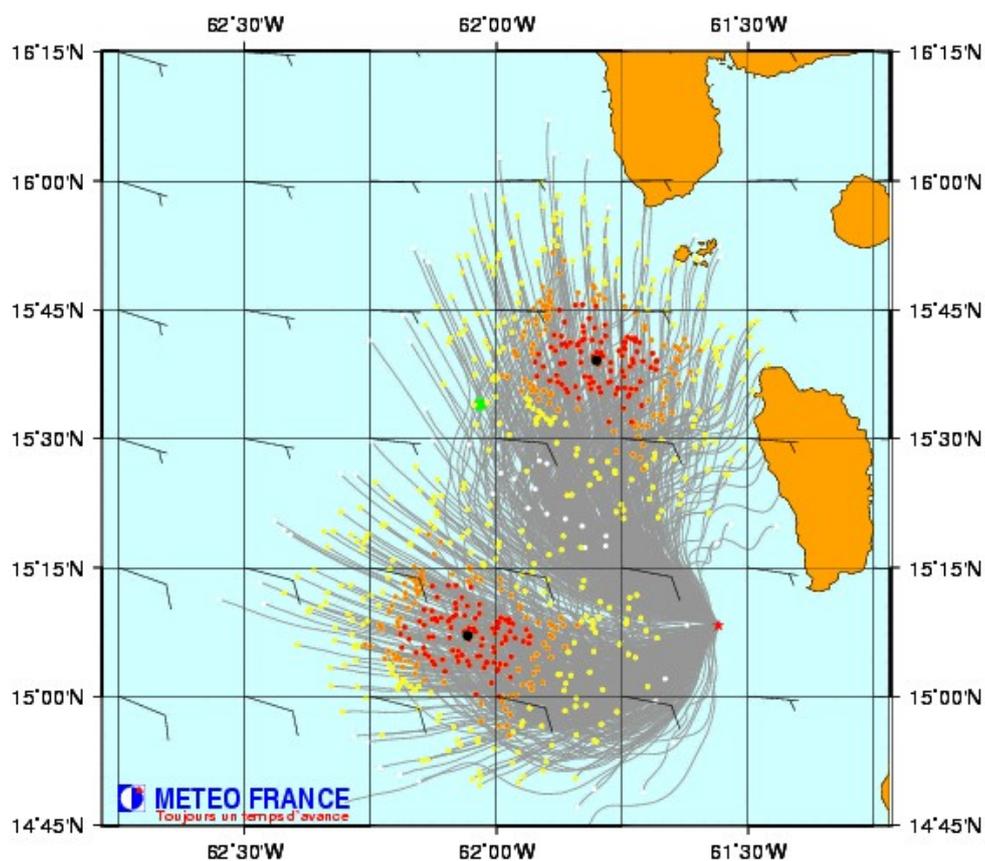
On simule la dérive de 480 objets dont les caractéristiques suivent une distribution statistique ce qui permet d'associer une probabilité aux prévisions de dérive. Selon l'orientation initiale de l'objet, celui-ci peut dériver à droite ou à gauche du vent. L'incertitude sur la dérive liée aux caractéristiques de l'objet et à l'environnement est prise en compte dans la dérive des points de couleur.

Sur la carte ci-dessous, les deux points noirs prennent en compte le fait que la dérive gauche ou droite est la prévision déterministe.

L'incertitude sur la dérive liée aux caractéristiques de l'objet et à l'environnement est prise en compte dans la dérive des points de couleur. Les points rouges, oranges, jaunes et blancs correspondent à la probabilité de présence :

- 50% pour les points rouges
- 68% pour les points rouges et oranges
- 95% pour les points rouges, oranges et jaunes
- 99% pour les points rouges, oranges, jaunes et blancs.

MOTHY/CEP Prévision pour le 21/09/2008 à 19 utc



Position initiale :
 le 18/09/2008 à 18h07 utc
 Latitude : 15° 08,23'
 Longitude : -61° 33,54'

Voilier

Mono-hull full keel, deep draft

Prévision déterministe:

2 points noirs

Probabilité de présence:

50%: rouge

68%: rouge+orange

95%: rouge+orange+jaune

99%: rouge+orange+jaune+blan

Extraction GEBCO 5 minutes

Résolution: 5 (minute)

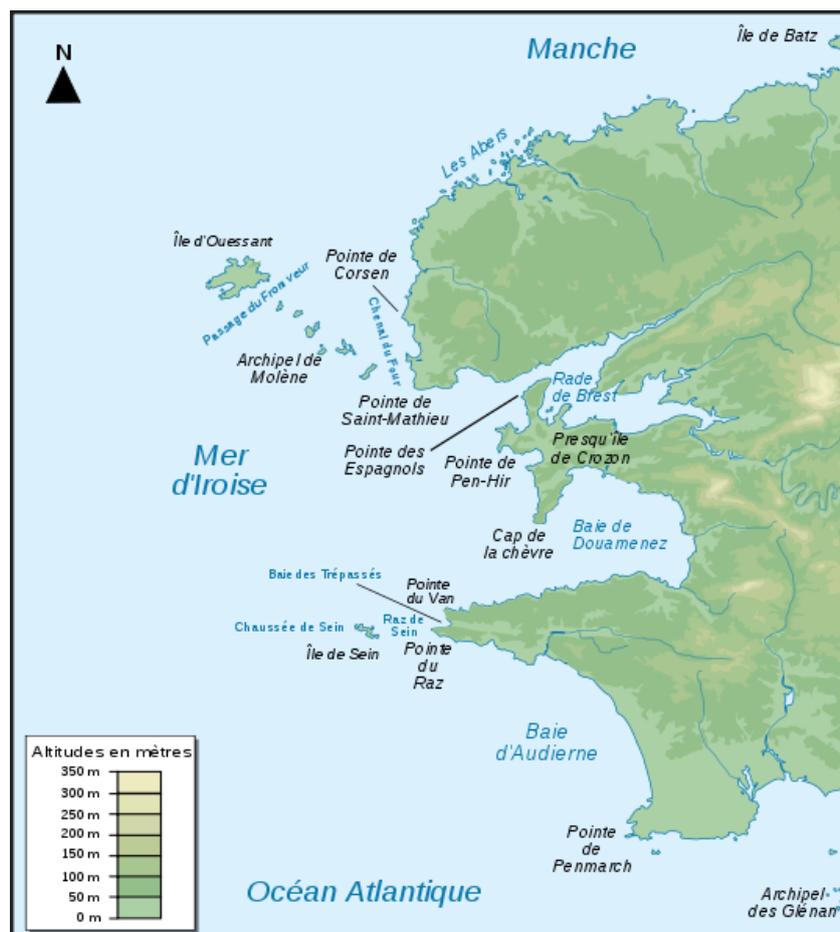
Système géodésique: WGS 84

IV. Radars Haute Fréquence en mer d'Iroise

Depuis le début des années 1970, la technique radar courantomètre a progressé aux États-Unis et en Europe. Elle est maintenant opérationnelle sur la côte Est américaine, en Angleterre et également en Italie.

1. La mer d'Iroise

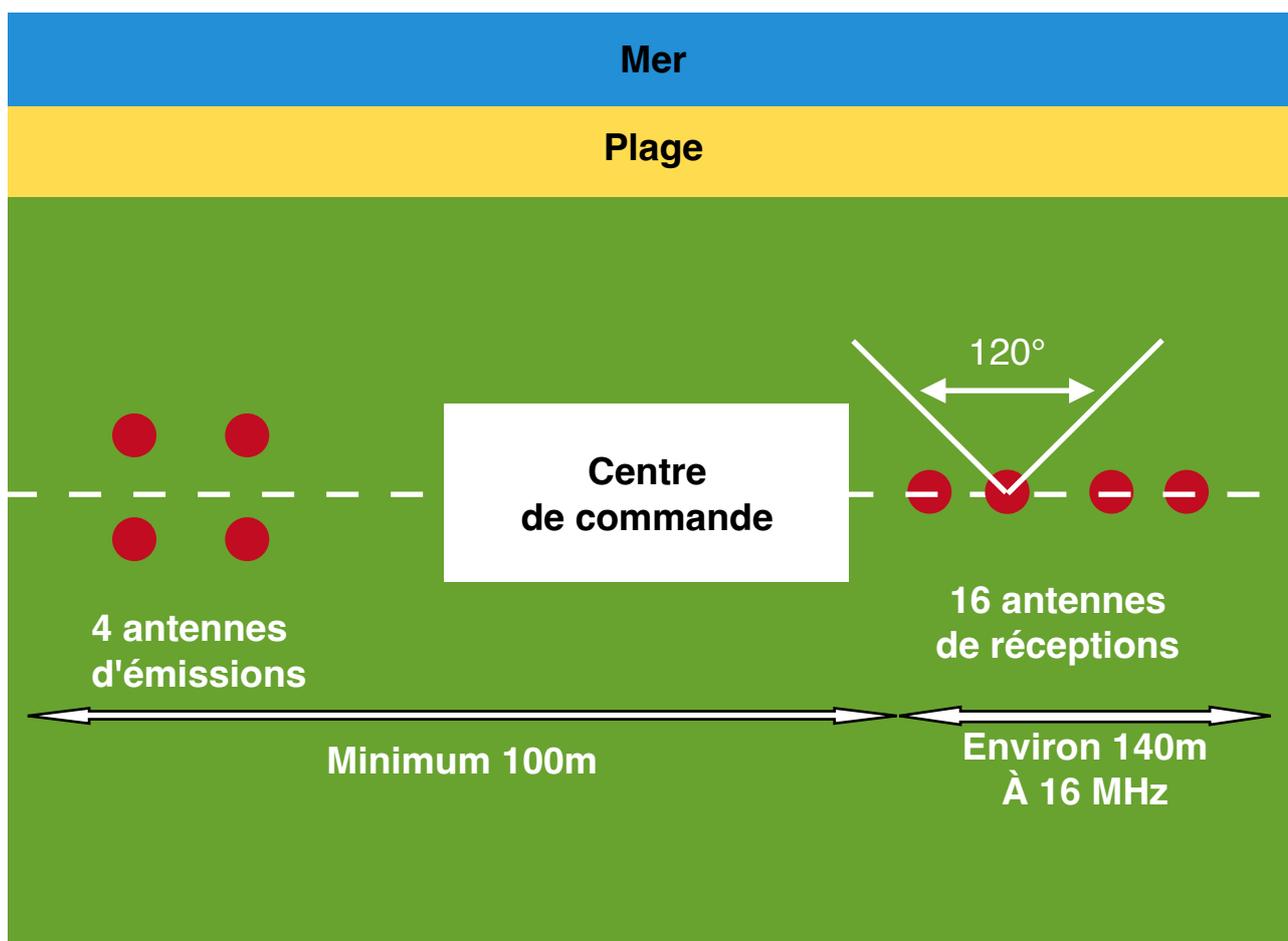
La mer d'Iroise est située à l'ouest de la pointe de la Bretagne. Elle constitue un domaine peu profond (profondeurs inférieures à 150 mètres) qui s'étend au nord au-delà de l'île d'Ouessant et de l'archipel de Molène jusqu'à 48°45'N, et au sud au-delà de la chaussée de Sein jusqu'à 47°40'N. A l'ouest, la mer d'Iroise s'étend jusqu'à 6°W à l'ouest et à l'est jusqu'à 4°W. Elle est soumise à l'action des courants et des vagues générées par les vents et à de forts courants de marée, (8 nœuds de marée de vives-eaux de coefficient 115 dans le passage du Fromveur entre Molène et Ouessant), très différents d'un endroit à l'autre, ce qui détermine le régime de circulation de ces masses d'eau. La marée est semi-diurne et l'onde de marée progresse du sud au nord en tournant autour de la pointe de Bretagne. Elle engendre des courants importants liés à la forme du littoral et à la profondeur de la région. Ces courants sont forts le long de la côte nord finistérienne (3 nœuds), au voisinage de l'île de Sein et de l'île d'Ouessant et dans les zones de rétrécissement, mais sont relativement faibles dans les baies, entre les deux îles précédentes et sur la côte sud (1 nœud).



2. Installations

Les radars installés sont des radars WERA développés par l'Université de Hambourg. Ils sont installés en Bretagne de manière à pouvoir mesurer les courants de la mer d'Iroise. Un est situé à la pointe de Garchine sur la commune de Porspoder, et l'autre à la pointe de Brézellec sur la commune de Cléden-Cap-Sizun. Les installations sont les suivantes:

- un réseau d'émission composé de 4 antennes en rectangle.
- un réseau de réception composé de 16 antennes alignées.



Installation des radar HF sur la plage

(La longueur totale de l'installation est d'environ 360 mètres)

3. Principe de mesure

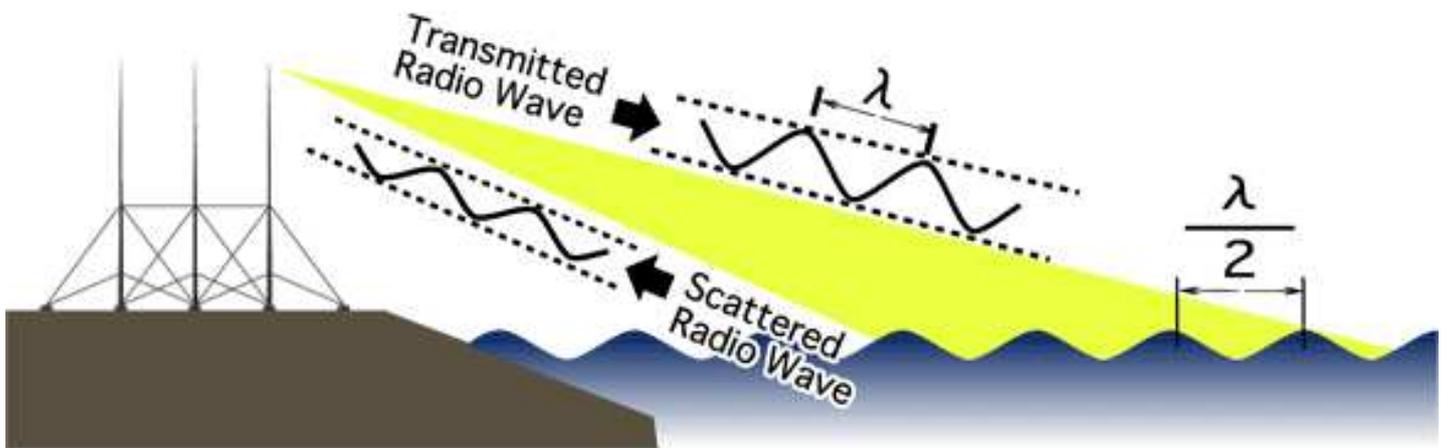
Les quatre antennes d'émission, appelées antennes fouet, émettent une onde de faible puissance (30 Watts) en continu, dans la bande passante de 12 MHz. Les ondes sont réfléchies par la mer. Le réseau de seize antennes écoute l'écho, qui malgré sa faiblesse, possède une signature spécifique des vagues à la surface de la mer.

Tout d'abord les échos sont triés pour déterminer de quelle région ils proviennent : le temps d'aller-retour de l'onde, à la vitesse de la lumière, est utilisé pour savoir à quelle distance se trouve la source de l'écho. Pour localiser la position il faut alors déterminer l'angle (azimuth). Il existe deux grandes méthodes : la goniométrie et la formation de voie. La formation de voie est la plus utilisée avec les 16 antennes de réception qui permettent de séparer des signaux arrivant de deux azimuth

séparés de 10° , quels que soient les signaux. La goniométrie peut souvent donner une meilleure résolution, mais ce n'est pas systématique.

Ainsi, chaque radar est capable d'attribuer à une région de l'océan (on parle de cellule de mesure) les échos enregistrés. Ces cellules sont petites près du radar (environ 1 km par 1 km) mais plus grandes au fur et à mesure que l'on s'éloigne.

Dans chaque cellule de mesure, l'écho principal est produit par les vagues se propageant soit vers le radar soit dans le sens opposé, avec une longueur d'onde qui est, dans les deux cas, la moitié de l'onde radar (ce sont les "vagues de Bragg"). La vitesse de ces vagues donne le décalage de la fréquence de l'onde par effet Fizeau-Doppler, de la même manière que les gendarmes mesurent la vitesse des voitures par radar, ou que les médecins mesurent la vitesse du sang dans les artères (dans ce dernier cas, il s'agit d'ondes acoustiques). Or, le courant dans le sens de visée, ainsi que les autres vagues, contribue à la vitesse des vagues de Bragg. Chaque station radar peut donc mesurer le courant dans la direction de visée. La combinaison des deux composantes, mesurées par les deux stations, donne le vecteur courant. La portée de mesure dépend de l'amplitude des vagues de Bragg, de la présence de bruit (émissions radio ondes courtes, autres radars), et atteint typiquement 100km. Le courant mesuré est généralement proche du courant induit par la marée et les variations de température et de salinité de l'océan. Pour la partie du courant induite par le vent, il convient par contre de dissocier le courant moyen du courant résiduel induit par les vagues (dérive de Stokes). Le radar mesurant une vitesse intermédiaire. En pratique, la vitesse mesurée est très proche de la vitesse de la dérive de l'eau au voisinage de la surface. Ce genre de détails fait encore l'objet de recherches qui combinent nécessairement le courant, la turbulence et les vagues.



La longueur d'onde des vagues de Bragg (λ_b) est $\lambda_b = \lambda/2$.

V. Exploitation des données

1. Récupération des données des radars HF

Tout d'abord, il faut comparer les données MOTHY, qui sont la base et le repère du travail à effectuer, et les données des radars. Pour cela il faut, dans un premier temps, analyser les données des radars. Ces dernières sont sous formes de fichier dont les sept premières lignes donnent le nom du radar utilisé, la date et l'heure du début de la mesure, la durée de la mesure en minute et seconde, la délimitation des mesures exprimée par les latitudes et les longitudes minimales et maximales, et pour terminer, le nombre de points pris entre chaque latitude et entre chaque longitude. La suite du fichier est composée de six colonnes (dont les deux dernières ne nous intéressent pas). Les deux premières colonnes correspondent respectivement à l'indice de grille en longitude et à l'indice de grille en latitude. En effet, l'origine du repère se situe en la longitude minimale et en la latitude maximale. L'intervalle de longitude est segmenté en 80 morceaux identiques et celui des latitudes en 110 morceaux. Nous obtenons donc une grille de 8800 points. Chaque point est donc défini par un X et un Y dans le fichiers qui correspond aux deux premières colonnes. Les deux colonnes suivantes correspondent aux composantes U et V du courant en mètre par seconde. (voir annexe I.1)

Toutes ces données ne sont pas exploitables pour MOTHY, mais également pour le logiciel de tracé de carte GMT. En effet, il faut commencer par transformer les points de grilles en latitudes et longitudes pour que le logiciel puisse les lire. Ensuite il faut transformer les composantes U et V du courant, en direction et vitesse, pour avoir une représentation vectorielle.

2. Programme Fortran pour la transformation du fichier

Pour transformer ces fichiers, nous avons donc mis au point un programme en langage Fortran qui fonctionne en deux étapes (voir annexe I.2).

La première étape transforme les composantes U et V en direction et vitesse de la façon suivante :

- ff = vitesse du vecteur représentant le courant;
- dd = direction du vecteur représentant le courant;
- uu = composante U du courant;
- vv = composante V du courant.

$$ff = \sqrt{uu^2 + vv^2}$$

Pour uu il faut distinguer plusieurs cas :

- 1er cas :
si $uu = 0$ et si $vv \geq 0$ alors $dd = 0$
- 2ème cas :
si $uu = 0$ et si $vv < 0$ alors $dd = 180$
- 3ème cas :
si $uu > 0$ alors $dd = 90 - \arctan(vv/uu) * 180/\pi$
- 4ème cas :
si $uu < 0$ alors $dd = 270 - \arctan(vv/uu) * 180/\pi$

Le fait de multiplier par $180/\pi$ sert à transformer la valeur de "arctan", qui est en radians, en degrés.

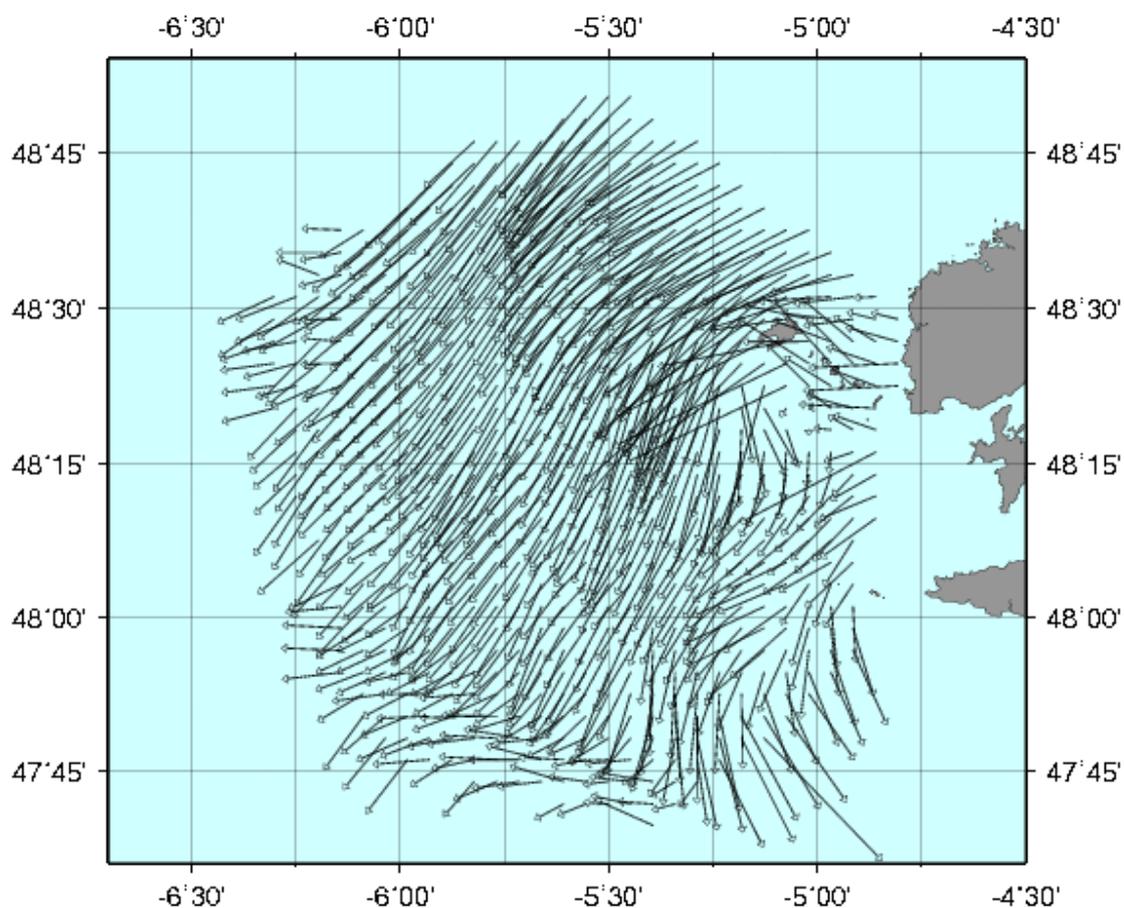
La deuxième étape du programme transforme les coordonnées des points de grille en longitude et latitude de la façon suivante:

longitude = "longitude minimale" - (("longitude minimale" - "longitude maximale") / "nombre de points de grille en longitude") * "un des nombre de la première colonne"

latitude = "latitude minimale" - (("latitude minimale" - "latitude maximale") / "nombre de points de grille en latitude") * "un des nombre de la deuxième colonne"

Une fois ces deux étapes effectuées dans le programme, un nouveau fichier, que nous appellerons lon_lat_dir_for (voir annexe I.3), se crée qui lui sera lisible par GMT. Comme nous l'avons dit auparavant, ce logiciel permet de créer tous les types de cartes de n'importe quelle partie du monde, mais également de tracé des vecteurs, des isolignes...

Le résultat obtenu est le suivant :



Tracé des courants avec le logiciel GMT le 02/10/2008 à 1h UTC

3. Programme Fortran pour obtenir des fichiers lisibles par MOTHY

Maintenant, il faut comparer cette carte avec une carte obtenu avec MOTHY pour bien constater que les données radars et les données de MOTHY concordent.

Pour obtenir ce type de tracé grâce à MOTHY, il faut utiliser la version hydrocarbure. Pour pouvoir utiliser cette version il faut définir une nappe, du même type qu'une nappe de pollution, à la

différence que le nombre de points sera défini par la taille du fichier de courant que nous allons créer.

Pour concevoir ce fichier, il suffit simplement de prendre dans le fichier lon_lat_dir_for toutes les longitudes et les latitudes (voir annexe I.4).

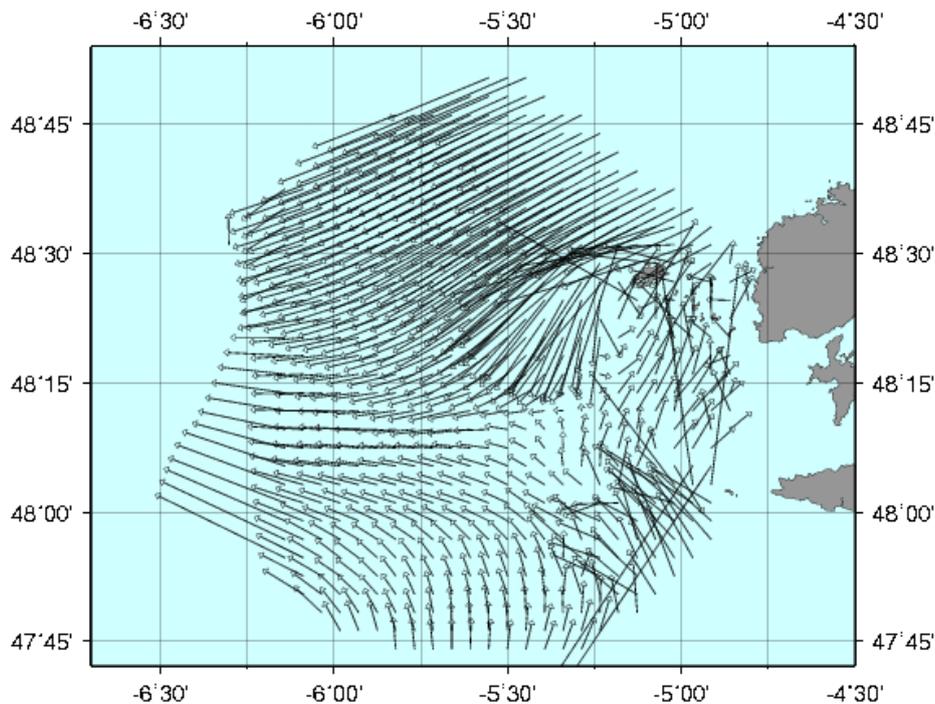
Ensuite, il faut lancer MOTHY une première fois avec une résolution de 1 minute, par exemple.

Une fois que le modèle a terminé ses calculs, il faut récupérer un fichier crée par MOTHY, que j'appellerai uu_vv, qui correspond aux composantes U et V du courant obtenus après les calculs, à chaque point de la nappe (voir annexe I.5).

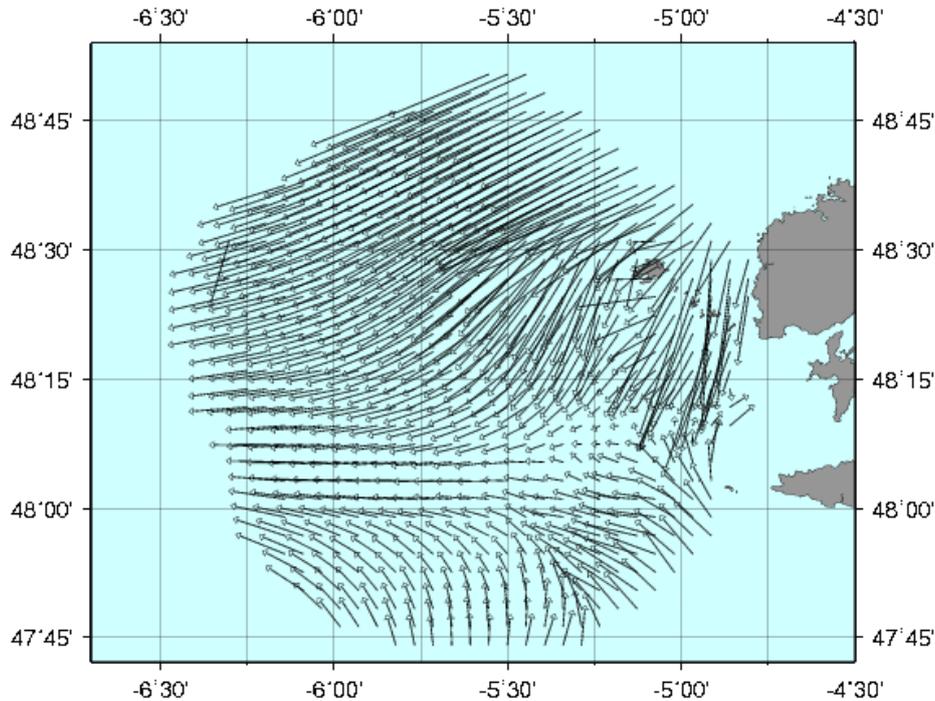
Ensuite avec un nouveau programme Fortran (voir annexe I.6), il faut réattribuer à chaque longitude et latitude la direction et la vitesse, après avoir à nouveau transformé les composantes U et V en direction et vitesse.

Une fois ce nouveau fichier obtenu, il faut réaliser la même opération que précédemment avec le logiciel GMT, afin d'obtenir une nouvelle carte.

Quand tout ceci a été réalisé, il faut relancer MOTHY, mais avec une résolution de 5 minutes cette fois-ci. Il faut renouveler toutes les étapes précédentes pour obtenir une nouvelle carte.



Tracé des courants obtenus avec le modèle MOTHY 1' le 02/10/2008 à 1h UTC



Tracé des courants obtenu avec le modèle MOTHY 5' le 02/10/2008 à 1h UTC

Ces trois tracés ont été effectués le même jour, à la même heure. Nous pouvons constater des différences de vitesses et de directions des vecteurs. Pour confirmer cela, des tracés et des comparaisons ont été effectués durant trois jours différents (le 2 octobre 2007, le 18 octobre 2007 et le 29 novembre 2007) entre minuit UTC et 13 heures UTC. Au cours de ces 13 heures, il y aura eu la pleine mer et la basse mer. Ces dates ont été choisies telles que la pleine mer soit aux alentours de 7 heures UTC et la basse mer aux alentours de 1 heure UTC.

4. Comparaison des directions et des vitesses des données MOTHY et radar HF

Le but de cette analyse est de regarder si la marée influe sur les différences de directions et de vitesses constatées sur les cartes ou si les différences et la marée n'ont rien en commun.

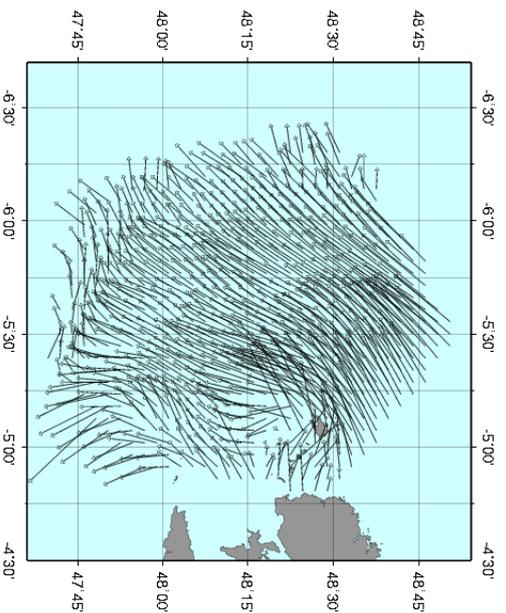
Dans un premier temps, il fallait lancer le modèle MOTHY hydrocarbure en résolution 1' puis 5', après avoir créé la nappe à l'aide des données des radars HF. Ensuite il a fallu réitérer les étapes évoquées précédemment pour le tracé des trois cartes des courants. (voir ci-après et annexe II.1)

Tous les points du nouveau fichier créé ne sont pas présents dans le fichier des données des radars et réciproquement tous les points des données des radars ne sont pas présents dans le dernier fichier créé à l'aide de MOTHY. Une fois le tri réalisé, nous créons quatre fichiers. Un pour comparer les directions entre les données du modèle MOTHY 1' et les données des radars HF, un pour comparer les vitesses entre les données du modèle MOTHY 1' et les données des radars HF, et deux autres avec le modèle MOTHY 5'.

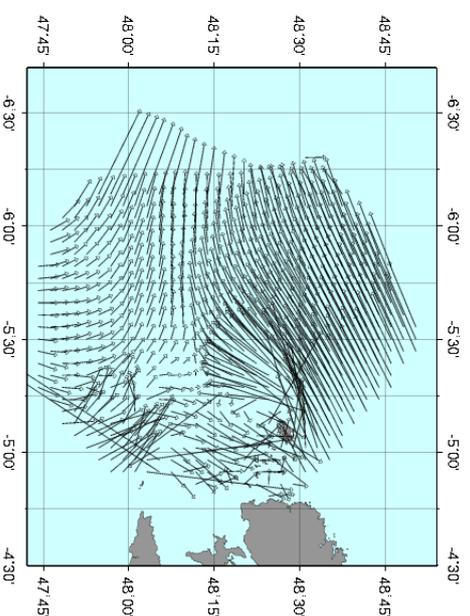
Une fois ces quatre fichiers créés, il ne reste plus qu'à tracer avec le logiciel GMT les isolignes correspondant aux différences (voir ci-après et annexe II.2)

COMPARAISONS ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5' LE 02/10/2007 À 01H00 UTC, 30 MINUTES APRÈS LA BASSE MER

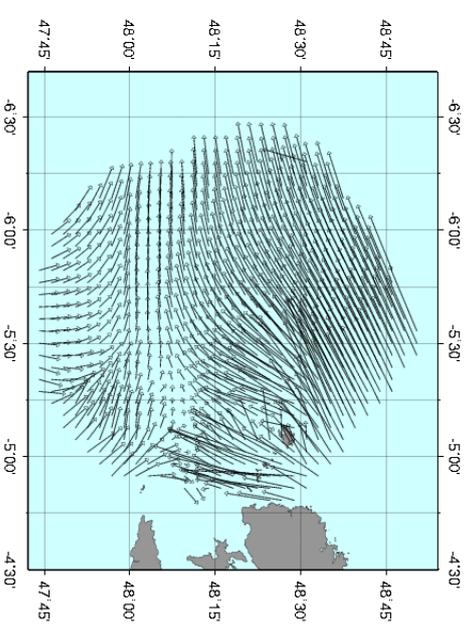
Représentation vectorielle des données obtenues avec radars HF



Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 1'

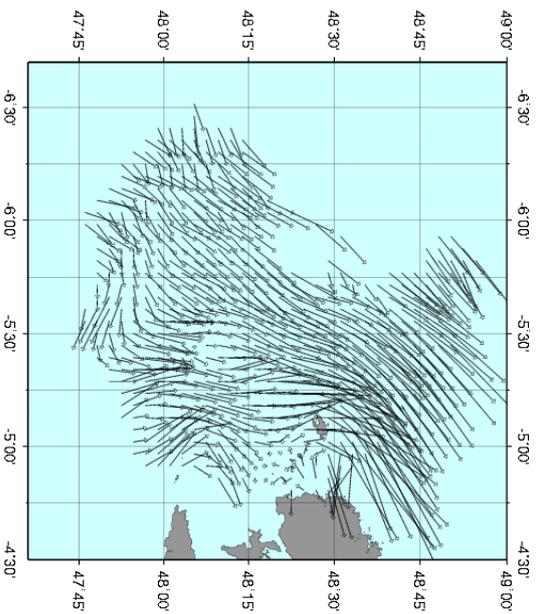


Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 5'

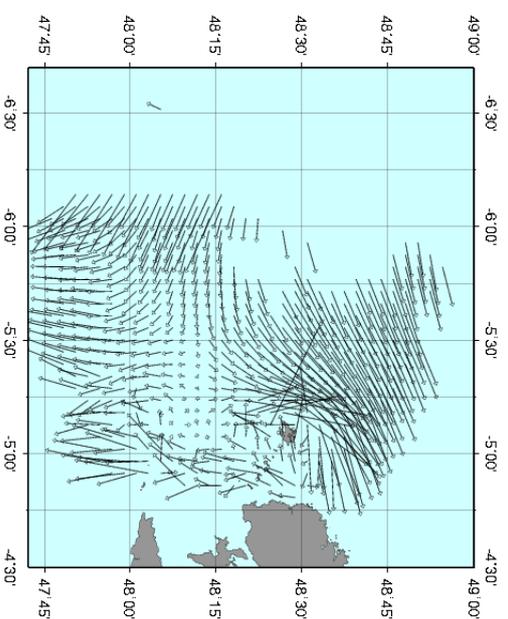


COMPARAISONS ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5' LE 02/10/2007 À 07H00 UTC, 25 MINUTES APRÈS LA PLEINE MER

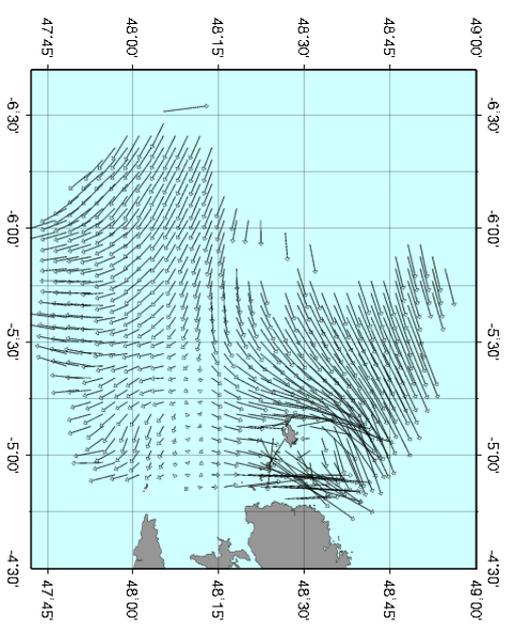
Représentation vectorielle des données obtenues avec radars HF



Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 1'

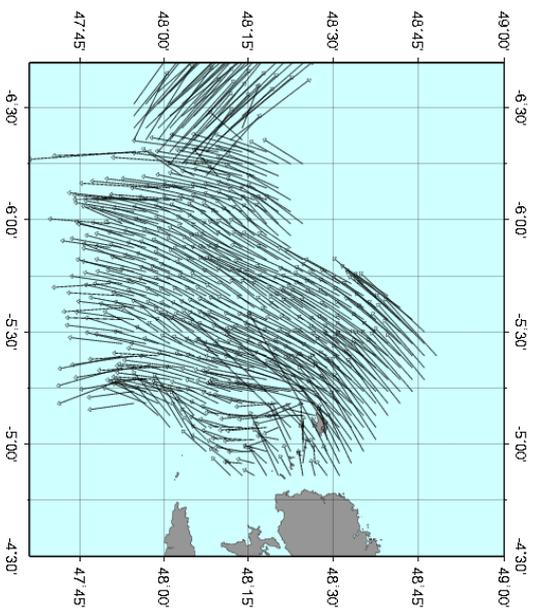


Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 5'

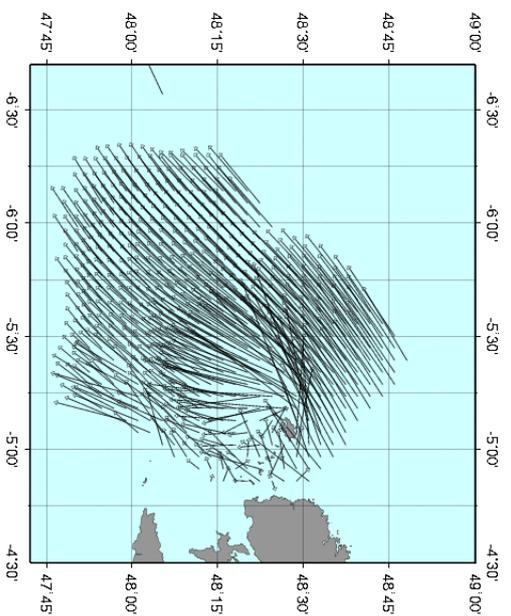


COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5' APRÈS LA PLEINE MER

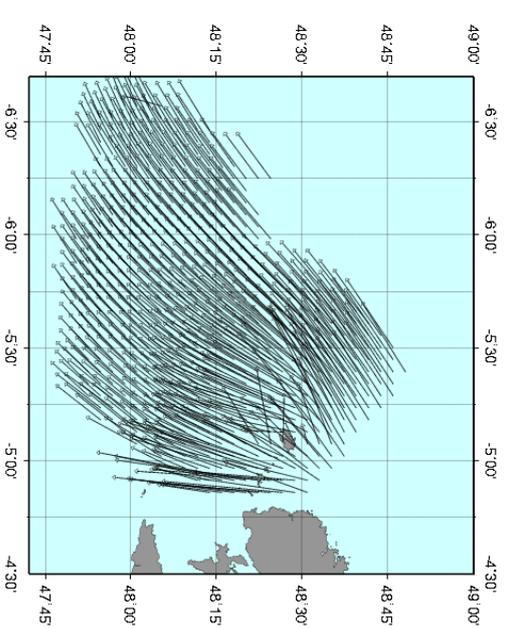
Représentation vectorielle des données obtenues avec les radars HF

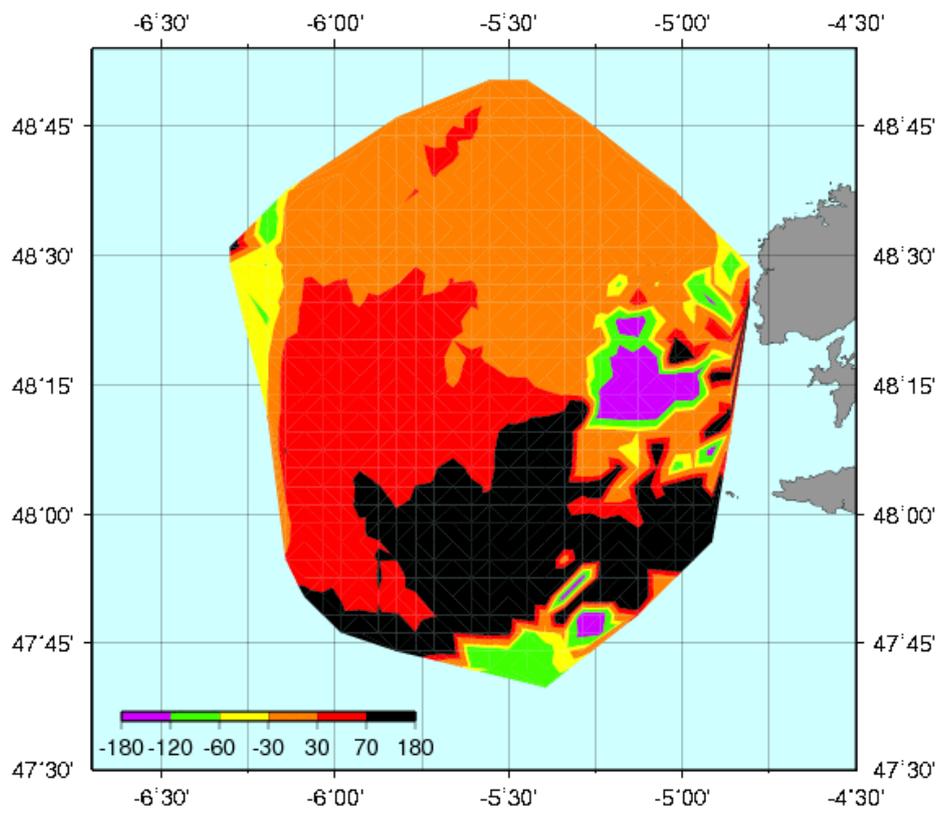


Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 1'

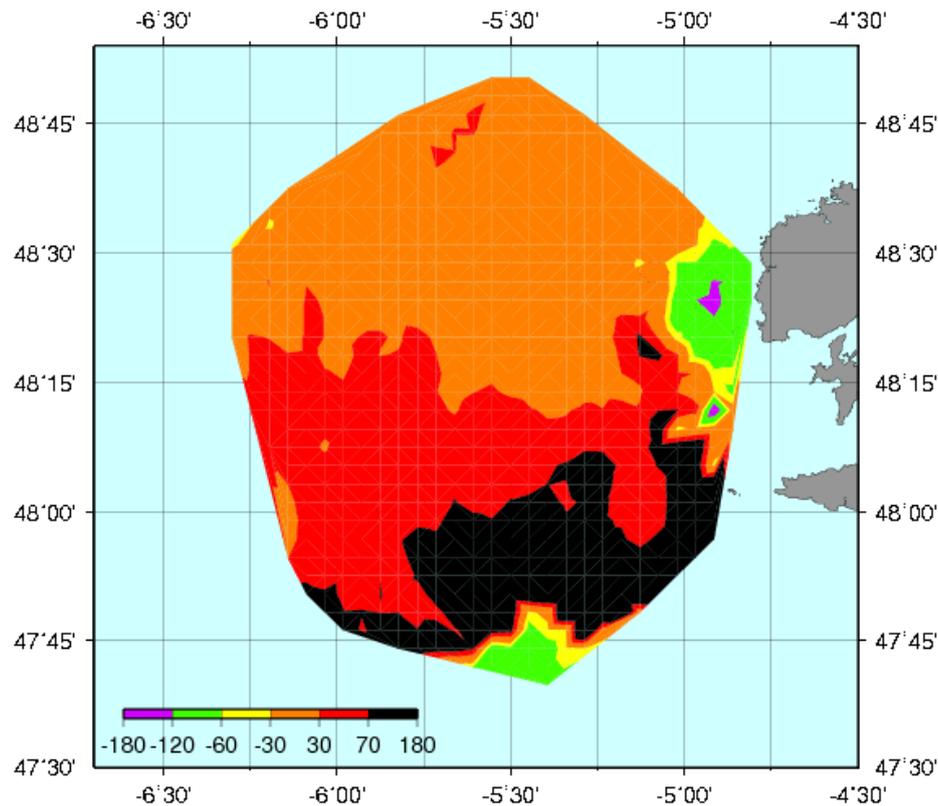


Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 5'



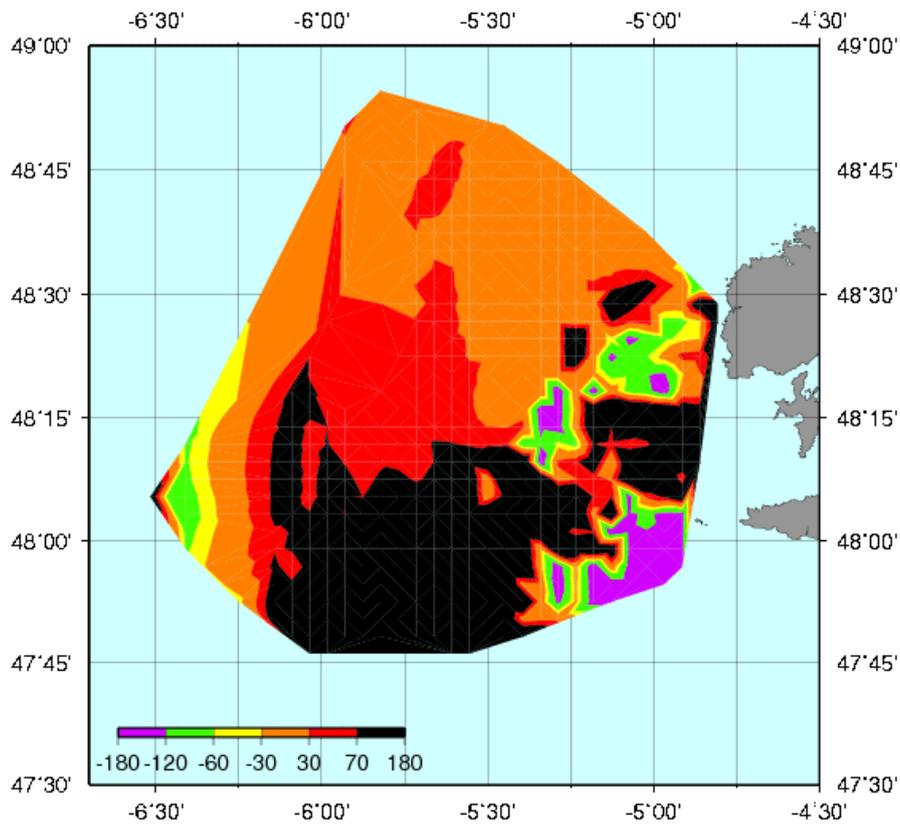


Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 02/10/07 à 1h UTC)

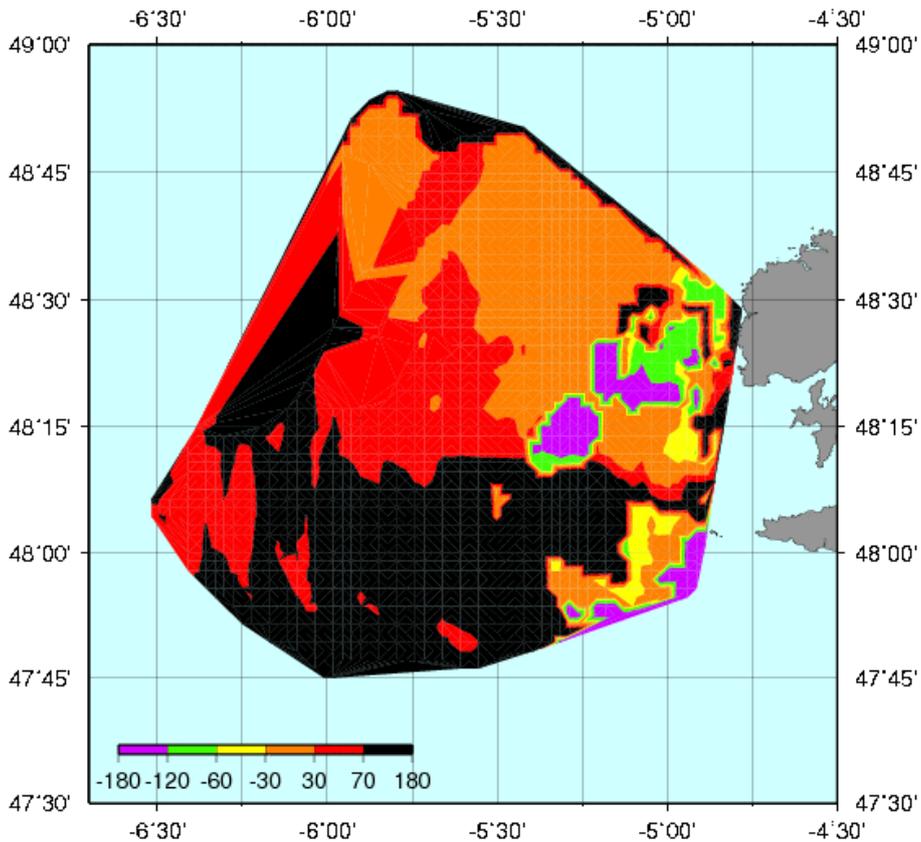


Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 02/10/07 à 1h UTC)

Les échelles sont en degrés. Dans la partie nord de la représentation, nous voyons que les données sont proches, en revanche au sud de grosses différences sont constatées. Nous sommes en basse mer au Conquet.

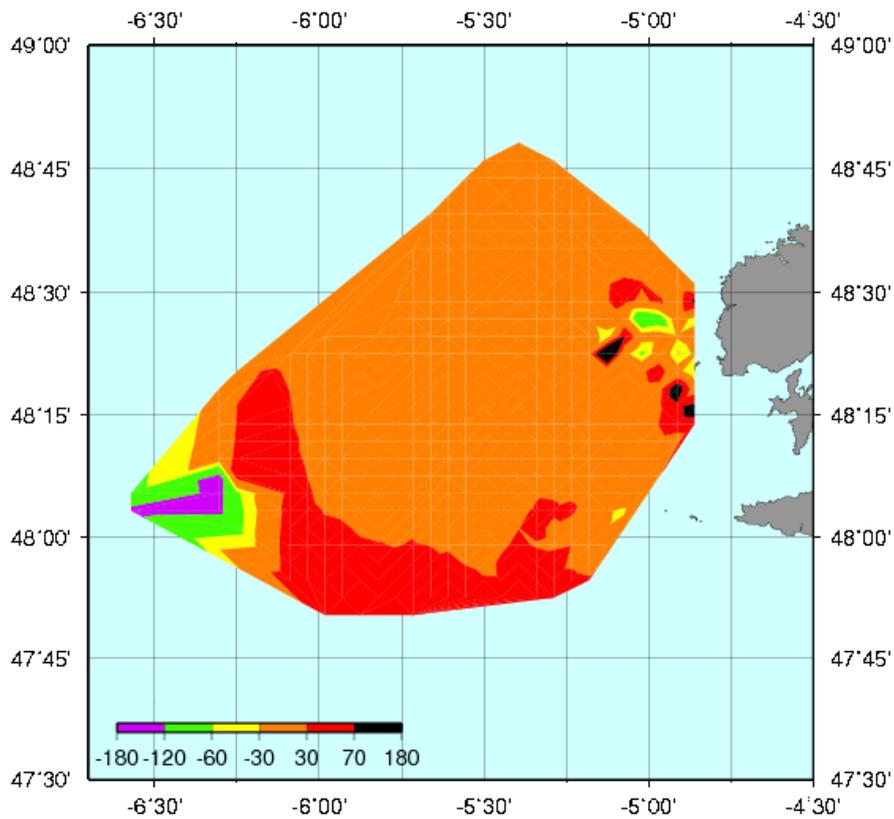


Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 1' (le 02/10/07 à 7h UTC)

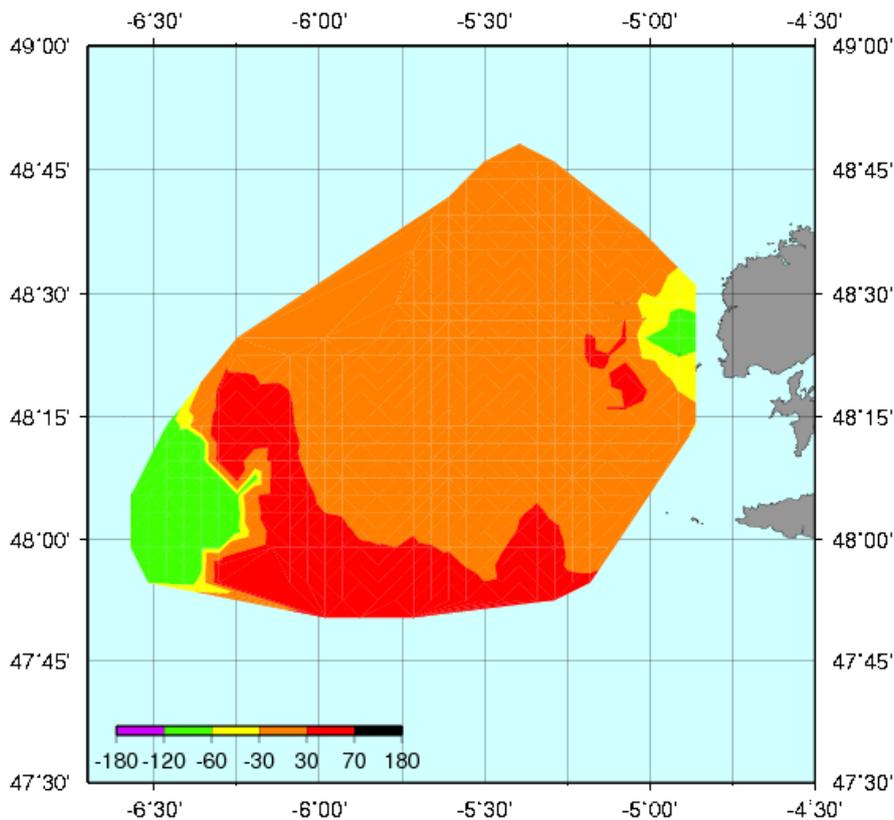


Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 5' (le 02/10/07 à 7h UTC)

Les échelles sont en degrés. Dans ce cas, les données sont différentes de plus de 30° pratiquement partout. Nous sommes en période de pleine mer avec un coefficient de 69 au Conquet.

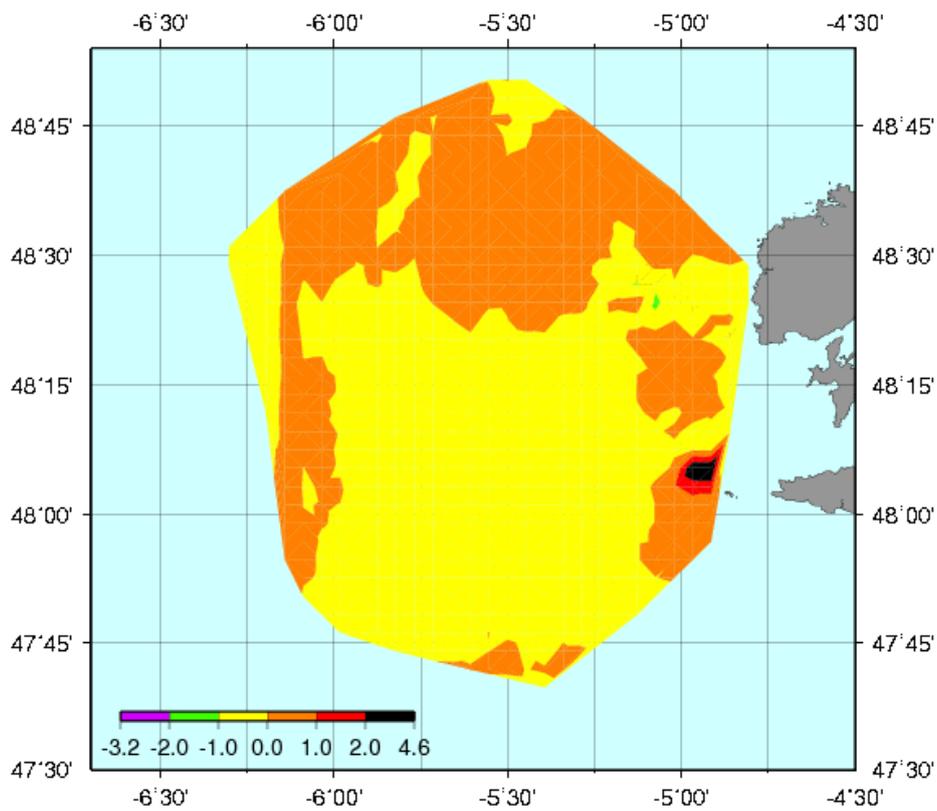


Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 1' (le 02/10/07 à 12h UTC)

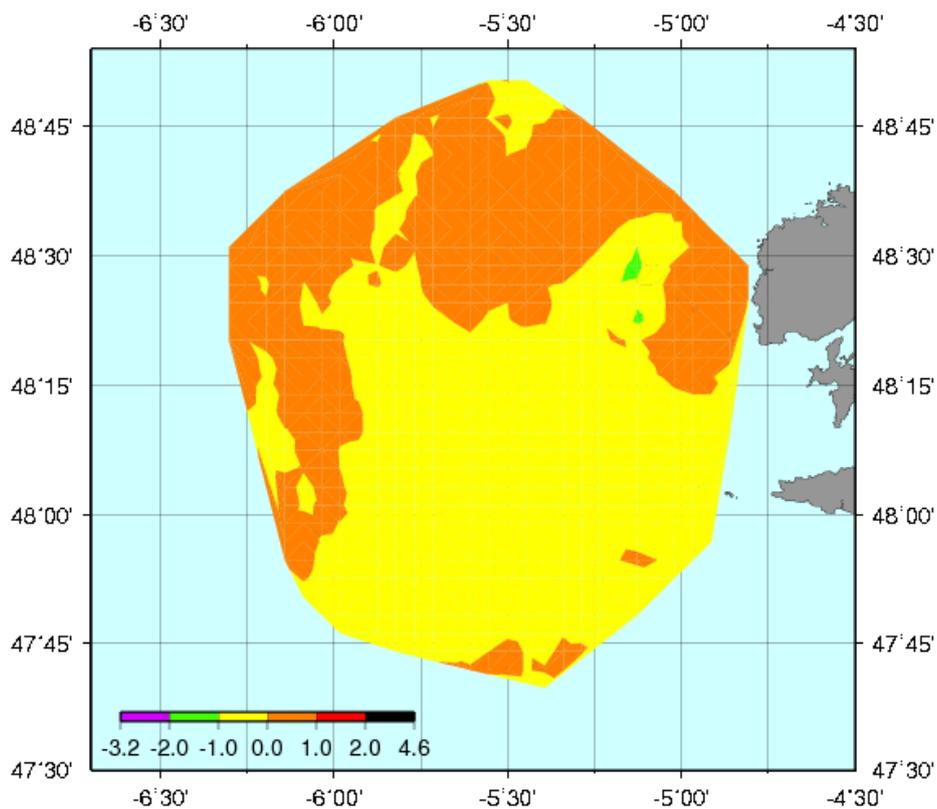


Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 5' (le 02/10/07 à 12h UTC)

Les échelles sont en degrés. Nous sommes à mi-marée descendante au Conquet, la grande majorité de la représentation montre que les données du modèle et du radar sont proches.

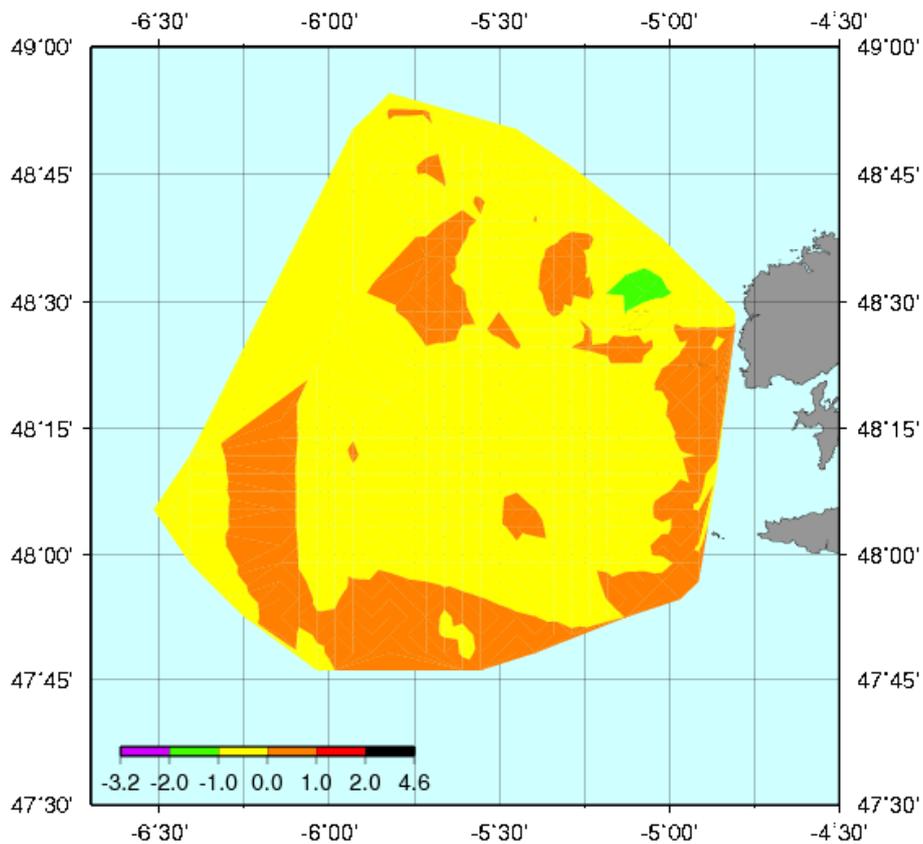


Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 1' (le 02/10/07 à 1h UTC)

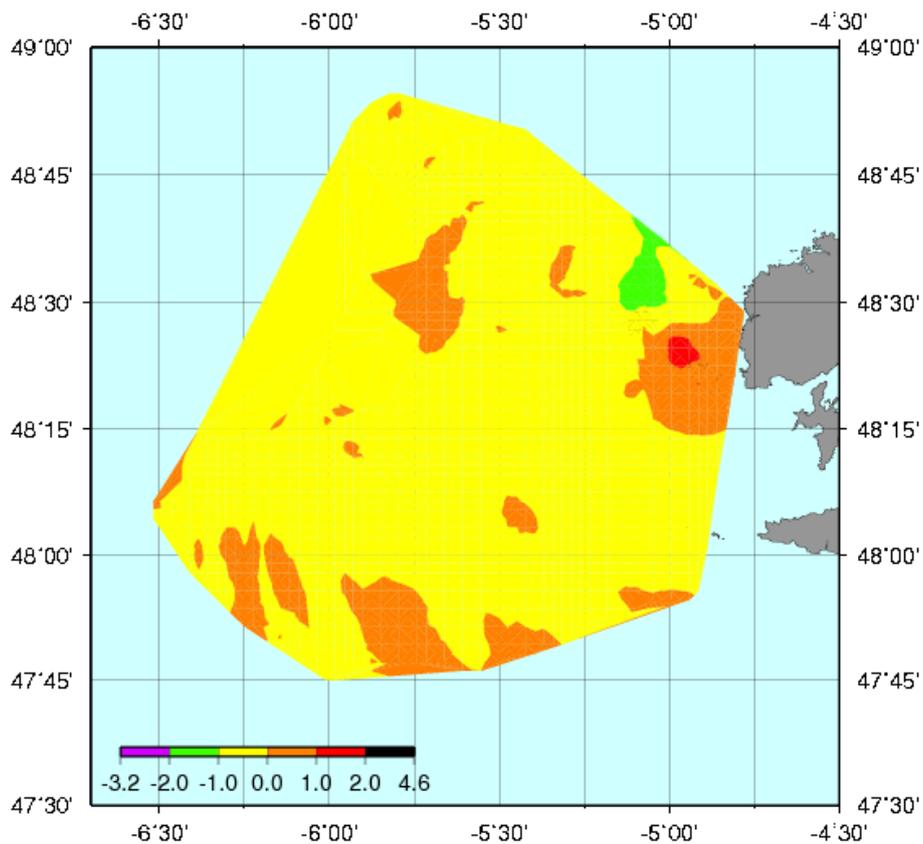


Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 5' (le 02/10/07 à 1h UTC)

Les échelles sont en mètre par seconde. La très grande majorité des valeurs est dans l'intervalle [-1 ; 1]. Les données du modèle et celles du radar sont donc proches. Nous sommes, dans ce cas, en période de basse mer au Conquet.

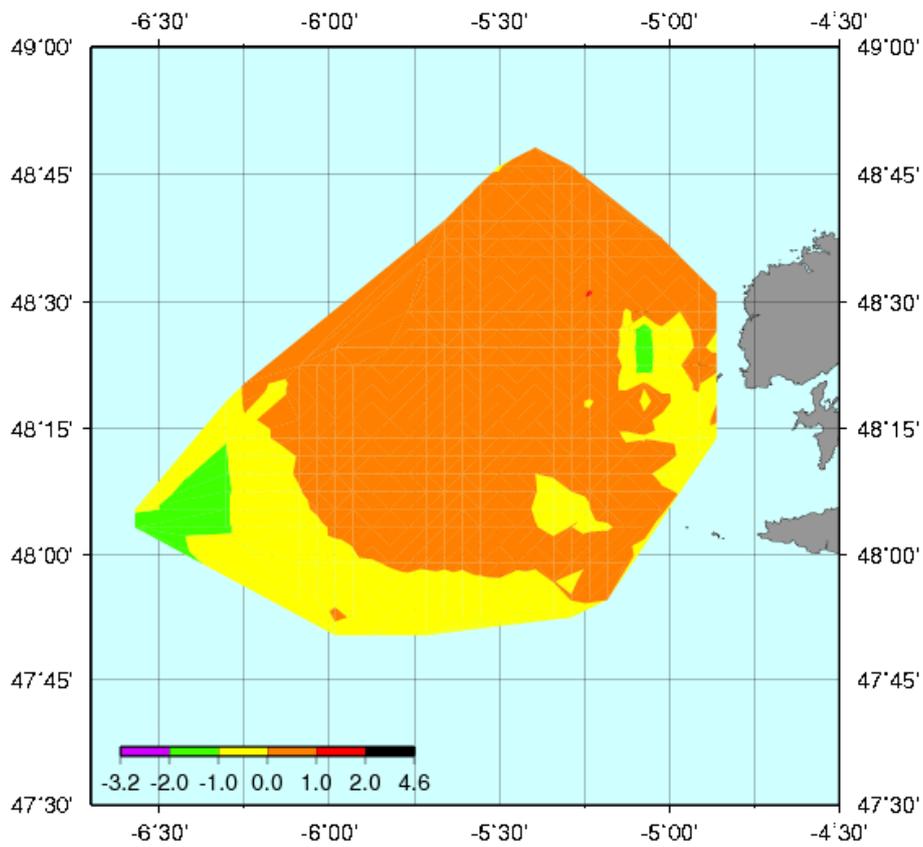


Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 1' (le 02/10/07 à 7h UTC)

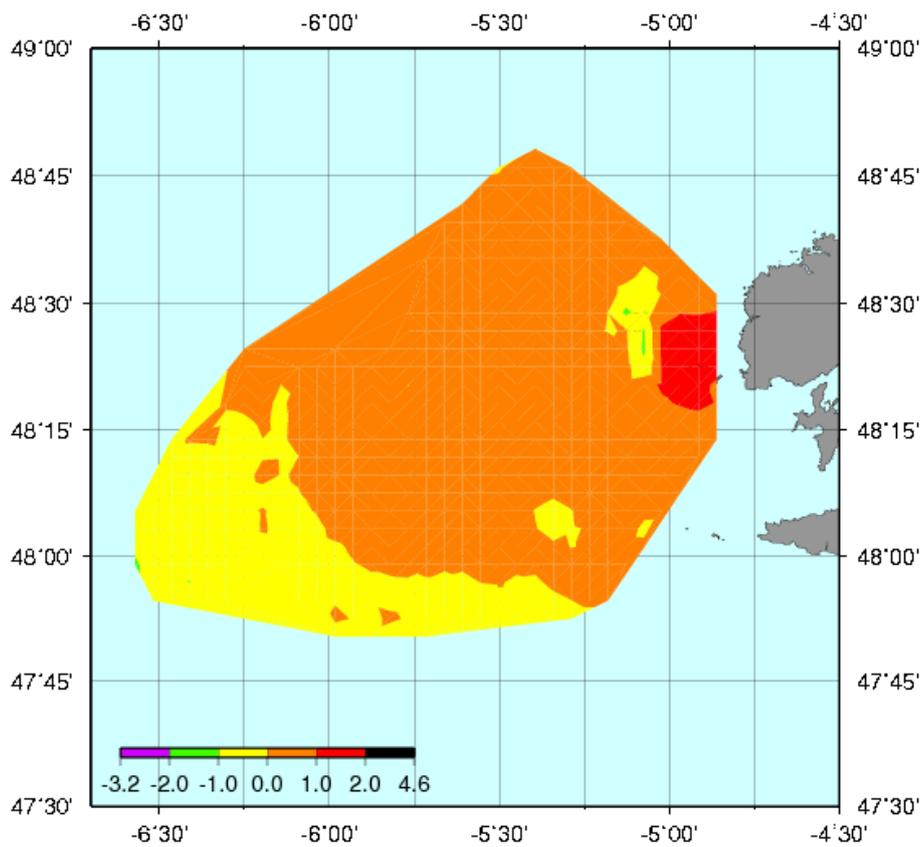


Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 5' (le 02/10/07 à 7h UTC)

Ici également, la grande majorité des valeurs est situé dans l'intervalle $[-1 ; 1]$. Nous sommes en phase de pleine mer au Conquet, et apparemment ceci n'influe pas sur les valeurs.



Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 1' (le 02/10/07 à 12h UTC)



Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 5' (le 02/10/07 à 12h UTC)

Nous sommes à mi-marée descendante au Conquet et, dans ce cas encore, les données radars et celles du modèle sont très proches.

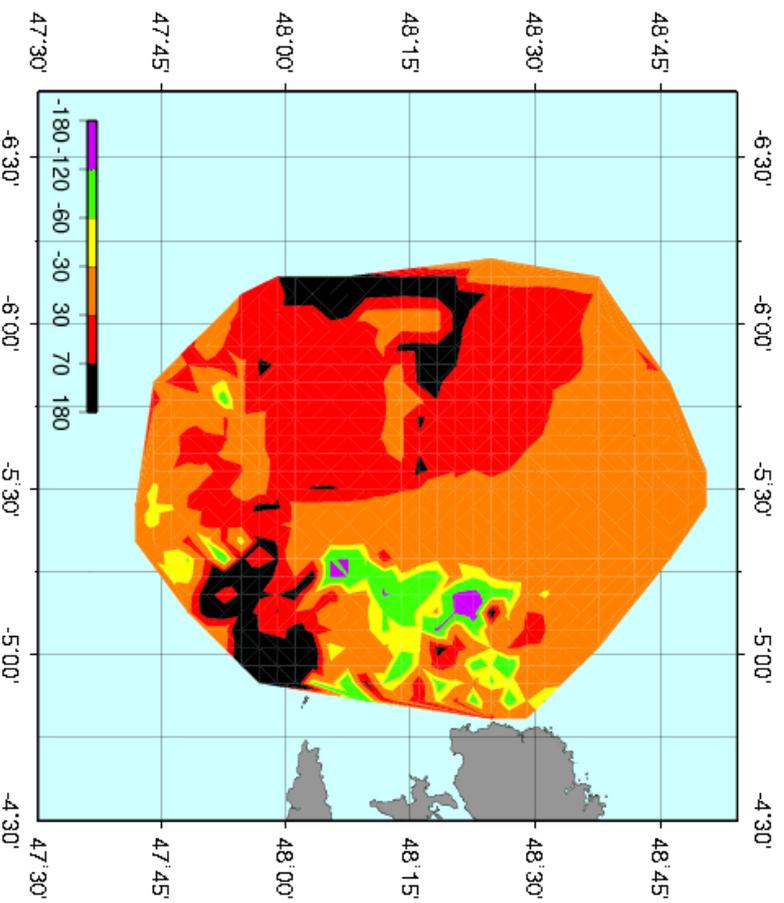
Dans les six cas précédents, nous constatons que, pour les différences de vitesses, que l'instant choisit se situe à pleine mer, à basse mer ou à un moment intermédiaire il n'y a pas de gros écarts. En revanche pour les différences de direction, ce n'est pas le même cas. Pour la pleine et la basse mer, de grandes disparités sont constatées, et principalement dans la zone sud de la représentation. Il n'y a pas d'explications à ce phénomène. Par contre, pour le cas de 12h UTC, il n'y a pratiquement pas de divergences significatives (pour d'autre cas voir annexe II.2).

Pour confirmer ces tendances nous avons mis au point un programme permettant de faire la moyenne des différences des directions et des vitesses sur les trois jours observés. C'est à dire que pour chaque heure observée, (donc les 02/10/2007, 18/10/2007 et 29/11/2007 de 0H00 UTC à 13h00 UTC), il a fallu prendre les points en commun aux trois fichiers des différences de directions puis des trois fichiers des différences des vitesses, et en faire des moyennes.

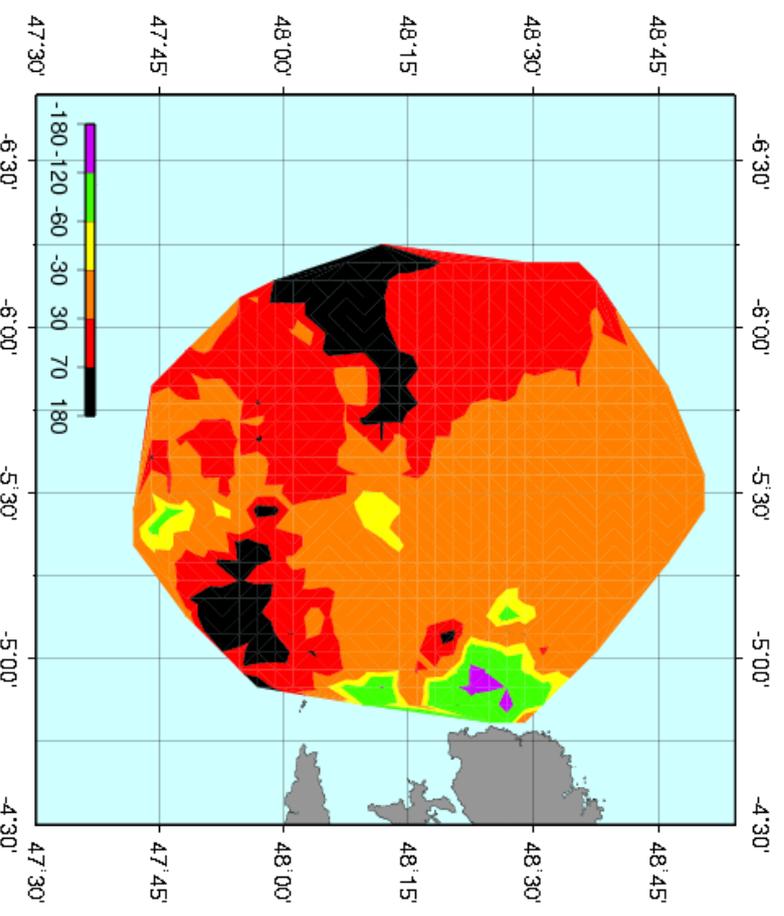
Les résultats sont les suivants :

MOYENNE DES DIFFÉRENCES DES DIRECTIONS ENTRE LES DONNÉES DES RADARS HF ET CELLES DES MODÈLES MOTHY 1' ET 5' LES 02/10/2002, 18/10/2007 ET 29/11/2007 À 01H00 UTC, À BASSE MER

Moyenne des différences des directions
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 1'

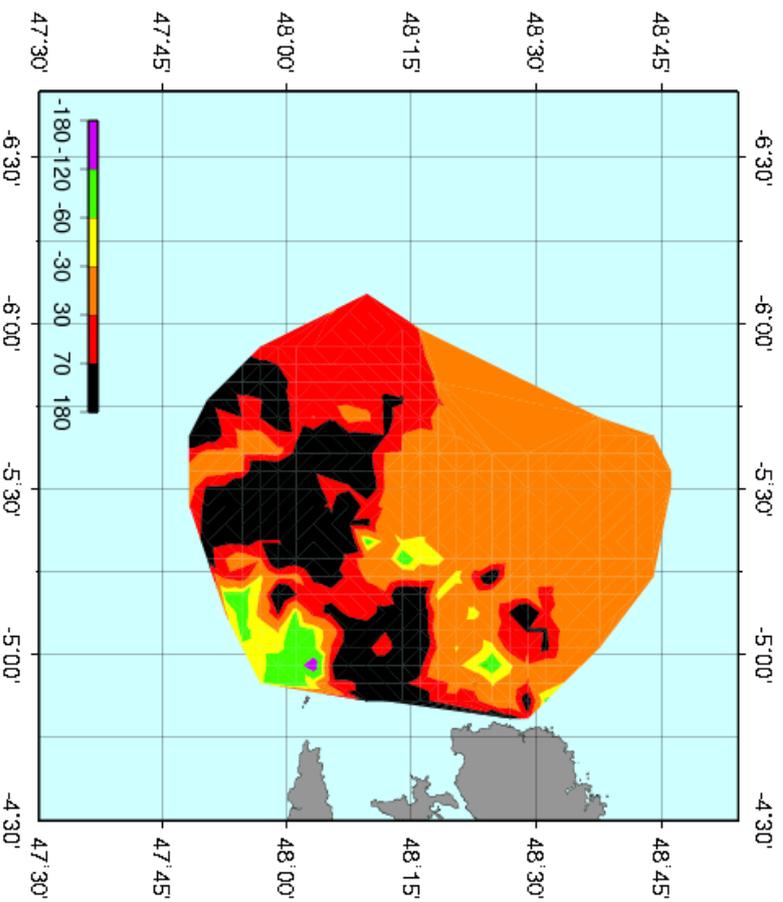


Moyenne des différences des directions
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 5'

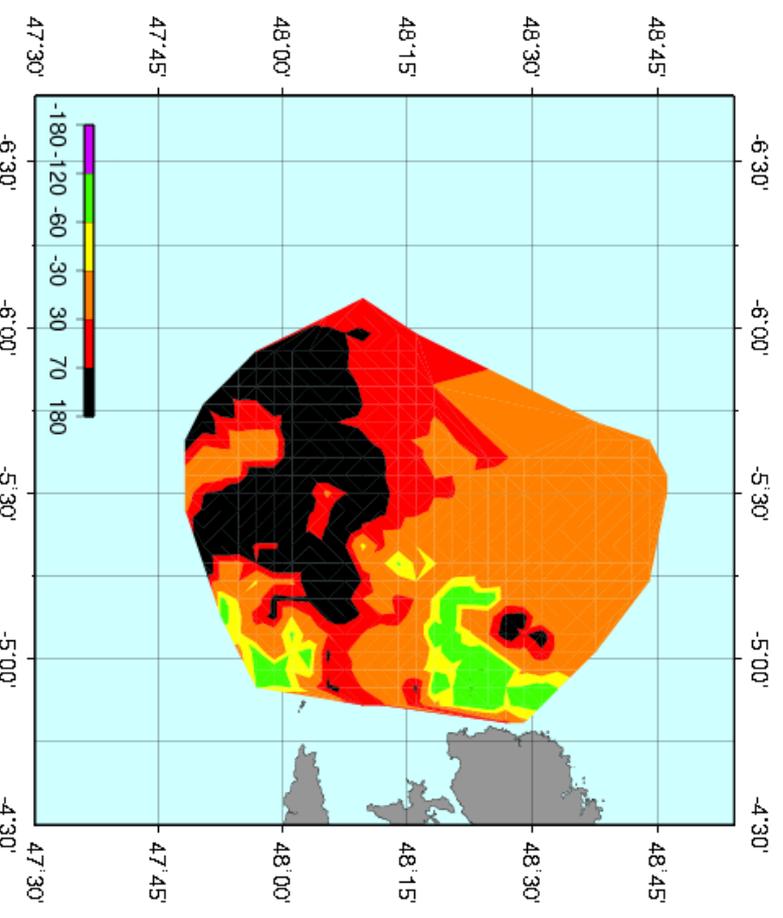


MOYENNE DES DIFFÉRENCES DES DIRECTIONS ENTRE LES DONNÉES DES RADARS HF ET CELLES DES MODÈLES MOTHY 1' ET 5' LES 02/10/2007, 18/10/2007 ET 29/10/2007 À 07H00 UTC, À PLEINE MER

Moyenne des différences des directions
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 1'

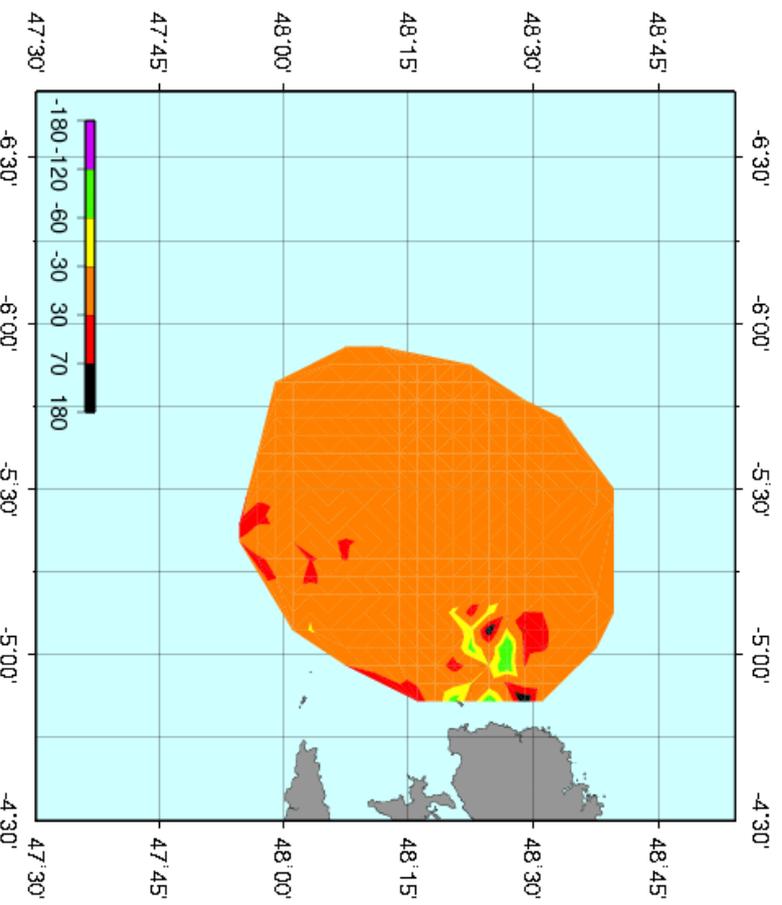


Moyenne des différences des directions
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 5'

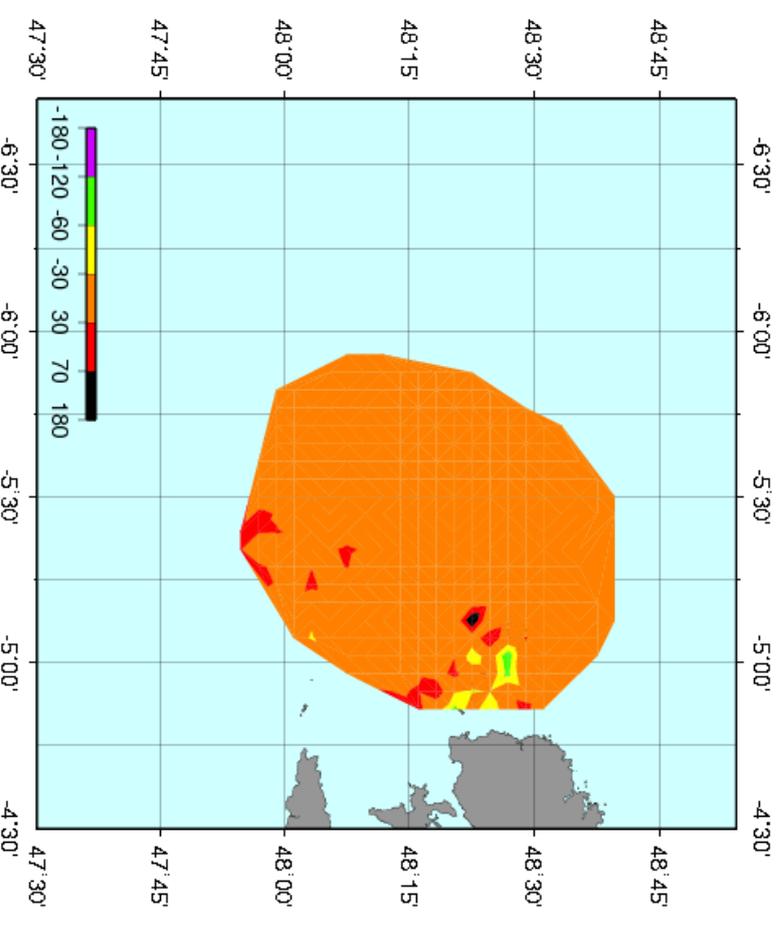


MOYENNE DES DIFFÉRENCES DES DIRECTIONS ENTRE LES DONNÉES DES RADARS HF ET CELLES DES MODÈLES MOTHY 1' ET 5' LES 02/10/2007, 18/10/2007 ET 29/11/2007 À 12H00 UTC, À MI-MARÉE DESCENDANTE

Moyenne des différences des directions
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 1'

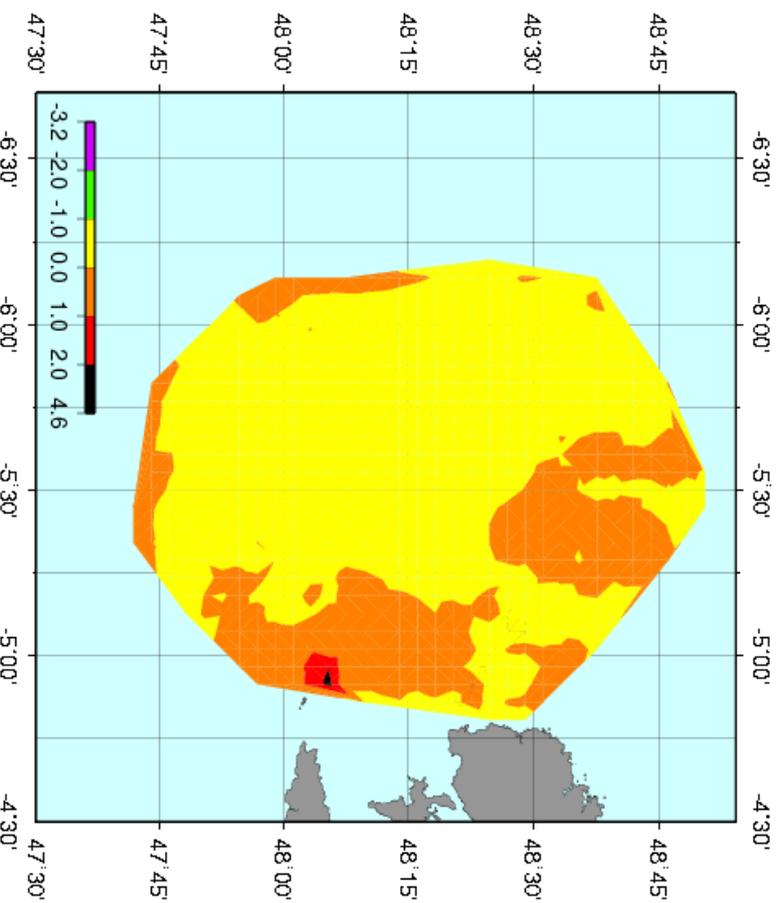


Moyenne des différences des directions
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 5'

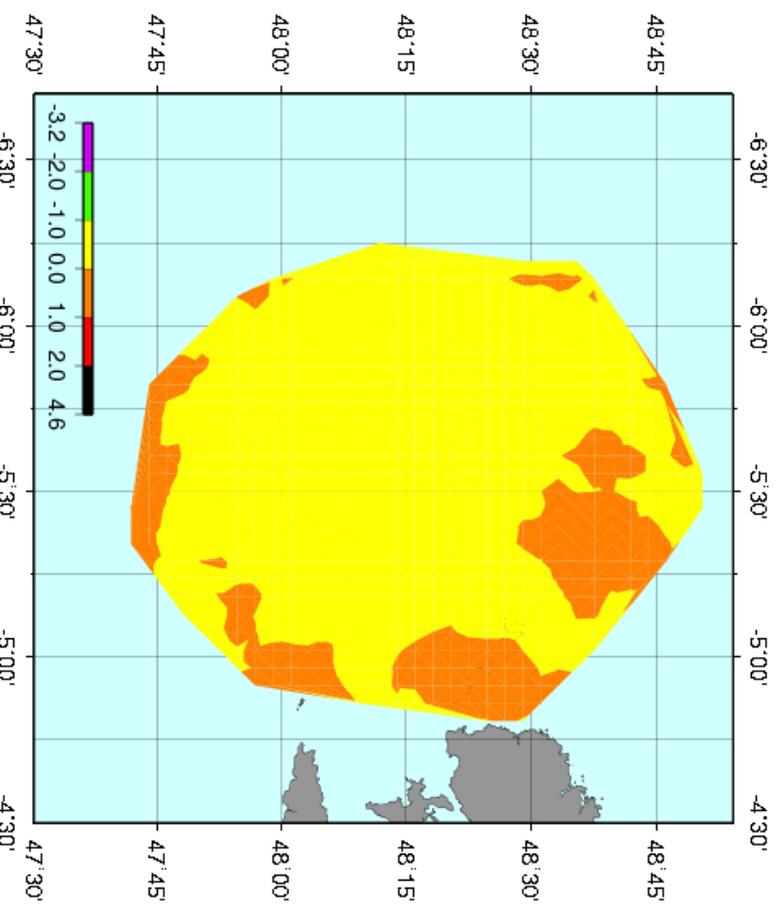


MOYENNE DES DIFFÉRENCES DES VITESSES ENTRE LES DONNÉES DES RADARS HF ET CELLES DES MODÈLES MOTHY 1' ET 5' LES 02/10/2007, 18/10/2007 ET 29/10/2007 À 01H00 UTC, À BASSE MER

Moyenne des différences des vitesses
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 1'

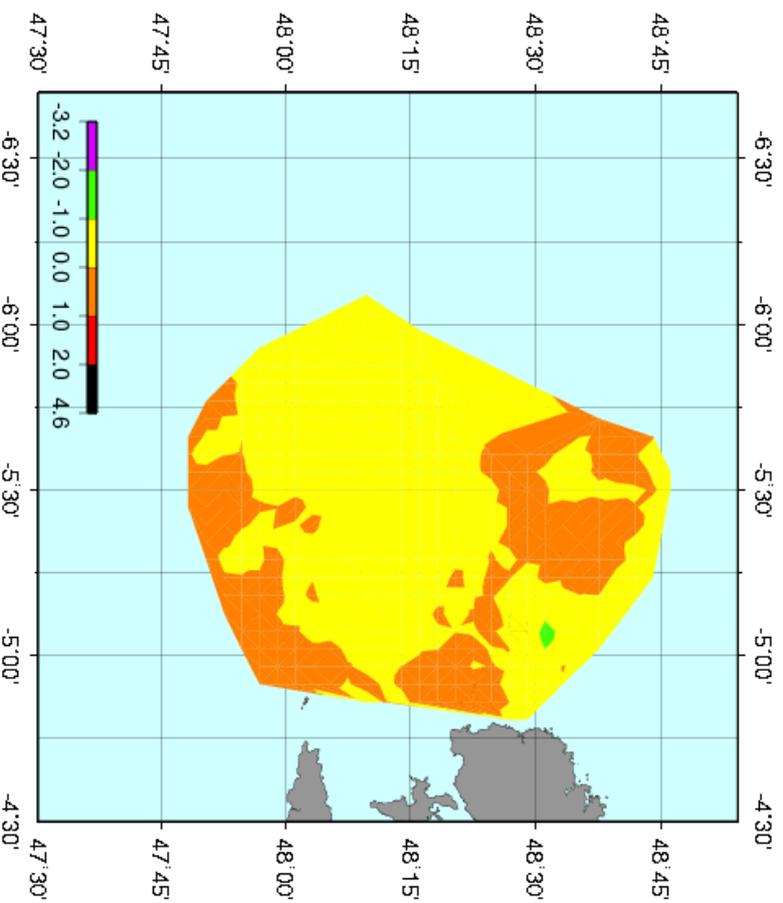


Moyenne des différences des vitesses
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 5'

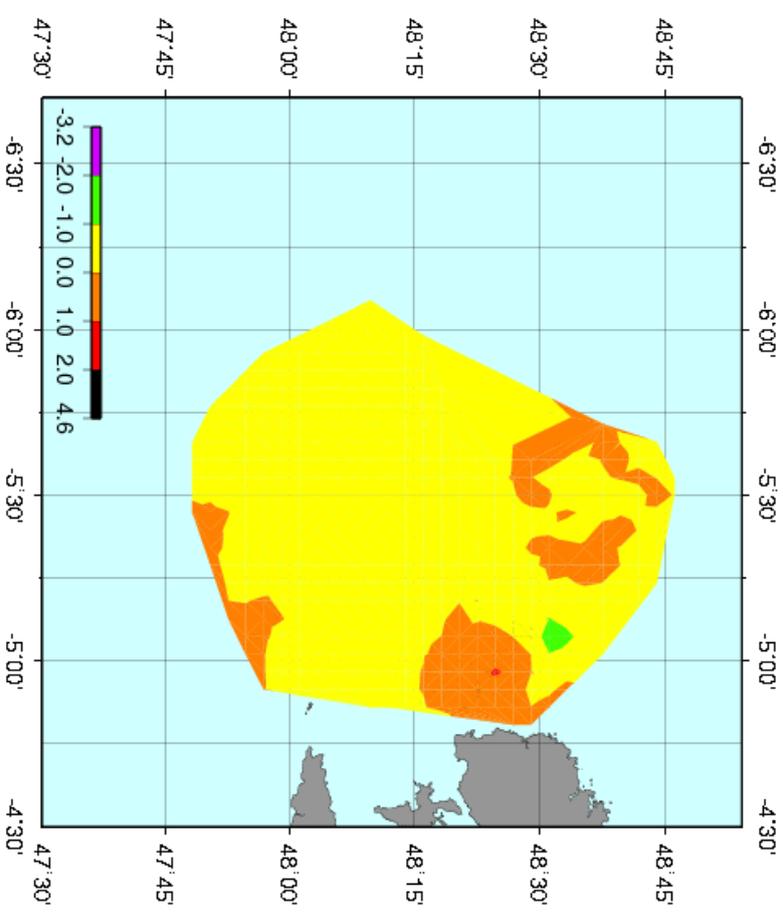


MOYENNE DES DIFFÉRENCES DES VITESSES ENTRE LES DONNÉES DES RADARS HF ET CELLES DES MODÈLES MOTHY 1' ET 5' LES 02/10/2007, 18/10/2007 ET 29/10/2007 À 07H00 UTC, À PLEINE MER

Moyenne des différences des vitesses
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 1'

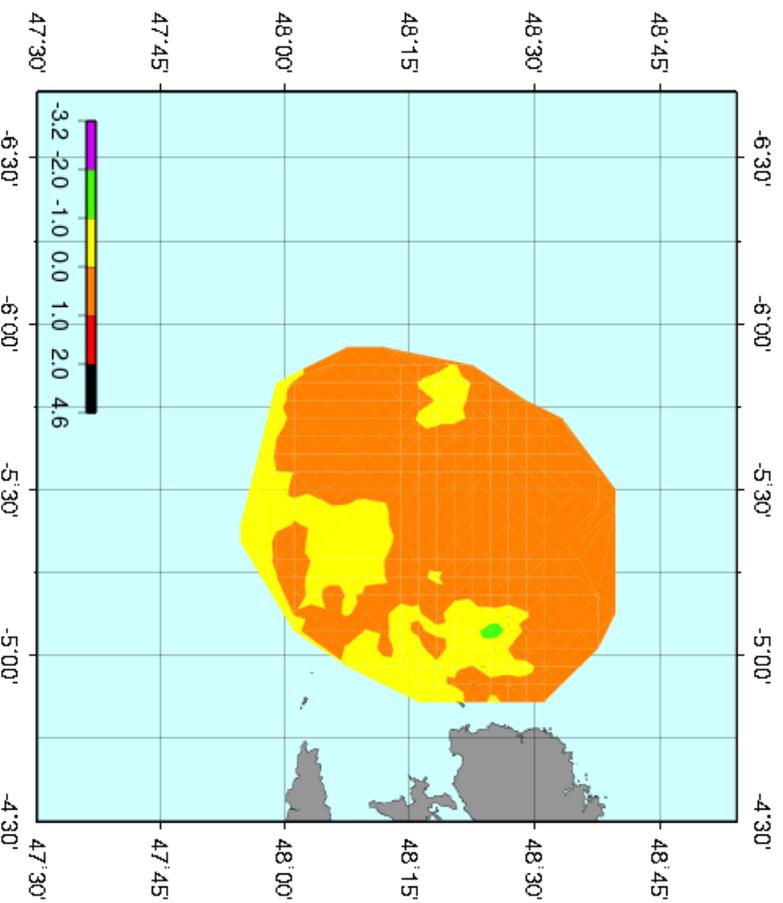


Moyenne des différences des vitesses
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 5'

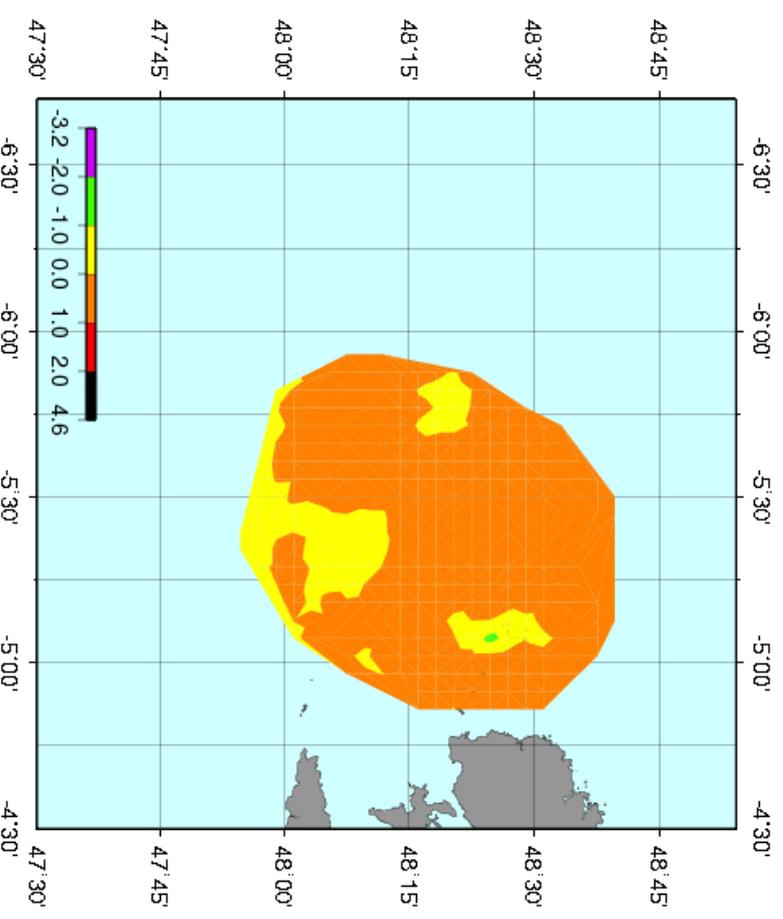


MOYENNE DES DIFFÉRENCES DES VITESSES ENTRE LES DONNÉES DES RADARS HF ET CELLES DES MODÈLES MOTHY 1' ET 5' LES 02/10/2007, 18/10/2007 ET 29/10/2007 À 12H00 UTC, À MI-MARÉE DESCENDANTE

Moyenne des différences des vitesses
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 1'



Moyenne des différences des vitesses
obtenues à partir des données des
radars HF et du modèle MOTHY 5'



5. Conclusion

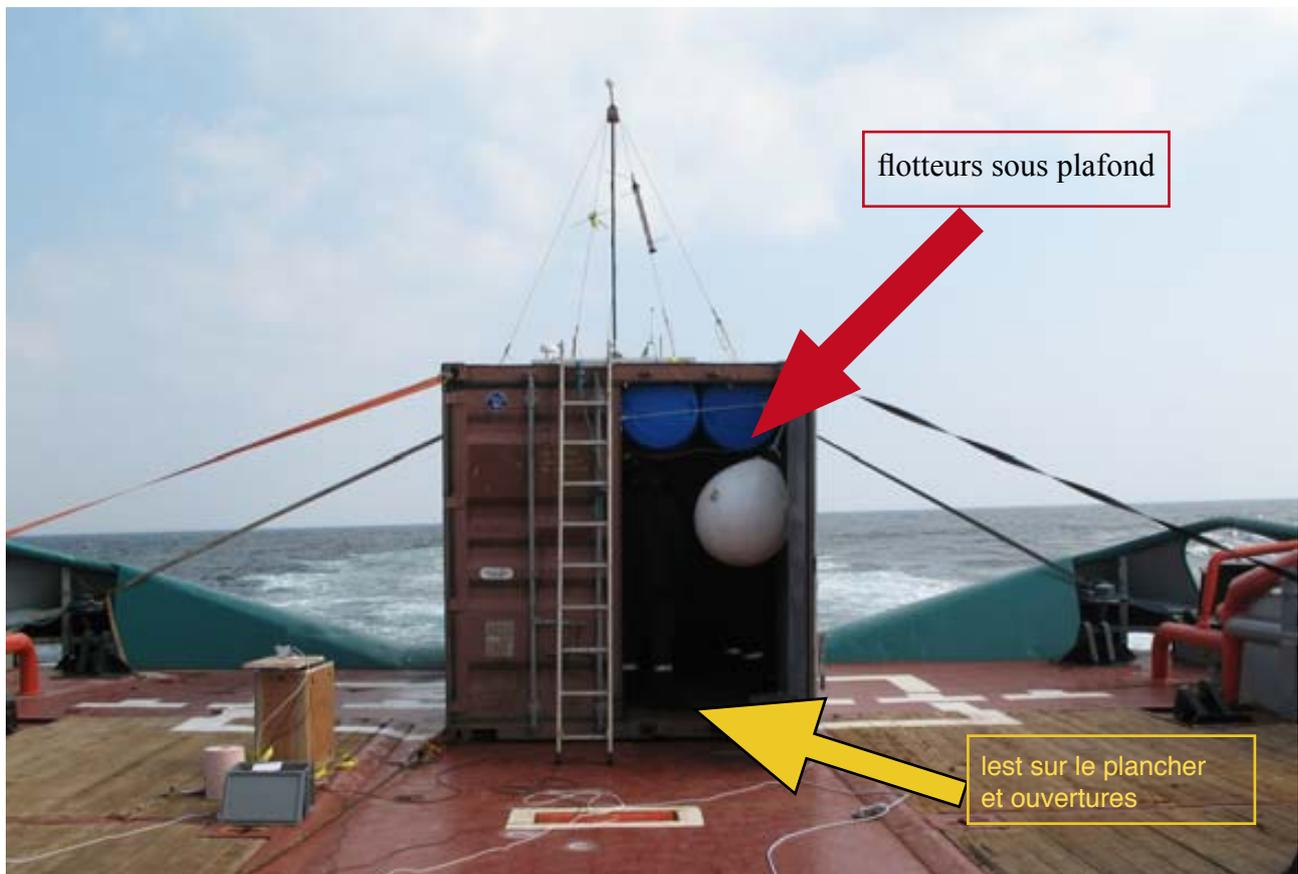
Toutes les remarques faites précédemment se confirment ici avec les moyennes sur trois dates différentes aux mêmes moments durant la pleine mer, la basse mer, ou un moment intermédiaire. Il y a donc des contradictions de directions dans la zone sud entre les données des radars HF et les données du modèle MOTHY en résolution 1 minute et 5 minutes.

VI. Test sur un cas réel

1. Explications du cas

Il s'agit d'essais réalisés par l'institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, (IFREMER, qui est un organisme public de recherche et de développement à vocation maritime), en commun avec le "Norwegian Meteorological Institute", qui est l'organisme national norvégien de la météorologie et des prévisions météorologiques.

Le but de cette expérience était de tester l'efficacité des modèles de dérives en mer d'Iroise. Pour cela un conteneur, (appelé conteneur 20'), de 6,1 mètres de long, 2,44 mètres de large et 2,59 mètres de haut a été préparé de la manière suivante :



- 420 kg de lest sur le plancher
- $5.8m^3$ de flotteurs sous le plafond
- des ouvertures dans le bas du conteneur pour permettre à l'eau d'entrer rapidement.

Dans un premier temps, le conteneur est largué dans la mer d'Iroise à la position 48°15' N, 5°10' W, le 22 septembre 2008 à 13h UTC.



Une fois le conteneur mis à l'eau, sa dérive est observé jusqu'au 23 septembre à 12h UTC.



Pour observer sa dérive et étudier diverses données, comme le vent, les vagues, des capteurs ont été placés dessus et autour du conteneur.

2. Résultats obtenus avec les données des radars HF intégrées à MOTHY

a. MOTHY version objets flottants

Pour avoir un point de comparaison, dans un premier temps le modèle MOTHY version objets flottants a été lancé en résolution 1' et 5'.

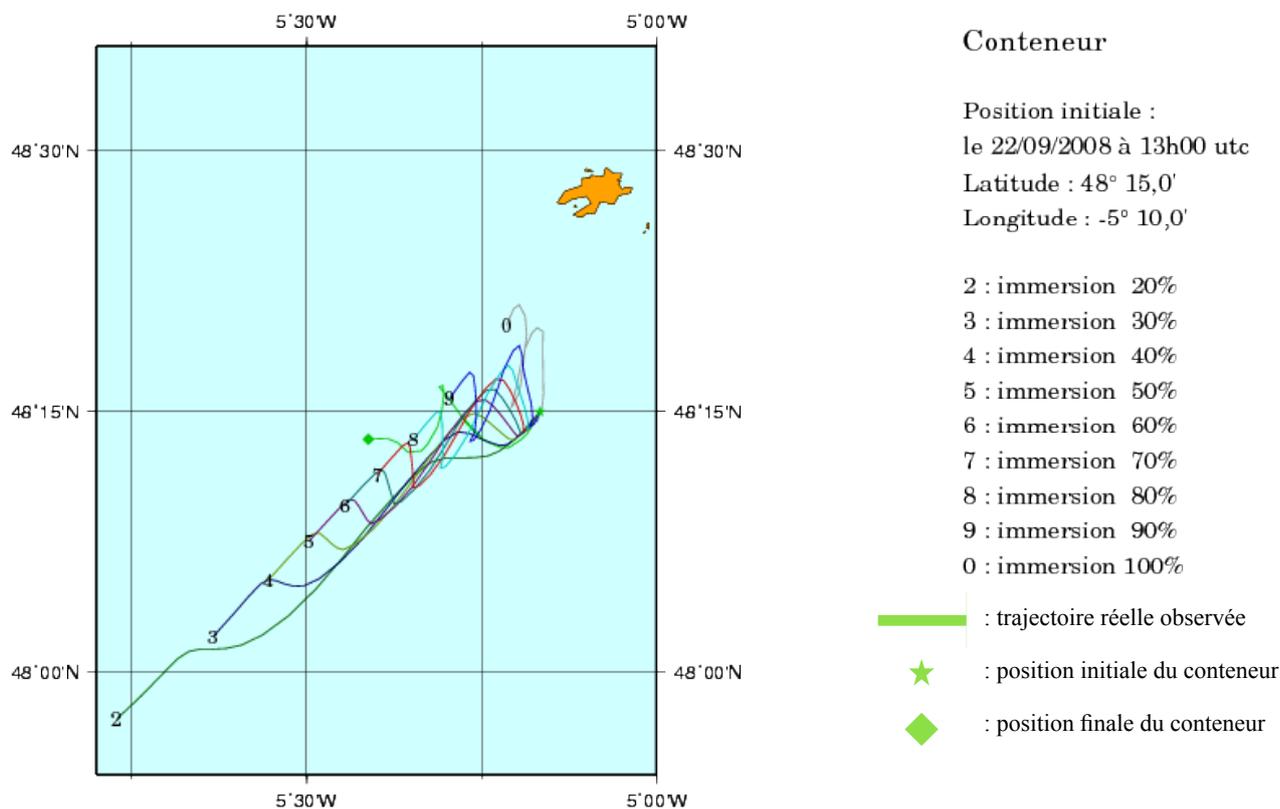
Ensuite, pour réaliser la simulation avec les données des radars HF, il a fallu modifier les scripts informatiques qui gèrent le déroulement d'une simulation MOTHY pour intégrer dans une boucle de calcul les données de direction et de vitesse aux différents moments. Pour réaliser cela, il a fallu récupérer les 70 fichiers correspondant aux données radars HF du 22 septembre 2008 à 13h UTC jusqu'au 23 septembre 2008 à 12h UTC (un fichier toutes les 20 minutes), puis programmer leur conversion en un format lu par le modèle MOTHY.

Le déroulement du modèle MOTHY modifié est le suivant. Tout d'abord, il faut donner le lieu précis du lâcher du conteneur, la date et l'heure, (en l'occurrence 48°15' nord et 5°10' ouest, le 22 septembre 2008 à 13h UTC). Ensuite il faut choisir quel objet est utilisé pour le calcul, ici il s'agit d'un conteneur 20'. Et le modèle commence ses calculs. En temps normal, MOTHY calcule la nouvelle position de l'objets toutes les cinq minutes en intégrant les effets du vent, de la marée et d'autres paramètres. La modification apportée pour l'intégration des données des radars HF est le remplacement des composantes du courant calculés par le module hydrodynamique de MOTHY, par la direction et la vitesse en chaque nouveau point et cela, toutes les 20 minutes. La méthode a été d'associer à chaque point trouvé par MOTHY la direction et la vitesse correspondantes au point le plus proche du fichier des données des radars HF à l'heure adéquate.

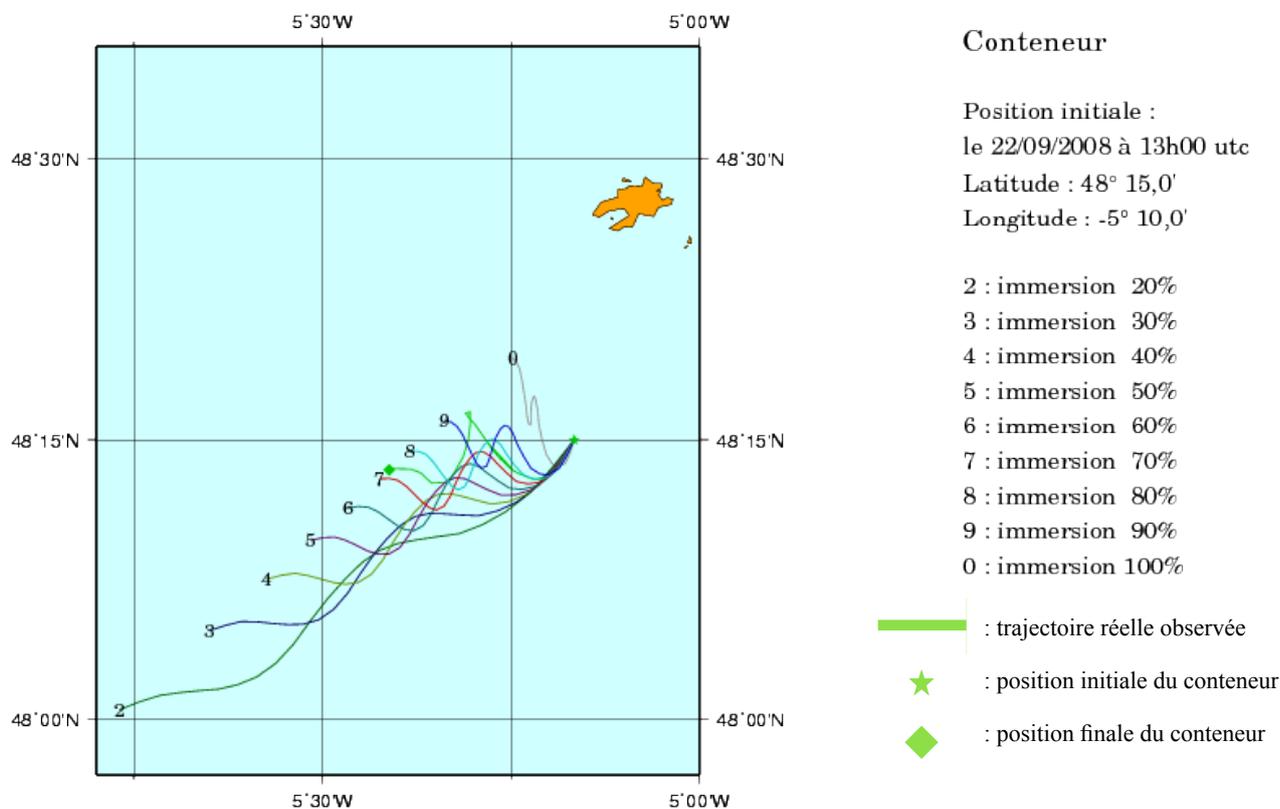
Exemple :

Au départ le conteneur est lâché à la position 48°15'N et 5°10'W à 13h UTC. Dans le fichier des données des radars HF de 13h, le modèle cherche le point le plus proche de cette position, récupère les composantes de direction et de vitesse de ce point. MOTHY calcule ensuite la dérive du conteneur et trouve un nouveau point pour 13h20. Dans le fichier radars HF de 13h20 l'opération de trouver le point le plus proche est à nouveau réalisé de même que la récupération de la direction et de la vitesse. Ces données sont alors utilisés pour le calcul du nouveau point après dérive, et ainsi de suite jusqu'au lendemain 12h UTC fin des calculs et des observations.

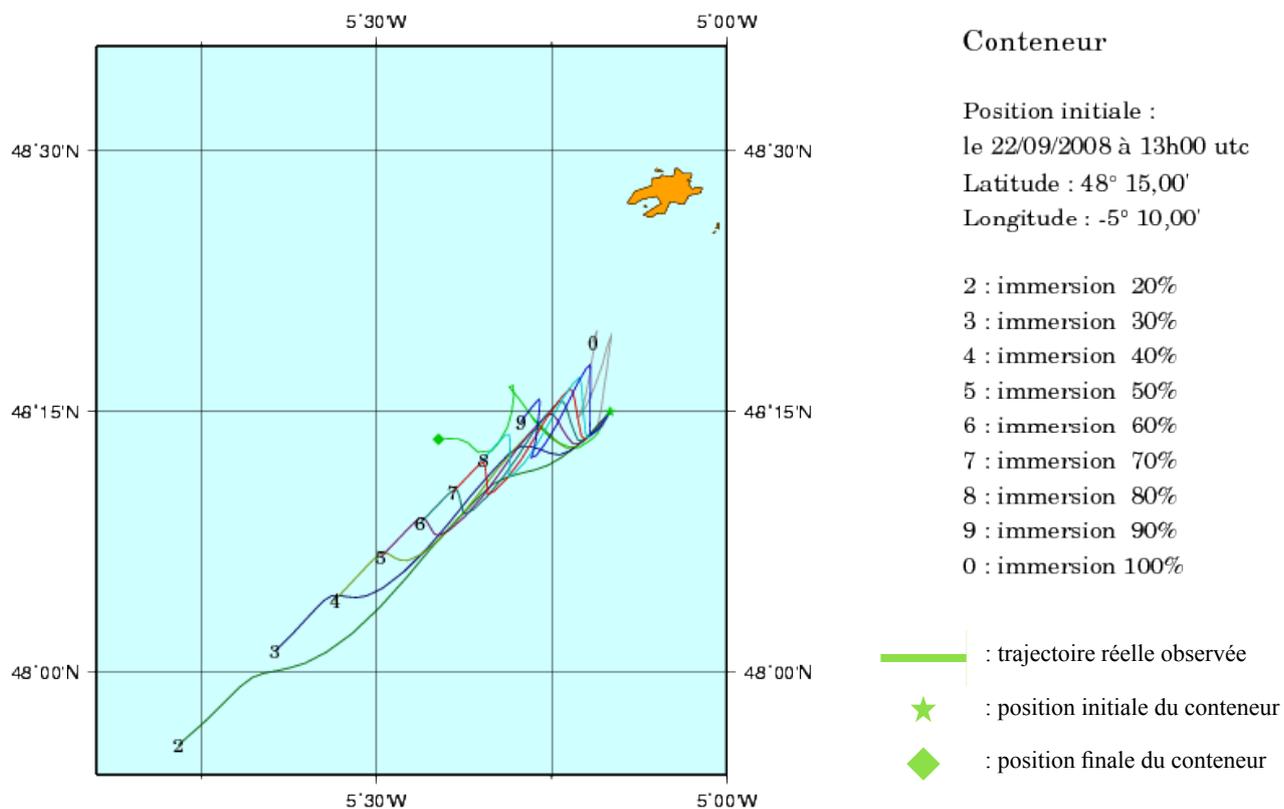
Les résultats obtenus sont les suivant avec, à chaque page le résultat du modèle en résolution soit 1' soit 5' avant modification et celui après les changements :



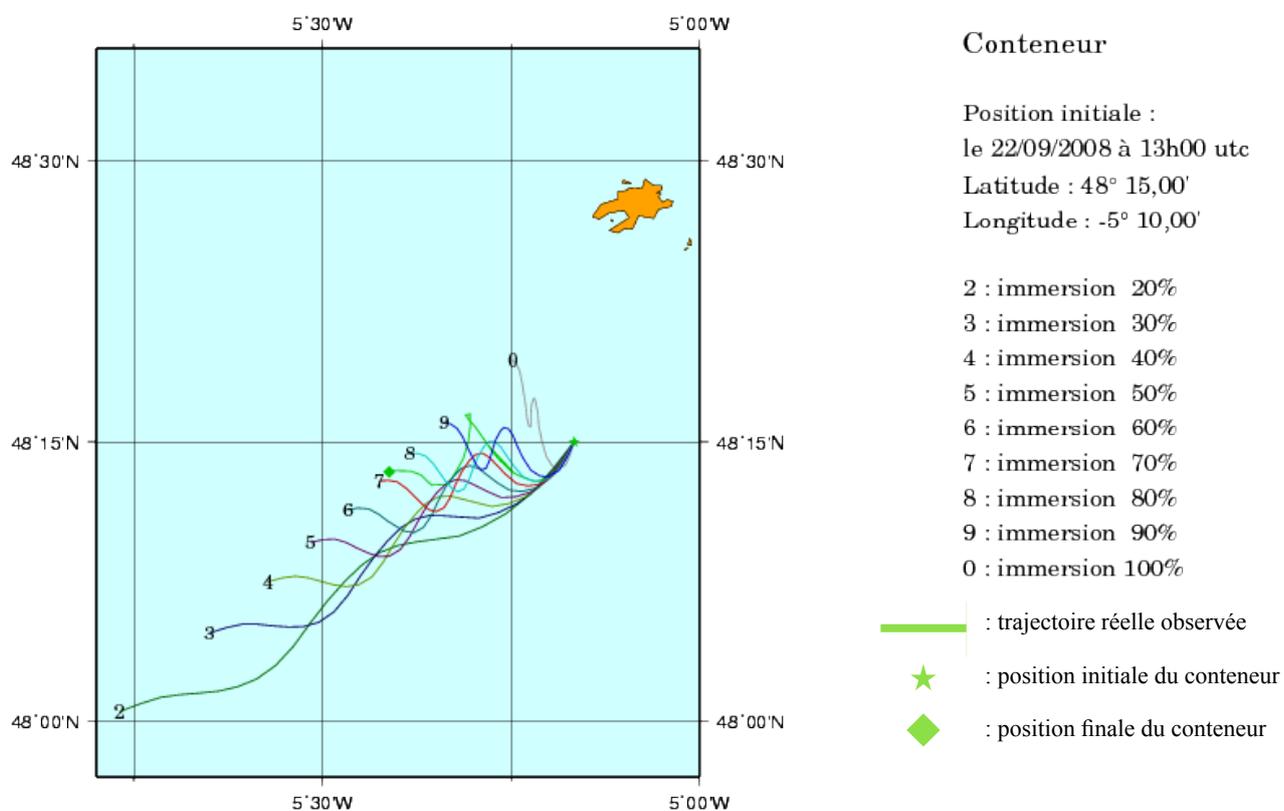
Trajectoires des dix conteneurs simulées avec le modèle MOTHY objets flottants en résolution 1' et trajectoire réelle observée le 23/09/2008 à 12h UTC



Trajectoires des dix conteneurs simulées après modifications du modèle MOTHY objets flottants en résolution 1' et trajectoire réelle observée le 23/09/2008 à 12h UTC



Trajectoires des 10 conteneurs simulées avec le modèle MOTHY
objets flottants en résolution 5' et trajectoire réelle observée



Trajectoires des 10 conteneurs simulées après modification du modèle MOTHY
objets flottants en résolution 5' et trajectoire réelle observée

Les résultats pour la version objets flottants sont réellement très convaincants. Voici le récapitulatif des distances entre la position finale du conteneur et les positions finales calculées par le modèle après modifications.

pourcentage d'immersion du conteneur	distance entre prédiction du modèle et lieu final observé en km			
	MOTHY 1' modifié	MOTHY 1'	MOTHY 5' modifié	MOTHY 5'
0	16,4	9,9	16,4	7,6
20	35,7	55,6	35,7	58,1
30	23,9	42,2	23,9	43,8
40	16,2	34,04	16,2	35,5
50	10,4	28,2	10,4	28,9
60	5,6	22,9	5,6	23,4
70	1,3	18,6	1,3	18,8
80	2,8	13,7	2,8	14,4
90	7,3	9,6	7,3	9,6

Comme le prouve le tableau, il y a une amélioration de plusieurs kilomètres entre le modèle modifié et l'original. Les valeurs entre le modèle MOTHY 1' modifié et le modèle MOTHY 5' modifié sont les mêmes. En effet, lors du calcul de la trajectoire par le modèle, les points diffèrent légèrement entre les deux trajectoires mais leur point correspondant dans les fichiers des données radars HF sont identiques, d'où le même choix de direction et de vitesse par le modèle et donc de trajectoires identiques.

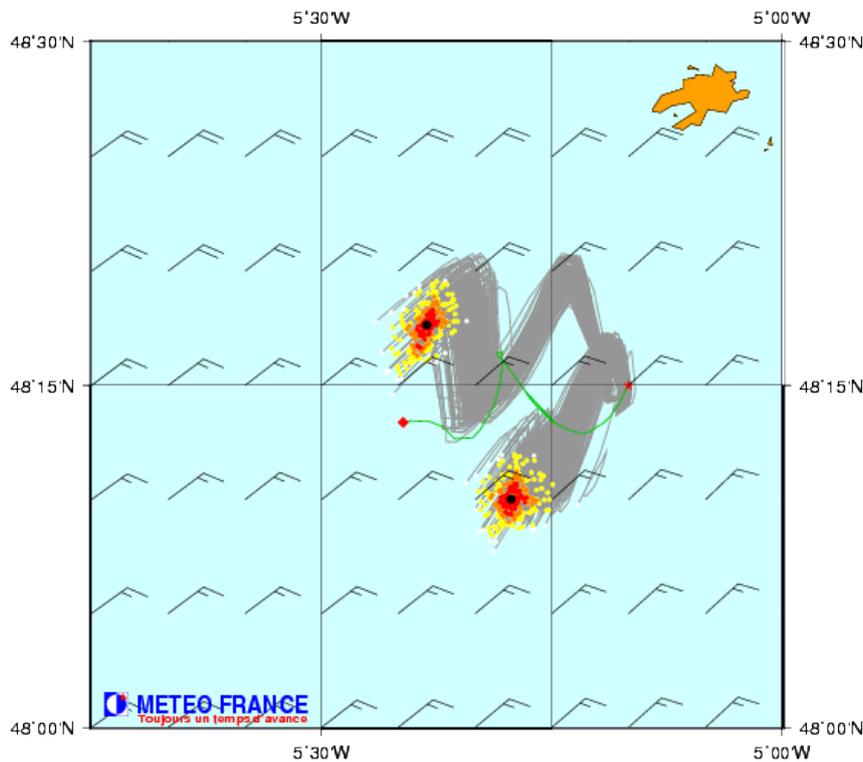
b. Conclusions modèle MOTHY version objets flottants

Les résultats sont vraiment encourageants, comme le démontrent les chiffres du tableau et les représentations graphiques des quatre modèles. Les données des radars HF améliorent grandement la précision du modèle ce qui pourrait aider lors de recherches. Le bémol vient du fait de la connaissance de l'immersion du conteneur qui joue un grand rôle dans le lieu final de l'objet.

c. MOTHY Leeway

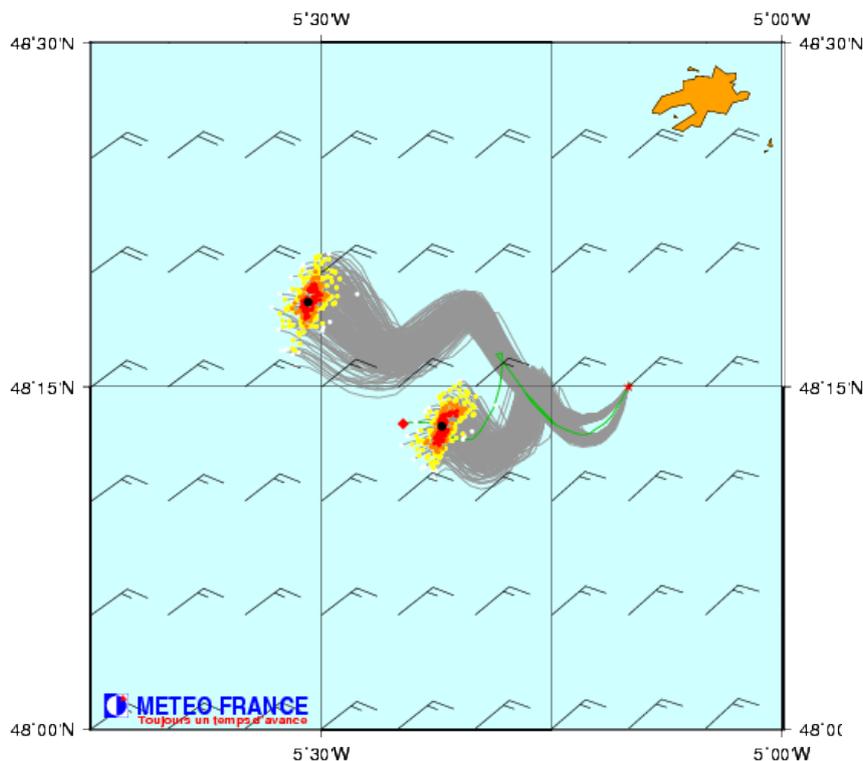
Pour la comparaison, les premiers essais ont été réalisés avec la version originale de MOTHY Leeway. Ensuite il a fallu exécuter les mêmes opérations dans le script de cette version pour obtenir les nouveaux résultats. Le déroulement de cette version est presque la même à la différence que lors du choix de l'objet, au lieu d'avoir 6 options différentes il y en a 63 (voir annexe VI), plus celle créée pour ces essais. Les résultats obtenus sont les suivants :

MOTHY/CEP Prévision pour le 23/09/2008 à 12 utc



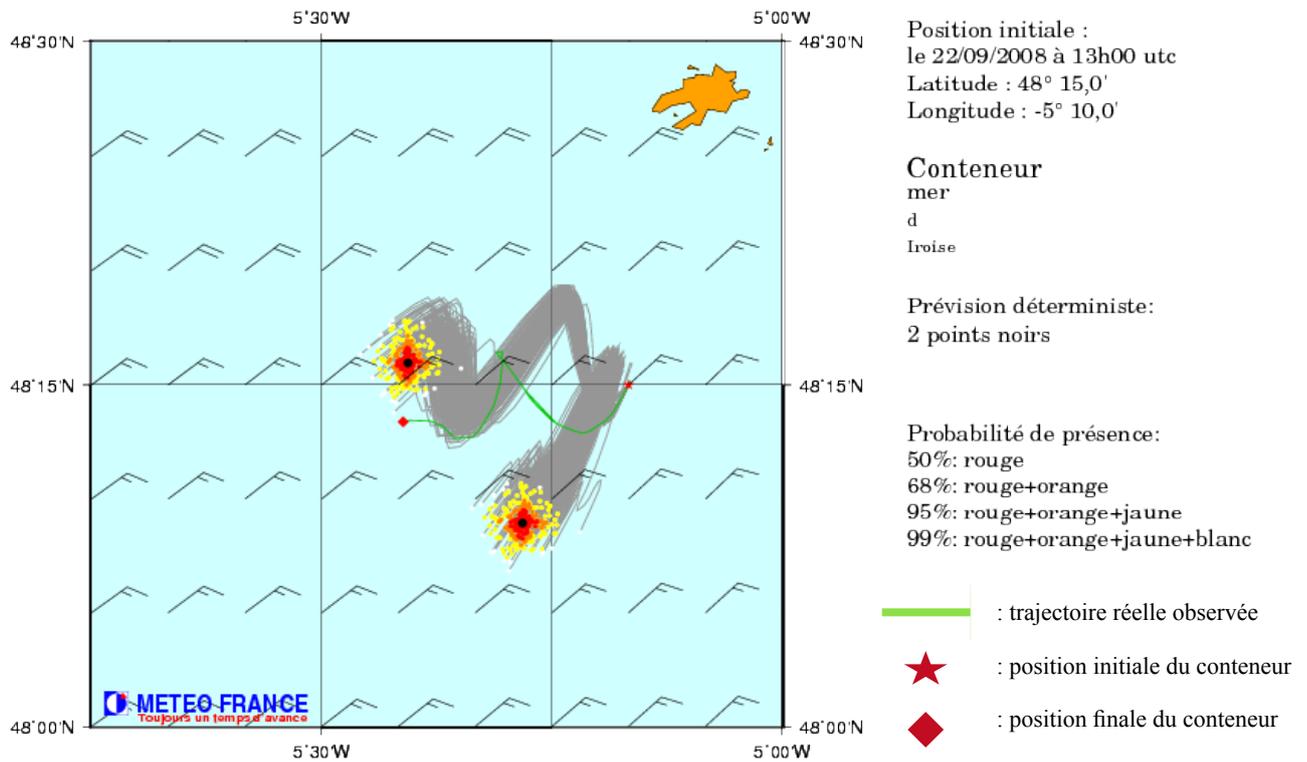
Prévision des trajectoires et probabilités de présence du conteneur
obtenues avec le modèle MOTHY Leeway en résolution 1'

MOTHY/CEP Prévision pour le 23/09/2008 à 12 utc



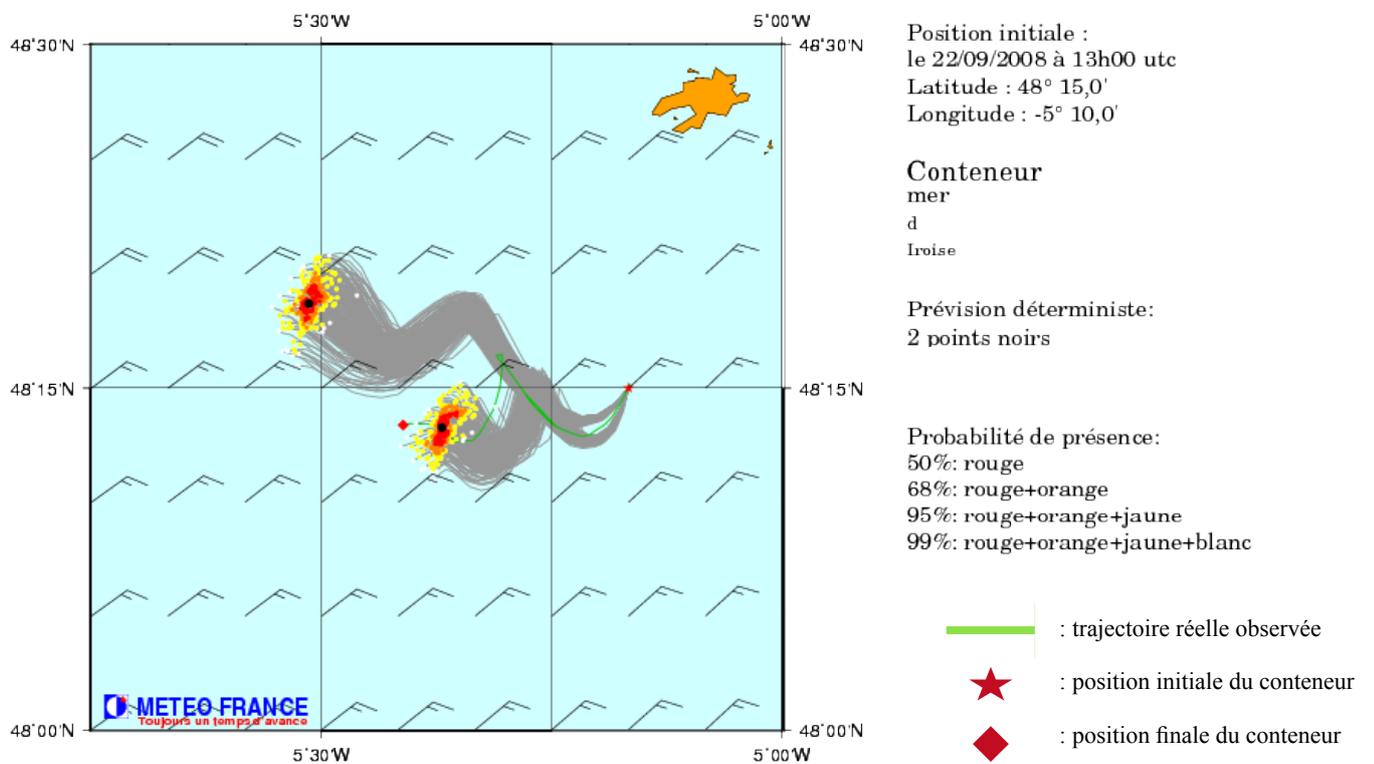
Prévision des trajectoires et probabilités de présence du conteneur
obtenues avec le modèle modifié de MOTHY Leeway en résolution 1'

MOTHY/CEP Prévision pour le 23/09/2008 à 12 utc



Prévision des trajectoires et probabilités de présence du conteneur
obtenues avec le modèle MOTHY Leeway en résolution 5'

MOTHY/CEP Prévision pour le 23/09/2008 à 12 utc



Prévision des trajectoires et probabilités de présence du conteneur
obtenues avec le modèle modifié de MOTHY Leeway en résolution 5'

d. Conclusions modèle MOTHY version Leeway

Comme pour la version objets flottants, l'ajout des données radars HF améliore nettement la qualité de prévision de l'emplacement du conteneur. En revanche, sur ce cas précis, la zone de probabilité de présence n'inclut pas la position finale de l'objet, même si elle est très proche.

3. Conclusions et perspectives

Durant cette mission, nous avons montré que les données des radars Haute Fréquence sont exploitables pour la simulation de dérive MOTHY en mer d'Iroise, car les résultats de cette nouvelle configuration sont meilleurs que ceux du modèle utilisé aujourd'hui en opérationnel. En effet, que ce soit dans la version objets flottants ou Leeway, les résultats sont probants et l'amélioration de la prévision de la dérive est très nette. Ceci peut devenir un très gros avantage pour le sauvetage en mer où chaque minute compte.

Actuellement, les données des radars HF ne sont pas prélevées à intervalles réguliers. Les informations reçues pour notre étude étaient prélevées toutes les 20 minutes, à l'heure actuelle, elles le sont une fois au bout de 13 minutes, une fois 9 minutes, et cela de manière irrégulière. Ceci pose un problème pour intégrer les données dans le modèle MOTHY car ce dernier attend un intervalle de calcul de dérive constant. Pour pouvoir se servir des données, il faudrait modifier les scripts informatiques qui gèrent le déroulement d'une simulation MOTHY.

Les perspectives pour l'utilisation des radars HF pour l'océanographie opérationnelle sont diverses. Par exemple, grâce à la récupération rapide et à l'analyse des données, nous pourrions diffuser des mesures de courants de surface en quasi temps réel sur Internet. De même, cela pourrait servir à une meilleure surveillance du littoral et à la détection de bateaux. Pour confirmer ces améliorations, observés ici en mer d'Iroise, il faudrait installer des radars en de nouveaux lieux, la Manche ou la Méditerranée par exemple et si ces essais sont également concluants étendre ces installations sur les côtes françaises.

Conclusion générale

Durant ce stage, j'ai pu découvrir le domaine de la météorologie (au sens large) que je ne connaissais pas et effectuer mes premiers pas dans le monde du travail dans une structure vraiment accueillante et compétente.

Tout d'abord, j'ai appris comment fonctionne le service public de la météorologie française, Météo-France, qui est un acteur d'importance dans le monde de la prévision opérationnelle et de la recherche en météorologie au niveau national, européen et international.

La mission que j'ai effectuée m'a permis de prendre en mains nombres d'outils informatiques (le langage Fortran, le logiciel de tracé de carte GMT, ...) et scientifiques utilisés dans le domaine de la météorologie ainsi qu'un modèle de prévision. Elle m'a également permis de développer une méthodologie rigoureuse et efficace pour mener à bien le projet.

Le sujet du stage étant "l'apport des données de radars HF pour la prévision de dérive en mer", les objectifs ont été atteints dans les temps.

Je n'avais pas d'orientation professionnelle précise avant le début de ce stage mais avec ces 13 semaines passées dans les locaux de Météo-France, travailler dans ces conditions, avec le matériel, les logiciels, les livres à disposition, le partage avec les autres membres de l'équipe, a été une chance pour moi et une excellente expérience professionnelle.

Pour terminer, ce stage a confirmé mon choix d'orientation dans le Master d'ingénierie mathématiques et m'a motivé quand à la future année à venir.

BIBLIOGRAPHIE

1. Météo-France, Rapport annuel d'activité 2009, 2009, Chapitre 3, *L'activité commerciale*, p. 42
2. S. Law Chune, Y. Drillet, P. Daniel et P. De Mey, 2008, *Intégration des courants issus de l'océanographie opérationnelle (systèmes Mercator) dans le modèle de dérive Mothy (Météo-France)*, Ateliers de modélisation de l'atmosphère, Météo-France, Toulouse
3. T. Lee et C. Marie-Luce, 2006, *Optimisation du calcul des courants de marée dans le modèle MOTHY*, Météo-France, Toulouse
4. M. Decarnin, 2009, *MOTHY ou comment prévoir la dérive des objets en mer?*, École Nationale de la Marine Marchande du Havre
5. F. Ardhuin, L. Marié, N. Rascle, P. Forget and A. Roland, 2009, *Observation and estimation of Lagrangian, Stokes and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface*, Journal of Physical Oceanography
6. MOTHY, <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/>
7. Service Hydrologique et Océanographique de la marine (SHOM), <http://www.shom.fr/>

ANNEXES

Annexe I

I.1 Extrait fichier donné pour étude

```
C2D_CUR
RADAR WERA - Champ2D courant
2007 10 02 02 00 00 UTC
 18 52
  -6.78333000  -4.64649000   80
 47.30483000  49.26667000  110
IX  IY      U      V    PrecU    PrecV
18  55  -0.312  -0.323  -0.045  -0.221
18  56  -0.314  -0.325  -0.043  -0.211
18  57  -0.326  -0.291  -0.041  -0.206
```

I.2 Programme pour transformer U et V en direction et vitesse

```
programme transformation_U_V_en_direction_vitesse

*initialisation des données*

real pi,uu,vv,ff,dd,x1,x80,y1,y110,lat,lon
integer annee,mois,jour,heures,minutes,secondes,x,y,y2
character rien*1

*définition de  $\pi$ *

pi=4.atan(1.)
angle=180./pi

*création du fichier lon_lat_dir_for*

open(13,file='lon_lat_dir_for')

*lecture du fichier contenant les données radar HF du 02/10/2007 à
2H UTC*

open(10,file='02_10_07_0200.txt')
read(10,*) rien
read(10,*) rien
read(10,*) annee,mois,jour,heures,minutes,secondes
read(10,*) rien
read(10,*) x1,x80
read(10,*) y110,y1
read(10,*) rien
y2=1
```

```

*calcul de la direction et de la vitesse*
do i=1,2854

    read(10,*) x,y,uu,vv,a,b
    ff=sqrt(uu^2+vv^2)
    if(uu.eq.0)then
        if(vv.ge.0.)then
            dd=0.
        else
            dd=180.
        endif
    else if(uu.gt.0.)then
        dd=90.-atan(vv/uu)*angle
    else
        dd=270.-atan(vv/uu)*angle
    endif

*calcul de la latitude et de la longitude*

    lon=x1-((x1-x80)/80)*x
    lat=y1-((y1-y110)/110)*y

*écriture dans le fichier crée*

write(13,'(I4.4,1X,I4,4(1X,I2.2),4(1X,f8.3)')
y2,année,mois,jour,heures,minutes,lon,lat,dd,ff
y2=y2+1

enddo
close(10)
close(13)
end

```

I.3 Extrait fichier obtenu lon_lat_dir_for

```

*ligne année mois jour heures minute longitude latitude direction force
0001 2007 10 02 02 00 -6.303 48.268 224.014 0.452
0002 2007 10 02 02 00 -6.303 48.232 228.410 0.440
0003 2007 10 02 02 00 -6.303 48.197 220.179 0.530

```

I.4 Programme pour créer une nappe

```

programme nappe

*initialisation des données*

integer ligne,année,mois,jour,heures,minutes,secondes
character rien*1

*création du fichier nappe du 02/10/2007*

```

```

open(13,file='nappe')

*lecture du fichier lon_lat_dir_for*

open(10,file='lon_lat_dir_for)
read(10,*) ligne,annee,mois,jour,heures,minutes,lon,lat,dd,ff
write(13,'(I4?"-",I2.2,"-",I2.2,1X,I2.2,":",I2.2,":",I2.2,3X,"830"
,4X,"1")') annee,mois,jour heures,minutes,secondes

*écriture dans le fichier nappe*

write(13,'(f8.3,f8.3)4) lat,lon

do i=1,713

read(10,*) ligne,annee,mois,jour,heures,minutes,secondes,lon,lat,dd
,ff
write(13,'2(f8.3)') lat,lon

enddo
close(10)
close(13)
end

```

I.5 Extrait du fichier obtenu par le modèle

```

*ligne      U          V  *
0001      -0.108      -0.540
0002      -0.076      -0.373
0003      -0.090      -0.394

```

I.6 Programme pour transformer le fichier obtenu par le modèle

```

programme transformation_U_V

*initialisation des données*

real pi,uu,vv,ff,dd,lat,lon
integer annee,mois,jour,heures,minutes,secondes,ligne,x,y
character rien*1

*définition de  $\pi$ *

pi=4.atan(1.)
angle=180./pi

*création du fichier courant_02_10_2007_5*

open(13,file='courant_02_10_2007_5')

```

```

*lecture du fichier crée par le modèle et du fichier lon_lat_dir_for
du 02/10/2007 à 2H UTC*

open(11,file='lon_lat_dir_for')
open(10,file='02_10_07_0200.txt')

y=0

*calcul de la direction et de la vitesse*
do i=1,2854

    read(10,*) x,uu,vv
    ff=sqrt(uu^2+vv^2)
    if(uu.eq.0)then
        if(vv.ge.0.)then
            dd=0.
        else
            dd=180.
        endif
    else if(uu.gt.0.)then
        dd=90.-atan(vv/uu)*angle
    else
        dd=270.-atan(vv/uu)*angle
    endif

read(11,*) ligne,annee,mois,jour,heures,minutes,secondes,lon,lat,a,
b
    if(ligne==x)then
y=y+1

write(13,'(I4.4,1X,I4,4(1X,I2.2),4(1X,f8.3)')
y2,année,mois,jour,heures,minutes,lon,lat,dd,ff
    else
        do j=ligne,x-1
            read(11,*) rien
        enddo

*écriture dans le fichier crée*

write(13,'(I4.4,1X,I4,4(1X,I2.2),4(1X,f8.3)')
y2,année,mois,jour,heures,minutes,lon,lat,dd,ff
    endif
enddo
close(10)
close(11)
close(13)
end

```

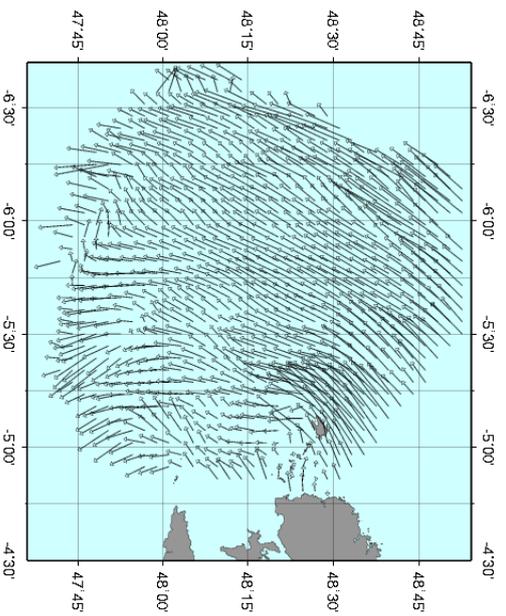
Annexe II

II.1 Comparaison des données MOTHY et radar HF
(voir feuilles suivantes)

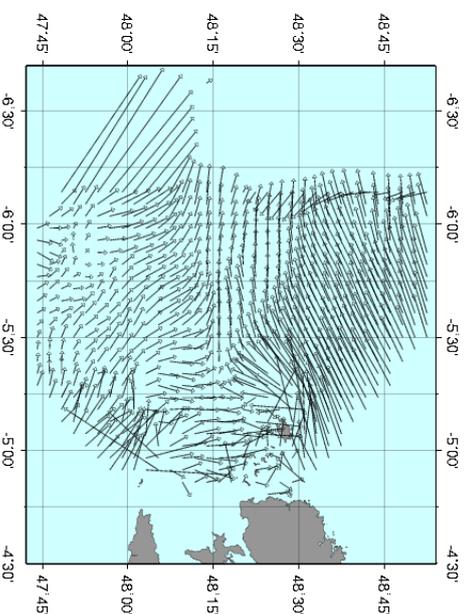
COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5'

LE 18/10/2007 À 01H00 UTC, 30 MINUTES APRÈS LA BASSE MER

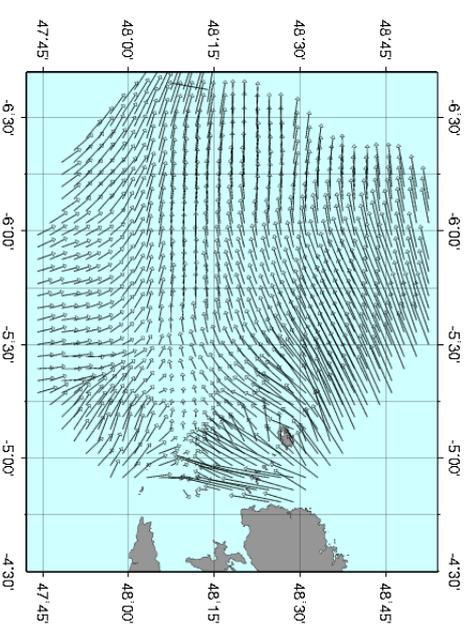
Représentation vectorielle des
données obtenues avec les
radars HF



Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 1'



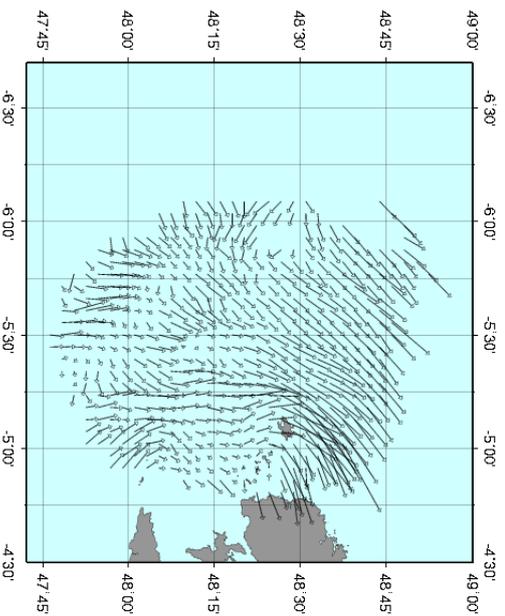
Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 5'



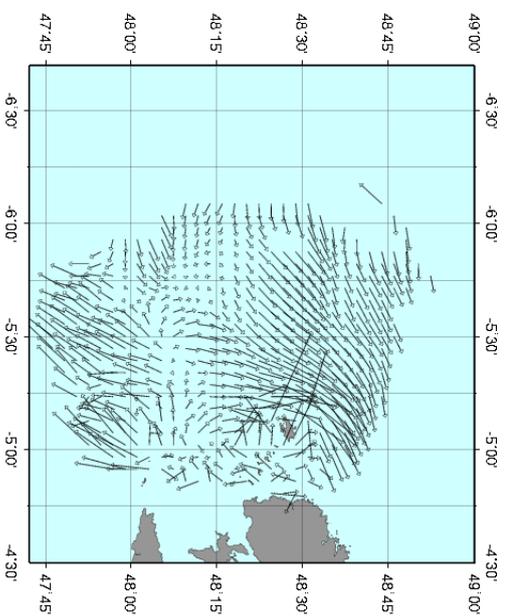
COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5'

LE 18/10/2007 À 07H00 UTC, 30 MINUTES APRÈS LA PLEINE MER

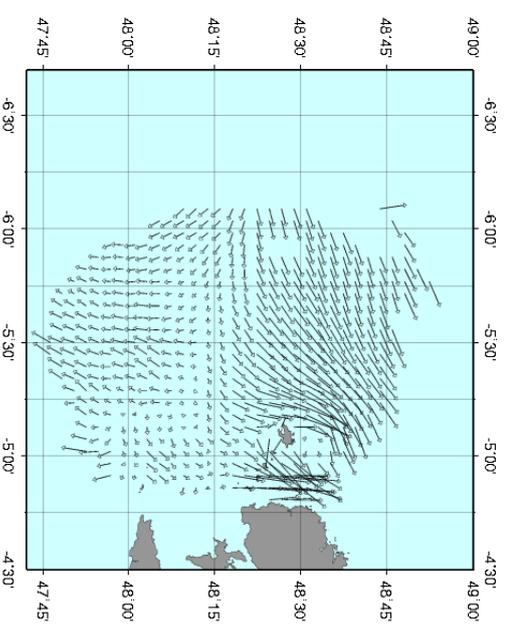
Représentation vectorielle des
données obtenues avec les
radars HF



Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 1'



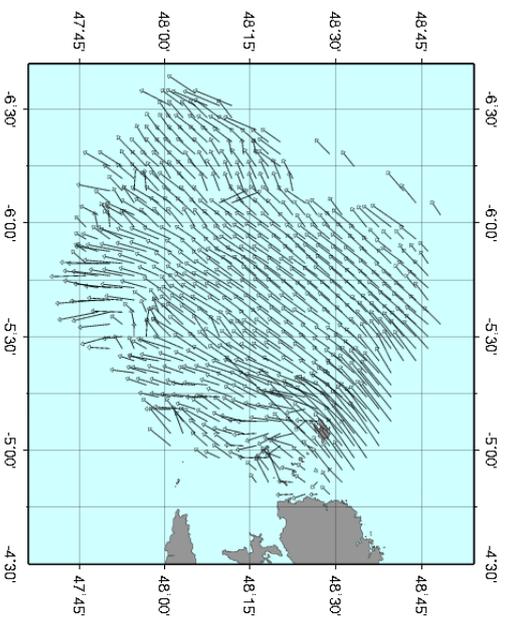
Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 5'



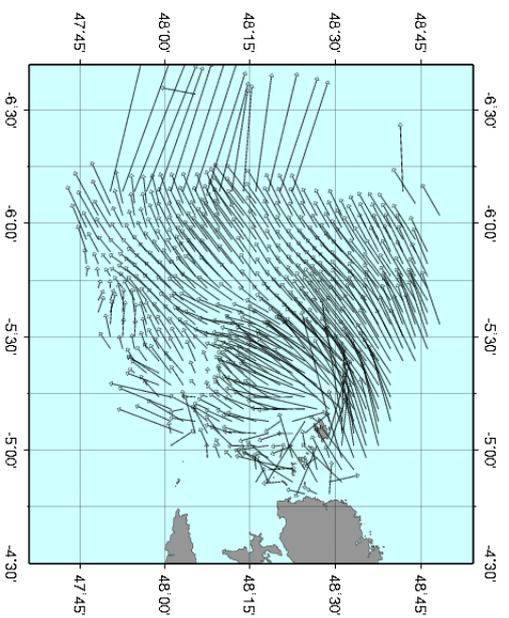
COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5'

LE 18/10/2007 À 12H00 UTC, À MI-MARÉE DESCENDANTE

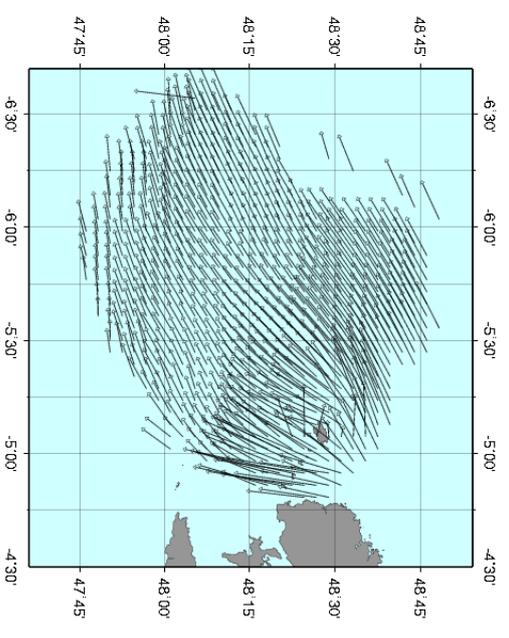
Représentation vectorielle des
données obtenues avec les
radars HF



Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 1'



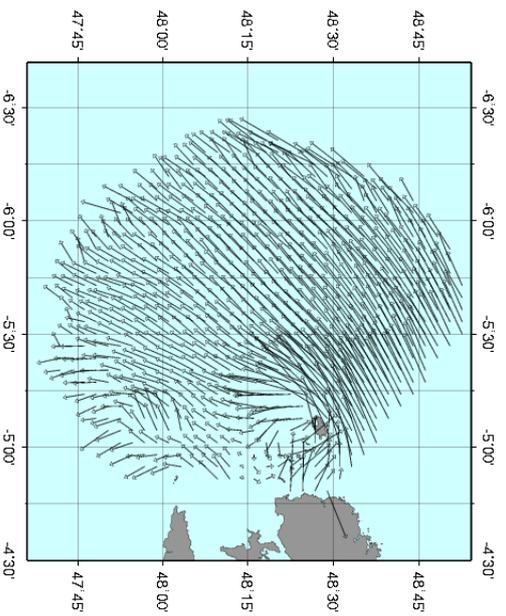
Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 5'



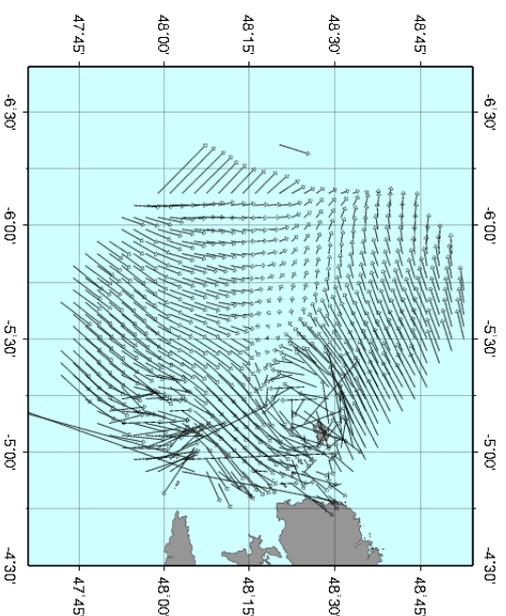
COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5'

LE 29/11/2007 À 01H00 UTC, À BASSE MER

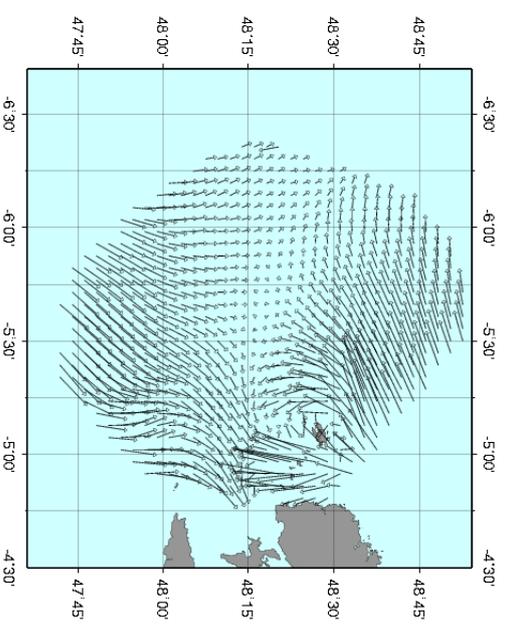
Représentation vectorielle des
données obtenues avec les
radars HF



Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 1'



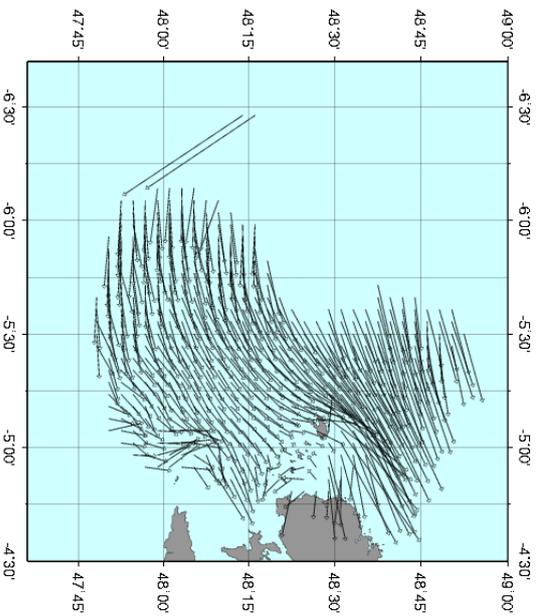
Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 5'



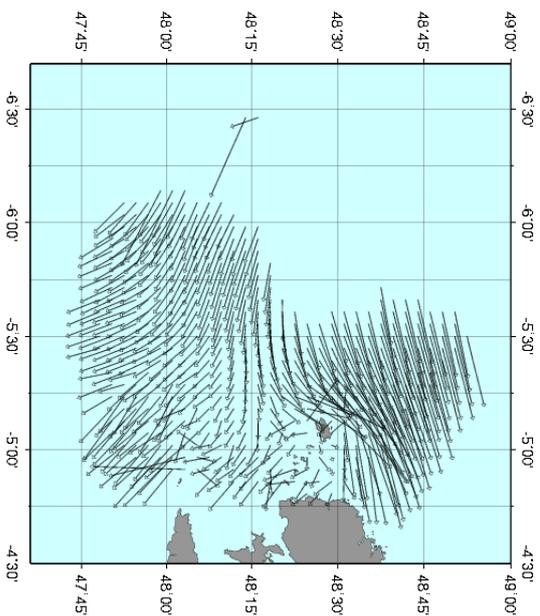
COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5'

LE 29/11/2007 À 07H00 UTC, À PLEINE MER

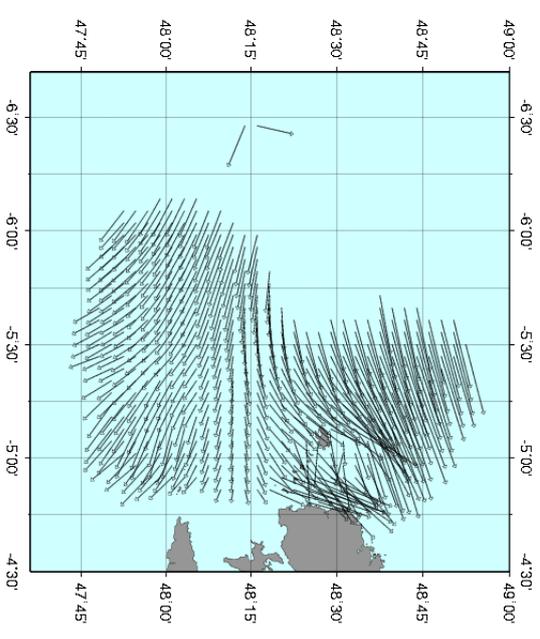
Représentation vectorielle des données obtenues avec les radars HF



Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 1'



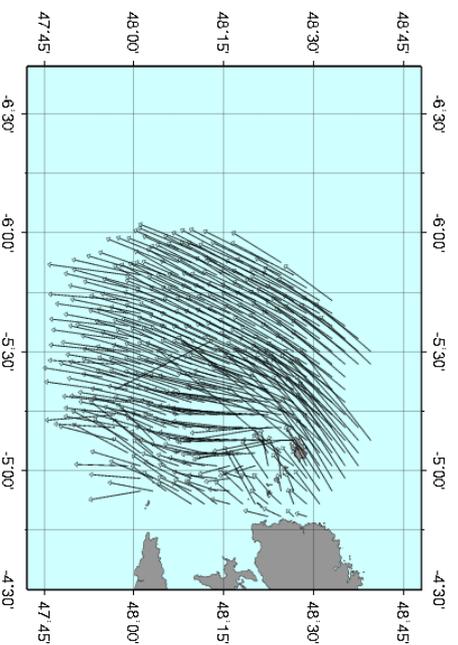
Représentation vectorielle des données obtenues avec MOTHY 5'



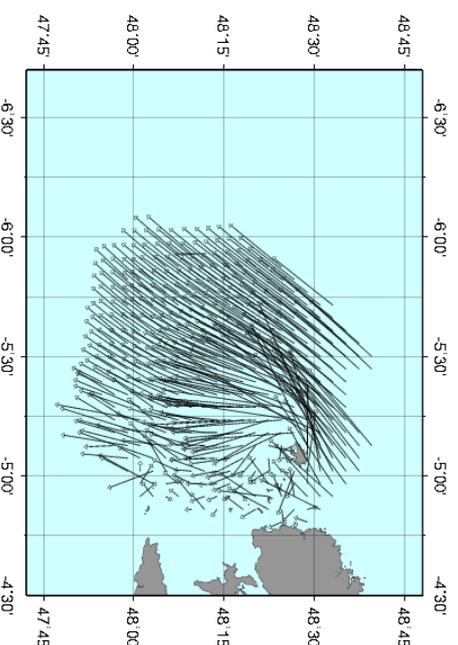
COMPARAISON ENTRE DONNÉES RADAR HF, MOTHY 1' ET MOTHY 5'

LE 29/11/2007 À 12H00 UTC, À MI-MARÉE DESCENDANTE

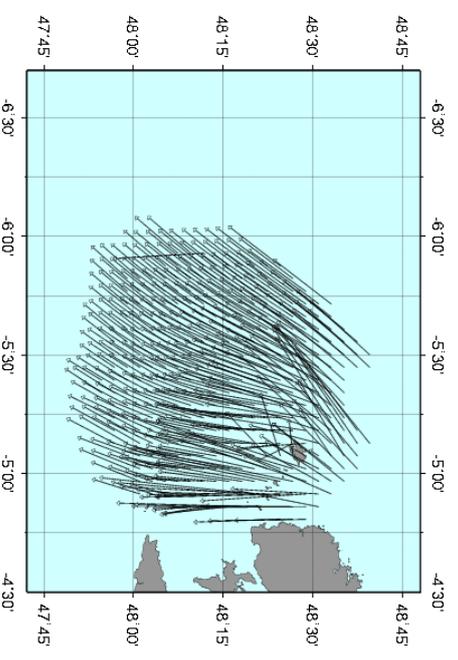
Représentation vectorielle des
données obtenues avec les
radars HF



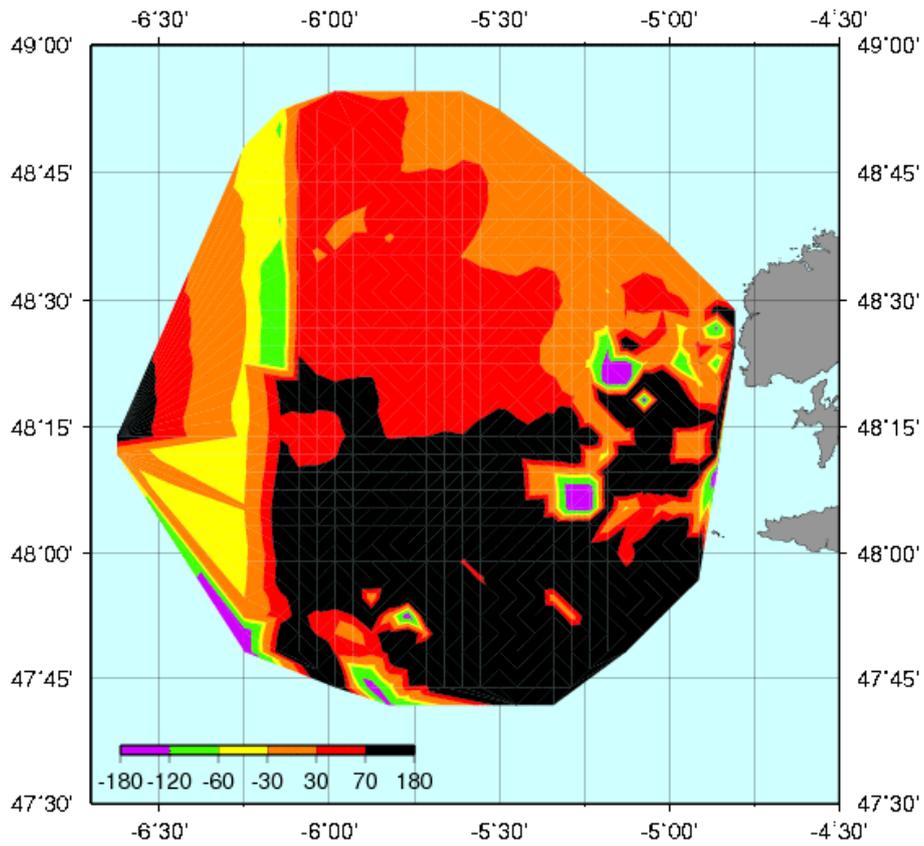
Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 1'



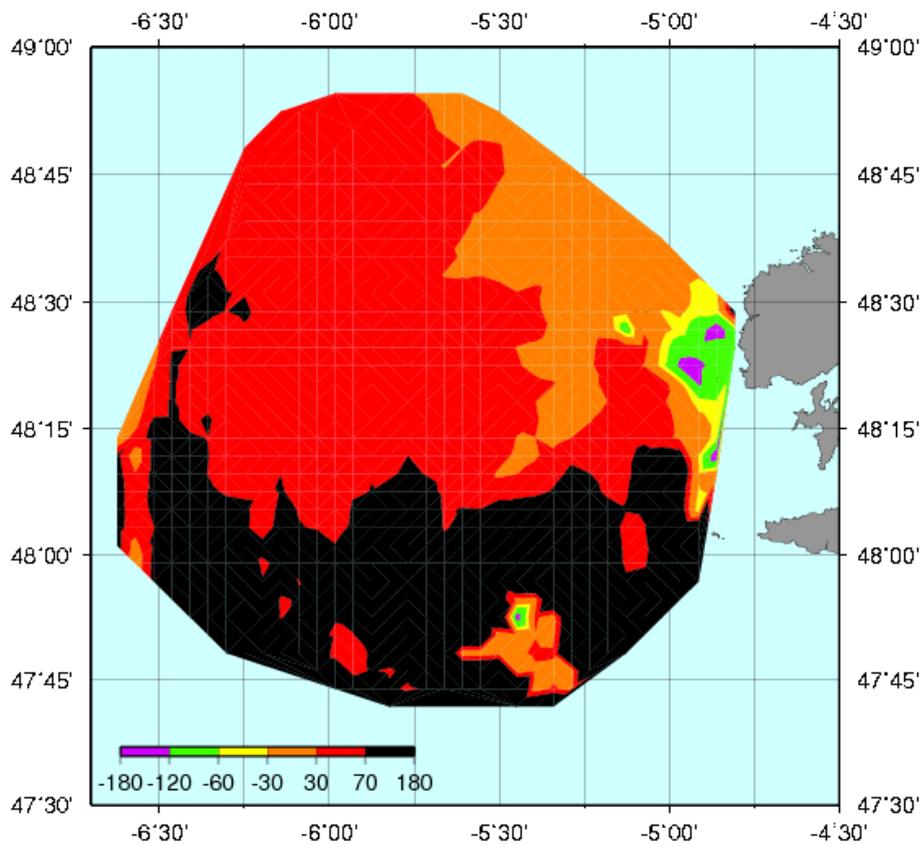
Représentation vectorielle des
données obtenues avec
MOTHY 5'



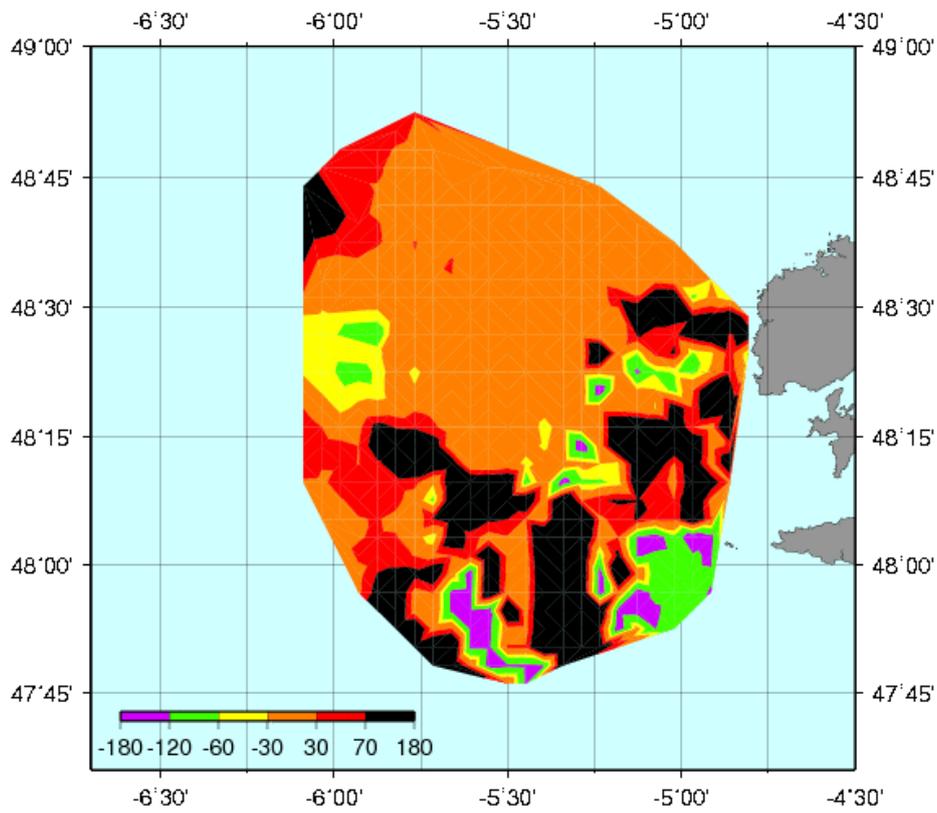
II.2 Comparaison des directions et des vitesses des données MOTHY et radar HF (voir feuilles suivantes)



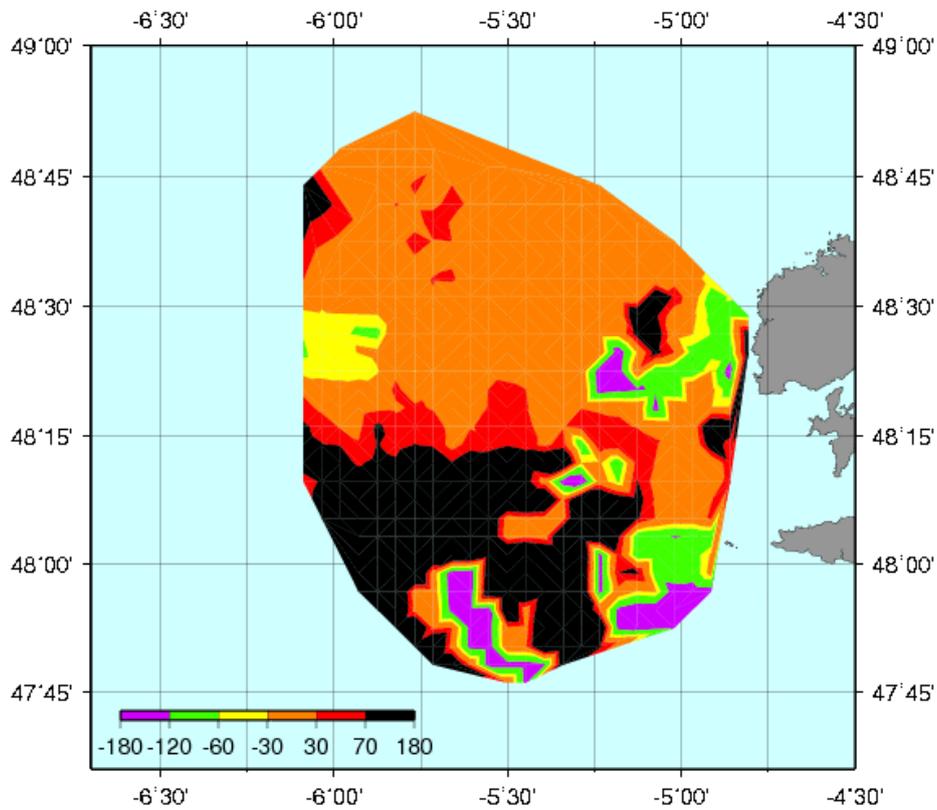
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 18/10/07 à 1h UTC)



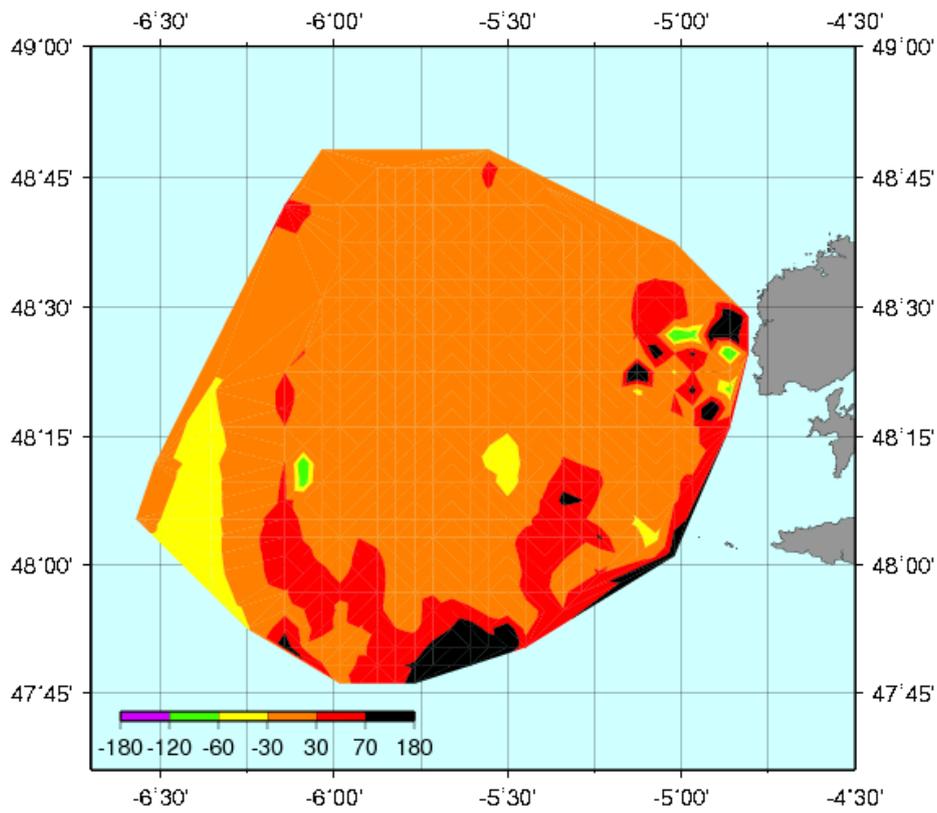
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 18/10/07 à 1h UTC)



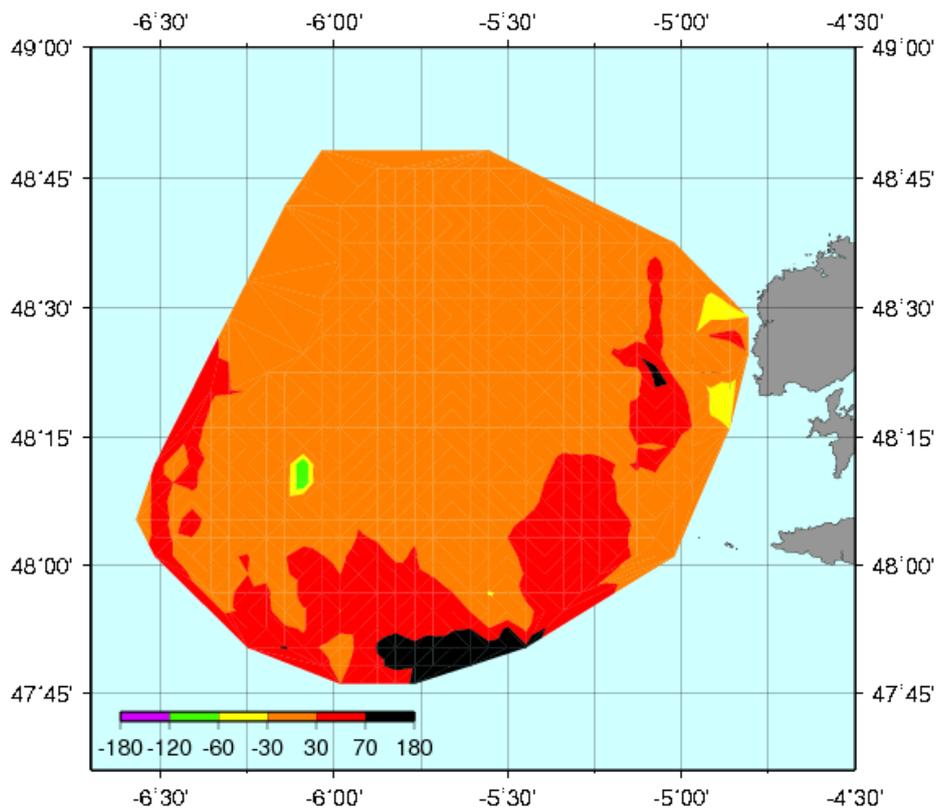
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 1' (le 18/10/07 à 7h UTC)



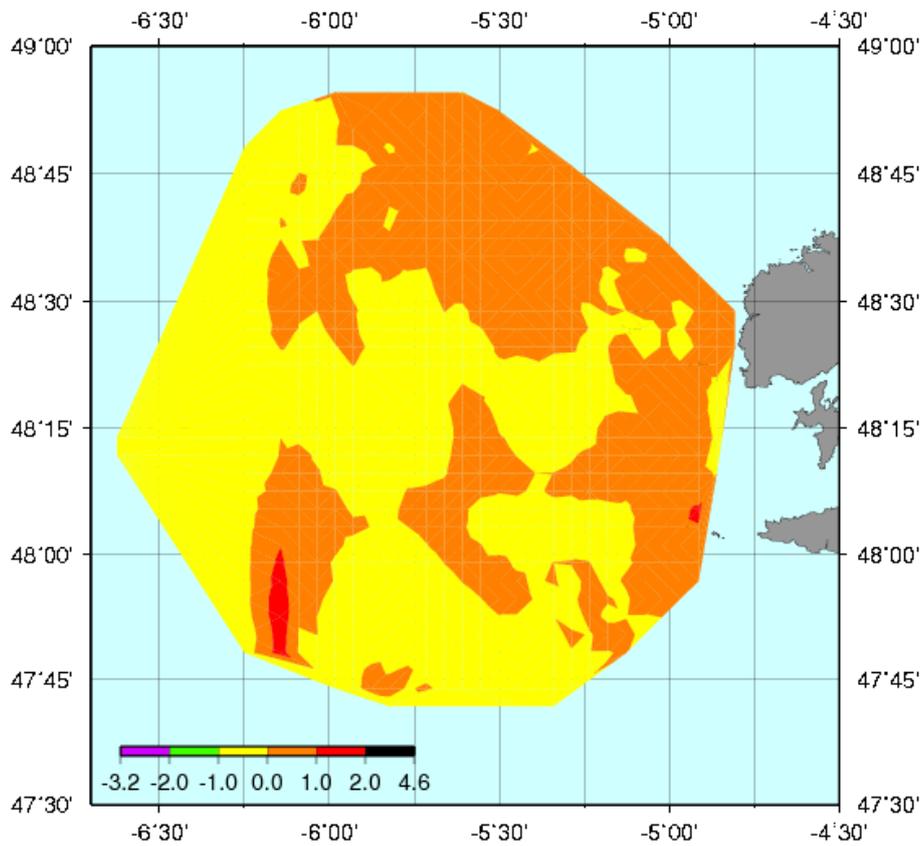
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 5' (le 18/10/07 à 7h UTC)



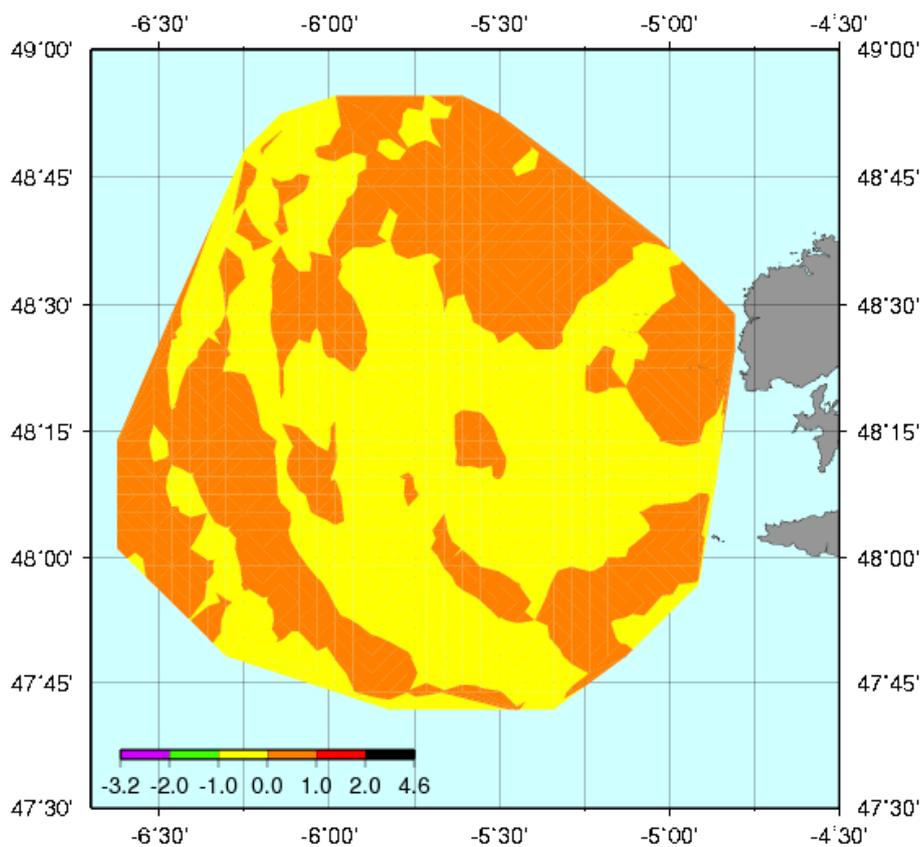
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 1' (le 18/10/07 à 12h UTC)



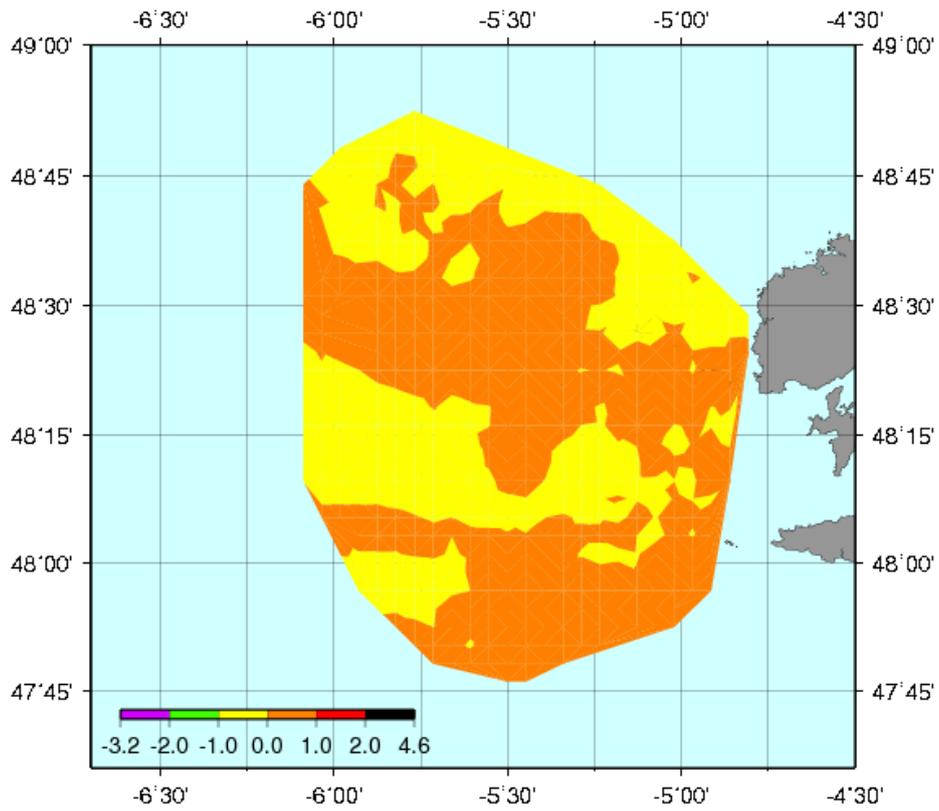
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 5' (le 18/10/07 à 12h UTC)



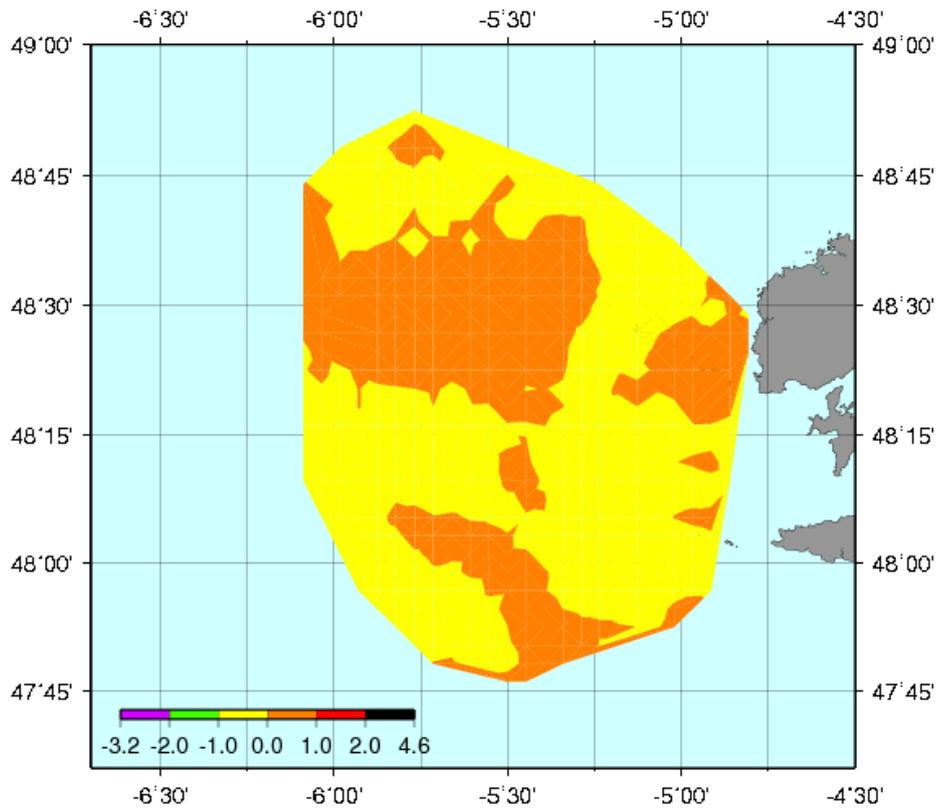
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 18/10/07 à 1h UTC)



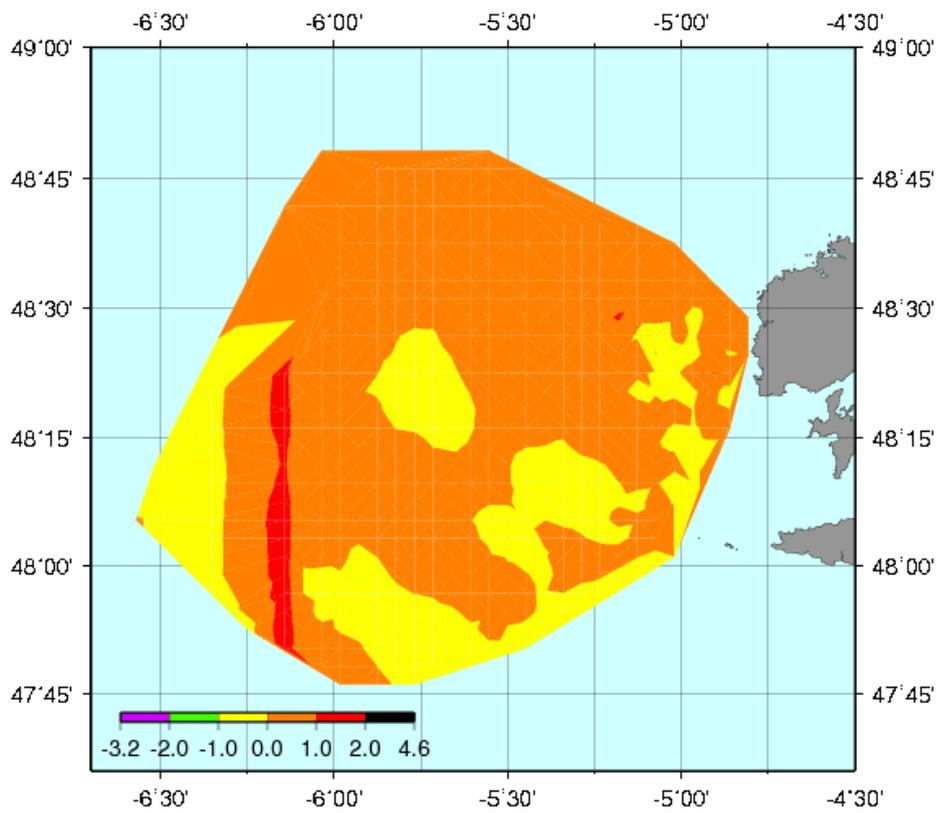
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 18/10/07 à 1h UTC)



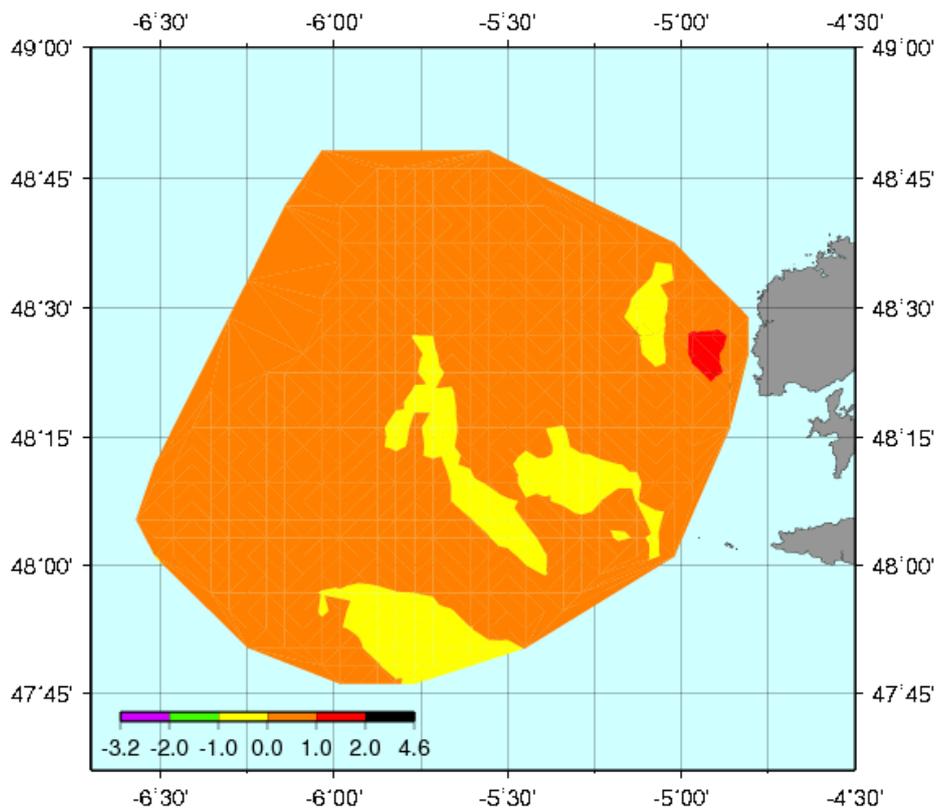
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 18/10/07 à 7h UTC)



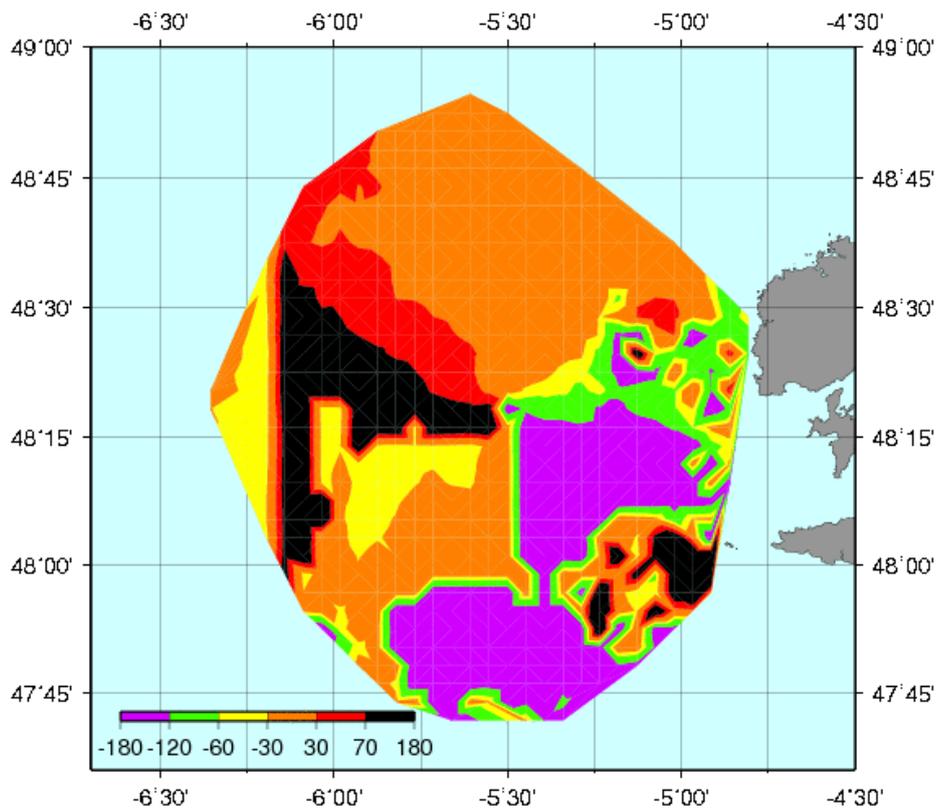
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 18/10/07 à 7h UTC)



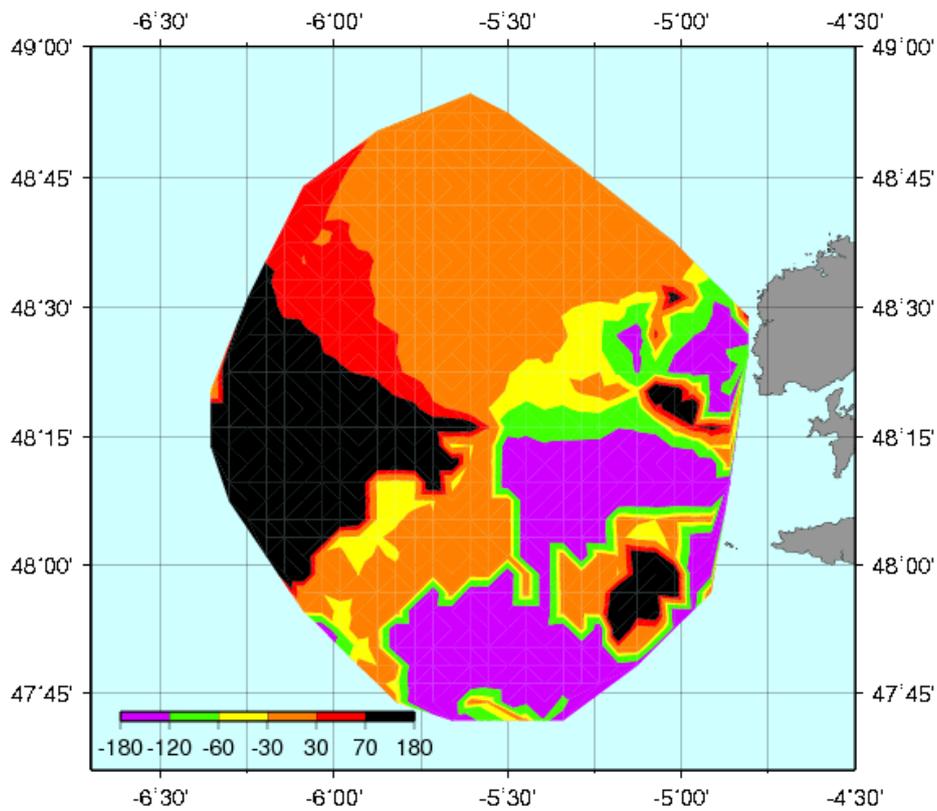
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 1' (le 18/10/07 à 12h UTC)



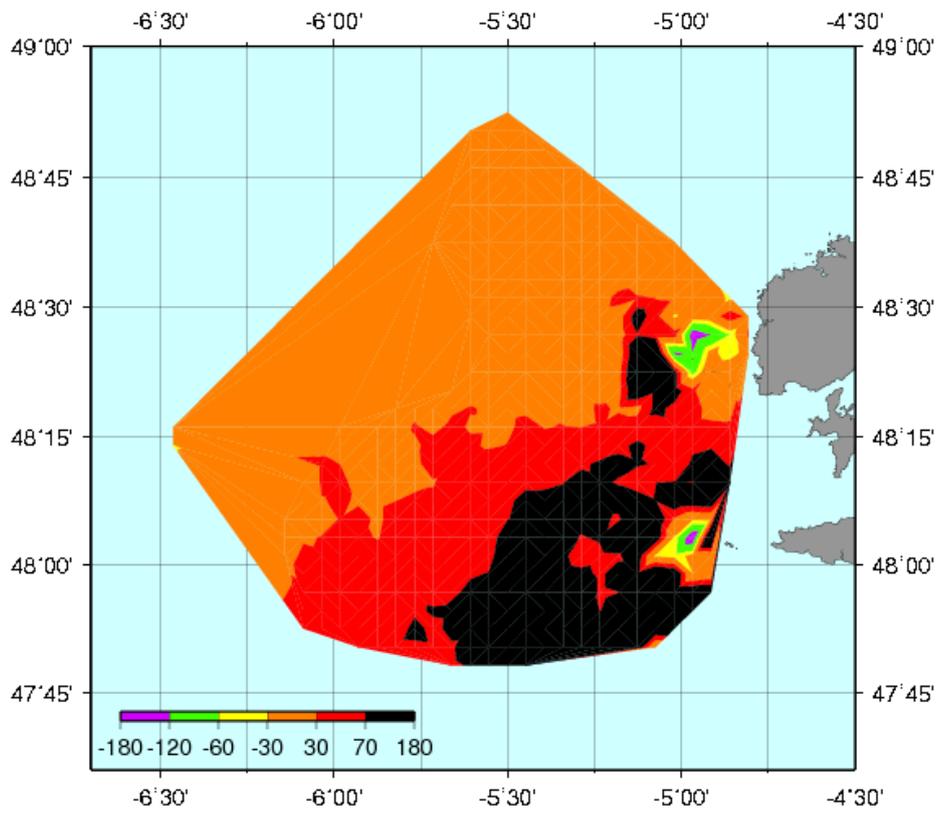
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOTHY 5' (le 18/10/07 à 12h UTC)



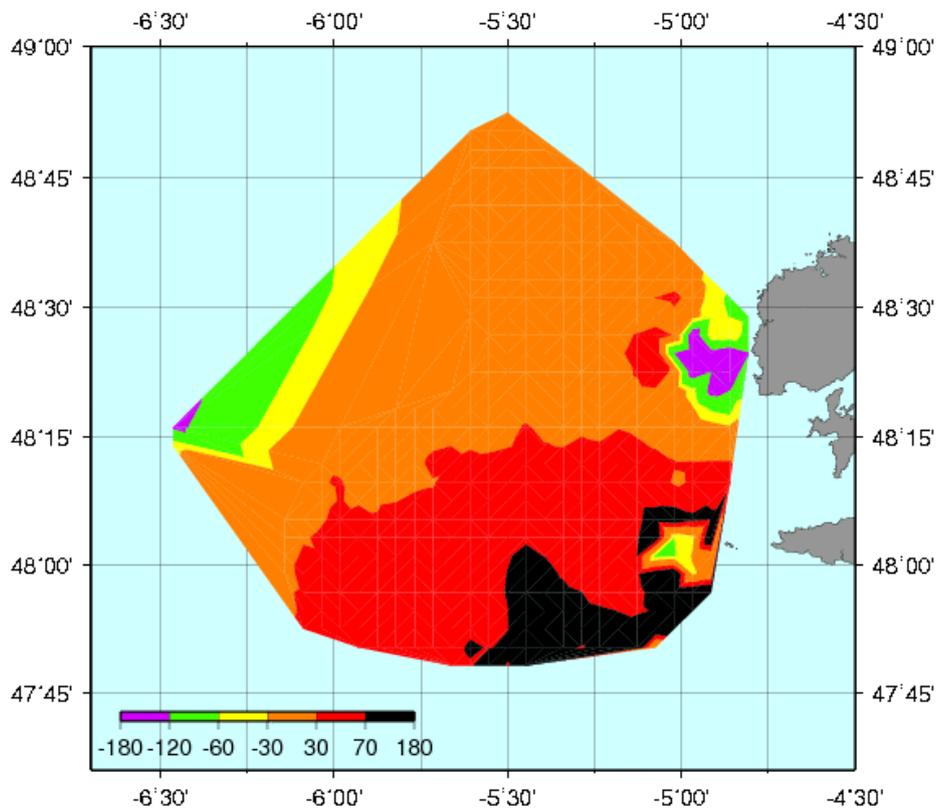
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 1' (le 29/11/07 à 1h UTC)



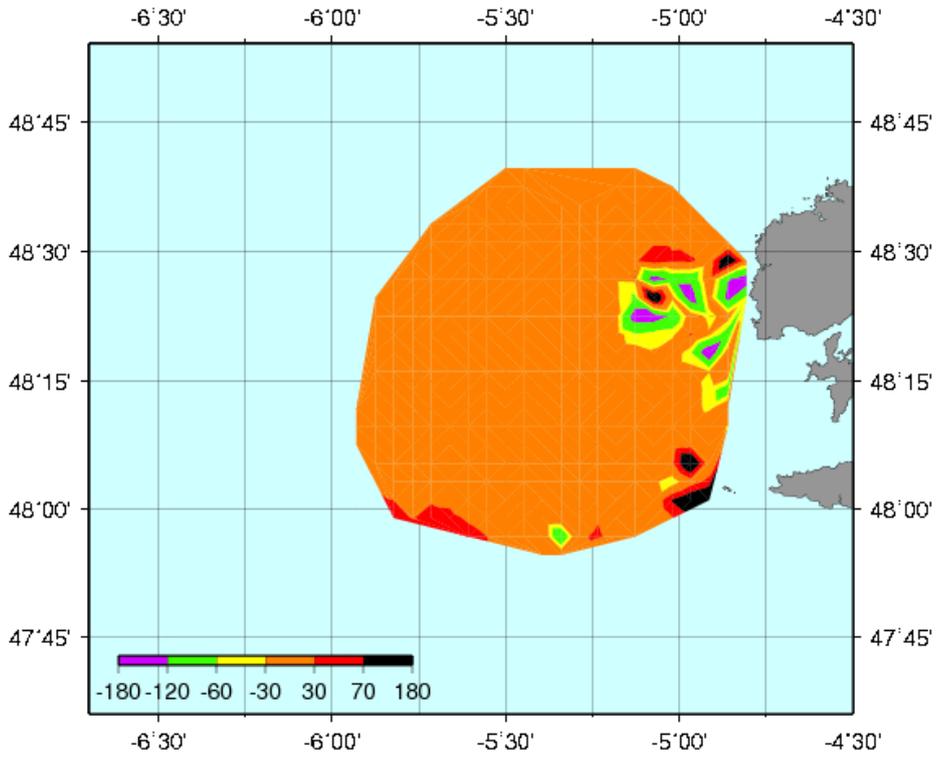
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 5' (le 29/11/07 à 1h UTC)



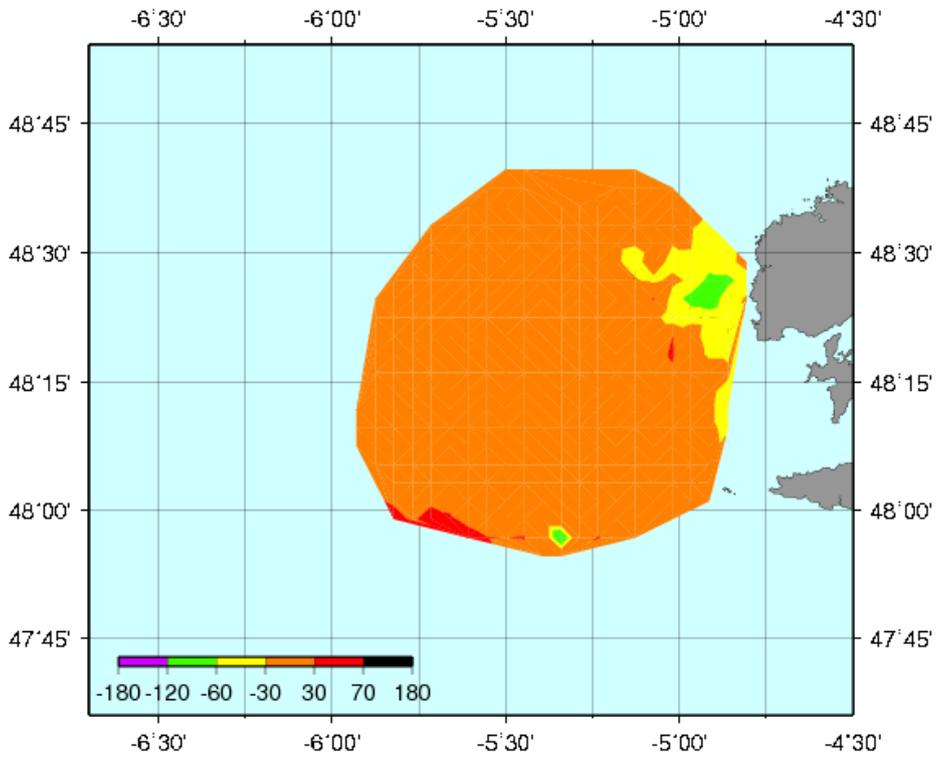
Différence des directions entre les données des radars HF
et celles du modèle MOUHY 1' (le 29/11/07 à 7h UTC)



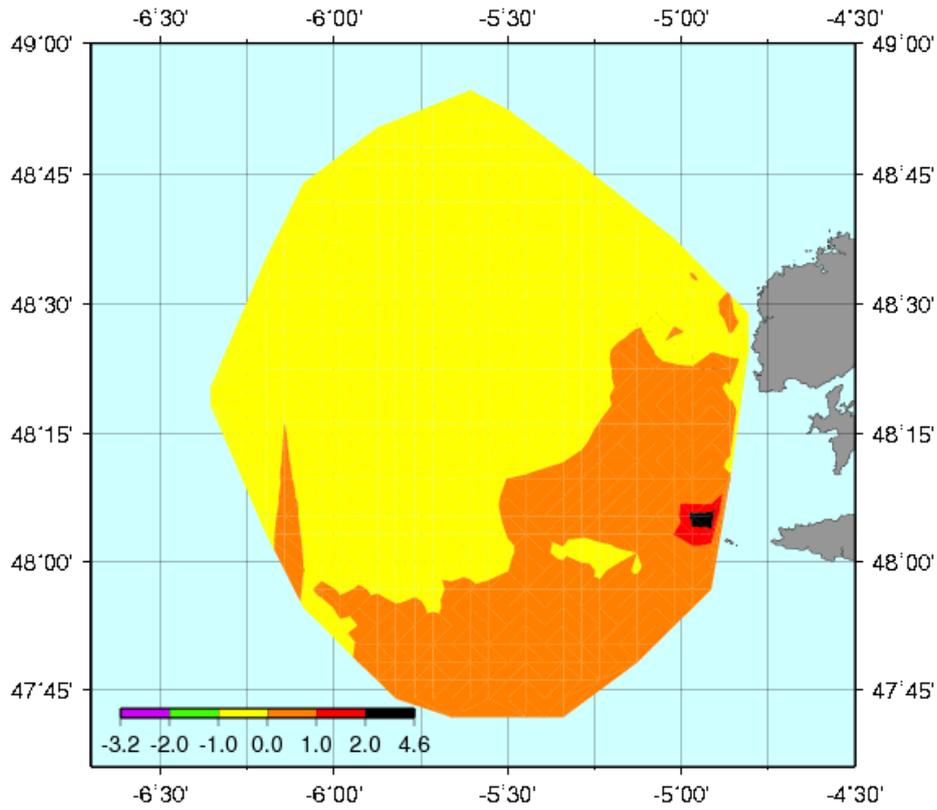
Différence des directions entre les données des radars HF
et celles du modèle MOUHY 5' (le 29/11/07 à 7h UTC)



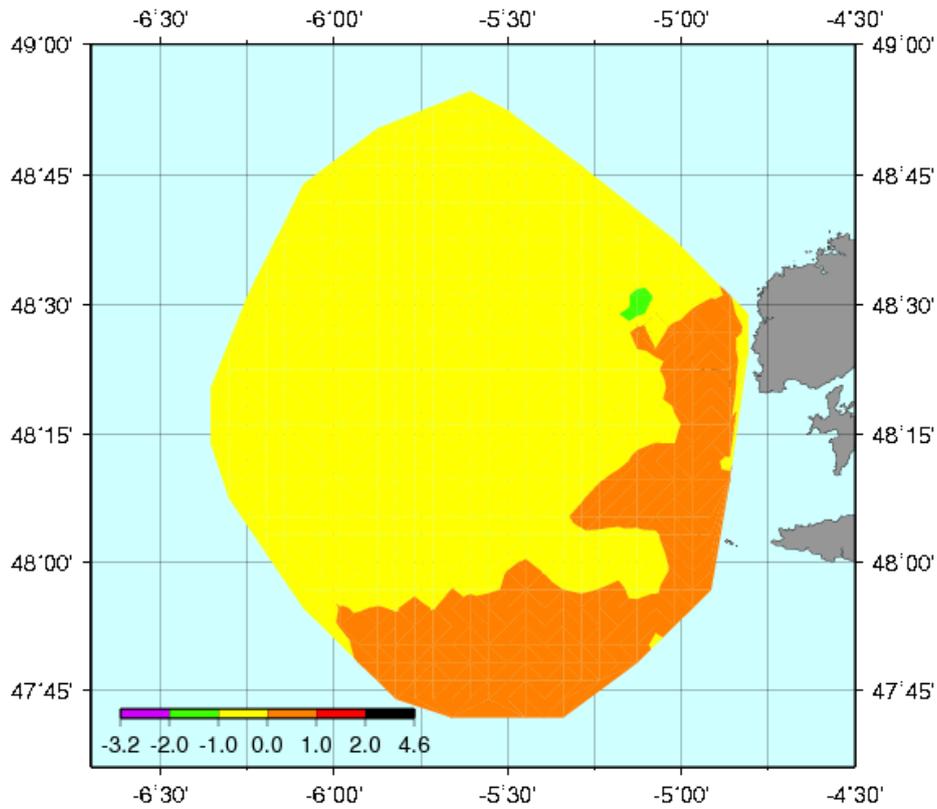
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 29/11/07 à 12h UTC)



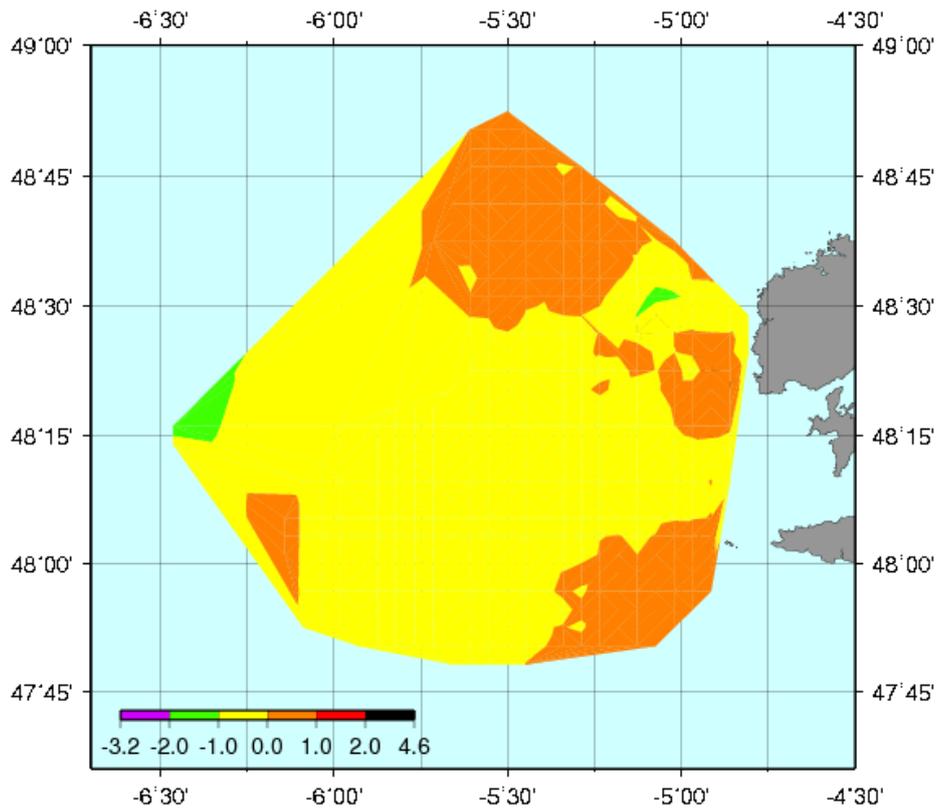
Différence des directions entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 29/11/07 à 12h UTC)



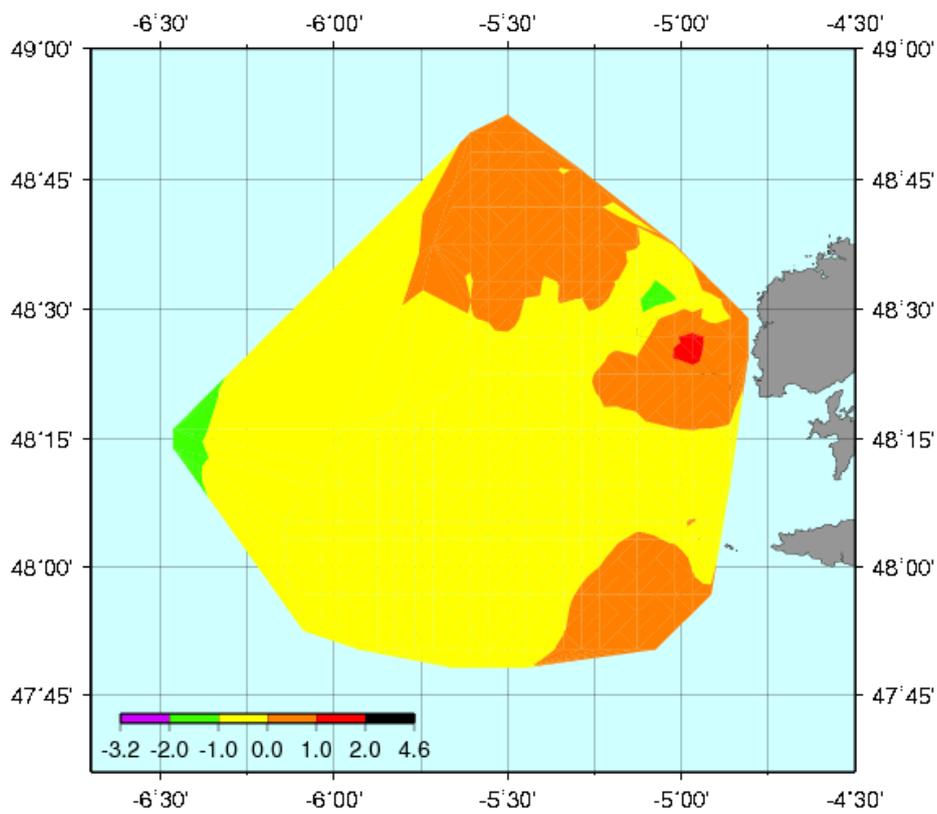
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 1' (le 29/11/07 à 1h UTC)



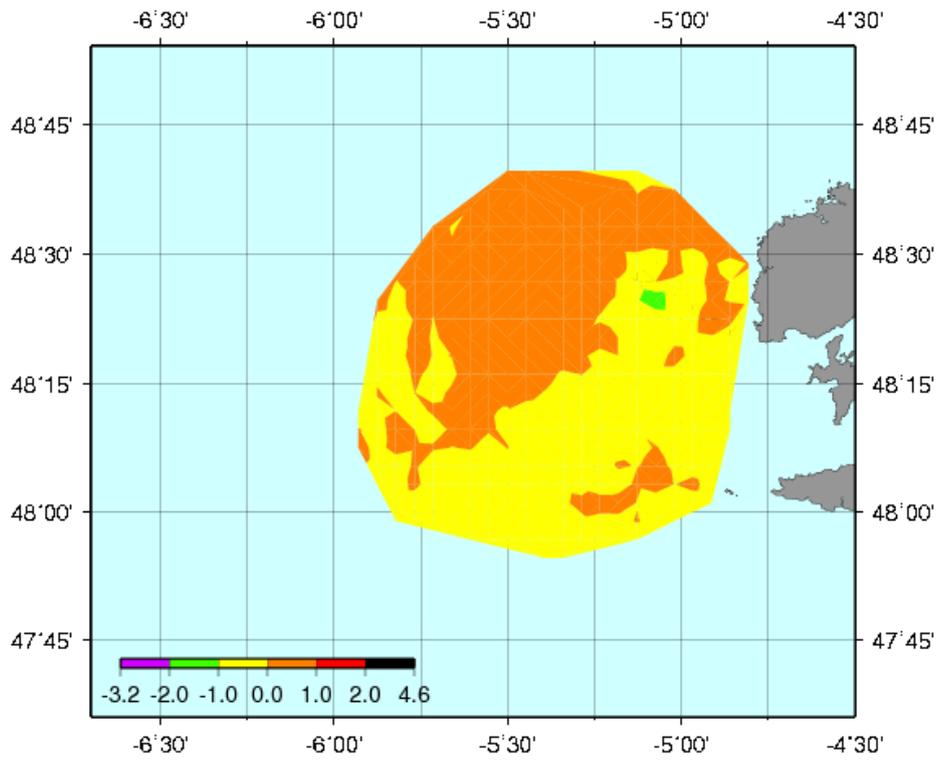
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOUHY 5' (le 29/11/07 à 1h UTC)



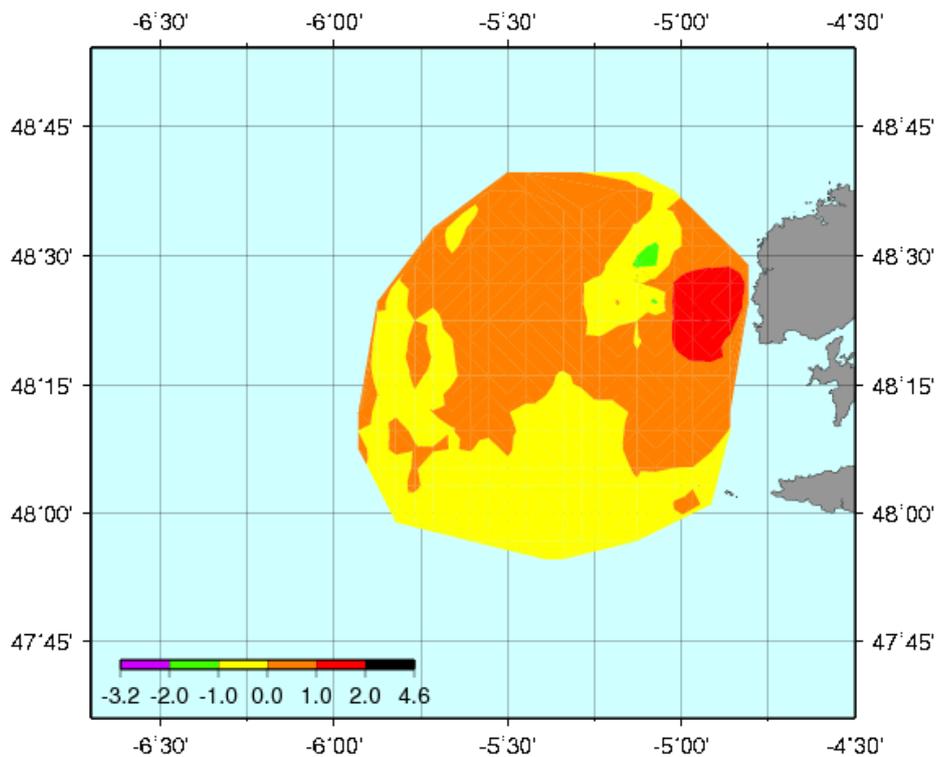
Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 29/11/07 à 7h UTC)



Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 29/11/07 à 7h UTC)



Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 1' (le 29/11/07 à 12h UTC)



Différence des vitesses entre les données des radars HF et celles du modèle MOthy 5' (le 29/11/07 à 12h UTC)

Dans tous les cas précédent, nous constatons que, pour les différences de vitesses, que l'instant choisit se situe à pleine mer, à basse mer ou à un moment intermédiaire il n'y a pas de grosse différences. En revanche pour les différences de direction, ce n'est pas le même cas. Pour la pleine et la basse mer, de grosses différences sont constatées, et principalement dans la zone sud de la représentation. Par contre, pour le cas de 12h UTC, il n'y a pratiquement pas de différences significatives. Tout ceci est comparable aux données observées de la page 20 à la page 25 et confirme ce qui a été dit.

Annexe IV

Description mathématique de MOTHY

MOTHY est un modèle autonome permettant la simulation des principaux forçages contraignant les mouvement d'une nappe d'hydrocarbure (le forçage est une valeur imposée de manière statique à une variable d'un modèle. Celle-ci n'est pas calculée par les équations du modèle, mais est issue d'un autre modèle, d'observations, d'analyse ou de prévisions. Par exemple, on peut utiliser le vent issu d'un modèle atmosphérique comme forçage atmosphérique d'un modèle océanique). Cette simulation repose sur le travail commun d'un modèle hydrodynamique d'océan à domaine limité et d'un modèle physico-chimique de nappe.

Modèle d'océan

Equation du modèle barotrope 2D

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= f \cdot v - g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial Pa}{\partial x} - u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho \cdot H} \cdot (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -f \cdot u - g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial Pa}{\partial y} - u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho \cdot H} \cdot (\tau_{sy} - \tau_{by}) \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &+ \left(\frac{\partial(u \cdot H)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot H)}{\partial y} \right) = 0\end{aligned}$$

u,v	:	Courants zonaux et méridiens intégrés sur la profondeur
f	:	Facteur de Coriolis
Pa	:	Pression atmosphérique
g	:	Accélération de la pesanteur (g=9.81m.s ⁻²)
η	:	Élévation absolue de la surface libre de l'océan
ρ	:	Masse volumique de l'eau de mer
H	:	Profondeur de l'océan
τ _{sx} , τ _{sy}	:	Composantes la tension du vent de surface
τ _{bx} , τ _{by}	:	Composantes du frottement de fond

Les termes de tension/frottement sont modélisés en utilisant une loi quadratique :

$$\begin{cases} \tau_{sx} = \rho_a \cdot C_d \cdot |\vec{W}| \cdot W_x \\ \tau_{sy} = \rho_a \cdot C_d \cdot |\vec{W}| \cdot W_y \end{cases} \quad \begin{cases} \tau_{bx} = \rho \cdot C_b \cdot \sqrt{(u^2 + v^2)} \cdot u \\ \tau_{by} = \rho \cdot C_b \cdot \sqrt{(u^2 + v^2)} \cdot v \end{cases}$$

W_x, W_y, \vec{W} : Composantes horizontales et vecteur du vent à 10 mètres

ρ_a : Masse volumique de l'air

C_d : Coefficient de frottement air-eau, $C_d = (0,8 + 0,065 \cdot |\vec{W}|) 10^{-3}$
(formule de Wu)

C_b : Coefficient de frottement de fond ($C_b=0.0015$)

Le modèle d'océan utilisé par MOTHY est un modèle barotrope (les propriétés ne varient pas avec l'épaisseur) basé sur les "équations en eau peu profonde". En effet, si les effets baroclines (les propriétés varient avec l'épaisseur) ont un impact certain sur la circulation océanique, on estime que, pour des prévisions à court terme (quelques jours) et autour du plateau continental, les principaux forçages sont le vent de surface, la pression atmosphérique, le frottement sur le fond et la force de Coriolis. Cette approche est effectivement un succès sur des zones où les eaux sont bien mélangées et où les courants permanents sont négligeables (par exemple en Manche ou dans le Golfe de Gascogne).

Modèle d'hydrocarbure

Modélisation de la diffusion turbulente : modèle d'Elliot

Le processus est dépendant d'un coefficient de diffusion et représenté par la distance de parcours effective sur l'horizontale et la verticale.

$$D_h = R \sqrt{2 \cdot K_h \cdot \delta t}$$

$$D_v = (2 \cdot R - 1) \cdot \sqrt{2 \cdot K_v \cdot \delta t}$$

R : nombre aléatoire pris entre 0 et 1,

δt : pas de temps

K_h, K_v : coefficient de diffusion horizontal et vertical

$$K_h, K_v = 2 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot s^{-1}$$

Cette diffusion horizontale a lieu dans la direction $\theta = 2 \cdot \pi \cdot R$

Modélisation de la flottabilité

La flottabilité est modélisée par une loi de Stokes pour les gouttes de diamètre inférieur à $d_{critique}$ et par une loi de Reynolds pour les autres. On a :

$$Stokes : U_f = \frac{g \cdot d^2 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}{18 \cdot \nu}$$

$$Reynolds : U_f = \sqrt{\frac{8}{3}} \cdot g \cdot d \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)$$

$$d_{critique} = \frac{9,52 \cdot \nu^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{g \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}}$$

- d : diamètre de la goutte
- ν : viscosité ($\nu = 1.10^{-6}$)
- ρ, ρ_0 : masse volumique de l'eau de mer et du polluant

Le modèle MOTHY ne prend pas pour l'instant en compte une chimie trop complexe du polluant, telle que l'évaporation, le vieillissement et l'émulsification.

Annexe V

Les 63 cibles SAR

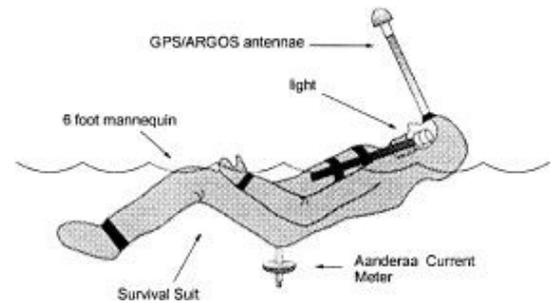
1 personne à la mer, état inconnu

2 vertical

3 assis



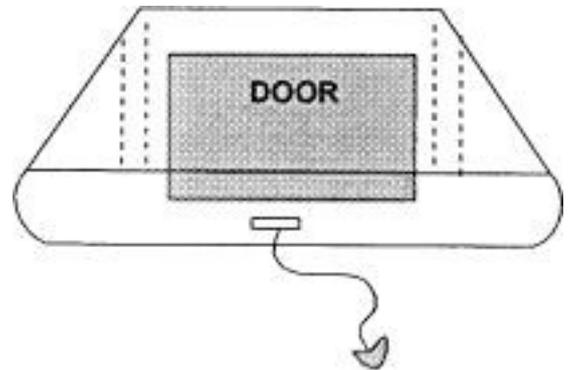
4 horizontal, combinaison de survie



5 horizontal, combinaison de plongée

6 horizontal, décédée

7 canot de survie, sans lest



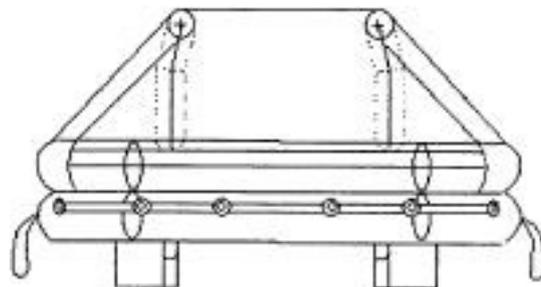
8 canot de survie, sans lest, ni tente, ni ancre flottante

9 canot de survie, sans lest, ni tente, avec ancre flottante

10 canot de survie, avec tente, sans ancre flottante

11 canot de survie, sans lest, avec tente et ancre flottante

12 canot de survie, lest peu profond, tente

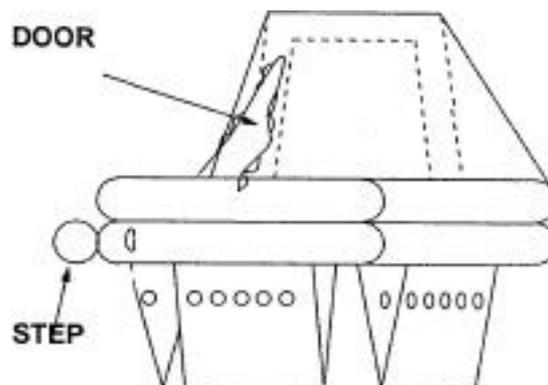


13 canot de survie, lest peu profond, tente, sans ancre flottante

14 canot de survie, lest peu profond, tente avec ancre flottante

15 canot de survie, lest peu profond, tente, retourné

16 canot de survie avec lest peu profond



17 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond

18 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond, sans ancre flottante

19 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond, sans ancre flottante, légèrement chargé

20 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond, sans ancre flottante, lourdement chargé

21 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond, avec ancre flottante

22 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond, avec ancre flottante, légèrement chargé

23 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec lest profond, avec ancre flottante, lourdement chargé

24 canot de survie de capacité 15 à 25 personnes, avec lest profond

25 canot de survie de capacité 15 à 25 personnes, avec lest profond, sans ancre flottante, légèrement chargé

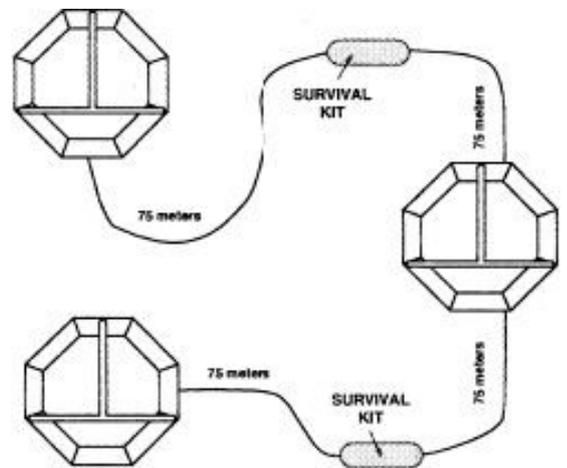
26 canot de survie de capacité 15 à 25 personnes, avec lest profond, avec ancre flottante, lourdement chargé

- 27 canot de survie avec lest profond, retourné
- 28 canot de survie avec lest profond, rempli d'eau

- 29 capsule de survie



- 30 USCG Sea rescue Kit



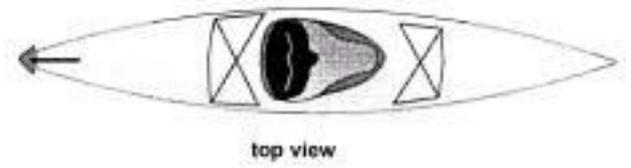
- 31 canot de survie de capacité 4 à 6 personnes, avec tente, sans lest ni ancre flottante



- 32 Toboggan d'avion, capacité 46 personnes



33 Kayak de mer avec une personne

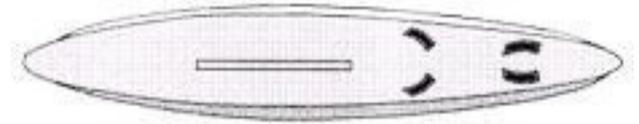


top view



side view

34 Planche de surf avec une personne

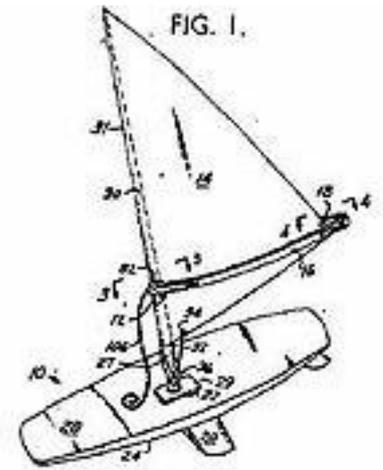


top view

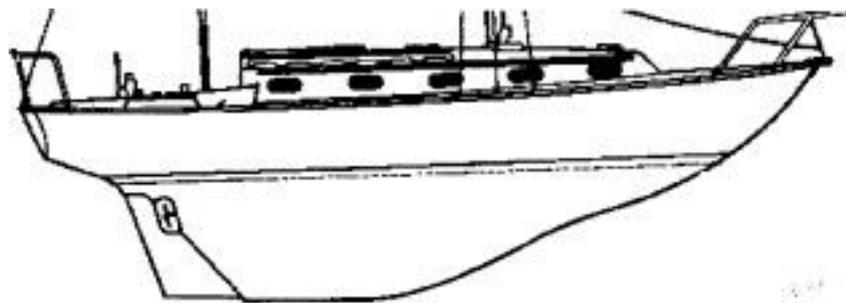


side view

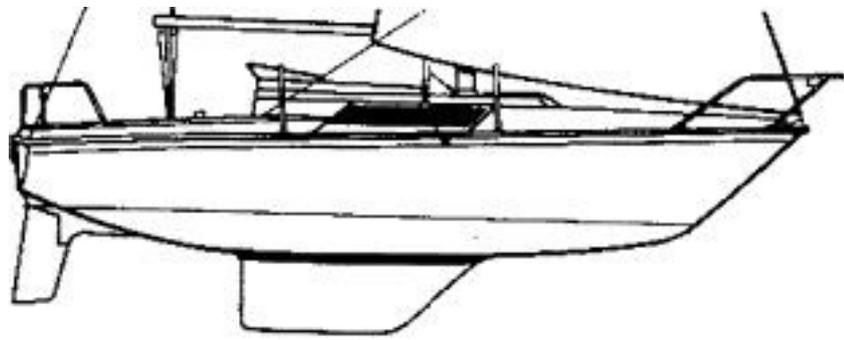
35 Planche à voile avec gréement dans l'eau



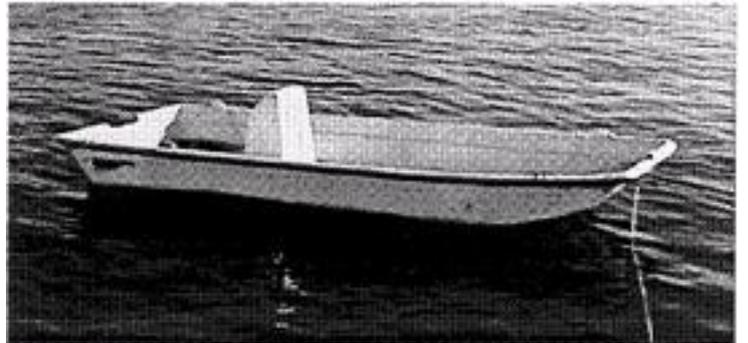
36 Monocoque de plaisance à tirant d'eau élevé



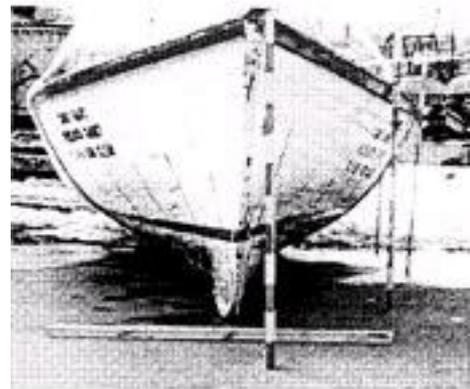
37 Monocoque de plaisance à faible tirant d'eau



38 Yole plate



39 Yole coque en V



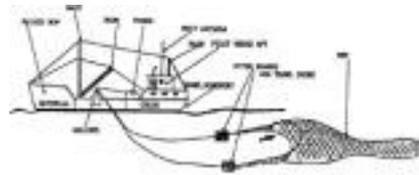
40 Yole coque en V, remplie d'eau

41 Bateau de sport : navire de 15 à 25 pieds de long, sans voile, coque en V modifiée

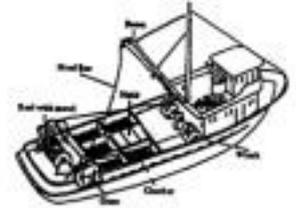


42 Bateau de pêche sportive : navire de 17 à 100 pieds de long, tableau de bord central cockpit ouvert





Side Trawler

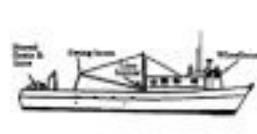


Stern Trawler

43 Navire de pêche



Gillnetter



Longliner



Purse Seiner



Trap Boat

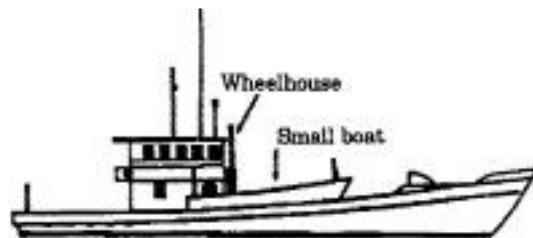


Sampan

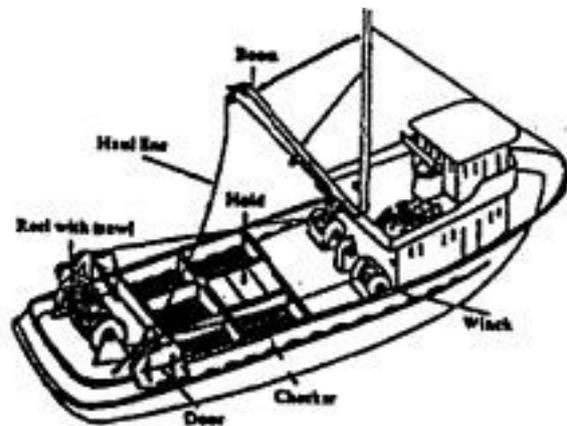


Lobster Boat

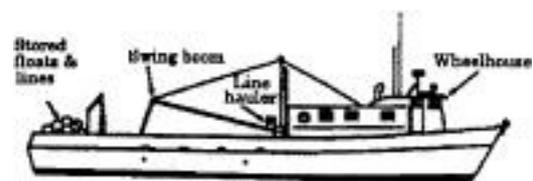
44 Sampan hawaïen



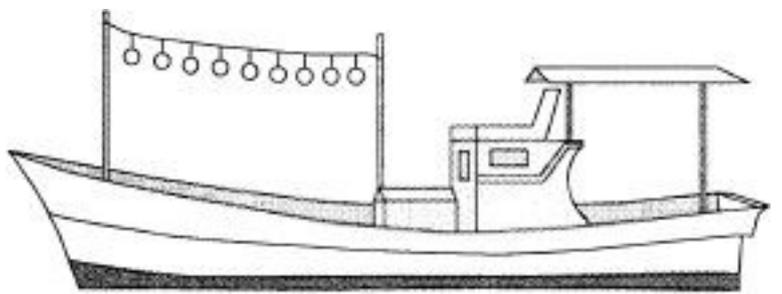
45 Chalutier japonais



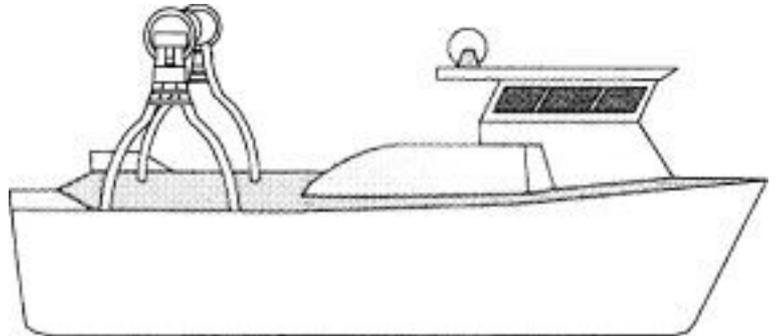
46 Palangrier japonais



47 Navire de pêche coréen



48 Fileyeur avec enrouleur arrière

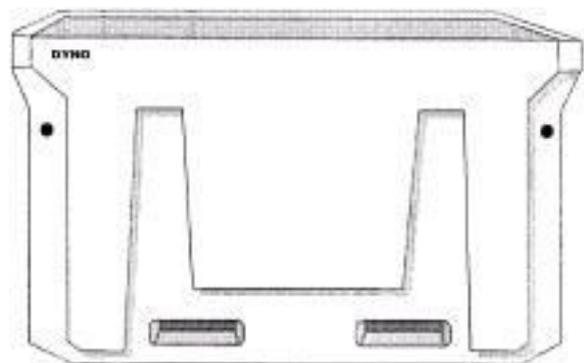


49 Cargo côtier



50 Débris

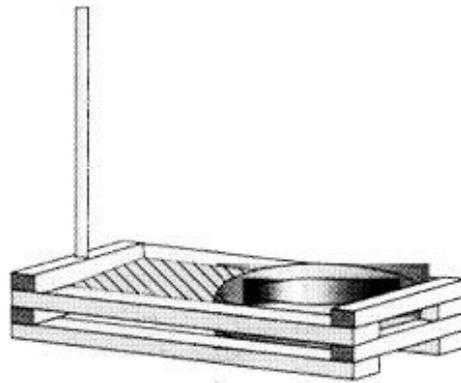
51 Boîte contenant un mètre cube de glace



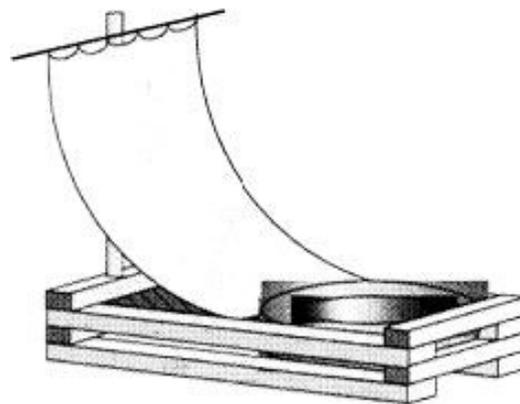
52 Boîte contenant un mètre cube de glace, faiblement chargé

53 Boîte contenant un mètre cube de glace, pleine charge

54 Radeau sans voile



55 Radeau avec voile



56 Déchets flottants

57 Déchets médicaux

58 Déchets médicaux : flacons

59 Déchets médicaux : grands flacons

60 Déchets médicaux : petits flacons

61 Déchets médicaux : seringues

62 Déchets médicaux : grandes seringues

63 Déchets médicaux : petites seringues