



Pêches et Océans Fisheries and Oceans
Canada Canada

Sciences

Science

Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS)

Document de recherche 2014/116

Région du Québec

Habitat thermique du maquereau bleu; profondeur de l'isotherme de 8 °C dans le sud du golfe du Saint-Laurent entre 1960 et 2014

Peter S. Galbraith et François Grégoire

Ministère des Pêches et des Océans
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli, Québec
G5H 3Z4

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Les documents de recherche sont publiés dans la langue officielle utilisée dans le manuscrit envoyé au Secrétariat.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien de consultation scientifique
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

[http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/
csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca)



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2015
ISSN 2292-4272

La présente publication doit être citée comme suit :

Galbraith, P. S., et Grégoire, F. 2015. Habitat thermique du maquereau bleu; profondeur de l'isotherme de 8 °C dans le sud du golfe du Saint-Laurent entre 1960 et 2014. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2014/116. v + 13 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUCTION.....	1
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	2
3. RÉSULTATS.....	3
4. DISCUSSION ET CONCLUSION.....	4
5. REMERCIEMENTS.....	5
6. RÉFÉRENCES	5
FIGURES.....	8

RÉSUMÉ

Le maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) est un poisson pélagique qui, en eaux canadiennes, se reproduit principalement dans le sud du golfe du Saint-Laurent en juin et juillet. Il est sensible aux variations de la température de l'eau qui sont compensées par des changements de distribution permettant à l'espèce de demeurer à l'intérieur de ses préférences thermiques. Celles-ci se retrouvent entre 7 °C et 16 °C alors que des observations de terrain suggèrent aussi que l'espèce ne tolère pas les eaux dont les températures sont inférieures à 5-6 °C ou supérieures à 15-16 °C. La migration printanière le long de la côte des États-Unis a été associée au réchauffement des températures de l'eau et en particulier à l'arrivée de l'isotherme de 8 °C. Depuis quelques années, les captures par l'industrie dans la baie des Chaleurs se font à une plus grande profondeur. Notre objectif est de vérifier si la profondeur de la zone de préférences thermiques, qui est associée à l'isotherme de 8 °C, avait augmenté au cours des dernières années ce qui pourrait expliquer les changements observés de distribution. Nous regardons donc ici l'évolution temporelle de l'habitat thermique supérieur à 8 °C à la mi-juin et au mois de septembre sur le Plateau madelinien entre 1960 et 2014. En général, la partie ouest du Plateau madelinien en juin est plus chaude avec des profondeurs de l'isotherme de 8 °C plus grandes que la partie est. Nous observons une tendance à l'augmentation de la profondeur de l'isotherme de 8 °C en juin dans les deux régions, mais plus grande du côté ouest. La profondeur en juin est passée d'environ 7-8 m dans les années 1960 (avec des moyennes aussi faibles que 2 m lors de certaines années) jusqu'aux environs de 12 m depuis 2010. Lors du cas extrême de 2012, l'isotherme de 8 °C atteignait en moyenne 15 m dans les deux régions, mais dépassait cette valeur sur de grandes superficies. Cependant, la variabilité interannuelle de la profondeur de l'isotherme de 8 °C en septembre ne démontre pas de tendance à long terme ni de disparité est-ouest.

Thermal habitat of the Atlantic mackerel: Depth of 8 °C isotherm in the southern Gulf of St. Lawrence between 1960-2014

ABSTRACT

Atlantic mackerel (*Scomber scombrus* L.) is a pelagic fish that, in Canadian waters, reproduces principally in the southern Gulf of St. Lawrence in June and July. It is sensitive to water temperature, compensating the variability by changes in its distribution that allow the species to remain within its range of temperature preference. While the latter is between 7°C and 16°C, field observations also suggest that the species does not tolerate water temperatures lower than 5-6°C or higher than 15-16°C. Spring migration along the United States American coast has been associated with warming temperatures, and in particular with the timing of water temperatures reaching 8°C. In recent years, industry catches in the Baie des Chaleurs have been occurring in deeper waters. Our objective is to verify whether the depth of the preferred temperature habitat, associated with the 8°C isotherm, has increased in recent years, which could explain the observed distribution changes. Therefore, we investigated the interannual variability of the Magdalen Shallows habitat with temperatures higher than 8°C in mid-June as well as in September, between 1960 and 2014. In general, in June, the western part of the Magdalen Shallows is warmer with deeper 8°C isotherms than the eastern part. A trend with increasing depth of the mid-June 8°C isotherm was observed in both regions, but higher on the western side. The 8°C June isotherm depth has increased from about 7-8 m during the 1960s (with averages as low as 2 m in some years) to about 12 m since 2010. In the extreme warm case of 2012, the 8°C isotherm reached an average of 15 m in both regions while exceeding that value over large areas. However, the interannual variability of the depth of the 8°C September isotherm does not show any long term trend or an east-west disparity.

1. INTRODUCTION

Le maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) est un poisson pélagique qui est largement distribué des deux côtés de l'Atlantique Nord. À l'est, il est présent de l'Espagne à la Norvège et depuis quelques années, il fréquente même les eaux de l'Islande, des îles Féroé et du Groenland. À l'ouest, on le retrouve de la Caroline du Nord jusqu'au Labrador (Sette 1950, Parsons 1970). Cette aire de distribution est caractérisée par la présence de deux populations (contingents) ayant chacune leur site de fraie. La population américaine fraie sur le « mid-Atlantic Bight » de la Virginie au Rhode Island. La fraie de la population canadienne se produit principalement dans le sud du golfe du Saint-Laurent en juin et juillet.

Comme bien d'autres espèces de poissons, le maquereau bleu est sensible aux variations de la température de l'eau. Ces variations sont compensées par des changements de distribution permettant à l'espèce de demeurer à l'intérieur de ses préférences thermiques (Mountain et Murawski 1992, Reid *et al.* 1997, Overholtz *et al.* 2011). Selon des expériences en bassins, les préférences thermiques du maquereau bleu se situent entre 7 °C et 16 °C (Olla *et al.* 1975 et 1976, Overholtz et Anderson 1976). Des observations de terrain suggèrent aussi que l'espèce tolère mal les eaux dont les températures sont inférieures à 5–6 °C ou supérieures à 15-16 °C (Studholme *et al.* 1999). Dès le début des années 1950, la migration printanière du maquereau bleu le long de la côte des États-Unis a été associée au réchauffement des températures de l'eau et en particulier à l'arrivée de l'isotherme de 8 °C (Sette 1950, Bigelow et Schroeder 1953). La température de l'eau est aussi responsable de la distribution hivernale et printanière de l'espèce sur le plateau continental, autant du côté Canadien (Bruneau et Grégoire 2011) qu'américain (Murawski 1993, Overholtz *et al.* 1991). Une plus grande présence de l'espèce a même été observée dans la baie de Brador, située sur la Basse-Côte-Nord du Québec, lorsque les températures de l'eau étaient au-delà de 7°C (Castonguay *et al.* 1992). Il arrive parfois que du maquereau bleu soit aussi observé dans des eaux dont les températures se situent à l'extérieur de sa zone de préférences thermiques. Par exemple, dans le détroit de Cabot, la présence exceptionnelle de l'espèce dans des eaux de 2,8 °C suggère que des motifs d'ordre biologique, comme l'atteinte des sites de ponte, s'avèrent plus importants que le respect des préférences thermiques (D'Amours et Castonguay 1992). Des résultats récents ont aussi démontré que la température de surface de l'eau permettait de prévoir certains aspects de la migration annuelle du maquereau bleu (Radlinski *et al.* 2013).

Dans le nord-est de l'Atlantique, les patrons de distribution du maquereau bleu sont aussi influencés par la température de l'eau (Molloy 2004). Des captures près de l'île de Spitzberg dans l'océan Arctique ont été associées à la présence d'une couche d'eau de 6-11 °C située à 20 m de profondeur (Nøttestad 2008). La température de l'eau serait aussi responsable de la présence du maquereau bleu aux îles Féroé et en Islande (Jacobsen 2008, ICES 2008). À ce dernier endroit, le changement soudain et majeur de la distribution de l'espèce aurait été occasionné par différents facteurs, dont la température de l'eau (Astthorsson *et al.* 2012). Finalement, dans la Mer du Nord, la température de l'eau serait responsable du moment de la ponte de même que du choix des sites de fraie (Jansen et Gislason 2011, Jansen *et al.* 2012, Jansen et Gislason 2013).

La distribution verticale du maquereau bleu est aussi influencée par la température de l'eau comme le démontre l'analyse des données de captures d'une pêche au chalut pélagique pratiquée sur le plateau néo-écossais au début des années 1990 (Grégoire 2006). Lors de cette pêche réalisée par des navires étrangers, les plus importantes captures hivernales et printanières ont été réalisées à l'intérieur d'une couche d'eau se situant à une profondeur moyenne d'environ 100 m. Cette couche d'eau, dont la température était généralement supérieure à 8 °C, était présente entre le Banc Georges et l'île de Sable.

Récemment, des pêcheurs côtiers de la baie des Chaleurs (zones unitaires 4Tm et 4Tn de l'OPANO) ont mentionné que la distribution verticale du maquereau bleu avait changé. Les captures de ces pêcheurs se font maintenant à une plus grande profondeur. Une hypothèse émise pour expliquer cette situation est que le réchauffement des eaux de surface aurait occasionné une augmentation de l'épaisseur de la zone de préférences thermiques du maquereau bleu ce qui permettrait à ce dernier de se retrouver en plus grande profondeur. L'objectif de la présente étude est de vérifier si la profondeur de la zone de préférences thermiques du maquereau bleu, qui est associée à l'isotherme de 8 °C, avait augmenté au cours des dernières années.

Le Plateau madelinien (Figure 1) est caractérisé par un cycle saisonnier de la température qui passe par une couche mélangée près du point de congélation sur presque toute la colonne d'eau en hiver (Galbraith 2006) à un maximum à la surface en août de près de 18 °C lorsque moyenné sur toute la région et tout le mois (Galbraith *et al.* 2013). Des températures de moins de 1 °C persistent encore sur le fond en septembre, un vestige restant de l'hiver qui précède (Galbraith *et al.* 2013). Une tendance au réchauffement des eaux de surface de l'ordre de 0,9 °C sur 100 ans a été estimée sur l'ensemble du golfe entre 1873 et 2011, avec 9 des 20 années les plus chaudes de la série qui se sont produites durant les 20 dernières années (Galbraith *et al.* 2012). Il est donc pertinent de s'attarder à l'évolution de l'habitat thermique favorable au maquereau ($T > 8$ °C) en début d'été durant les dernières décennies.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données de température de l'eau proviennent de profils de température et salinité obtenus lors d'un relevé annuel réalisé en juin sur le Plateau madelinien pour l'évaluation du stock de maquereau. Ce relevé est, depuis quelques années, fusionné avec un relevé du golfe du Saint-Laurent conduit dans le cadre du Programme de Monitoring de la Zone Atlantique (PMZA; Therriault *et al.* 1998). Des profils sont aussi obtenus en septembre dans le cadre d'un relevé annuel multidisciplinaire pour l'évaluation des stocks de poissons de fond et de la crevette nordique.

La température de surface augmente rapidement en juin, car cette période est à mi-temps entre le minimum hivernal du cycle annuel et son maximum au début du mois d'août. Pour ne pas introduire un biais lorsque le relevé est effectué plus tard ou plus tôt d'une année à l'autre, notre première étape consiste à ajuster les profils de température comme s'ils avaient tous été mesurés le 15 juin en utilisant un taux moyen de réchauffement temporel. Le réchauffement temporel est estimé à partir de profils de température et salinité de la station de Vallée de Shediac du PMZA (Figure 1), typiquement visitée chaque mois durant la saison estivale depuis 1999, et pour laquelle l'évolution de la température estivale sur cette période est présentée à la Figure 2. La température est d'abord interpolée à chaque mètre de la colonne d'eau pour chacun des profils. Le taux de réchauffement temporel printanier est ensuite estimé pour chaque mètre, séparément pour chaque année, en utilisant une régression linéaire. Seules les régressions linéaires ayant un $R^2 > 0,7$ et des pentes statistiquement différentes de zéro (les intervalles de confiance de 95% n'incluent pas la pente nulle) sont ensuite conservées pour le calcul du taux de réchauffement moyen de toutes les années pour chaque mètre de profondeur. La Figure 3 montre des exemples pour deux profondeurs des observations de température et des régressions linéaires annuelles obtenues. Le taux de réchauffement moyen (1999-2013) entre les mois de mai et de juillet est montré à la Figure 4 en fonction de la profondeur. Celui-ci est ensuite simplifié par une fonction par laquelle le taux de réchauffement serait de 18,4 °C sur 100 jours à la surface, décroissant linéairement jusqu'à 2,15 °C sur 100 jours à 50 m, puis décroissant linéairement jusqu'à 1,15 °C par 100 jours à 82 m, et constant par la suite.

Les profils de température des relevés de juin sont ensuite ajustés pour estimer la température à chaque profondeur pour le 15 juin, soit en augmentant les températures prises avant le 15 juin ou en réduisant celles prises après en utilisant le taux moyen de réchauffement calculé ci-haut. Comme la profondeur de l'isotherme de 8 °C semble être relativement stable durant le mois de septembre (Figure 2), aucun ajustement n'est apporté pour les températures du relevé du mois de septembre. Pour chaque relevé, la température (ajustée, pour le cas du mois de juin) est ensuite spatialement interpolée sur une grille de 2 km pour chaque mètre de profondeur, produisant ainsi une interpolation 3D complète avec toutes les couches de 1 m. La profondeur à laquelle le seuil de 8 °C est atteint est calculée pour chaque point des grilles annuelles de juin et de septembre. Des exemples pour les mois de juin 1967 (extrême froid), 2003 et 2012 (extrême chaud) sont illustrés à la Figure 5.

3. RÉSULTATS

Durant le réchauffement printanier à la station de la Vallée de Shediac, l'isotherme de 8 °C apparaît assez brusquement sur une couche mélangée qui peut dépasser 10 m de profondeur (Figure 2), et s'approfondit durant l'été jusqu'en septembre ou octobre. Sa disparition soudaine est causée par l'homogénéisation de la couche de surface par le mélange vertical en automne, et de la température de cette couche mélangée qui descend progressivement pour passer très rapidement sous le seuil de 8 °C sur toute la couche (Figure 2).

La variabilité interannuelle du taux de réchauffement printanier de la colonne d'eau est relativement faible près de la surface et près du fond (Figures 3 et 4). La variabilité est plus grande entre 15 et 52 m, et ce phénomène est probablement associé à la variabilité interannuelle de l'épaisseur de la couche mélangée. Seulement une année de données contribue à établir la plupart des taux de réchauffement entre les profondeurs de 34 et 47 m. Comme nous nous attardons ici à l'évolution interannuelle des températures des eaux près de la surface, l'ajustement fait en utilisant un taux de réchauffement moyen pour chaque profondeur devrait donc être adéquat.

Les profondeurs à laquelle l'isotherme de 8 °C sont atteintes au 15 juin (p. ex. cartes de 1967, 2003 et 2012 à la Figure 5) sont ensuite moyennées à l'intérieur de deux régions, soit le Plateau madelinien est et ouest, tel qu'illustré à la Figure 1. Les séries temporelles des moyennes spatiales faites sur les deux régions de la profondeur à laquelle l'isotherme de 8 °C est atteinte pour les mois de juin et septembre sont illustrées à la Figure 6. En général, en juin la partie ouest du Plateau madelinien est plus chaude, avec des profondeurs de l'isotherme plus grandes, que la partie est. Il y a une tendance à l'augmentation avec les années de la profondeur de l'isotherme de 8 °C en juin dans les deux régions, mais plus grande du côté ouest. Ceci pourrait être associé à l'augmentation de la température maximale atteinte, à un réchauffement printanier hâtif, ou à des effets associés à la variabilité de la stratification et de l'épaisseur de la couche mélangée; nous n'avons pas examiné les causes. La profondeur est passée d'environ 7-8 m dans les années 1960 (avec des valeurs aussi faibles que 2 m) jusqu'à environ 12 m dans les années 2010. Lors du cas extrême de 2012, l'isotherme de 8 °C atteignait en moyenne 15 m dans les deux régions (Figure 6), mais dépassait 15 m sur de grandes superficies (Figure 5C).

À une position choisie du côté est du Plateau, soit 47° 30'N 063° 15'O, la Figure 7 montre les profils verticaux de la température interpolée au 15 juin 1967, 2003 et 2012. Les extrêmes froids (1967) et chaud (2012) présents au début et à la fin de la série temporelle y sont représentés. Au 15 juin 1967, les eaux de surface avaient à peine atteint 8 °C, tandis que même si la température de surface était similaire en 2003 et 2012, la profondeur à laquelle l'isotherme de

8 °C est atteinte passe de 11 m en 2003 à 19 m en 2012 à cause de la plus grande profondeur de la thermocline et de la couche mélangée de surface.

La variabilité interannuelle de la profondeur de l'isotherme de 8 °C ne démontre plus de tendance à long terme ni de disparité est-ouest plus tard dans la saison, en septembre (Figure 6), alors que cette isotherme est près de la profondeur maximale atteinte durant l'année (Figure 2). De plus, les conditions observées en juin ne sont pas de bons indicateurs des observations réalisées en septembre. Par exemple, les profils de température de juin de la station fictive ne montrent pas de correspondance avec la profondeur de l'isotherme de 8 °C en septembre (Figure 7). Bien que les eaux de surface atteignent des températures record en septembre 2012, l'épaisseur de la thermocline est demeurée sensiblement la même à cet endroit qu'en juin, et l'isotherme de 8 °C a même légèrement monté dans la colonne d'eau. Par contre, en 2003 la thermocline s'est approfondie considérablement, ce qui est probablement une situation plus près de la normale (Figure 7). En effet, moyennée sur les deux régions, l'isotherme de 8 °C est toujours plus profonde en septembre qu'à la mi-juin, et ce pour toutes les années (Figure 6).

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Bien que l'ajustement de la température pour recentrer les données au 15 juin soit plus grand à faible profondeur qu'à plus grande profondeur, la variabilité interannuelle du taux de réchauffement est relativement faible pour les premiers 15 m de la colonne d'eau (Figure 4). Or, l'isotherme de 8 °C dépasse tout juste cette limite en juin durant les années les plus chaudes (p. ex. 1980, 1987, 1999 et 2012 sur la Figure 6). La méthode est donc appropriée pour cette étude. Par contre, la représentativité spatiale de la station de la Vallée de Shediac pour tout le Plateau n'est certainement pas parfaite. Par exemple Ouellet *et al.* (2003) ont trouvé une échelle de corrélation spatiale de 95 km pour les températures de surface à cette station. Ce site est par contre le seul pour lequel nous avons des données à haute fréquence sur le Plateau.

Une fois ajustées au 15 juin de chaque année, les relevés de température du mois de juin sur le Plateau madelinien indiquent que l'isotherme de 8 °C s'est non seulement approfondi entre 1960 et 2014, mais que du côté ouest du Plateau les trois années de plus faibles profondeurs (les plus froides) étaient toutes avant 1970, tandis que les années de fortes profondeurs étaient plus tard en 1980, 1987 et 2012. L'isotherme de 8 °C de mi-juin qui a été la plus profonde sur l'ensemble du Plateau a été observée en 2012. En opposition à cette tendance, l'isotherme de 8 °C de juin était peu profonde durant la période de 1988 à 1997, une période froide avec des hivers rigoureux, une couche intermédiaire froide estivale épaisse et froide et des eaux froides sur le fond du Plateau madelinien en juin (Galbraith *et al.* 2013). La faible profondeur de l'isotherme de 8 °C en juin durant ces années pourrait donc être associée à une couche intermédiaire froide plus volumineuse ou par un réchauffement printanier tardif.

Ces résultats tendent à confirmer les observations récentes des pêcheurs de la baie des Chaleurs. Ces derniers mentionnent aussi que les patrons de migration et de distribution du maquereau ont grandement changé au cours des dernières années. L'arrivée de l'espèce sur les lieux de pêche n'est plus aussi prédictible qu'elle ne l'était dans le passé. Ces changements s'observent aussi à partir des statistiques de pêche qui démontrent clairement depuis le début des années 2000 un déplacement progressif des plus importantes captures du plateau néo-écossais et du sud du golfe du Saint-Laurent vers le nord du golfe et les côtes ouest et est de Terre-Neuve (Grégoire *et al.* 2014).

En plus de ces changements de distribution, il est important de rappeler que l'abondance de la population de maquereau qui se reproduit dans le golfe du Saint-Laurent est à son plus bas

niveau jamais observé depuis que l'on tient des statistiques sur l'espèce (1960) et que le stock est clairement en zone critique (MPO 2014). Cet effondrement du stock peut aussi expliquer certains des changements récents observés par l'Industrie.

Le maquereau est une espèce fourragère clef de l'écosystème du golfe du Saint-Laurent (Savenkoff *et al.* 2005). Les changements récents de distribution de l'espèce pourraient avoir un impact important sur ses prédateurs qui à leur tour pourraient modifier leurs déplacements, comme démontré pour le thon rouge par Vanderlaan *et al.* (2014). De plus, les changements de profondeur de l'isotherme de 8 °C pourraient affecter des espèces comme le fou de Bassan (*Sula bassana*) qui s'alimente en effectuant des plongées. Par exemple, à l'Île Bonaventure, la profondeur moyenne maximale des plongées est de 8,6 m ($\pm 1,1$) (Garthe *et al.* 2007) par rapport à l'isotherme de 8 °C qui, comme le démontre la présente étude, a atteint un maximum en juin de 15 m en 2012. L'alimentation de cette espèce pourrait donc être affectée compte tenu d'une présence possible du maquereau à de plus grandes profondeurs et aussi à des endroits plus éloignés comme le démontrent les statistiques de pêche.

5. REMERCIEMENTS

De très sincères remerciements sont exprimés à l'égard de Joël Chassé et Martin Castonguay pour la révision du document.

6. RÉFÉRENCES

- Astthorsson, O. S., Valdimarsson, H., Gudmundsdottir, A. and Óskarsson, G. J. 2012. Climate-related variations in the occurrence and distribution of mackerel (*Scomber scombrus*) in Icelandic waters. *ICES J. Mar. Sci.* 697: 1289–1297.
- Bigelow, H. B. and Schroeder, W. C. 1953. Fishes of the Gulf of Maine. *Fish. Bull. Fish Wildl. Serv.* 74: 1–577.
- Bruneau, B. and Grégoire, F. 2011. Spatial distribution study of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) and Capelin (*Mallotus villosus*) abundance data from winter groundfish surveys in NAFO Divisions 4VW using generalized additive models. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2930: vi + 21 pp.
- Castonguay, M., Rose, G. A. and Leggett, W. C. 1992. Onshore movements of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) in the northern Gulf of St. Lawrence: associations with wind-forced advections of warmed surface waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 22322241.
- D'Amours, D. and Castonguay, M. 1992. Spring migrations of Atlantic mackerel *Scomber scombrus* in relation to water temperature through Cabot Strait (Gulf of St. Lawrence). *Env. Biol. Fish.* 34: 393–399.
- Galbraith, P. S. 2006. Winter water masses in the Gulf of St. Lawrence. *J. Geophys. Res.*, 111, C06022, doi:10.1029/2005JC003159.
- Galbraith P. S., Larouche, P., Chassé, J. and Petrie, B. 2012. Sea-surface temperature in relation to air temperature in the Gulf of St. Lawrence: interdecadal variability and long term trends. *Deep Sea Res. II*, V77–80, 10–20.
- Galbraith, P. S., Chassé, J., Larouche, P., Gilbert, D., Brickman, D., Pettigrew, B., Devine, L. and Lafleur, C. 2013. [Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2012](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/026. v + 89 p.

-
- Garthe, S., Montevecchi, W. A., Chapdelaine, G., Rail, J.-F. and Hedd, A. 2007. Contrasting foraging tactics by northern gannets (*Sula bassana*) breeding in different oceanographic domains with different prey fields. *Mar. Biol.* 151: 687–694.
- Grégoire, F. 2006. [Distribution verticale des captures de maquereau bleu \(*Scomber scombrus* L.\) au chalut pélagique en relation avec la température de l'eau](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2006/097. 44 pp.
- Grégoire, F., Girard, L. et Boudreau, M. 2014. [La pêche au maquereau bleu \(*Scomber scombrus* L.\) dans les sous-régions 3 et 4 de l'OPANO en 2013](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2014/077. vi + 119 p.
- ICES. 2008. Report of the planning group on Northeast Atlantic pelagic ecosystem surveys (PGNAPES), 19–22 August 2008, Hirsthals, Denmark. ICES CM 2008/RMC: 05. 87 pp.
- Jacobsen, J. A. 2008. Wide distribution of mackerel. Working document to ICES Working Group on Widely Distributed Stocks in September 2008. ICES Headquarters Copenhagen. 691 pp.
- Jansen, T. and Gislason, H. 2011. Temperature affects the timing of spawning and migration of North Sea mackerel. *Cont. Shelf Res.* 31: 64–72.
- Jansen, T. and Gislason, H. 2013. Population structure of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*). *PLoS ONE* 8(5): e64744. doi:10.1371/journal.pone.0064744.
- Jansen, T., Campbell, A., Kelly, C., Hátún, H. and Payne, M. R. 2012. Migration and fisheries of North East Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) in autumn and winter. *PLoS ONE* 7(12): e51541. doi:10.1371/journal.pone.0051541.
- Molloy, J. 2004. The Irish mackerel fishery and the making of an industry. Marine Institute. Galway. 245 pp.
- Mountain, D. G. and Murawski, S. A. 1992. Variation in the distribution of fish stocks on the northeast continental shelf in relation to their environment, 1980–1989. *ICES Mar. Sci. Sym.* 195: 424–432.
- MPO. 2014. [Évaluation du stock de maquereau bleu du nord-ouest de l'Atlantique \(sous-régions 3 et 4\) en 2013](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2014/030.
- Murawski, S. A. 1993. Climate change and marine fish distribution: forecasting from historical analogy. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 122: 647–658.
- Nøttestad, L. 2008. Mapping the northerly distribution of NEA mackerel (*Scomber scombrus*) in summer 2008. Working document to ICES Working Group on Widely Distributed Stocks in September 2008. ICES Headquarters Copenhagen. 691 pp.
- Olla, B. L., Studhome, A. L., Bejda, A. J., Samet, C. and Martin, A. D. 1975. The effect of temperature on the behaviour of marine fishes: a comparison among Atlantic mackerel *Scomber scombrus*, bluefish *Pomatomus saltatrix*, and tautog *Tautoga onitis*. In: Proceedings of combined effects of radioactive chemical and thermal releases to the environment. International Atomic Energy Agency. Vienna. pp 299–308.
- Olla, B. L., Bejda, A. J. and Stuholme, A. L. 1976. Swimming speeds of Atlantic mackerel, *Scomber scombrus* L, under laboratory conditions: relation to capture by trawling. *ICNAF Res. Doc.* 76/XII/143. 6 pp.
- Ouellet, M., Petrie, B. and Chassé, J. 2003. Temporal and spatial scales of sea-surface temperature variability in Canadian Atlantic waters. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 228: v + 30 p.
-

-
- Overholtz, W. J. and Anderson, E. D. 1976. Relationship between mackerel catches, water temperature, and vessel velocity during USA spring bottom trawl surveys in SA 5-6. ICNAF Res. Doc. 76/XII/170. 7 pp.
- Overholtz, W. J., Armstrong, R. S., Mountain, D. G. and Tercerio, M. 1991. Factors influencing spring distribution, availability, and recreational catch of Atlantic mackerel ('*Scomber scombrus*') in the Middle Atlantic and Southern New England regions. Reports NTIS Order No.: PB92-160209/GAR.NOAA-TM-NMFS-F/NEC-85.
- Overholtz, W. J., Hare, J. A., Keith, C. M. 2011. Impacts of inter-annual environmental forcing and climate change on the distribution of Atlantic mackerel on the U. S. Northeast Continental Shelf. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*. 3: 219–232.
- Parsons, L. S. 1970. Northern range extension of the Atlantic mackerel, *Scomber scombrus*, to Black Island, Labrador. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 27: 610–613.
- Radlinski, M. K., Sundermeyer, M. A., Bisagni, J. J. and Cadrin, S. X. 2013. Spatial and temporal distribution of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) along the northeast coast of United States, 1985–1999. *ICES. J. Mar. Sci.* 70: 1151–1161.
- Reid, D. G., Turrell, W. R., Walsh, M. and Corten, A. 1997. Cross-shelf processes north of Scotland in relation to the southerly migration of Western mackerel. *ICES J. Mar. Sci.* 54: 168–178.
- Savenkoff, C., Grégoire, F., Castonguay, M., Swain, D. P., Chabot, D. and Hanson, J. M. 2005. Main prey and predators of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus* L.) in the northern and southern Gulf of St. Lawrence during the mid-1980s, mid-1990s, and early 2000s. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2619: v+29 pp.
- Sette, O. E. 1950. Biology of the Atlantic mackerel (*Scomber scombrus* L.). Part 2: Migration and habits. *U.S. Wild. Serv., Fish. Bull.* 49 (51): 251–358.
- Studholme, A. L., Packer, D. B., Berrien, P. L., Johnson, D. L., Zetlin, C. A. and Morse, W. W. 1999. Essential fish habitat source document: Atlantic mackerel, *Scomber scombrus*, Life history and habitat characteristics. NOAA Tech. Memo. NMFS-NE-141.
- Therriault, J.-C., Petrie, B., Pépin, P., Gagnon, J., Gregory, D., Helbig, J., Herman, A., Lefavre, D., Mitchell, M., Pelchat, B., Runge, J. and Sameoto, D. 1998. Proposal for a Northwest Atlantic zonal monitoring program. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.*, 194: vii + 57 pp.
- Vanderlaan, A. S. M., Hanke, A., Chassé, J. and Neilson, J. D. 2014. Environmental influences on Atlantic bluefin tuna catch per unit effort in the southern Gulf of St. Lawrence. *Fish. Oceanogr.* 23:1, 83–100.

FIGURES

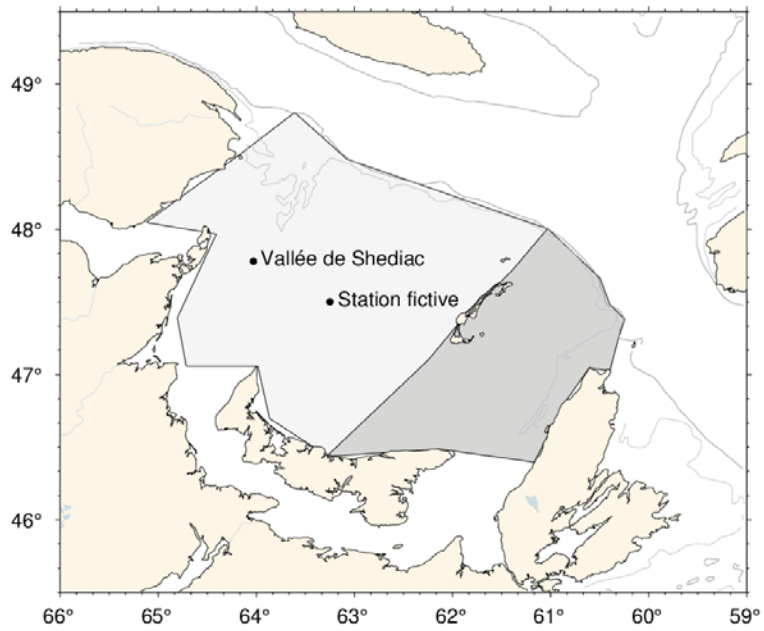


Figure 1. Les régions est et ouest du Plateau madelinien utilisées pour les moyennes spatiales. La station du PMZA Vallée de Shediac est indiquée ainsi qu'une station fictive à la position 47° 30'N 063° 15'O.

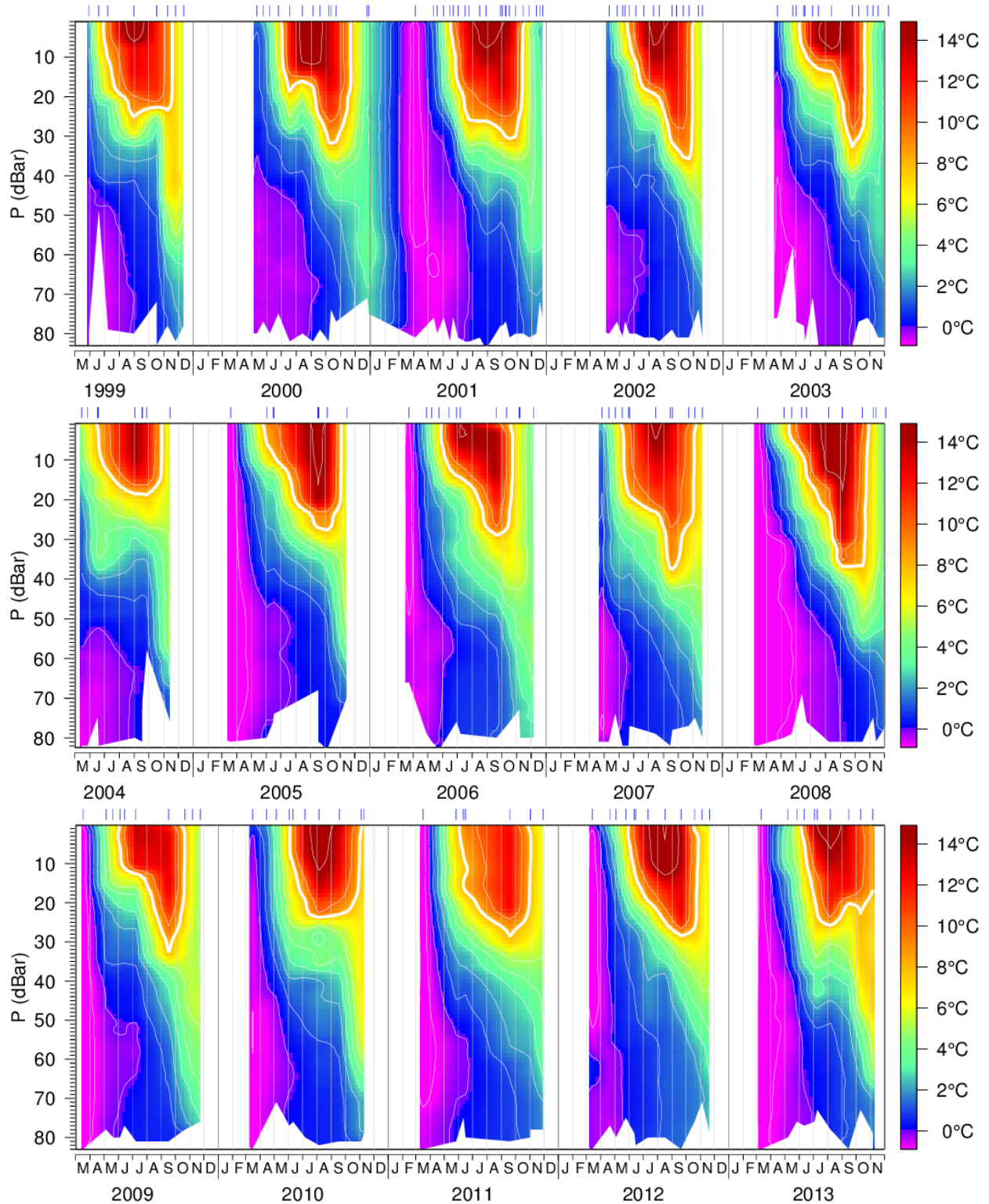


Figure 2. Évolution temporelle de la température à la station PMZA Vallée de Shediac entre 1999 et 2013. Les lignes en bleu au-dessus des panneaux représentent les échantillonnages de profils de température. Le contour en trait blanc et large représente l'isotherme de 8 °C.

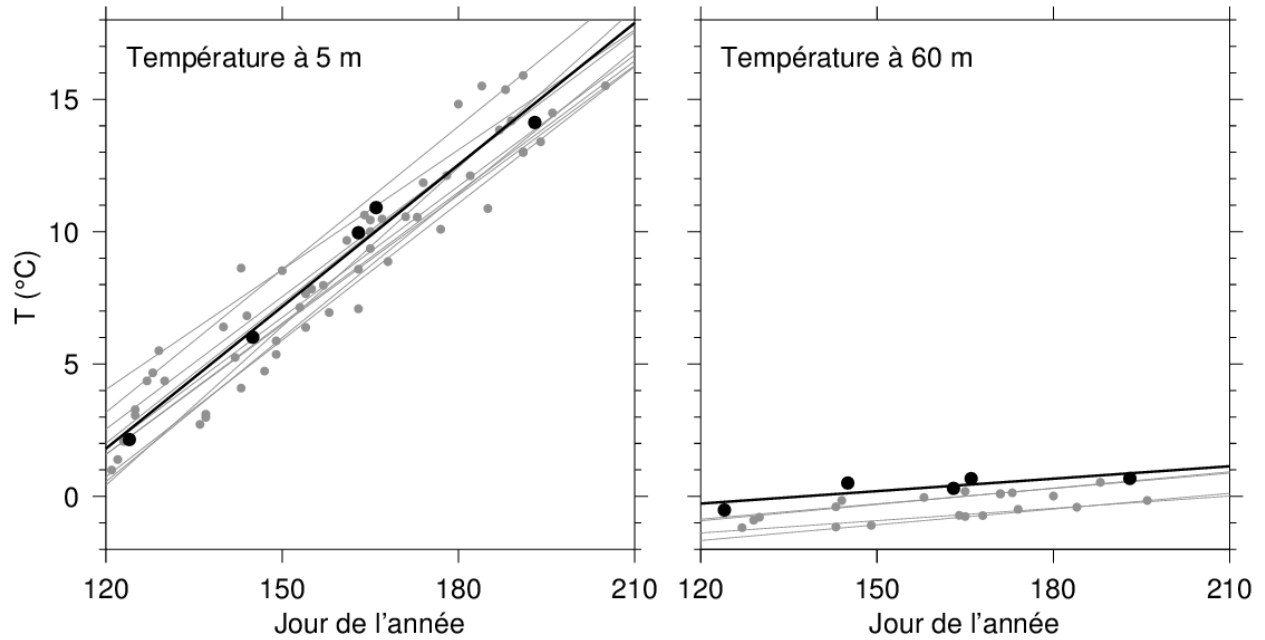


Figure 3. Évolution temporelle de la température à 5 m (gauche) et 60 m (droite) à la station PMZA Vallée de Shediac durant les mois de mai à juillet, pour chaque année entre 1999 et 2013 (points gris). Le taux de réchauffement pour chaque saison est estimé par régression linéaire (lignes grises). Pour le calcul du taux de réchauffement moyen, seules sont conservées les régressions avec $R^2 > 0.7$ et des intervalles de confiance sur la pente qui n'incluent pas la pente nulle. Les données et régressions pour 2012 sont indiquées en traits foncés.

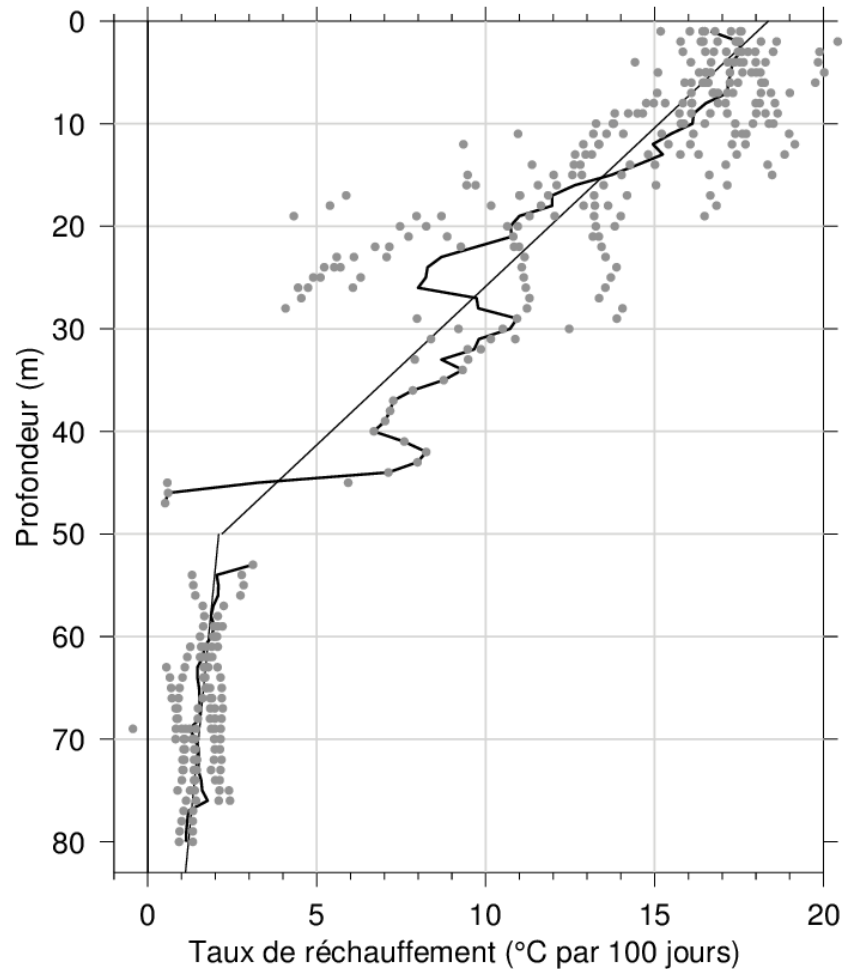


Figure 4. Taux de réchauffement moyen entre les mois de mai à juillet 1999-2013 à la station PMZA Vallée de Shédiac (trait foncé). Les valeurs annuelles sont indiquées par des points gris. Aucune des régressions linéaires réalisées sur les données temporelles entre 48 et 52 m n'a donné un taux de réchauffement statistiquement différent de zéro. La fonction simplifiée choisie pour représenter la décroissance linéaire du taux de réchauffement selon la profondeur est indiquée par deux lignes droites entre la surface et 50 m de profondeur, et entre 50 m et 82 m.

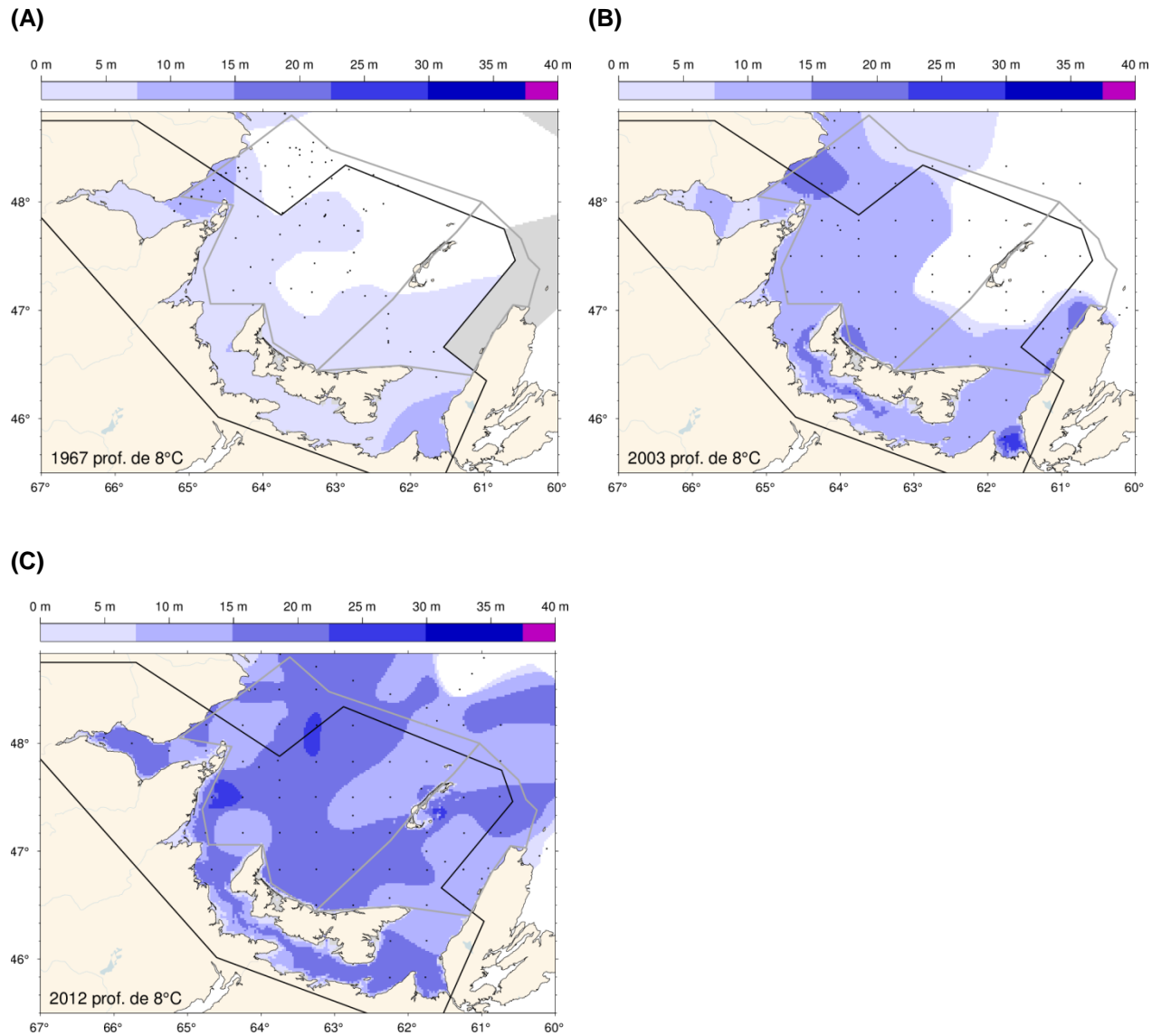


Figure 5. Cartes de la distribution spatiale de l'isotherme de 8 °C estimée au 15 juin 1967 (A), 2003 (B) et 2012 (C). La ligne noire représente la région du Plateau madelinien utilisée dans les rapports annuels des conditions océanographiques du golfe (p.ex. Galbraith et al. 2013); les régions est et ouest utilisées ici s'étendent plus loin au large et excluent les aires moins profondes.

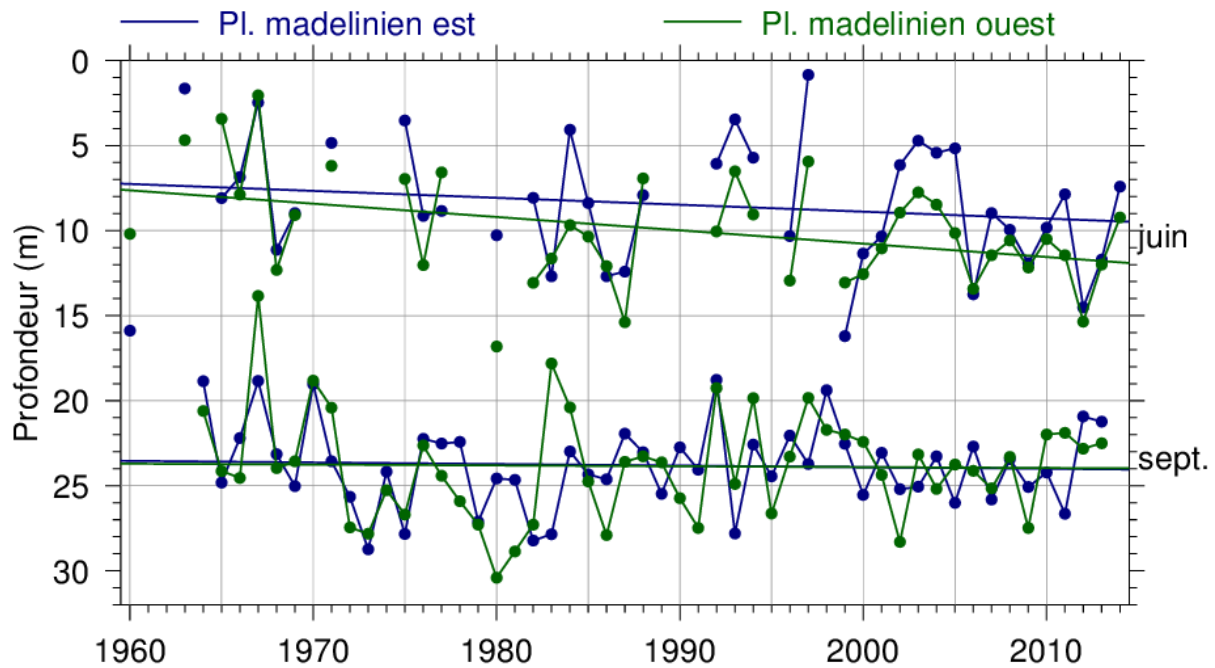


Figure 6. Profondeur de l'isotherme de 8 °C moyennée sur les régions est et ouest du Plateau madelinien (Figure 1) à partir des grilles interpolées de température au 15 juin 1960-2014 ainsi que celles des relevés de septembre 1964-2013.

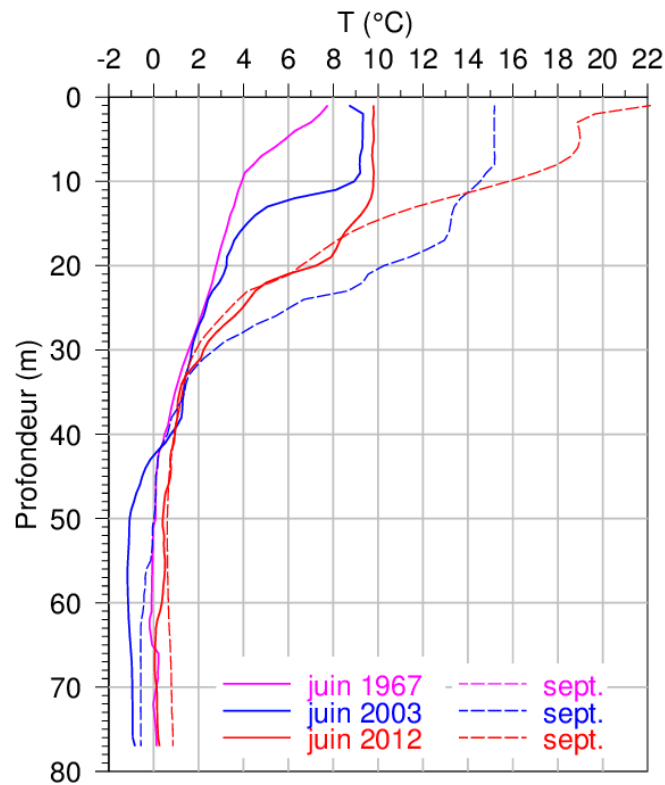


Figure 7. Profils verticaux de la température interpolée à la position 47° 30'N 063° 15'O au 15 juin et en septembre 1967, 2003 et 2012.