

Direction des Opérations pour la Prévision - Département Prévision Marine et Océanographie
École nationale de la météorologie
Météo France

Modélisation de la marée autour de l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon et recherche du chalutier *Ravenel*

Auteur.e.s :

Samy GALLEGO
Gwenvaël LE BARON
Fleur NICOLAY
Clémence TURBÉ

Encadrant du projet :
Pierre DANIEL

Avril 2021



FIGURE 1 – Le chalutier *Ravenel* © Studio Briand Photographie.

Sommaire

Table des figures	2
Liste des tableaux	3
Introduction	5
1 Contexte	6
1.1 Disparition du <i>Ravenel</i>	6
1.1.1 Brève chronologie	6
1.1.2 Hypothèses sur le naufrage	7
1.2 Autour de Saint-Pierre-et-Miquelon	7
1.2.1 Bathymétrie	7
1.2.2 Circulation océanique générale	8
1.2.3 Conditions météorologiques lors du naufrage	9
1.3 Le phénomène de marée	9
1.3.1 Une origine astronomique	9
1.3.2 Analyse harmonique du phénomène de marée	10
1.3.3 La propagation des ondes de marée	10
1.3.4 La marée à Saint-Pierre-et-Miquelon	11
2 Méthode	14
2.1 Débris du <i>Ravenel</i>	14
2.2 Modèle de dérive en mer MOTHY	15
2.3 Conditions aux limites et forçages	17
2.3.1 Données de bathymétrie	18
2.3.2 Données de vent	20
2.3.3 Données de marée océanique	20
2.4 Calage de la marée dans MOTHY	20
2.4.1 Hauteurs d'eau	20
2.4.2 Courants	21
3 Résultats	24
3.1 Trajectoires des objets 4 et 6	24
3.2 Multi-trajectoires	24
3.3 Cartes de probabilités maximales	24
Conclusion	30
Références bibliographiques	31
Annexes	32
Annexe A : Comparaison des trajectoires et des cartes de probabilités maximales avec et sans marée	32
Annexe B : Étude de la sensibilité aux conditions initiales	35

Table des figures

1	Le chalutier <i>Ravenel</i> © Studio Briand Photographe.	1
2	Bathymétrie autour de l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon (étude de l'Ifremer [3]). .	7
3	Carte des fonds marins autour de Terre-Neuve et de Saint-Pierre-et-Miquelon (https://loti2010.wordpress.com/2010/04/26/campagnes-de-peche-sur-les-bancs-de-terre-neuve/).	8
4	Carte des courants à grande échelle © MétéoMédia.	8
5	Schéma illustrant le phénomène de marée.	10
6	Carte de la phase de l'onde M2 autour de Saint-Pierre-et-Miquelon (en °) (FES2014). .	12
7	Carte de l'amplitude de l'onde M2 autour de Saint-Pierre-et-Miquelon (en mm) (FES2014). 12	
8	Vitesse maximale des courants instantanés de marée (figure du rapport d'étude de l'ARDA [6] reproduite dans l'étude de l'Ifremer [3]).	13
9	Localisation des objets du tableau 4.	16
10	Le système MOTHY © Pierre Daniel.	17
11	Exemple de probabilité de présence le 30/01/1962 à 7 h UTC pour un débris échoué le 31/01/1962 à 7 h 45 UTC en un point de latitude 46° 53,60' N et de longitude 55° 56,24' O. 17	
12	Bathymétrie du domaine Saint-Pierre-et-Miquelon selon la grille GEBCO_2014 à 30 secondes d'arc.	18
13	Bathymétrie (en haut) et points de terre (en bas) au niveau de l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon et de la pointe de la péninsule de Burin selon la grille GEBCO_2014 à 30 secondes d'arc (cartes non corrigées à gauche, cartes corrigées à droite).	19
14	Comparaison entre les hauteurs d'eau près du marégraphe de Saint-Pierre calculées par MOTHY et fournies par le SHOM.	21
15	Comparaison des marées pendant la période des vives-eaux et à pleine mer (à gauche : figure tirée de [6], à droite : courants obtenus avec MOTHY).	22
16	Comparaison des marées pendant la période des vives-eaux et à basse mer (à gauche : figure tirée de [6], à droite : courants obtenus avec MOTHY).	22
17	Rétrotrajectoires de l'objet 4 à différents horaires.	24
18	Rétrotrajectoires de l'objet 6 à différents horaires.	25
19	Rétrotrajectoires de l'ensemble des objets à différents horaires.	26
20	Seuil 4. À gauche : cartes de probabilités maximales (en dixièmes de %), à droite : dates (jour/heure) correspondant aux probabilités maximales.	27
21	Seuil 5. À gauche : cartes de probabilités maximales (en dixièmes de %), à droite : dates (jour/heure) correspondant aux probabilités maximales.	28
22	Seuil 6. À gauche : cartes de probabilités maximales (en dixièmes de %), à droite : dates (jour/heure) correspondant aux probabilités maximales.	28
23	Carte de probabilités maximales (en dixièmes de %, seuil 5) associées au lieu du naufrage du <i>Ravenel</i>	29
24	Rétrotrajectoires sans les courants de marée de l'ensemble des objets à différents horaires. 33	
25	Cartes de probabilités maximales (en dixièmes de %), seuil 5. À gauche : sans marée, à droite : avec marée. La coloration des carreaux est la même que celle des nombres en fonction de leur valeur.	34
26	Carte de probabilités maximales (en dixièmes de %), seuil 5, avec marée. La coloration des carreaux montre les gains et pertes de probabilités maximales par rapport à la carte sans marée.	34
27	Cartes des probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, seuil 5. . . .	35
28	Cartes des probabilités maximales avec dédoublement des objets 4 et 6, seuil 5 à droite et seuil 6 à gauche.	35
29	Cartes des probabilités maximales avec dédoublement des objets 4 et 6, seuil 7 à droite et seuil 8 à gauche.	36

30	Rétrotrajectoires de l'objet 10 pour 4 échéances différentes (de haut en bas : le 01/02/1962 à 4 h UTC, le 30/01/1962 à 22 h UTC, 16 h UTC et 10 h UTC). À droite, l'heure de lâcher est à 7 h 46, à gauche, il est à 9 h 46.	37
31	Rétrotrajectoires de l'objet 11 pour 4 échéances différentes (de haut en bas : le 01/02/1962 à 4 h UTC, le 30/01/1962 à 22 h UTC, 16 h UTC et 10 h UTC). À droite, l'heure de lâcher est à 7 h 46, à gauche, il est à 9 h 46.	38
32	Cartes des probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, avec les objets 10 et 11 lâchés à 7 h 46.	39
33	Cartes des probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, avec les objets 10 et 11 lâchés à 9 h 46.	39

Liste des tableaux

1	Conditions météorologiques du samedi 27 janvier 1962.	9
2	Conditions météorologiques du dimanche 28 janvier 1962.	9
3	Principales ondes de marée.	11
4	Caractéristiques des débris retenus pour la présente étude.	15

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble du personnel du Département Prévision Marine et Océanographique de Météo France (DIROP/MAR), qui nous a accueilli dans leurs locaux.

Nous remercions particulièrement notre encadrant Pierre Daniel pour sa disponibilité, sa réactivité à nos mails et ses précieux conseils qui nous ont permis de réaliser ce projet dans de bonnes conditions.

Par ailleurs, nous adressons nos remerciements à Nicolas Cormier (DTAM 975/SAMP), Michel L'Hour (directeur du DRASSM) ainsi que Cécile Sauvage (DRASSM) pour les renseignements qu'ils ont pu nous apporter. Nous remercions également les associations Les Disparus du *Ravenel* et Recherches du *Ravenel* 2019/2020 pour avoir mis à notre disposition les documents qu'ils avaient en leur possession. Nos remerciements s'adressent aussi à Florent Lyard (LEGOS) pour avoir répondu à nos questions concernant FES2014.

Lors de notre projet, nous avons dû travailler à distance. C'est dans cette continuité que nous souhaitons remercier la DSI et la DESR (Météo France) pour l'accès à distance aux serveurs et leur assistance informatique.

Introduction

Les circonstances de la disparition, au large de Saint-Pierre-et-Miquelon, du chalutier *Ravenel* lors d'une campagne de pêche hivernale en 1962 n'ont à ce jour pas été élucidées. Ni épave ni corps des membres de l'équipage n'ont été retrouvés. Seuls témoins d'un naufrage dont on ignore tout, des débris du *Ravenel* se sont échoués sur les côtes de Terre-Neuve quelques jours après l'ultime communication du bateau. Presque 60 ans plus tard, la mémoire de ce drame nautique demeure vivace à Saint-Pierre, le port d'attache du *Ravenel*. Toutes les campagnes de recherche menées jusqu'ici se sont révélées infructueuses.

Une nouvelle campagne, dans laquelle sont impliqués les ministères de la Mer, des Outre-mer, des Armées, des Affaires étrangères, de la Culture et le Secrétariat général de la mer, est annoncée pour 2021. Une entente avec le SHC (Service hydrographique du Canada) va permettre d'étendre les zones de recherche aux eaux canadiennes. Le drone de surface DriX, développé par la société française iXblue, sera utilisé pour tenter de détecter l'épave sur les fonds sous-marins. L'expertise technique des services de l'État à Saint-Pierre-et-Miquelon et du DRASSM (Département de recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) a été mise à contribution pour la préparation de cette campagne. Les associations Les Disparus du *Ravenel* et Recherches du *Ravenel* 2019/2020 ont partagé l'ensemble des documents d'archives qu'elles ont réunis. Météo France a été sollicité pour délimiter des zones où le naufrage a le plus vraisemblablement eu lieu et ainsi contribuer au choix des zones de prospection (des zones plus ou moins prioritaires ayant par ailleurs déjà été définies). Si des études antérieures ont eu pour objet d'élaborer différents scénarios et de retracer les itinéraires potentiellement suivis par le *Ravenel* après sa dernière communication, le modèle de dérive en mer MOTHY développé et utilisé à Météo France est quant à lui à même de calculer des rétrotrajectoires, c'est-à-dire de tracer à rebours les possibles trajectoires suivies par les divers débris rejetés sur la côte. Mathilde Jomé et Alexandrine Grandemange, stagiaires à Météo France en 2020, ont procédé à une première série de simulations numériques faisant intervenir les courants dus aux vents [2]. Poursuivant ce travail, Mathilde Jomé a mis en relief quelques zones en lesquelles les probabilités de naufrage étaient plus élevées [1].

Dans la continuité de ce travail, nous avons reproduit le même type de simulations numériques, en faisant cette fois intervenir, outre les courants dus aux vents, ceux dus à la marée. En prenant en compte ces deux types de courants de haute fréquence, les simulations devraient tendre vers plus de réalisme et ainsi permettre de mieux définir les zones de prospection attendues. La présente étude s'attache dans un premier temps à poser le contexte historique de la disparition du *Ravenel* ainsi que les caractéristiques géographiques et dynamiques de l'environnement de Saint-Pierre-et-Miquelon puis à aborder le phénomène de marée, en particulier dans cet environnement. La méthode adoptée pour effectuer l'étude est exposée dans un deuxième temps ; le modèle de dérive en mer MOTHY est présenté, les informations et jeux de données mis à contribution sont détaillés, l'introduction des marées dans le modèle est évaluée et validée. Enfin, dans un troisième temps, les expériences numériques réalisées et les résultats obtenus sont développés et des propositions de zones de recherche sont avancées.

1 Contexte

Dans cette section nous donnons le contexte global de l'étude en rappelant la chronologie connue avant la disparition du *Ravenel*, puis nous donnons des éléments liés à la bathymétrie, à la circulation océanique et aux conditions météorologiques rencontrées par le chalutier au moment du naufrage. Enfin nous expliquons le phénomène des marées afin que le lecteur comprenne l'amélioration principale apportée dans ce rapport comparé au précédent rapport [1].

1.1 Disparition du *Ravenel*

Nous avons eu accès à la somme conséquente d'archives collectée par les associations Les Disparus du *Ravenel* (président : Sibyl Olano) et Recherches du *Ravenel* 2019/2020 (président : André Autin). Une chronologie succincte des faits entourant la disparition du *Ravenel* et des recherches qui s'en sont suivies est présentée ci-après, fondée sur l'un des plus fiables de ces documents d'archives, le rapport d'enquête de l'Inscription maritime de Saint-Pierre-et-Miquelon daté du 7 mai 1962 [7], et étayée par le travail de synthèse réalisé par Cécile Sauvage pour le DRASSM¹ [5]. Les hypothèses les plus plausibles quant aux circonstances et au moment du naufrage sont ensuite évoquées.

1.1.1 Brève chronologie

Le chalutier *Ravenel* est parti de Saint-Pierre, le 27 janvier 1962, pour une semaine de pêche au sud-ouest du Grand Banc de Terre-Neuve et n'a jamais regagné son port d'attache. Le *Ravenel* a échangé avec un autre chalutier le 27 janvier, vers 9 h². Cet appel permet d'estimer la position du *Ravenel*, ce matin-là, aux alentours de 44° 50 N, 54° 00 O³. C'est la dernière information dont nous disposons au sujet de la localisation du chalutier. Il ne s'agit toutefois pas de la dernière communication de ce dernier : un contact a eu lieu entre le *Ravenel* et son armateur, la SPEC (Société de pêche et de congélation de Saint-Pierre-et-Miquelon), le 27 janvier à 14 h. La pêche n'ayant pas été aussi fructueuse qu'escompté, Adrien Fily, le patron du *Ravenel*, a alors sollicité - et obtenu - que son retour à Saint-Pierre soit repoussé au 29 janvier afin de lui permettre de passer par le Banc de Saint-Pierre dans l'espoir de prises supplémentaires.

L'itinéraire effectivement suivi et les avaries subies par le chalutier par la suite demeurent à ce jour inconnus. Le 28 janvier vers 9 h 30, le *Ravenel* a tenté sans succès d'entrer en contact avec le *Galantry*, un autre chalutier de la SPEC ; mais il ne semblait pas s'agir d'un appel de détresse. Le contact quotidien, à 14 h, entre la SPEC et ses bateaux de pêche n'a pas été établi avec le *Ravenel*, ce qui ne constituait toutefois pas une anomalie significative, cette consigne n'étant pas toujours scrupuleusement suivie. En début de soirée, la SPEC et le *Galantry* ont encore échoué à établir une communication avec le *Ravenel*. L'inquiétude n'était cependant pas encore de mise.

Le lendemain seulement, le 29 janvier dans l'après-midi, les recherches ont débuté par une veille aérienne de circonstance. Des ressources supplémentaires (aériennes et maritimes) ont été mobilisées à partir du matin du 30 janvier et les recherches se sont alors multipliées en mer et sur la côte, jusqu'au 3 février. Divers débris sont arrivés sur la côte de Terre-Neuve entre le 30 janvier et le 1^{er} février, essaimés du sud-ouest au nord-ouest de la péninsule de Burin au fil de ces 3 jours. Pas un des corps des 15 membres de l'équipage n'a été trouvé. L'épave du *Ravenel* reste, quant à elle, encore à découvrir.

1. Le DRASSM (Département de recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) dépend du ministère de la Culture. Il « inventorie, étudie, protège, conserve et met en valeur le patrimoine archéologique immergé de l'ensemble des eaux marines sous juridiction française » ; entre autres missions, il assure celle « de conseil et de contrôle scientifique et technique sur les chantiers archéologiques sous-marins » selon le site du ministère de la Culture (voir <https://www.culture.gouv.fr/Sites-thematiques/Archeologie/Archeologie-sous-les-eaux>).

2. Les heures indiquées dans cette chronologie sont des heures locales. Les heures indiquées par la suite dans la présente étude sont, sauf mention contraire, des heures UTC. Il faut ajouter 3 h aux heures locales pour connaître les heures UTC correspondantes.

3. Ces coordonnées sont probablement indiquées en degrés et minutes dans le rapport d'enquête [7].

1.1.2 Hypothèses sur le naufrage

Deux hypothèses principales sur les circonstances du naufrage du *Ravenel* sont privilégiées. Le rapport d'enquête [7] plaide en faveur d'une erreur de trajectoire, dont la conséquence aurait été une « immersion consécutive à un échouage survenu sur l'un des hauts-fonds du sud-est de Saint-Pierre, de l'île Verte ou de la côte sud-ouest de la péninsule de Burin, éventuellement par chavirement en haute mer dans une zone relativement proche de ce même secteur ». La compacité des groupes de débris échoués les premiers au sud-ouest de la péninsule de Burin et la dispersion plus importante des groupes échoués plus tardivement abondent dans le sens d'un tel chavirement à proximité relative de cette côte. Les événements qui ont conduit à la perte du *Ravenel* ont pu survenir à partir du dernier appel du chalutier au matin du 28 janvier. Le silence observé par la suite ne signifie toutefois pas nécessairement que le *Ravenel* a disparu aussitôt après, les instruments de liaison ayant pu être endommagés par le givrage. La date de naufrage retenue dans ce document est d'ailleurs plus tardive : il s'agit du 28 janvier au soir. Le 30 janvier semble pouvoir être écarté puisque les recherches approfondies menées ce jour-là n'ont décelé aucun indice de présence.

Un autre scénario est détaillé dans la synthèse du DRASSM [5]. Ayant essuyé une grosse tempête les 27 et 28 janvier (voir les conditions météorologiques page 1.2.3, avec une forte baisse de température au cours de la nuit, le *Ravenel* a pu se couvrir de glace. Pas assez stable (en raison par exemple de cales trop peu remplies), il a alors pu être déséquilibré, peut-être par des vagues dans un contexte de grosse mer, puis chavirer. Si le naufrage est directement lié aux conditions de mer et de météorologie, il s'est plus vraisemblablement produit le 28 janvier, comme le souligne le rapport d'enquête [7], le temps s'étant amélioré par la suite.

Une étude sur l'intervalle de temps pendant lequel le naufrage a le plus vraisemblablement pu se produire a été menée dans le rapport [1] et indique une « probabilité importante d'échouement entre le 28 janvier à 14 h et le 29 janvier à 2 h ».

1.2 Autour de Saint-Pierre-et-Miquelon

1.2.1 Bathymétrie

L'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon se situe au nord-ouest du Grand Banc de Terre-Neuve et au nord du Banc de Saint-Pierre, comme le montre la figure 3. Le Banc de Saint-Pierre est bordé à l'ouest par le chenal Laurentien, qui est caractérisé par une profondeur de 450 m environ. Au voisinage de l'archipel, la profondeur des fonds est faible et reste inférieure à 100 m de profondeur. Néanmoins, il existe une grande variabilité ; quand on s'éloigne des côtes, la profondeur des fonds augmente. Entre l'archipel et la péninsule de Burin : ils ne dépassent pas les 200 m de profondeur. Une zone de hauts-fonds se distingue au sud-est de Saint-Pierre.

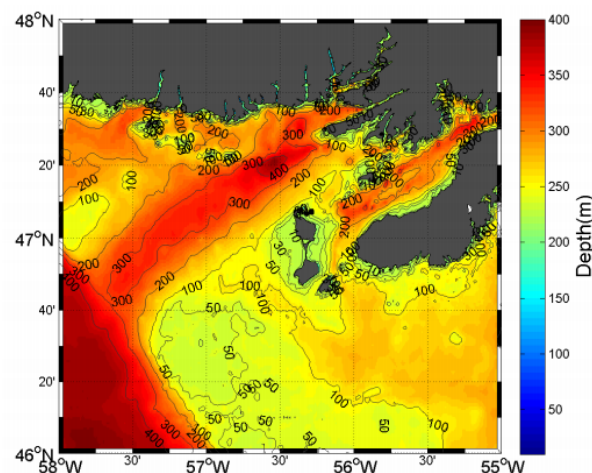


FIGURE 2 – Bathymétrie autour de l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon (étude de l'Ifremer [3]).

	Vents	Température air	Température mer
Matinée	nord-ouest à sud-ouest, 10 à 20 noeuds	- 6 à 0 °C	3 °C
Après-midi	sud à ouest, 30 à 40 noeuds	0 °C	4 à 5 °C
Soirée	ouest, 40 à 50 noeuds	- 8 à 0 °C	5 à 6 °C

Tableau 1 – Conditions météorologiques du samedi 27 janvier 1962.

	Vents	Température air	Température mer
Matinée	nord-ouest, 30 à 40 noeuds	- 12 à - 11 °C	6 °C
Après-midi	ouest, 30 à 40 noeuds	- 11 °C	6 °C
Soirée	ouest, 30 noeuds	- 10 °C	5 à 6 °C

Tableau 2 – Conditions météorologiques du dimanche 28 janvier 1962.

1.2.3 Conditions météorologiques lors du naufrage

Il est fréquent que Saint-Pierre-et-Miquelon soit touché par des perturbations et par des vents violents. De la lecture des documents d'archives précédemment mentionnés page 6, nous avons pu relever les éléments ci-après.

Le samedi 27 janvier 1962, l'état de la mer est équivalent à 8 sur l'échelle de Beaufort (mer très forte). Une dépression est centrée sur la baie d'Hudson et se dirige rapidement vers l'est, amenant des averses de neige et de pluie. En fin de soirée, le navire se retrouve dans la zone d'air froid postérieur de la tempête, avec des rafales de 60 noeuds et une forte chute des températures à 21 h. Les conditions sont résumées dans le tableau 1.

Le dimanche 28 janvier 1962, la dépression se déplace dans le sud-ouest du Groenland. Les averses de neige sont toujours présentes et la visibilité se détériore le soir. Les températures de l'air négatives sont des conditions favorables à la formation de givre à bord du chalutier. La mer est forte, avec des creux de 4 à 6 m. Les conditions sont résumées dans le tableau 2.

1.3 Le phénomène de marée

1.3.1 Une origine astronomique

Le phénomène de marée correspond à une déformation périodique des couches superficielles d'un astre en rotation sous l'effet d'une force dite de marée. On observe sur Terre des marées atmosphériques, terrestres et océaniques mais seules les marées océaniques sont significatives. Dans le vocabulaire courant, le terme « marée » renvoie donc par extension aux marées océaniques. La force de marée à l'origine des marées océaniques est la somme de deux forces : la force d'attraction gravitationnelle de l'astre (La Lune ou le Soleil dans le cas de la Terre) et la pseudo-force inertielle d'entraînement (force centrifuge) issue de la rotation de la Terre et de l'astre autour de leur centre de masse. Néanmoins, les composantes lunaires sont prépondérantes devant les composantes solaires. La force d'attraction lunaire est en effet environ deux fois plus forte que celle exercée par le Soleil. Les autres corps du système solaire ont eux aussi une influence sur les océans terrestres. Cette influence est cependant négligeable du fait de leur distance.

Les marées sont également influencées par la phase de la Lune. Lorsque la Lune est alignée avec la Terre et le Soleil c'est-à-dire lorsque la Lune est en syzygie (pleine lune et nouvelle lune), les forces d'attractions exercées par la Lune et le Soleil sont dans la même direction. La force de marée résultante est donc renforcée. Ce sont les marées de vives-eaux. Lorsque la Lune est en quadrature (premier et dernier quartier), les forces d'attraction de la Lune et du Soleil sont perpendiculaires. La force de marée résultante est donc atténuée. Ce sont les marées de mortes-eaux.

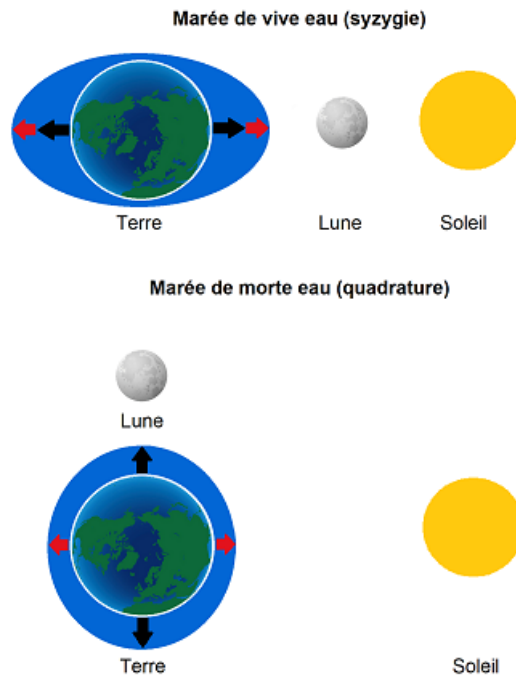


FIGURE 5 – Schéma illustrant le phénomène de marée.

1.3.2 Analyse harmonique du phénomène de marée

En 1775, Laplace met au point une nouvelle méthode de prédiction des marées. Ce phénomène n'est plus considéré comme une simple déformation des océans comme dans la théorie statique de Newton, mais comme une superposition de plusieurs ondes individuelles. Ce modèle ondulatoire est affiné par Darwin en 1883 et par Dobson en 1921 avec le développement de la formule harmonique utilisée entre autre pour le calcul des coefficients de marée. La marée est alors considérée comme une somme d'ondes sinusoïdales périodiques appelées ondes harmoniques.

Il existe au total 34 ondes de marées. Elles peuvent être regroupées en quatre catégories :

- ondes semi-diurnes (période d'environ 12 h), par exemple : S2 (onde solaire semi-diurne),
- ondes diurnes (période d'environ 24 h), par exemple : S1 (onde solaire diurne),
- ondes longue période, par exemple : Mm (onde lunaire mensuelle), Sa (onde solaire annuelle),
- ondes courte période.

Chaque onde est caractérisée par une période propre, par une amplitude et par une phase. L'amplitude et la phase d'une onde dépendent de la date et du lieu d'observation. La différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer consécutive est connue sous le nom de marnage. Il intègre l'amplitude de toutes les ondes de marées.

1.3.3 La propagation des ondes de marée

La théorie ondulatoire permet de considérer la marée comme une somme d'ondes harmoniques se propageant à la surface des océans (voir tableau 3). Relativement simple dans le cas d'une planète entièrement recouverte d'océans, cette propagation devient beaucoup plus complexe en prenant en compte les masses continentales et la bathymétrie. Les continents constituent en effet de véritables barrières qui empêchent les ondes de marée de tourner autour de la Terre. Elles sont de même ralenties par les hauts-fonds. Les ondes de marée se propagent donc plus rapidement au milieu des océans qu'à proximité des côtes. La force de Coriolis impacte également la propagation des ondes de marée. Elle sont déviées vers la gauche dans l'hémisphère nord et vers la droite dans l'hémisphère sud.

Les ondes de marée sont donc en réalité piégées (ondes stationnaires) dans les grands bassins

Symbole	Nom	Période (h)
Semi-diurnes		
M2	Principale lunaire semi-diurne	12,42
S2	Principale solaire semi-diurne	12,00
N2	Majeure lunaire elliptique semi-diurne	12,66
K2	Déclinaison lunisolaire semi-diurne	11,97
2N2	Lunaire elliptique semi-diurne d'ordre 2	12,91
L2	Mineure lunaire elliptique semi-diurne	12,19
$\mu 2$	Variationnelle	12,87
$\nu 2$	Majeure lunaire évectionnelle	12,63
T2	Majeure solaire elliptique	12,02
Diurnes		
K1	Déclinaison lunisolaire diurne	23,93
O1	Principale lunaire diurne	25,82
P1	Principale solaire diurne	24,07
Q1	Majeure lunaire elliptique diurne	26,87
Longues périodes		
Mf	Lunisolaire bimensuelle	13,66
Mm	Lunaire mensuelle	27,55
Ssa	Solaire semestrielle	182,63
Courtes périodes		
M4	Majeure lunaire <i>shallow water</i> haute fréquence	6,21

Tableau 3 – Principales ondes de marée.

océaniques du globe où elles ont tendance à tourner dans le sens anti-horaire dans l'hémisphère nord (inversement dans l'hémisphère sud) autour de points particuliers où l'amplitude de la marée est nulle : les points amphidromiques. Près des côtes, la forme de la marée (diurne, semi-diurne) et son amplitude dépendent de la bathymétrie et du relief local. Les ondes de marées peuvent en effet être amplifiées par résonance dans les baies fermées peu profondes. Le marnage atteint ainsi des valeurs très importantes dans certaines régions du globe comme la baie du mont Saint-Michel.

Ces cartes obtenues à partir des données FES2014 (voir 2.3.3) permettent de mieux comprendre le comportement de la marée dans l'Atlantique nord. Sur la première carte (carte de phases), nous pouvons identifier deux points amphidromiques situés respectivement dans l'Atlantique nord et dans le golfe du Saint-Laurent. L'onde de marée M2 tourne autour de ces points dans le sens anti-horaire. La seconde carte (carte d'amplitudes) révèle la présence d'amplitudes plus importantes près des côtes (zones peu profondes).

1.3.4 La marée à Saint-Pierre-et-Miquelon

À Saint-Pierre et Miquelon, la marée est semi-diurne c'est-à-dire qu'il y a deux marées basses et deux marées hautes chaque jour. Le marnage maximal estimé par le SHOM est de 2,10 m pour un marnage moyen d'1,26 m. La principale composante de la marée est l'onde M2. Pour rappel, c'est une onde semi-diurne de période 12,42 h associée à l'attraction lunaire. Son amplitude atteint 60 cm.

Des composantes diurnes sont aussi présentes, mais avec des amplitudes plus faibles. La somme des amplitudes des ondes diurnes ne dépasse pas 14,9 cm à Saint-Pierre-et-Miquelon.

Les marées sont à l'origine d'une circulation océanique assez complexe autour de l'archipel. Le rapport d'étude [6] réalisé en 2006 par l'ARDA (Association de recherche et de développement pour l'aquaculture) révèle que les courants de marée s'inversent toutes les 6 h. Cette inversion ne se produit pas lors de la pleine mer et de la basse mer mais en moyenne 3 h 30 plus tard au large. Lors de la phase

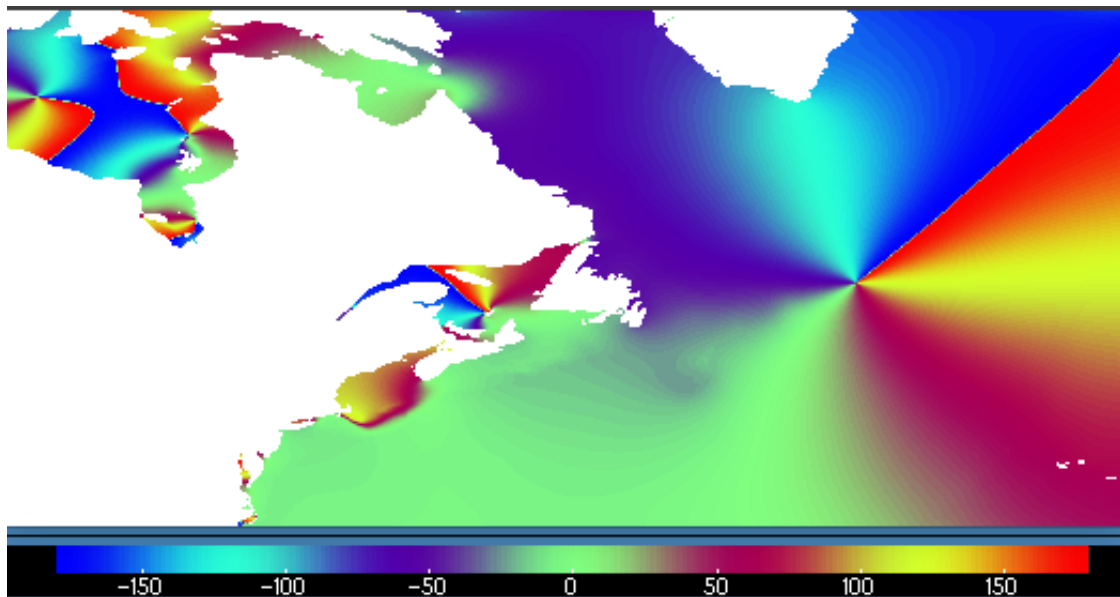


FIGURE 6 – Carte de la phase de l'onde M2
autour de Saint-Pierre-et-Miquelon (en °) (FES2014).

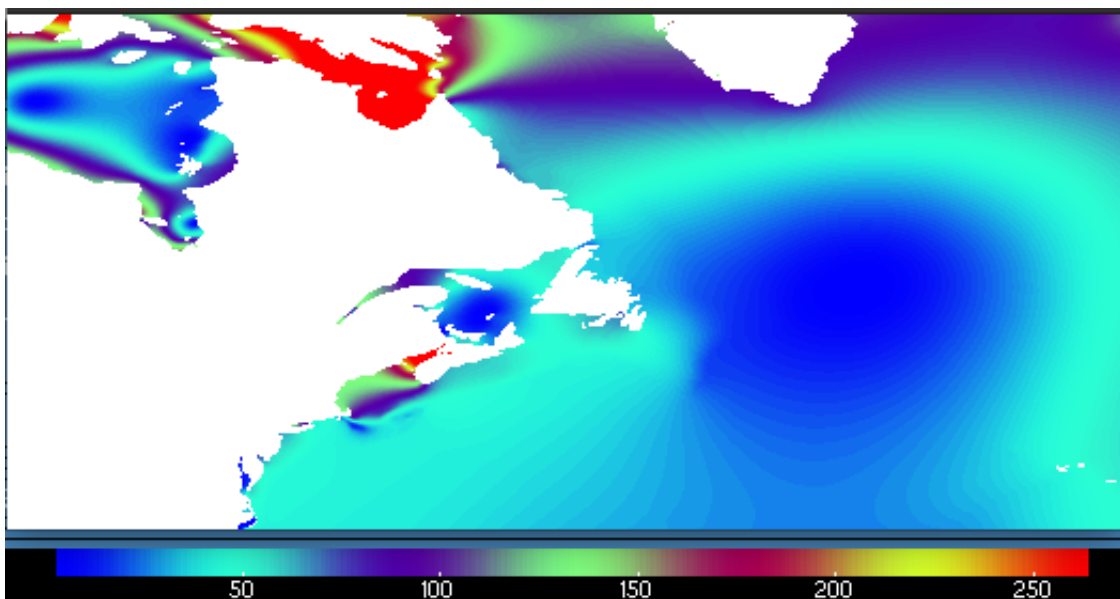


FIGURE 7 – Carte de l'amplitude de l'onde M2
autour de Saint-Pierre-et-Miquelon (en mm) (FES2014).

montante, les courants de marée (le flot) sont orientés vers le nord, nord-ouest. En phase descendante, les courants de marée (le jusant) sont orientés dans le sens contraire vers le sud, sud-est. Plus près des côtes, les frottements sont plus forts (présence de hauts-fonds). L'inertie de l'océan est plus faible. La bascule se réalise donc seulement 2 h après la pleine mer et la basse mer.

Ces courants sont amplifiés localement par l'abondance de caps, de hauts-fonds et de baies étroites. Ils peuvent atteindre des vitesses remarquables dans l'archipel notamment dans la zone située entre l'île de Saint-Pierre et la péninsule de Burin où des courants proches des 2 noeuds ne sont pas rares. Des zones de courants forts ont également été repérées près de la Pointe aux Soldats, près du cap du Nid à l'Aigle et au sud-ouest de Langlade.

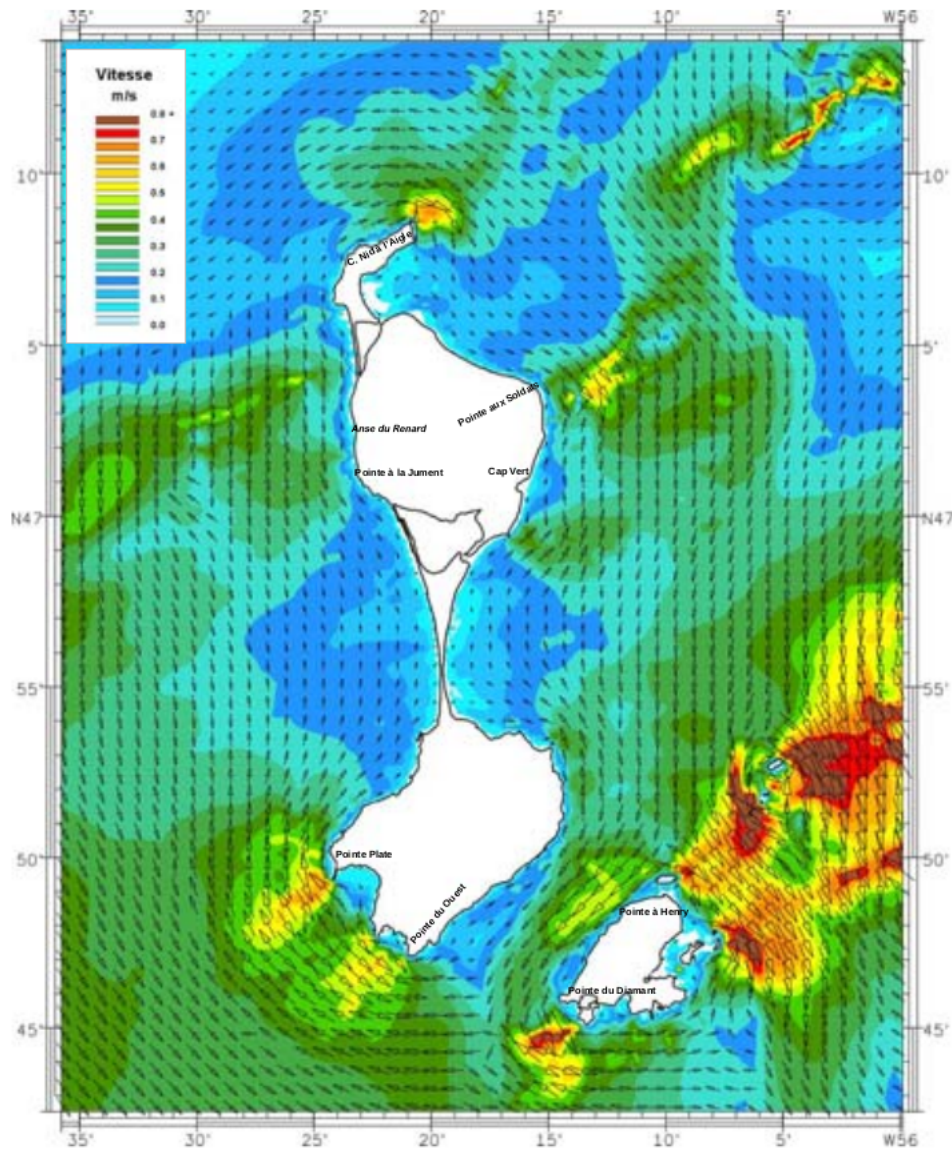


FIGURE 8 – Vitesse maximale des courants instantanés de marée (figure du rapport d'étude de l'ARDA [6] reproduite dans l'étude de l'Ifremer [3]).

2 Méthode

La méthode d'évaluation des lieu et date du naufrage du *Ravenel* utilisée dans la présente étude repose sur la reconstruction des trajectoires potentiellement suivies par différents débris du chalutier à partir de leurs lieu et date d'échouement sur les côtes de Terre-Neuve. Les informations concernant la découverte de débris qui s'en est suivie sont issues des documents d'archives collectés par les associations saint-pierraises évoquées dans la sous-partie 1.1. La présente étude poursuit les études [2] et [1] menées par Mathilde Jomé et Alexandrine Grandemange.

Le modèle de dérive en mer MOTHY utilisé à Météo France permet de calculer des trajectoires à rebours - ou *rétrotrajectoires* - à partir de données sur le vent et sur les courants marins (de surface) et de restituer les incertitudes associées à la dérive d'objets flottants classés par types (hommes à la mer, embarcations, ...) - ou, plus exactement, les incertitudes associées aux coefficients de dérive qui interviennent dans les calculs de trajectoire opérés par le modèle et qui sont attribués, de façon empirique, aux objets flottants selon leur type. Ces incertitudes sont non seulement liées aux caractéristiques physiques des objets considérés mais aussi à leurs changements d'amure (ou changements de position par rapport au vent), essentiellement provoqués par les vagues. En effet, selon son orientation initiale (qui est inconnue), un objet dérive à la gauche ou à la droite du vent ; au cours de la dérive, il peut garder la même amure ou, plus vraisemblablement, en changer (une ou plusieurs fois). Notons que les différents objets trouvés après la disparition du *Ravenel* entrent tous dans la même catégorie d'objets flottants - *débris* - et sont tous, par conséquent, traités de la même façon.

La force du vent est réputée prépondérante par rapport à l'action des vagues sur la dérive des objets de type *débris*, qui sont de taille modeste. Une analyse préliminaire de l'intensité des courants induits par la circulation océanique générale (d'après des données du *Copernicus Marine Service*) avait conduit à considérer que ceux-ci, dans la zone maritime entourant l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon, pouvaient être négligés aux échelles temporelle et spatiale considérées pour la recherche du *Ravenel*. La nouveauté développée dans la présente étude réside dans l'évaluation de la contribution des courants de marée dans la modélisation de la dérive d'objets flottants au large de Terre-Neuve. Enfin, aux forçages du modèle MOTHY par le vent et par les courants de marée, il convient d'ajouter le forçage induit par le relief sous-marin.

2.1 Débris du *Ravenel*

Mathilde Jomé et Alexandrine Grandemange ont dépouillé les documents d'archives compilés par les associations saint-pierraises, relevé toutes les mentions d'épaves et évalué la pertinence des débris à retenir pour leur étude, en fonction de la plausibilité de leur appartenance au *Ravenel* et de la précision avec laquelle leur localisation et leur date de découverte ont été consignées. La présente étude s'appuie sur ce choix et s'attache aux débris étudiés dans les rapports [2] et [1]. Ces débris sont recensés dans le tableau 4. Notons que, sauf mention contraire, les coordonnées sont indiquées en degrés, minutes et centièmes de minutes.

Dans la mesure où tous les objets trouvés à la côte sont considérés comme appartenant au même type *débris* par le modèle MOTHY, une collection de tels objets (bouée-couronne et brassière de sauvetage marquées au nom du *Ravenel*, portes de passerelle, panneau de cale, botte, soulier) trouvés au sud de la péninsule de Burin, entre Point Crewe et Lamaline, est traitée comme un seul objet. Cet objet est décliné en deux exemplaires (objets 1 et 2) afin de prendre en compte l'éparpillement des débris sur la côte, les points extrêmes de cet éparpillement (Point Crewe et Lamaline) étant retenus comme localisation de chacun de ces deux exemplaires. Si l'appartenance de ces débris au *Ravenel* semble avérée, en revanche l'imprécision relative à leurs lieu et date d'échouement nous porte à accorder aux objets 1 et 2 une confiance moyenne. Ils sont mentionnés dans le rapport d'enquête de l'Inscription maritime de Saint-Pierre-et-Miquelon [7].

Une ceinture de sauvetage marquée au nom du *Ravenel* et un ensemble de débris (botte, ceinture de sauvetage, morceau d'étagère), trouvés à l'ouest de la péninsule de Burin, constituent respectivement les objets 4 et 6. Ils sont mentionnés dans une note de deux pages, sans titre, qui provient probablement

Objet	Position géographique	Date de découverte	Confiance	Source
Objet 1	vers Point Crewe (46° 56,88' N, 55° 59,28' O)	31/01/1962, 7 h 45	**	rapport d'enquête [7]
Objet 2	vers Lamaline (46° 51,55' N, 55° 48,72' O)			
Objet 4	vers Cousin Head (46° 55,20' N, 55° 58,80' O)	31/01/1962, 7 h 45	***	note de deux pages
Objet 6	vers Lories (46° 53,60' N, 55° 56,24' O)	31/01/1962, 7 h 45	***	note de deux pages
Objet 10	vers Fortune (47° 05,34' N, 55° 49,26' O)	01/02/1962, 8 h 46	*	note Marine marchande
Objet 11	vers Grand Bank (47° 06,18' N, 55° 47,28' O)			

Tableau 4 – Caractéristiques des débris retenus pour la présente étude.

de l'Inscription maritime de Saint-Pierre-et-Miquelon selon le document de synthèse du DRASSM [5]. Cette note recense un certain nombre de débris (dont l'appartenance au *Ravenel* n'est pas nécessairement avérée) ainsi que les coordonnées auxquels ils ont été trouvés ou repérés. Ce sont probablement les objets pour lesquels les informations sont les plus fiables.

Une collection de débris (porte intérieure, débris de panneaux de cale, bois de passerelle, étagère de carré) trouvés au nord de la péninsule de Burin, entre Fortune et Grand Bank, est traitée comme un seul objet, comme la collection trouvée au sud. Et de la même manière que précédemment, cet objet est décliné en deux exemplaires (objets 10 et 11), chacun localisés aux points extrêmes de l'éparpillement. L'appartenance de ces débris au *Ravenel* ainsi que leur localisation semblent plus incertaine, ce qui entraîne un degré de confiance quelque peu inférieur. Il leur est fait référence dans une note de l'Administration générale et Gens de mer de la Marine marchande, datée du 16 mars 1962 et jointe au rapport d'enquête [7].

Les objets 1, 2, 4 et 6 ont été trouvés le 31 janvier 1962 au matin tandis que les objets 10 et 11 ont été découverts le 1^{er} février 1962 au matin. Il n'est pas possible de dater précisément l'échouement de ces divers débris, pas plus qu'il n'est possible de déterminer s'il s'agit d'un premier échouement ou si les débris ont d'abord été déposés en un endroit puis redéposés plus loin par la suite. Nous en sommes réduits à formuler l'hypothèse que les débris sont arrivés à la côte avec la pleine mer du matin pour les deux jours considérés (c'est cette heure qui est reportée dans le tableau 4).

Du fait des incertitudes liées à l'ancienneté des faits, à l'imprécision des données et à la fiabilité variable des sources consultées, un certain nombre d'hypothèses (quant aux lieux et dates d'échouement des débris) ont de la sorte été adoptées afin de restituer aussi fidèlement que possible les éléments portés à notre connaissance - sans pouvoir toutefois prétendre à une précision exemplaire. Le modèle MOTHY ne pouvant calculer la dérive d'un objet à terre, il a de surcroît été nécessaire de positionner en mer les débris qui sont au cœur de la présente étude.

La figure 9 permet de repérer ces débris. Les mentions de localité (numérotées) et les étoiles vertes ne désignent pas exactement lesdites localités mais la position (à proximité de ces dernières) choisie pour les débris numérotés du tableau 4. Les principaux lieux cités dans la présente étude sont également portés sur la carte, en particulier le port de Saint-Pierre.

2.2 Modèle de dérive en mer MOTHY

Le modèle d'océan MOTHY (Modèle océanique de transport d'hydrocarbures)⁴, développé par Pierre Daniel avec un grand nombre de contributeurs et utilisé au CNP (Centre national de prévision)

4. Voir <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/index-fr.html>.



FIGURE 9 – Localisation des objets du tableau 4.

de Météo France, permet, dans le cadre de la lutte contre les pollutions marines, de représenter la dérive en surface de nappes de polluants et de conteneurs ainsi que, en appui aux missions de recherche et de sauvetage, d'un certain nombre d'objets flottants (version MOTHY *leeway*)⁵. Il existe plusieurs dizaines d'objets flottants que MOTHY est capable de traiter de façon propre (tels que des hommes à la mer, différents types d'embarcation, ...) mais, ainsi que cela a été indiqué plus haut, les débris trouvés après la disparition du *Ravenel* appartiennent tous au même type d'objets - *débris* - et sont donc traités de la même façon.

Il est possible de réaliser deux types de simulations. Dans le *sens direct*, les possibles trajectoires d'un objet flottant sont modélisées à partir des lieu et date d'un événement (accident, déversement, etc.) afin de déterminer les zones qui peuvent être impactées. À *rebours*, les rétrotrajectoires potentielles sont calculées à partir des lieu et date d'échouement d'un objet afin d'évaluer les lieu et date de l'événement à l'origine de la dérive de cet objet.

L'incertitude sur l'orientation initiale de l'objet par rapport au vent est prise en compte grâce au tracé de deux trajectoires dites *déterministes*, selon que l'objet dérive à la gauche ou à la droite du vent. Ces deux trajectoires représentent le déplacement idéal d'un objet qui ne changerait pas d'amure ; en outre, ce déplacement est en accord avec le coefficient de dérive attribué au type de l'objet. Elles sont représentées en gris (un point noir indiquant chacune des positions déterministes de l'objet à un instant donné) dans l'exemple de la figure 11.

Pour prendre en compte l'incertitude entourant le coefficient de dérive qui permettrait de représenter de la façon la plus réaliste possible le déplacement de l'objet considéré (que nous appelons systématiquement *débris* dans ce qui suit afin d'éviter toute ambiguïté) et l'incertitude qui découle des changements d'amure de ce dernier, le coefficient de dérive (par rapport au vent à 10 m) de 8 670 objets similaires est distribué suivant une loi normale et 4 % de ces objets changent d'amure par heure. Le calcul de la dérive de ces 8 670 objets permet d'associer une probabilité de présence du débris au cours du temps autour des deux trajectoires déterministes⁶. Dans l'exemple de la figure 11, obtenu avec la version à *rebours* du modèle MOTHY *leeway*, cette probabilité de présence est de 50 % dans la somme des zones rouges, de 68 % dans la somme des zones rouges et orange, de 95 % dans la somme des zones rouges, orange et jaunes, de 99 % dans la somme des zones rouges, orange, jaunes et blanches. L'étoile verte figure le lieu d'échouement du débris. Les coordonnées et date de cet échouement sont indiquées en haut à droite tandis que la date donnée en titre au-dessus de la figure est celle pour laquelle la

5. Voir <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/doc/index.html>.

6. Voir <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/sar/doc-mothy/leeway.html>.

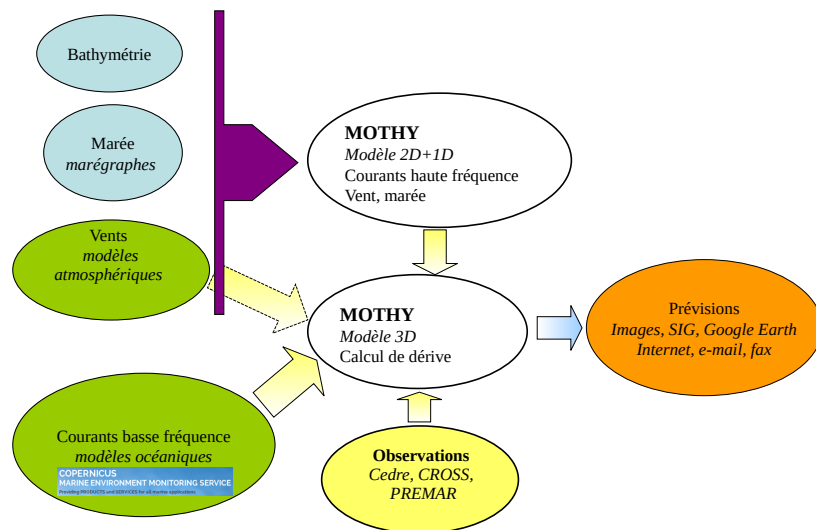


FIGURE 10 – Le système MOTHY © Pierre Daniel.

probabilité de présence est calculée. Notons qu'il est possible de réaliser un autre type de cartes de probabilité de présence avec MOTHY. Ce point est détaillé dans la sous-partie 3.3.

MOTHY/ERA-20C REBOURS : Prévion pour le 30/01/1962 à 07 UTC

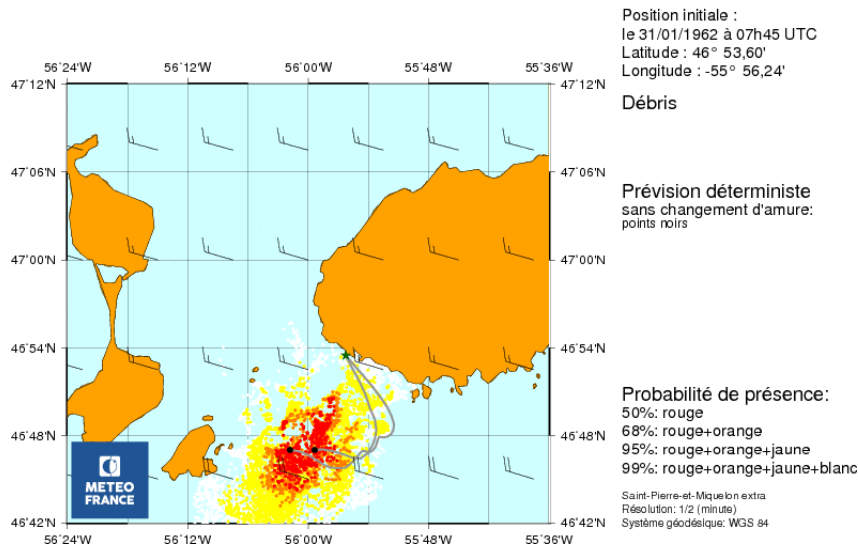


FIGURE 11 – Exemple de probabilité de présence le 30/01/1962 à 7 h UTC pour un débris échoué le 31/01/1962 à 7 h 45 UTC en un point de latitude 46° 53,60' N et de longitude 55° 56,24' O.

2.3 Conditions aux limites et forçages

Les jeux de données utilisés pour forcer le modèle MOTHY au niveau de Saint-Pierre-et-Miquelon au début de l'année 1962 touchent au relief sous-marin, au vent et à la marée océanique (l'influence d'autres éléments sur la dérive des débris du *Ravenel* pouvant être négligée, comme cela a été énoncé précédemment).

2.3.1 Données de bathymétrie

Nous avons utilisé les données bathymétriques de la grille GEBCO_2014, un modèle numérique de terrain dont la résolution spatiale est de 30 secondes d'arc ($1/120^\circ$)⁷. Les mailles de cette grille, qui couvre tout le globe, ont des côtés mesurant 930 m (en latitude) $\times$ 640 m (en longitude) dans la zone que nous avons étudiée. Cette zone, que nous nommons *domaine Saint-Pierre-et-Miquelon* dans la suite de la présente étude, s'étend entre $45,3125^\circ$ et $47,8125^\circ$ de latitude nord et entre $57,4375^\circ$ et $54,4375^\circ$ de longitude ouest (ces coordonnées sont exceptionnellement indiquées ici en format décimal). Elle couvre 109 989 points de la grille GEBCO_2014 : 363 points dans le sens longitudinal et 303 points dans le sens latitudinal. Notons que la résolution du modèle MOTHY s'adapte à la grille du modèle de bathymétrie utilisé.

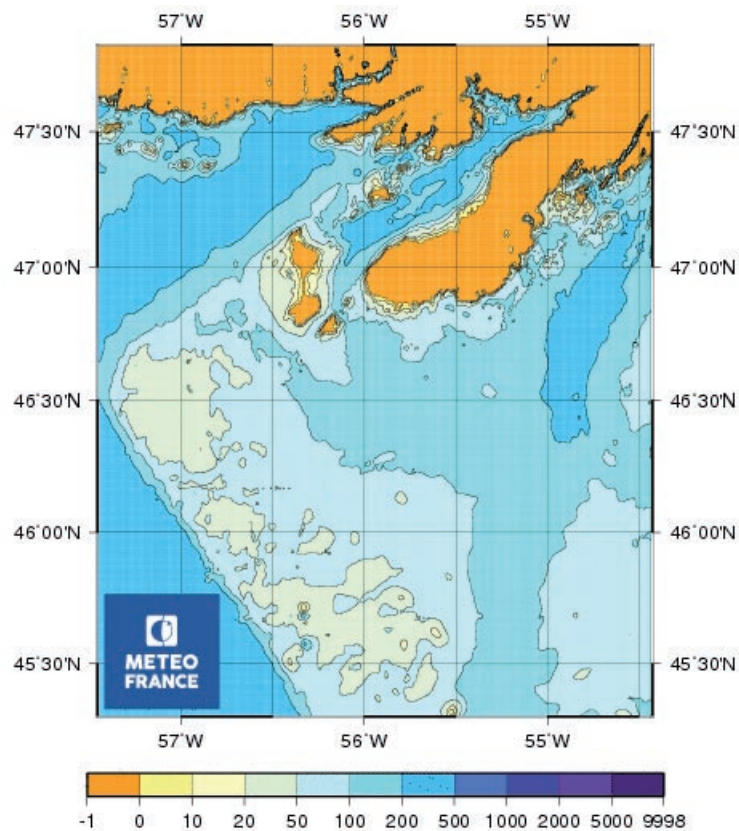


FIGURE 12 – Bathymétrie du domaine Saint-Pierre-et-Miquelon selon la grille GEBCO_2014 à 30 secondes d'arc.

En raison d'une résolution insuffisante de la grille GEBCO_2014 pour représenter assez finement le tracé des certaines parties des contours côtiers, nous avons dû apporter quelques corrections à la représentation de l'isthme de Miquelon-Langlade, de la lagune du Grand Barachois et de la partie nord-ouest de l'île de Saint-Pierre. L'augmentation du nombre de points de terre qui s'en est suivie a permis notamment d'éviter que l'isthme ne soit traversé par des courants. Le zoom sur l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon et la péninsule de Burin de la figure 13 permet de visualiser les modifications apportées au modèle de bathymétrie utilisé pour forcer MOTHY.

7. Sous l'égide de l'Organisation hydrographique internationale (OHI) et de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, la GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) compile des données bathymétriques issues de différentes organismes pour différents domaines et les met à disposition du public. Voir <https://www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/301801/>.

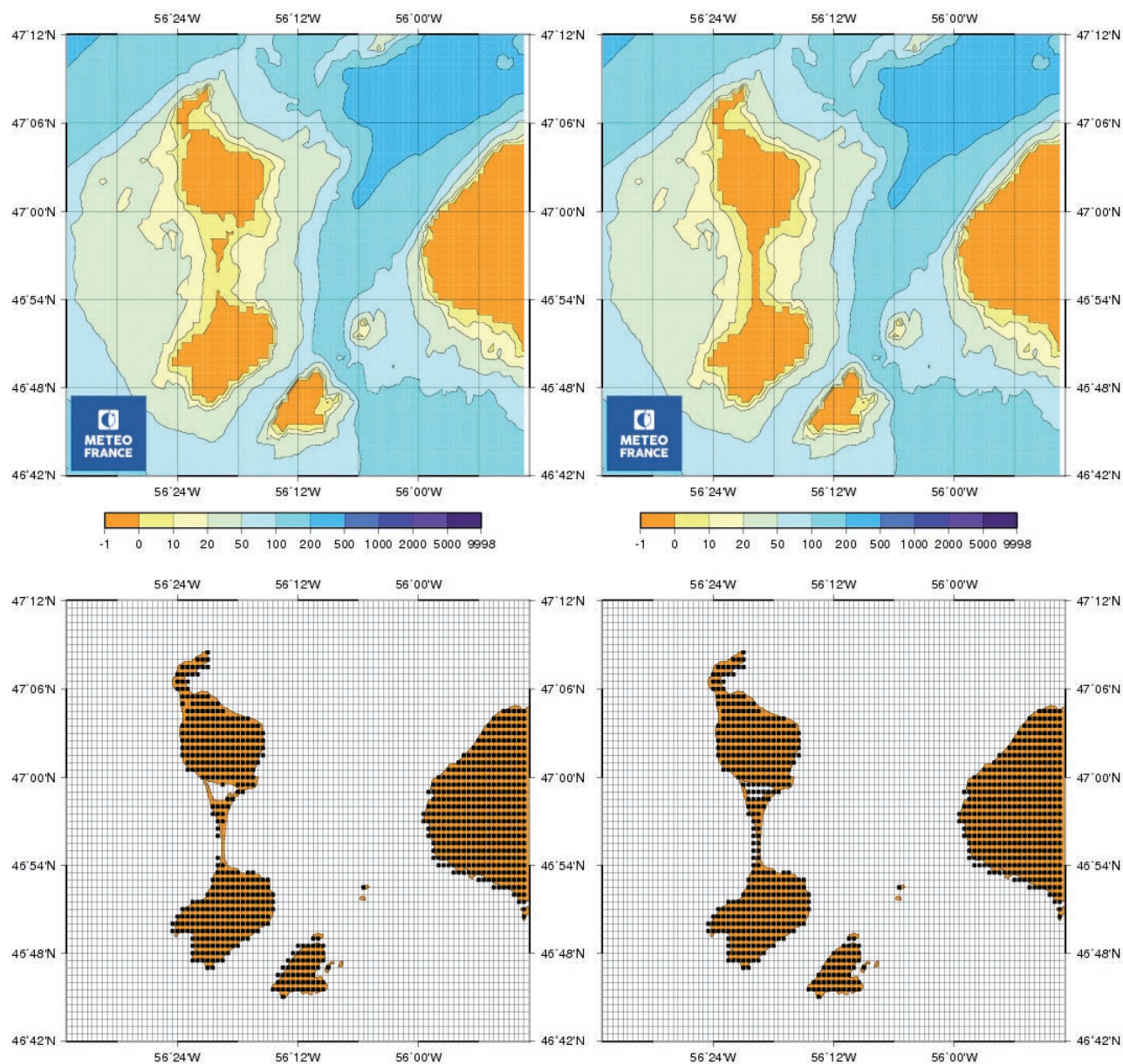


FIGURE 13 – Bathymétrie (en haut) et points de terre (en bas) au niveau de l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon et de la pointe de la péninsule de Burin selon la grille GEBCO_2014 à 30 secondes d'arc (cartes non corrigées à gauche, cartes corrigées à droite).

2.3.2 Données de vent

Les réanalyses atmosphériques ERA-20C⁸, réalisées grâce au modèle de prévision numérique IFS (*Integrated Forecasting System*), assimilent des données de surface selon la méthode 4D-VAR. Elles couvrent la période 1900-2010. Leur résolution temporelle est de 3 h et leur résolution horizontale d'environ 125 km.

Notons que l'intervalle de temps nécessaire à la stabilisation des courants engendrés par le vent dans le modèle MOTHY est estimé à 6 h.

2.3.3 Données de marée océanique

Le modèle hydrodynamique de marée FES2014⁹ repose sur « la résolution des équations barotropes de marée [...] dans une configuration spectrale¹⁰ » et est amélioré grâce à l'assimilation de données issues d'observations satellitaires et de marégraphes. Une présentation détaillée en est donnée dans l'article en ligne [4]. Il couvre l'ensemble du globe sur une grille au 1/16° et fournit l'amplitude et la phase en chaque point de grille pour 34 composantes de marée. Une version des données produites, dite extrapolée, permet de mieux couvrir les régions côtières (avec des contours de côte creusés). Les effets des marées étant accentués en région côtière, c'est cette version que nous utilisons.

Comme le module hydrodynamique de MOTHY est en charge du calcul des courants océaniques, le forçage du domaine Saint-Pierre-et-Miquelon s'opère aux limites de cette zone. En certains points, dits points de forçage, l'amplitude et la phase de chaque onde composant la marée océanique (à la date du 1^{er} janvier 1900) sont entrées dans le modèle. Le modèle MOTHY, capable de représenter 17 composantes de marée sur les 34 disponibles dans FES (M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1, Mf, Mm, Ssa, 2N2, L2, Mu2, Nu2, T2, M4) (voir tableau 3), calcule l'amplitude et la phase de chacune de ces composantes aux dates concernées par la simulation. Les élévations et courants de marée sont ensuite calculés dans tout le domaine. Un certain temps (empiriquement fixé à 4 jours) est nécessaire pour que le modèle tende vers un équilibre une fois que les ondes se sont propagées des limites vers le centre du domaine.

Les points choisis pour le forçage du domaine par les ondes de marée sont communs à la fois à la grille GEBCO_2014 (1/120°) (à laquelle s'adapte le modèle MOTHY) et à celle utilisée dans le modèle FES2014 (1/16°). Il y en a 25 dans le sens longitudinal et 21 dans le sens latitudinal, soit 88 en tout. (MOTHY ne fait pas de calculs pour les quelques uns de ces points qui sont situés sur terre au nord du domaine.)

2.4 Calage de la marée dans MOTHY

Comme expliqué dans la section précédente, l'introduction de la marée dans MOTHY s'effectue par un forçage sur les bords du domaine. Avant de lancer les rétrotrajectoires, MOTHY procède à une étape d'initialisation de la marée (sans vent) sur une durée de 96 h et il s'agit de vérifier qu'à l'issue de cette étape, le modèle est bien calé et que les ondes se sont bien propagées sur tout le domaine.

2.4.1 Hauteurs d'eau

Afin de vérifier que le modèle est calé, nous avons d'abord comparé les hauteurs d'eau obtenues lors de cette phase d'initialisation près du marégraphe de Saint-Pierre avec celles obtenues sur le site

8. Les réanalyses ERA-20C sont produites par le CEPMMT (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme). Voir <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-20c>.

9. Le modèle FES (*Finite Element Solution*) est le résultat d'un travail commun du LEGOS (Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales), de Noveltis et de CLS (Collecte localisation satellites), mené sous la responsabilité du CNES (Centre national d'études spatiales). Les données produites sont fournies par AVISO+ (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*).

10. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>.

du Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM)¹¹ sur la période du 27 janvier 1962 à 6 h UTC au 31 janvier 1962 à 6 h UTC (voir figure 14).

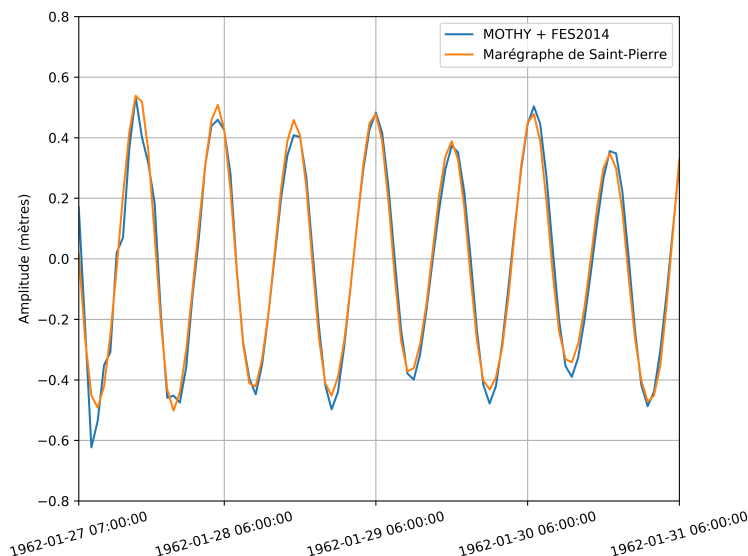


FIGURE 14 – Comparaison entre les hauteurs d’eau près du marégraphe de Saint-Pierre calculées par MOTHY et fournies par le SHOM.

Comme nous pouvons le constater, la période de 96 h semble amplement suffisante pour caler le modèle et les petites différences avec les données du SHOM (qui ne sont pas des observations mais qui sont aussi issues d’un modèle) sont tout à fait acceptables. Une vidéo de l’évolution de la hauteur d’eau sur tout le domaine lors de l’initialisation de la marée (même période que celle de la figure 14) a été réalisée à l’aide du logiciel MATLAB et est visible à l’adresse suivante : http://www.meteorologie.eu.org/mothy/ravenel/init_maree_3D.avi.

2.4.2 Courants

Pour vérifier que le modèle utilisé dans MOTHY se cale bien lors de la phase d’initialisation de la marée, nous avons aussi vérifié que le courant est cohérent avec ce qui est observé aux alentours de Saint-Pierre-et-Miquelon. Nous avons plus particulièrement vérifié que nos cartes de courants sont proches de celles qui avaient été obtenues dans un rapport de 2006 par l’Association de recherche et de développement pour l’aquaculture (ARDA) [6]. Dans ce rapport, un modèle bidimensionnel est utilisé et le logiciel MARS_Seamer permet la résolution numérique sur un maillage de 100 m autour de l’archipel (avec un domaine au nord de l’archipel dont la maille est raffinée à 30 m, mais cette zone ne nous intéresse pas dans le cadre de notre rapport), contre un maillage d’environ 930 m × 640 m dans MOTHY. À noter que pour les conditions aux bords utilisées dans MARS_Seamer, 6 ondes de marée sont prises en considération : M2, N2, S2, K1, O1 et Q1 contre 17 dans MOTHY (voir page 20).

Sur la figure 15 on peut voir une comparaison des courants obtenus lors des vives-eaux pour la pleine mer (comparaison avec figure 38 de [6] à gauche) et sur la figure 16 pour la basse mer (comparaison avec figure 42 de [6] à gauche).

Les champs de courants obtenus sont complexes mais sont bien cohérents avec [6]. Dans les zones profondes, le flot (dirigé vers le nord ou nord-ouest) encadre la pleine mer tandis que le jusant (dirigé vers le sud ou le sud-est) se produit aux alentours de la basse mer. Dans les zones moins profondes près du littoral, les forces de frottement ralentissent ces courants. Nous avons aussi vérifié que les intensités des courants sont cohérentes avec celles obtenues dans [6] (l’information n’apparaît pas sur nos figures).

11. Voir <https://data.shom.fr/donnees/refmar/115>.

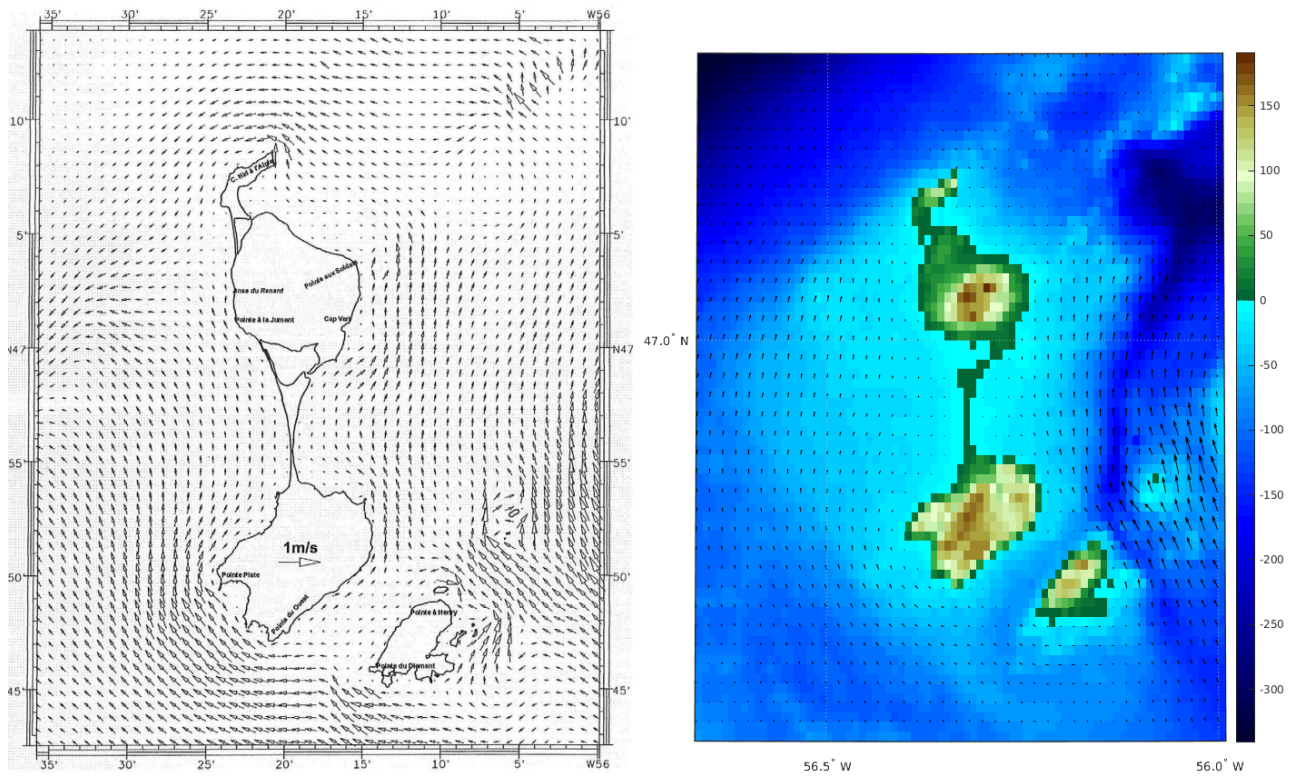


FIGURE 15 – Comparaison des marées pendant la période des vives-eaux et à pleine mer (à gauche : figure tirée de [6], à droite : courants obtenus avec MOTHY).

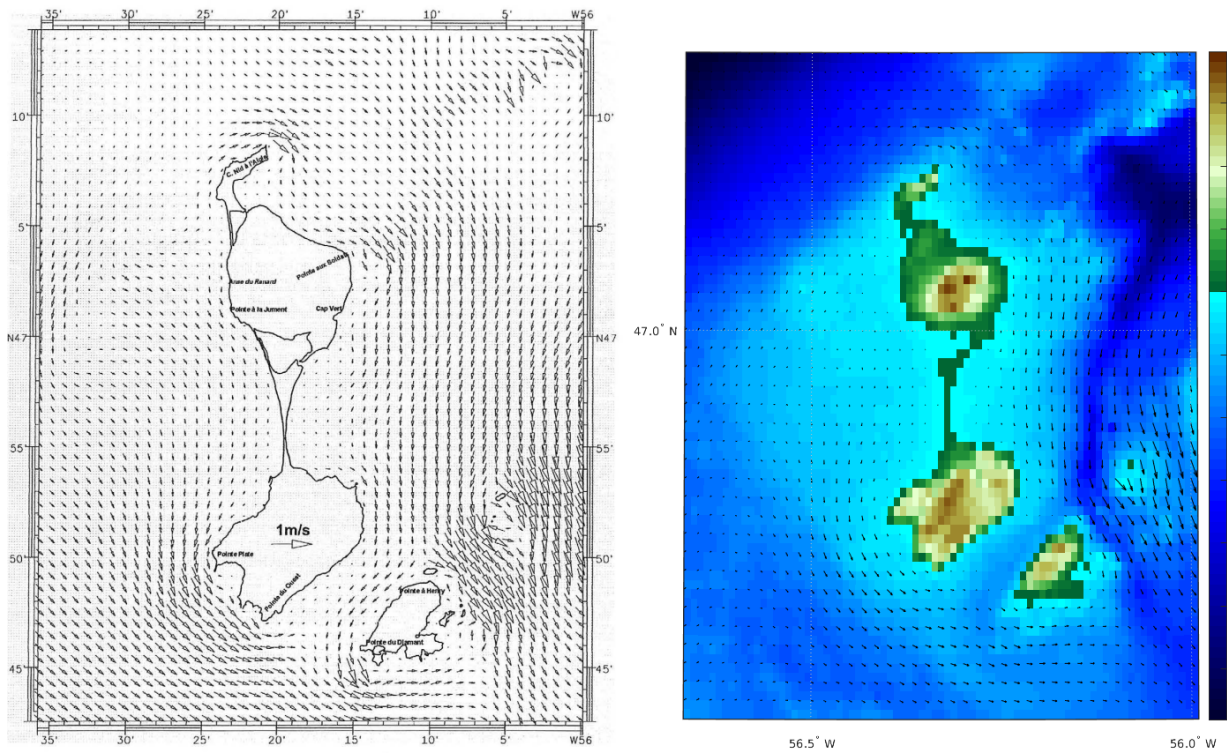


FIGURE 16 – Comparaison des marées pendant la période des vives-eaux et à basse mer (à gauche : figure tirée de [6], à droite : courants obtenus avec MOTHY).

Deux vidéos de l'évolution des courants (une sur tout le domaine et une zoomée sur l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon) lors de l'initialisation de la marée ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB et sont visibles aux adresses suivantes :

http://www.meteorologie.eu.org/mothy/ravenel/init_maree_courant.avi,

http://www.meteorologie.eu.org/mothy/ravenel/init_maree_courant_zoom.avi.

Comme nous le verrons dans les résultats, les zones les plus probables où retrouver le *Ravenel* se situant entre Saint-Pierre-et-Miquelon et la péninsule de Burin, la prise en compte des courants de marée est importante car même si la disparition a eu lieu à une période de mortes-eaux où les courants de marée sont plus faibles, les courants de marée restent relativement importants dans cette zone (voir annexe A page 32 pour la comparaison des résultats sans courant de marée).

3 Résultats

3.1 Trajectoires des objets 4 et 6

Les objets appartenant de manière certaine au *Ravenel* étant les objets 4 et 6, nous présentons dans les figures 17 et 18 les deux rétrotrajectoires obtenues avec ces objets afin que le lecteur se familiarise avec ces cartes. Nous choisissons les horaires des 31 janvier à 3 h UTC, 30 janvier à 7 h UTC, 29 janvier à 18 h UTC et 28 janvier à 20 h UTC, les trois premiers horaires correspondant à de fortes probabilités relevées dans la sous-partie suivante (cartes de probabilités maximales), le dernier horaire paraissant une limite à l'horaire de disparition du chalutier.

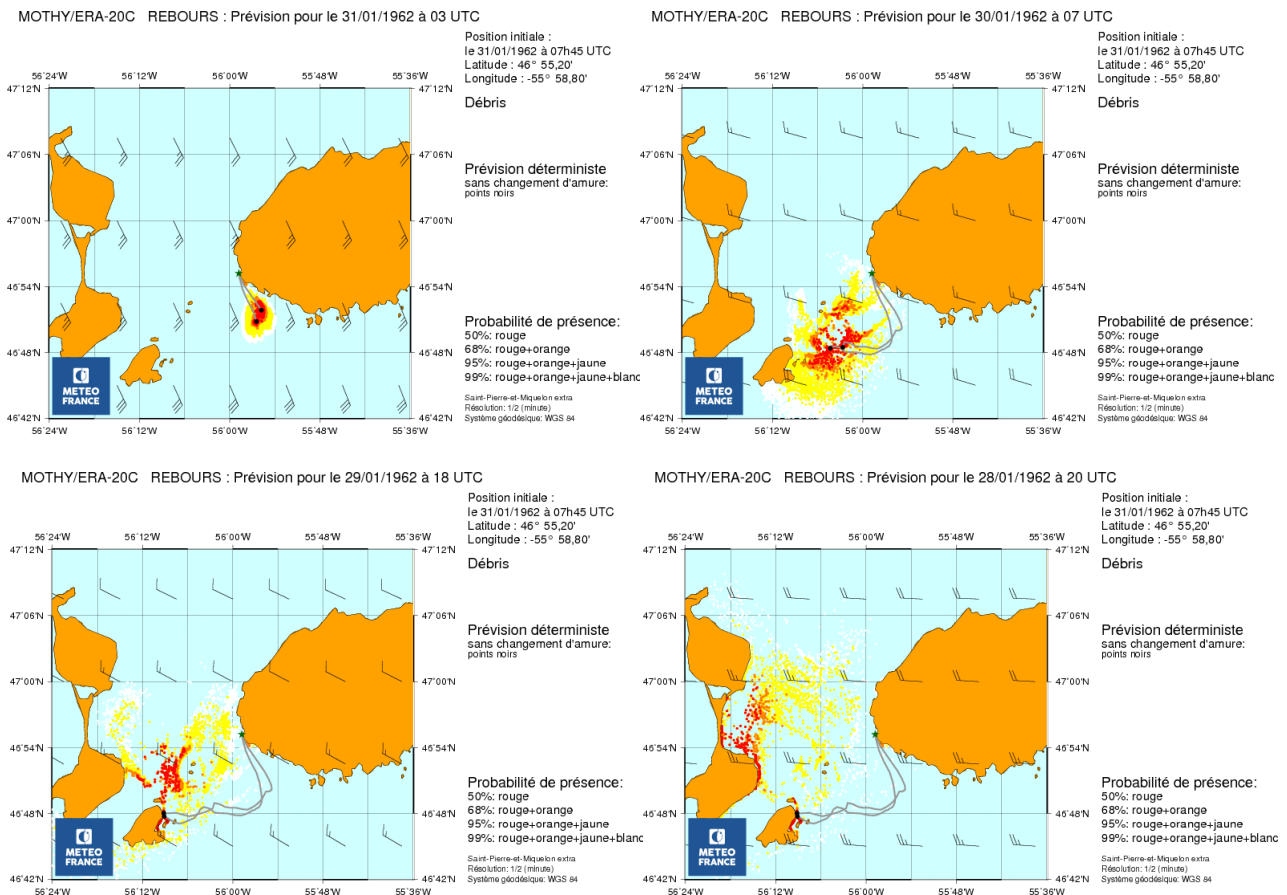


FIGURE 17 – Rétrotrajectoires de l'objet 4 à différents horaires.

3.2 Multi-trajectoires

La figure 19 montre quant à elle les rétrotrajectoires de l'ensemble des objets aux mêmes horaires que les rétrotrajectoires des objets 4 et 6 de la sous-partie précédente, et qui ont un intérêt particulier quand on regardera les cartes de probabilités dans la sous-partie suivante, auxquelles on a rajouté les rétrotrajectoires aux dates des 31 janvier 22 h UTC et 31 janvier 12 h UTC pour avoir le début des rétrotrajectoires des objets 10 et 11 le plus au nord. L'animation complète est visible à l'adresse http://www.meteorologie.eu.org/mothy/ravenel/anim_multi_traj_am.gif. À noter qu'on compare en annexe A page 33 sur la figure 24 les multi-trajectoires obtenues sans les courants de marée.

3.3 Cartes de probabilités maximales

Nous proposons de montrer les résultats de MOTHY concernant les « probabilités de présence » de l'épave dans des rectangles de 2×1 minutes en dixièmes de % en utilisant les rétrotrajectoires

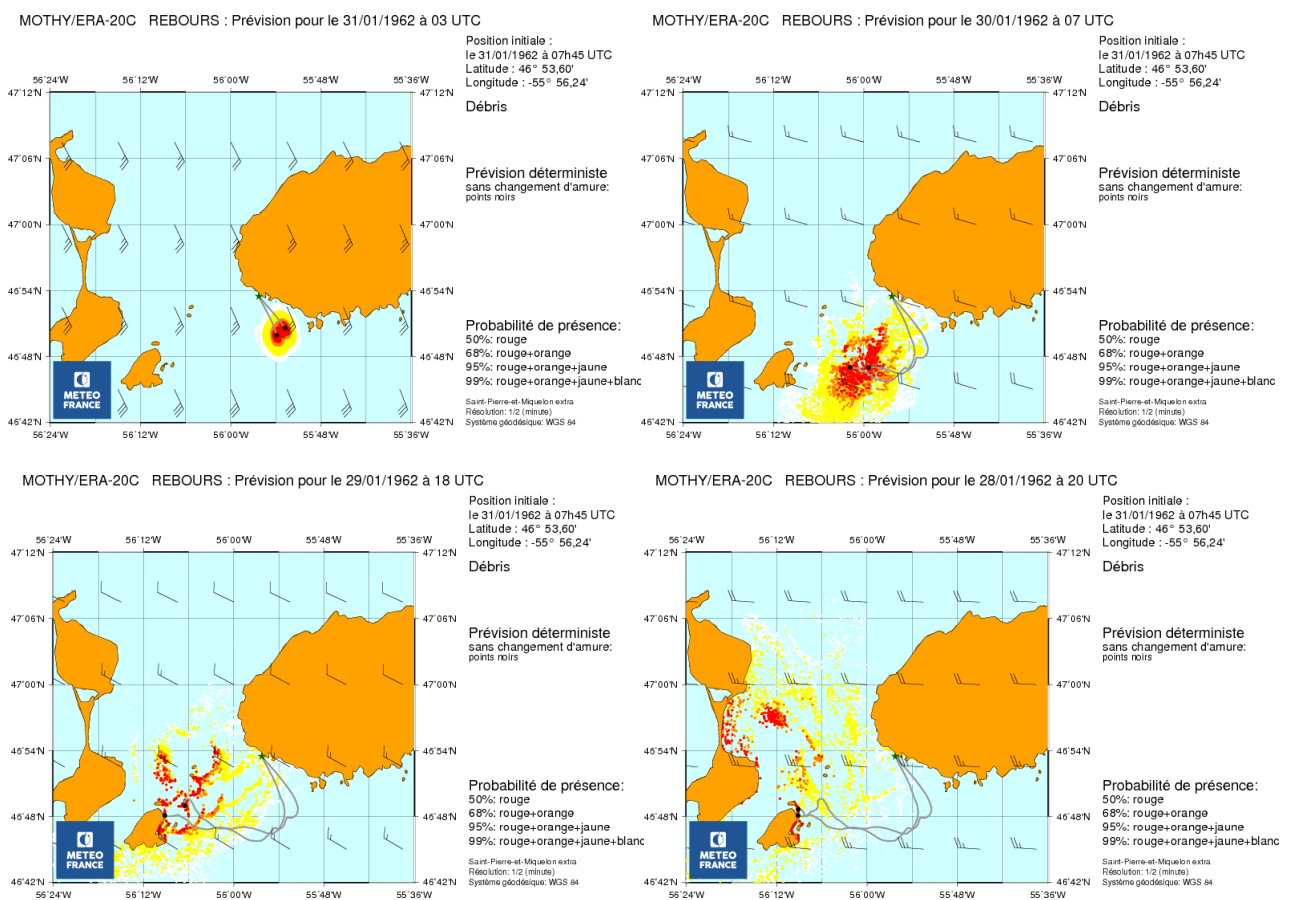


FIGURE 18 – Rétrotrajectoires de l'objet 6 à différents horaires.

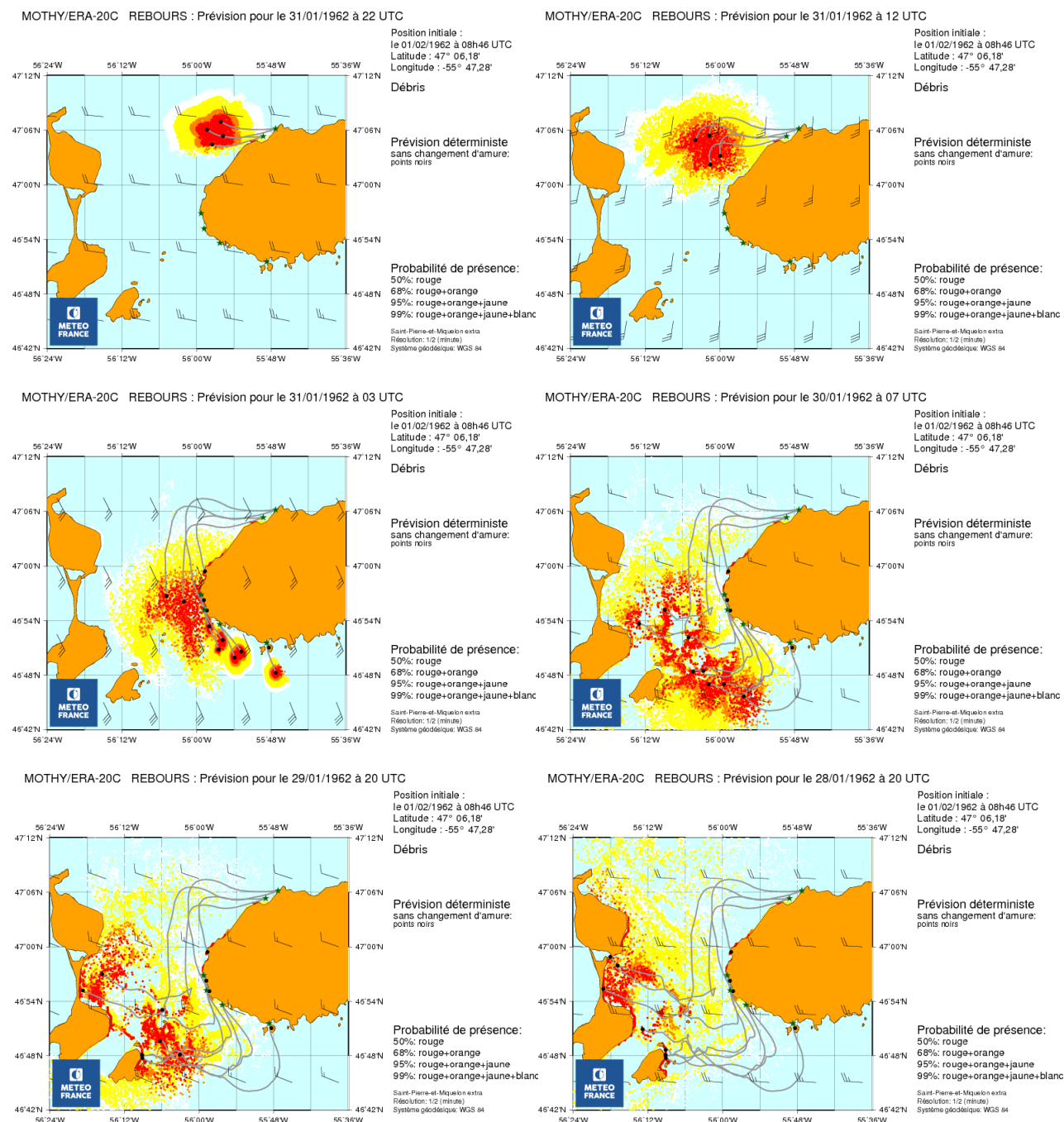


FIGURE 19 – Rétrotrajectoires de l'ensemble des objets à différents horaires.

des six objets. Ces cartes avec carroyage donnent des informations différentes des cartes avec les rétrotrajectoires et les points de couleurs car comme cela est remarqué dans [1], sur les cartes avec points de couleurs, quand un point s'échoue à la côte, on continue le tracé jusqu'à la fin de la simulation alors que sur les cartes avec carroyage, on somme les probabilités des points qui se trouvent dans chaque carreau, en ne prenant plus en compte les points échoués sur les côtes.

Pour être un peu plus précis sur la signification de ces probabilités maximales, expliquons brièvement comment elles sont calculées : MOTHY calcule une probabilité associée à chaque objet selon sa position sur la gaussienne de répartition des écarts des coefficients de dérive par rapport aux coefficients déterministes (2 points noirs). La somme des probabilités des 8 670 objets virtuels fait 99 %. Pour chaque carreau sur la carte, MOTHY fait la somme des probabilités individuelles associées à chaque objet virtuel divisée par 6 et cela, à chaque heure. MOTHY indique enfin la valeur maximale et l'heure à laquelle est obtenue la valeur maximale. Le seuil n signifie qu'il faut au moins la présence de n objets initiaux au même moment (parmi les 6) pour que la valeur soit retenue sur la carte.

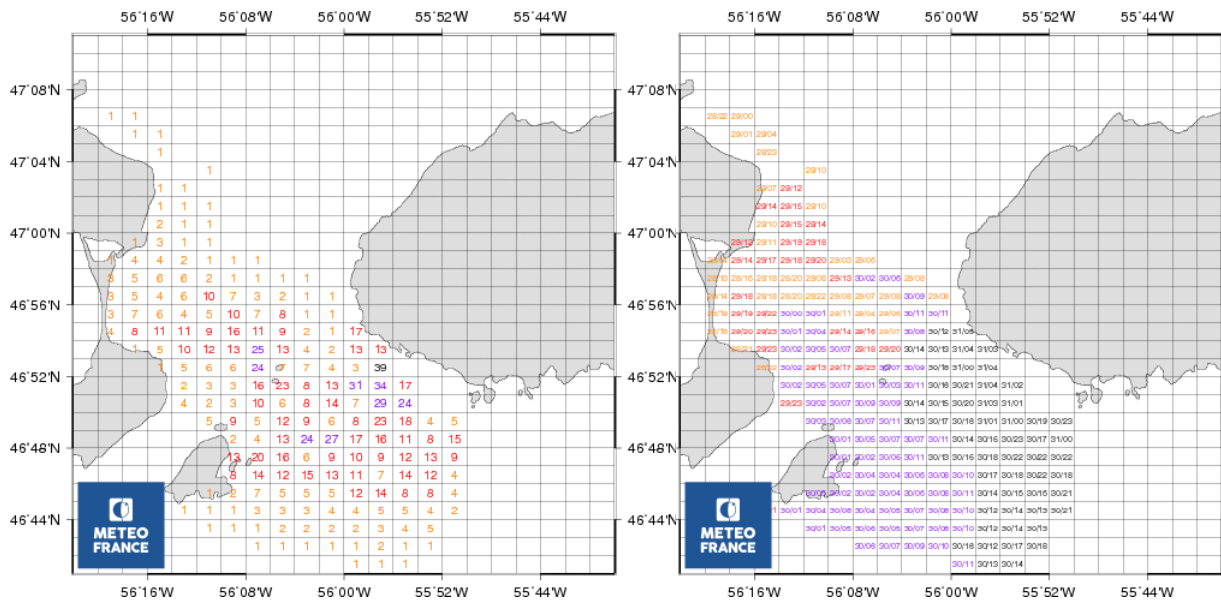
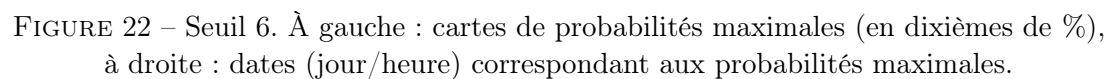
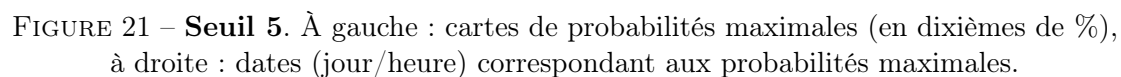


FIGURE 20 – Seuil 4. À gauche : cartes de probabilités maximales (en dixièmes de %), à droite : dates (jour/heure) correspondant aux probabilités maximales.

Sur les figures 20, 21, 22, on peut voir les cartes de probabilités maximales respectivement pour les seuils 4, 5 et 6. Trois zones semblent ressortir dans les probabilités maximales, visibles plus particulièrement avec les seuils 4 et 5. Comme dans le rapport [1], nous choisissons le seuil 5 qui semble un bon compromis pour faire ressortir les zones intéressantes, sans perdre trop d'information comme avec le seuil 6, mais sans qu'il y en ait trop comme avec le seuil 4. Une zone correspond à ce qui a été trouvé dans [1] avec une probabilité de 2,9% juste au sud de la péninsule de Burin non loin de Cousin Head autour des coordonnées $46^{\circ}50,50'N/55^{\circ}57,00'O$ avec une date correspondante du 31 janvier vers 3 h UTC. Cette zone a été écartée à juste titre dans [1] car la date est trop tardive, ce qui voudrait dire que beaucoup d'objets sont passés par là le 31 Janvier mais que le naufrage avait eu lieu avant et ailleurs.



Ce qui est intéressant, c'est que **deux nouvelles zones** qui n'apparaissent pas dans les simulations sans marée (voir annexe A page 32 pour la comparaison sans marée) apparaissent à présent **avec la marée** :

1. une zone avec des probabilités entre 2,4 % et 2,7 % au sud-est de l'île Verte (vers 46° 48,50' N, 56° 02,00' O) avec un naufrage probable le 30 janvier entre 7 h et 11 h UTC,
2. une zone avec des probabilités entre 2,3 % et 2,5 % autour de l'île Verte (vers 46° 52,00' N, 56° 06,00' O) avec un naufrage probable dans la nuit du 29 au 30 janvier, entre 18 h UTC le 29 janvier et 3 h UTC le 30 janvier.

Les dates de naufrage correspondant à ces deux zones, même si elles paraissent plutôt tardives par rapport à l'intervalle de temps établi page 7, ainsi que la présence de récifs autour de l'île Verte invitent à considérer les zones sus-mentionnées comme des zones prioritaires pour les recherches de l'épave.

Des probabilités moindres par rapport aux précédentes mais tout de même intéressantes permettent d'envisager aussi une zone située à l'est immédiat de Saint-Pierre (vers 46° 47' N, 56° 08' O).

Notons qu'afin de faciliter la lecture de ces cartes, une fois la probabilité maximale calculée, des couleurs sont attribuées par MOTHY aux nombres figurant dans les carreaux. Les couleurs noir, violet et rouge correspondent à des valeurs supérieures ou égales à respectivement 95 %, 60 % et 20 % de cette probabilité maximale. La couleur jaune est attribuée aux autres valeurs non nulles. Nous avons coloré, sur la figure 23, les carreaux de la même façon que les nombres, à l'exclusion de ceux qui sont associés à une combinaison date/lieu du naufrage irréaliste (antérieure au 28 janvier, les lieux associés étant situés trop au nord par rapport au trajet probable du *Ravenel* ; postérieure au 30 janvier à midi). Les coordonnées indiquées ci-dessus pour définir des zones de recherches prioritaires sont représentées par des points noirs.

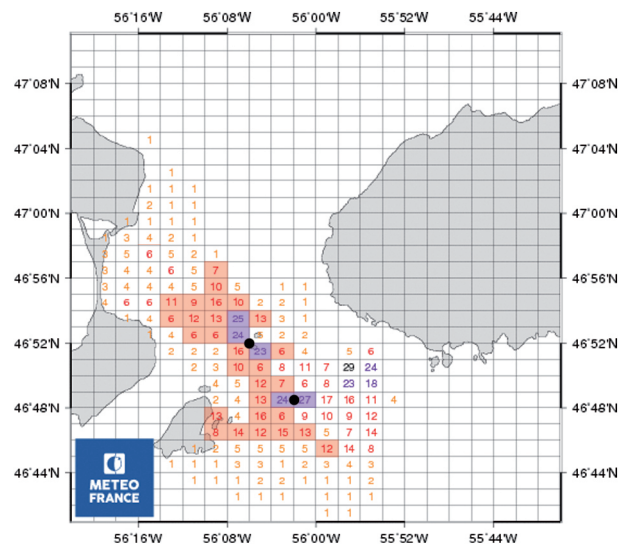


FIGURE 23 – Carte de probabilités maximales (en dixièmes de %, seuil 5) associées au lieu du naufrage du *Ravenel*.

Les zones de recherche prioritaires préconisées à l'issue de la présente étude se situent autour des points noirs, en particulier au niveau des régions colorées en violet.

Enfin, pour s'assurer que ces zones n'apparaissent pas de manière artificielle en fonction de petites perturbations sur les conditions initiales, nous présentons en Annexe B page 35 une étude de sensibilité aux conditions initiales qui laisse penser que les résultats trouvés dans cette partie sont assez robustes.

Conclusion

Météo France a été sollicité afin de retracer, à l'aide du modèle de dérive en mer MOTHY, des rétrotrajectoires possibles pour les débris retrouvés sur les côtes de Terre-Neuve après le naufrage du *Ravenel* et ainsi de définir des zones de recherches prioritaires pour la recherche de l'épave. Des simulations numériques prenant en compte les courants océaniques de haute fréquence (courants liés aux vents et courants de marée) ont été réalisées dans ce but.

Deux régions en particulier se distinguent par des probabilités plus élevées de présence cumulée des différents débris à une date cohérente du point de vue de la chronologie des événements liés à la disparition du chalutier. Elles rayonnent autour des points de coordonnées $46^{\circ} 48,50' \text{ N}$, $56^{\circ} 02,00' \text{ O}$ (au sud-est de l'île Verte) pour la première et $46^{\circ} 52,00' \text{ N}$, $56^{\circ} 06,00' \text{ O}$ (vers l'île Verte) pour la seconde. Le naufrage pourrait s'être produit aux alentours d'un de ces points, c'est-à-dire dans des régions connues pour leurs hauts-fonds et leurs récifs particulièrement dangereux, le matin du 30 janvier ou dans la nuit du 29 au 30 janvier.

Les résultats obtenus pourraient encore faire l'objet d'améliorations par la suite. L'incertitude liée aux lieu et date d'échouement des divers débris a demandé d'opérer certains choix ; les variations qu'il est possible d'envisager autour de ceux-ci ont commencé à être explorées ; cette démarche pourrait être poursuivie et approfondie. Il serait également intéressant de prendre en compte la circulation océanique générale (considérée comme négligeable dans cette étude) afin de vérifier que les courants de basse fréquence n'ont effectivement pas d'impact considérable dans le cas considéré.

Références

- [1] Mathilde JOMÉ : *Recherche du chalutier Ravenel, disparu au large de Saint-Pierre-et-Miquelon*. Rapport de stage, Météo France, juillet 2020.
- [2] Mathilde JOMÉ et Alexandrine GRANDEMANGE : *Recherche du chalutier Ravenel, disparu au large de Saint-Pierre-et-Miquelon*. Rapport de stage, Météo France, mai 2020.
- [3] P. LAZURE, M. LUNVEN et J. RODRIGUEZ : *Étude de l'hydrodynamique de la baie de Miquelon*. Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), janvier 2011.
- [4] F. LYARD, D. ALLAIN, M. CANCEZ, L. CARRÈRE et N. PICOT : *FES2014 global ocean tides atlas : design and performances*. Ocean Science, 2020 (<https://doi.org/10.5194/os-2020-96>).
- [5] Cécile SAUVAGE : *Synthèse de la documentation relative à la perte du chalutier Ravenel*. DRASSM, mars 2020.
- [6] ARDA (ASSOCIATION DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT POUR L'AQUACULTURE) : *Modélisation courantologique dans l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon*. Rapport d'étude, septembre 2006.
- [7] LE BOEUF : *Disparition du chalutier Ravenel : Rapport*. Rapport d'enquête, Inscription maritime de Saint-Pierre-et-Miquelon, 7 mai 1962.

Annexes

Annexe A : Comparaison des trajectoires et des cartes de probabilités maximales avec et sans marée

La figure 24 montre les rétrotrajectoires obtenues sans les courants de marée, comme cela avait été fait dans le rapport [1]. Comme les conditions et paramètres¹² des expériences numériques que nous avons conduites présentent quelques différences avec ceux des expériences menées par Mathilde Jomé, nous présentons ici, pour comparaison avec les simulations *avec marée* présentées dans la partie Résultats, non pas les résultats de [1] mais ceux que nous avons obtenus avec nos choix de configuration, *sans marée*. La figure 24 est à comparer avec la figure 19 page 26 qui inclut les courants de marée. On voit que les trajectoires sont plus lisses car les oscillations de fréquences plus élevées dues à la marée sont absentes et les objets semblent moins éparpillés mais il est difficile de conclure d'après ces cartes que des zones très différentes ressortent.

Les cartes de probabilités maximales (cartes à carroyage) permettent de mieux faire ressortir les différences entre les simulations obtenues avec et sans courants de marée. Afin de faciliter la lecture de ces cartes, une fois la probabilité maximale calculée, des couleurs sont attribuées aux nombres figurant dans les carreaux. Les couleurs noir, violet et rouge correspondent à des valeurs supérieures ou égales à respectivement 95 %, 60 % et 20 % de cette probabilité maximale. La couleur jaune est attribuée aux autres valeurs non nulles.

Afin de mettre en relief les différences entre les simulations réalisées avec et sans marée, sur les cartes de la figure 25, nous avons coloré les carreaux de la même façon que les nombres. Mais il n'est pas encore facile de préciser de quelle façon évolue exactement la répartition des probabilités maximales en fonction du type de simulation.

La figure 26 propose une approche purement qualitative. Une différence entre la carte avec marée et la carte sans marée est opérée selon le principe suivant : si, entre la simulation sans marée et la simulation avec marée, un carreau passe à la « couleur supérieure », on lui attribue « + 1 » ; s'il passe à la « couleur inférieure », on lui attribue « - 1 » ; et ainsi de suite. Cette démarche semble propre à permettre de visualiser l'évolution de la répartition des probabilités suite à l'introduction des courants de marée dans le modèle, montrant une augmentation globale, notamment autour des zones préconisées page 29 pour la recherche du *Ravenel*, mais aussi une perte au nord de l'île Saint-Pierre. Il convient toutefois de garder en mémoire la grossièreté du procédé.

12. La grille GEBCO_2014 à 30 secondes d'arc pouvant concorder en certains points avec celle de FES2014 (au contraire de la grille GEBCO_2020 à 15 secondes d'arc), nous avons préféré choisir une moindre résolution de bathymétrie plutôt qu'une nécessaire interpolation. Les corrections apportées à la bathymétrie sont légèrement différentes. Enfin, pour s'adapter aux caractéristiques des courants de marée, le pas de temps a été réduit de 1 heure à 5 minutes.

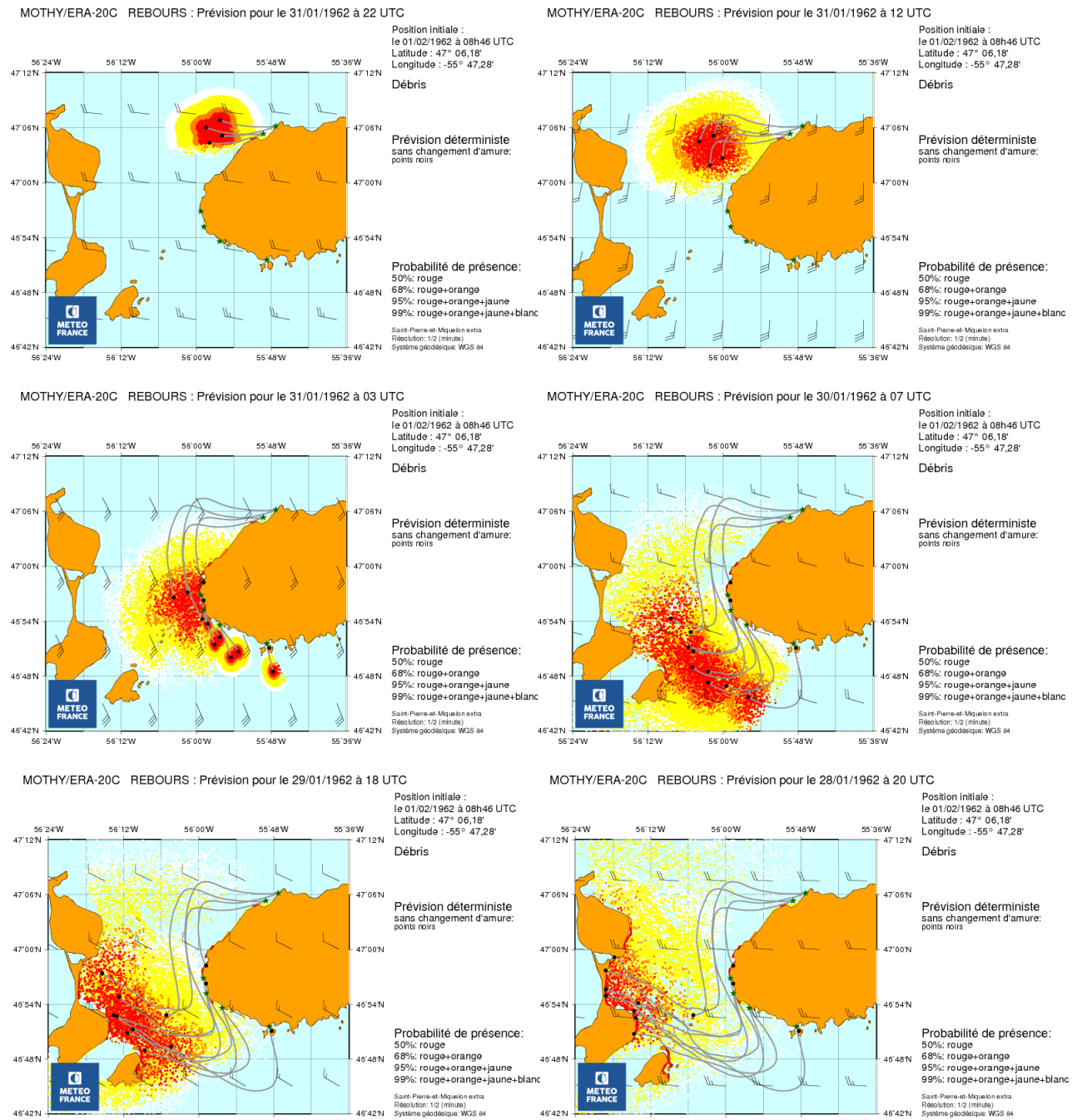


FIGURE 24 – Rétrotrajectoires sans les courants de marée de l'ensemble des objets à différents horaires.

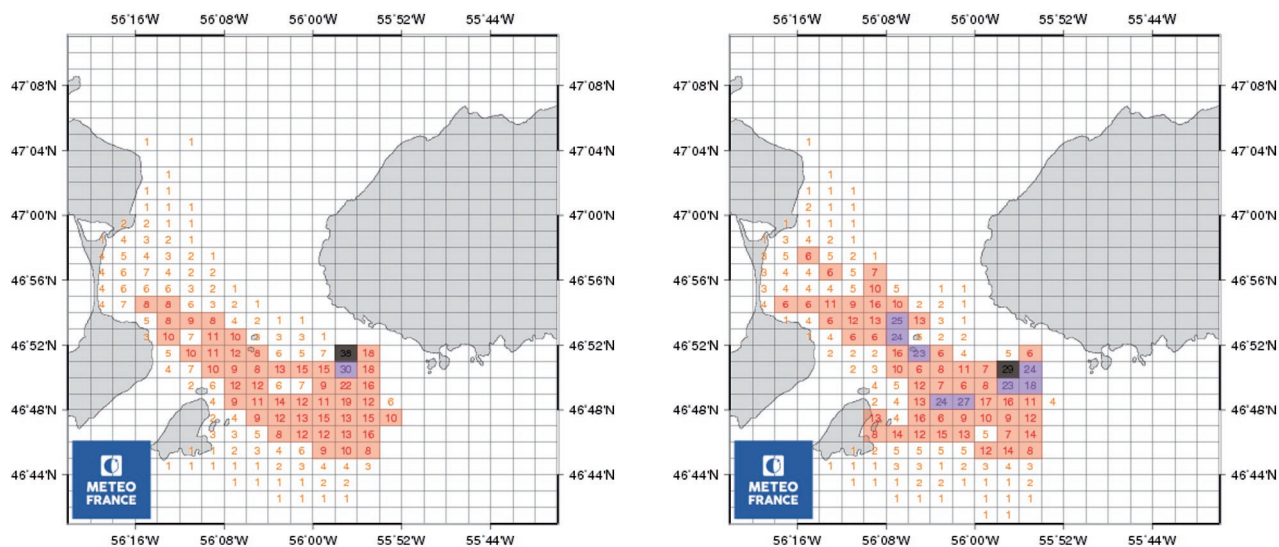


FIGURE 25 – Cartes de probabilités maximales (en dixièmes de %), seuil 5.

À gauche : sans marée, à droite : avec marée.

La coloration des carreaux est la même que celle des nombres en fonction de leur valeur.

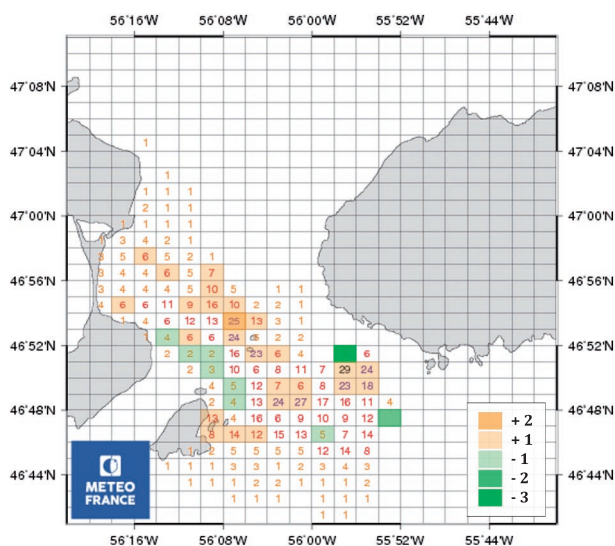


FIGURE 26 – Carte de probabilités maximales (en dixièmes de %), seuil 5, avec marée.

La coloration des carreaux montre les gains et pertes de probabilités maximales par rapport à la carte sans marée.

Annexe B : Étude de la sensibilité aux conditions initiales

Nous voulons vérifier ici que les cartes de probabilités obtenues dans la partie Résultats (page 24) ne sont pas trop sensibles aux conditions initiales et que les zones les plus probables pour effectuer des recherches ne changent pas du tout au tout en modifiant de peu les horaires et lieux d'échouement des débris sur les plages de la péninsule de Burin. Afin de mieux apercevoir les changements entre les cartes de probabilités obtenues, nous rappelons sur la figure 27 les cartes de probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, pour un seuil de 5 et sans changement dans les conditions initiales.

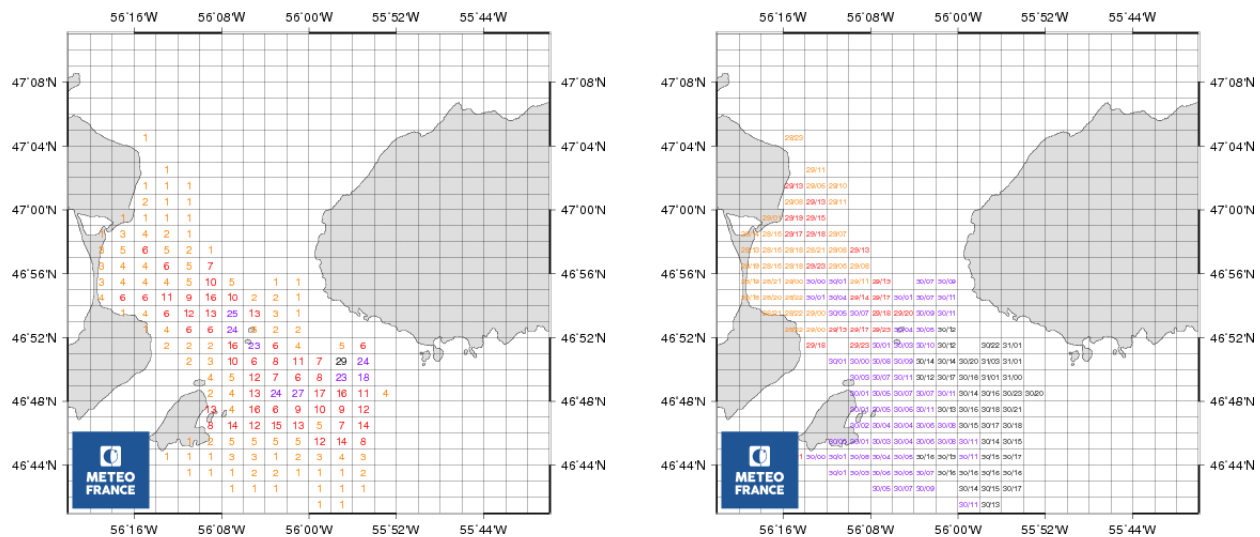


FIGURE 27 – Cartes des probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, seuil 5.

Dans un premier temps, nous avons fait varier le poids des objets. Les positions des objets 4 et 6 étant connues avec plus de précision, il est intéressant de leur attribuer un poids plus important que pour les autres objets. Nous avons pour cela ajouté deux objets supplémentaires correspondant à un nouvel objet 4 et à un nouvel objet 6, ce qui revient au final à introduire dans notre simulation deux objets 4 et deux objets 6. Les nouvelles cartes de probabilité obtenues sont montrées dans les figures 28 et 29.

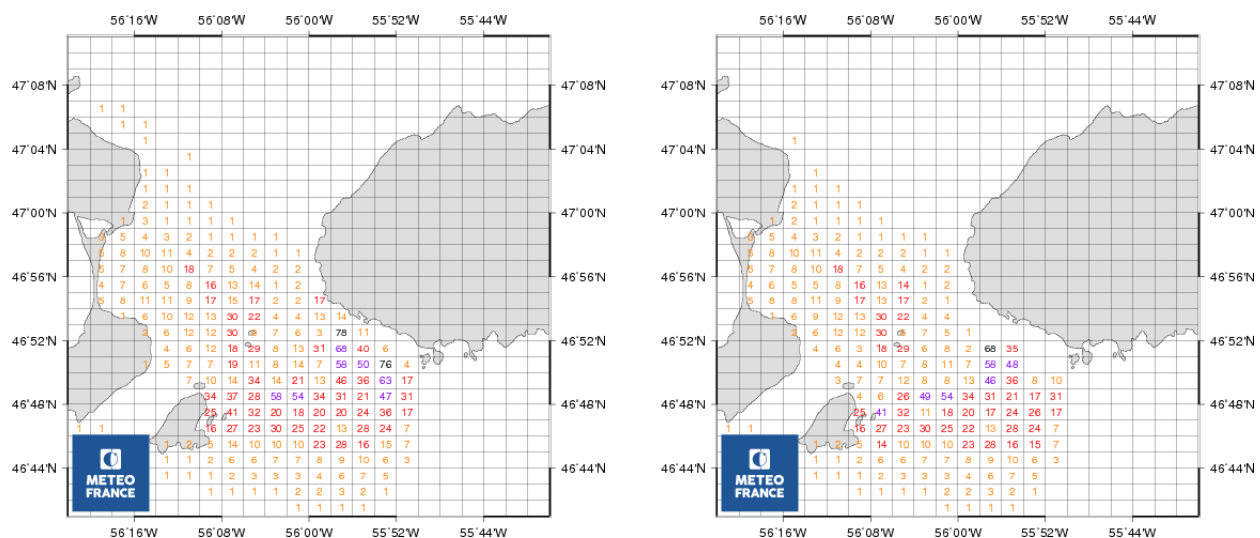


FIGURE 28 – Cartes des probabilités maximales avec dédoublement des objets 4 et 6, seuil 5 à droite et seuil 6 à gauche.

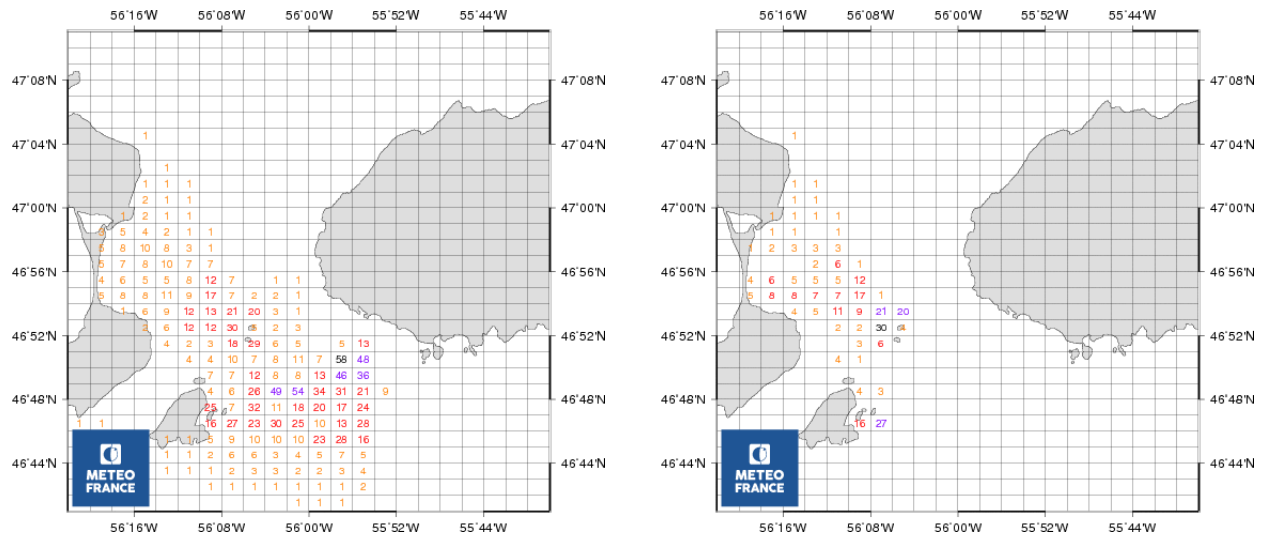


FIGURE 29 – Cartes des probabilités maximales avec dédoublement des objets 4 et 6, seuil 7 à droite et seuil 8 à gauche.

Nous constatons avec ces cartes que les fortes probabilités sont décalées vers le sud-est. Les probabilités sont en effet plus faibles dans le secteur de l'île Verte mais bien plus élevées au sud-ouest de la péninsule de Burin, notamment dans le secteur de Bob's Rock et au large de Saint-Pierre.

Ensuite, nous avons décalé de +1 h ou -1 h la date de lâcher des objets 10 et 11. Les rétrotrajectoires obtenues avec ces nouvelles simulations (voir figures 30 et 31) font apparaître des différences avec les précédentes sur la figure 19.

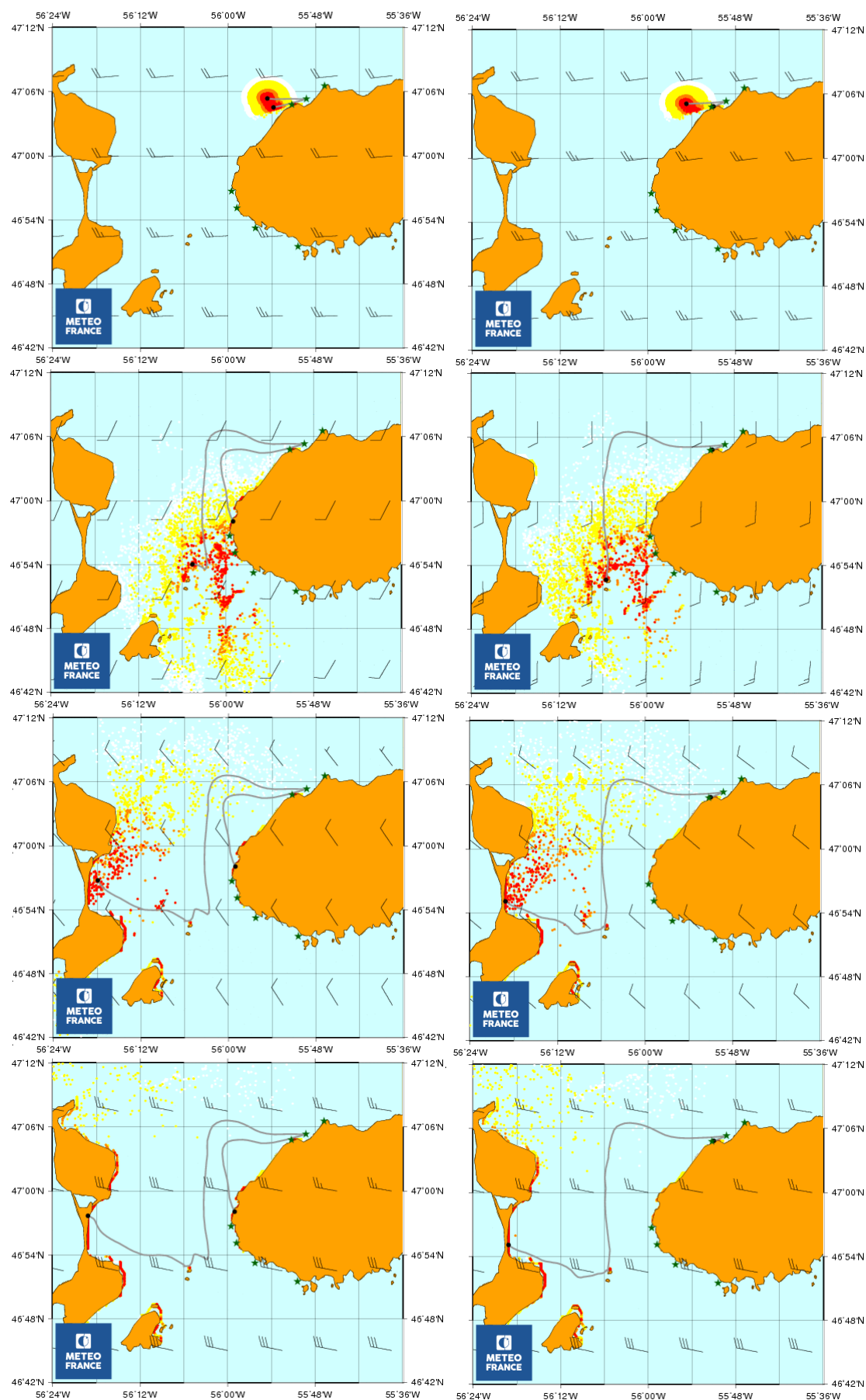


FIGURE 30 – Rétrotrajectoires de l'objet 10 pour 4 échéances différentes (de haut en bas : le 01/02/1962 à 4 h UTC, le 30/01/1962 à 22 h UTC, 16 h UTC et 10 h UTC).

À droite, l'heure de lâcher est à 7 h 46, à gauche, il est à 9 h 46.

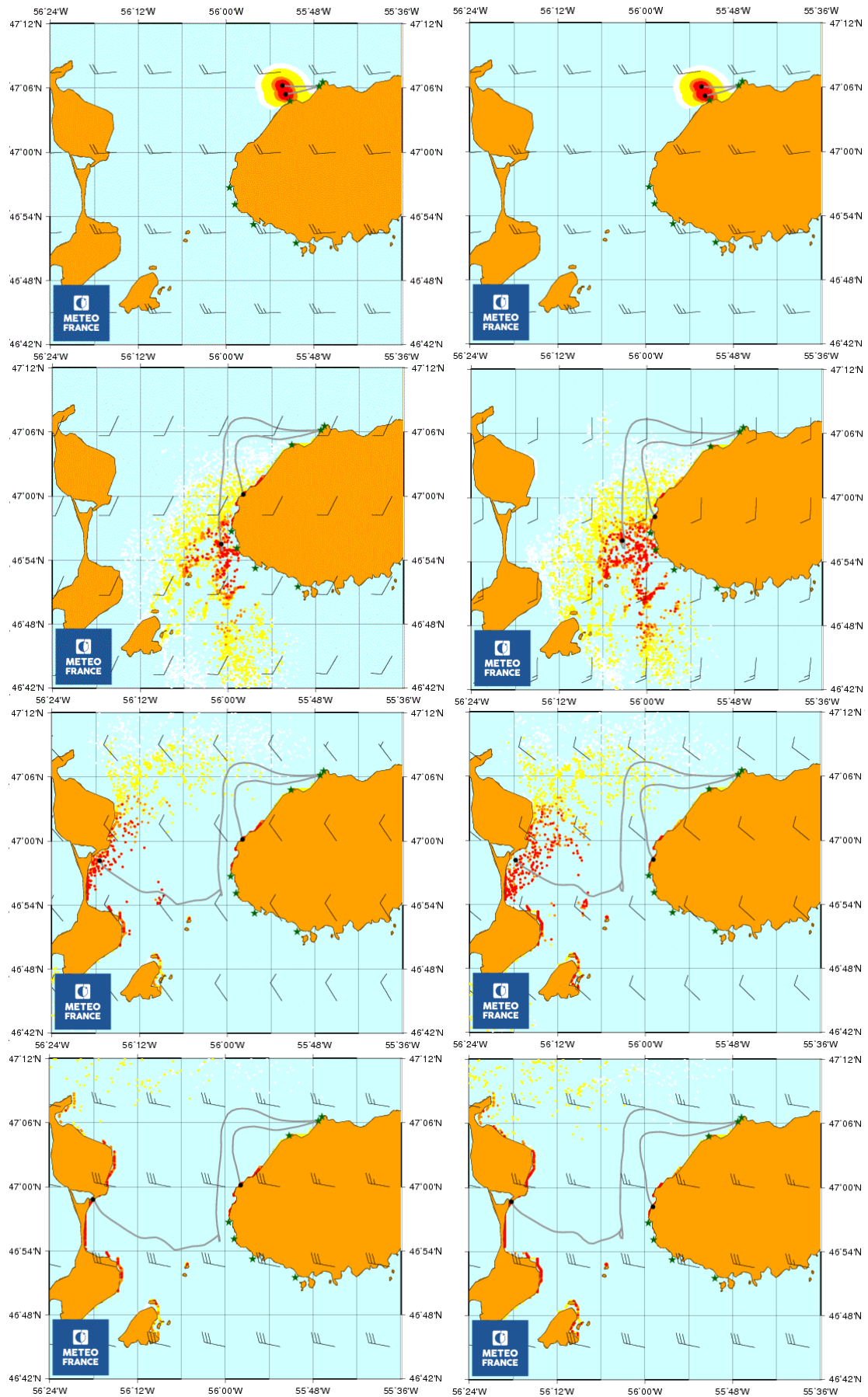


FIGURE 31 – Rétrotrajectoires de l'objet 11 pour 4 échéances différentes
(de haut en bas : le 01/02/1962 à 4 h UTC, le 30/01/1962 à 22 h UTC, 16 h UTC et 10 h UTC).
À droite, l'heure de lâcher est à 7 h 46, à gauche, il est à 9 h 46.

Les cartes de la figure 32 ont été réalisées avec un seuil égal à 5. Elles ont été obtenues pour un décalage de -1 h, c'est-à-dire pour un lâcher à 7 h 46 des objets 10 et 11. Elles font apparaître un décalage géographique. En effet, les zones de fortes probabilités en rouge sont décalées vers l'est au sud-ouest de la péninsule de Burin.

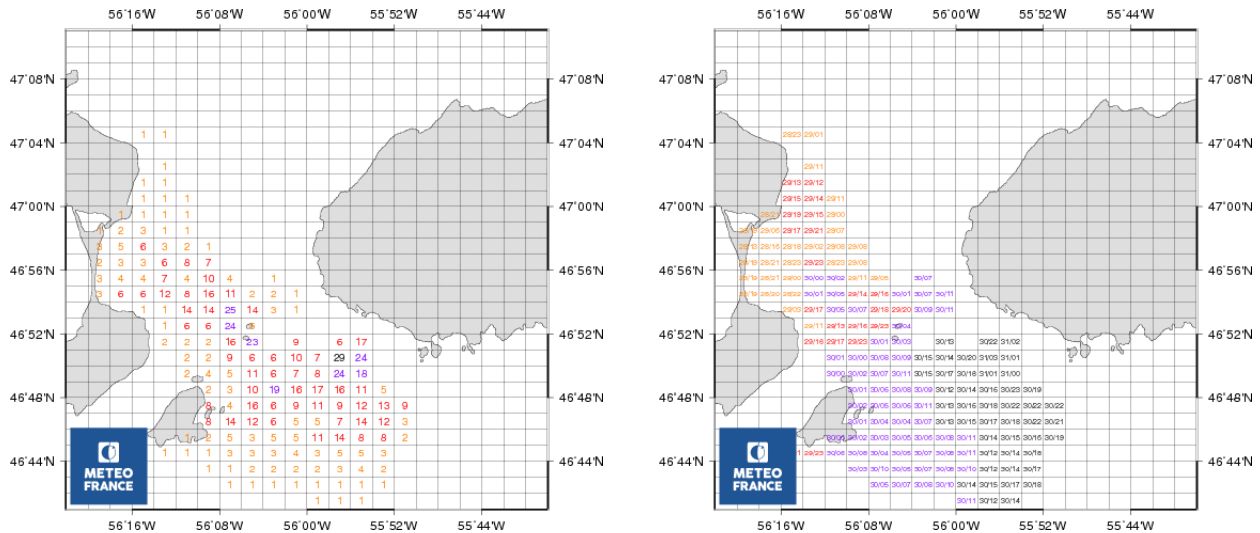


FIGURE 32 – Cartes des probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, avec les objets 10 et 11 lâchés à 7 h 46.

Pour les cartes de la figure 33, les objets 10 et 11 ont été lâchés à 9 h 46. De même que les cartes précédentes, nous pouvons observer un décalage. Le sud-ouest de la péninsule de Burin est concernée par des plus faibles probabilités alors que de fortes probabilités se sont déplacées vers l'est de l'île de Saint Pierre. Le décalage se fait donc vers l'ouest pour ce cas-là.

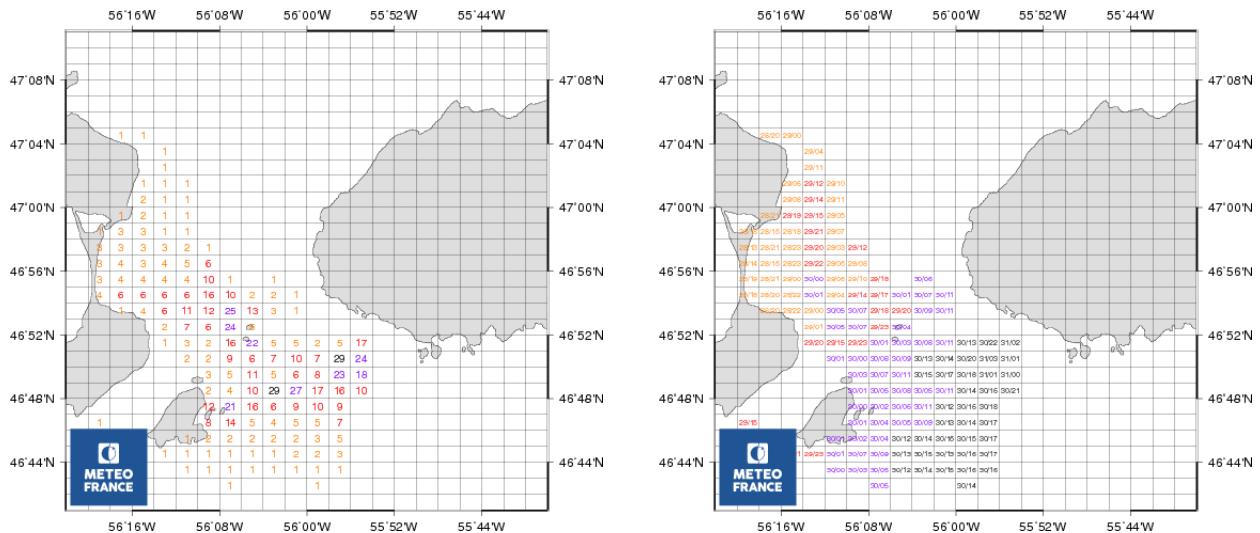


FIGURE 33 – Cartes des probabilités maximales et de dates de probabilités maximales, avec les objets 10 et 11 lâchés à 9 h 46.

À travers ces deux simulations, nous retrouvons des zones de fortes probabilités similaires dans le secteur de l'île Verte et dans les eaux canadiennes vers Bob's Rock. Cependant, les écarts de probabilités sont plus importants entre une simulation décalée de +1 h et une simulation dont les objets 10 et 11 ont été lâchés à 8 h 46. Le changement de l'heure du lâcher est donc plus visible pour un décalage de +1 h sur l'heure de lâcher. Les objets 10 et 11 possèdent quand même un poids important sur les simulations.

