Les prévisions de l'état de l'océan et leur application potentielle aux stocks de thonidés

Jason R. Hartog[1], J. Paige Eveson[2], Thomas Moore[2], Kylie L. Scales[3], Toby Patterson[2], Shane Baylis[2], Bernadette Sloyan[2], Ash Williams[2], Claire M. Spillman[3], Grant Smith[4] et Alistair J. Hobday[2]

Contexte

Les espèces d'intérêt commercial ciblées par les palangriers australiens (thon obèse, *Thunnus obesus* ; thon jaune, *Thunnus albacares* ; germon, *Thunnus alalunga* ; marlin rayé, *Kajikia audax* ; et espadon, *Xiphias gladius*) sont présentes dans une vaste aire géographique du Pacifique Sud-Ouest, mais on connaît mal l'influence de l'état de la mer et des variations océaniques sur leur répartition, leur abondance et leur phénologie. La Fisheries Research and Development Corporation (FRDC) et l'Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO) ont financé un projet de recherche, terminé récemment, qui visait à étudier l'influence des conditions océaniques sur la répartition de ces espèces.

L'une des principales conclusions de ce projet est que les variables d'état de l'océan subsuperficiel jouent un rôle important dans la répartition des prises. Les travaux de recherche menés précédemment portaient sur des variables de surface, telles que la température de surface de la mer, qui sont reprises depuis de nombreuses années dans les modèles de prévisions saisonnières et les modèles de système Terre, à l'image de ceux utilisés dans le Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Cependant, les paramètres de subsurface sont de plus en plus souvent modélisés et se révèlent importants dans la prévision de la répartition des espèces cibles.

Réanalyse des conditions passées

La Commission des pêches du Pacifique occidental et central (WCPFC) et l'Office australien de gestion de la pêche (AFMA) ont fourni des données sur les prises et l'effort de pêche pour les cinq espèces cibles dans 13 États et Territoires de la région du Pacifique Sud-Ouest (Îles Cook, Norfolk, Nouvelle-Calédonie, Nouvelle-Zélande, Polynésie française, Îles Salomon, Samoa, Tokelau, Tonga, Tuvalu, Vanuatu ; Australie et Fidji). Sur la base de ces données, toute une série de techniques de modélisation a été explorée pour évaluer l'influence de variables d'état de l'océan sur la variabilité des taux de prise. Ce sont les arbres de régression amplifiés (ARA) qui ont été jugés les plus efficaces ; la FRDC publiera prochainement un rapport expliquant en détail cette méthode de modélisation (https://www.frdc.com.au/project/2017-004), et un projet d'article scientifique est en préparation (Scales *et al.*, article en préparation). Les données relatives aux prises et à l'effort de pêche ont été compilées sur une base mensuelle et reportées sur un maillage composé de carrés de 0,25 degré de côté (latitude/longitude) pour la période 2008–2020. Des ARA ont été générés pour chacune des cinq espèces cibles, afin de modéliser les prises observées mensuellement au sein de chaque maille en appliquant la loi de Poisson. Le nombre d'hameçons a été défini comme offset et les variables océaniques choisies ont été intégrées comme prédicteurs. Les données relatives à la période 2008–2015 ont été employées pour entraîner les modèles ARA, et celles concernant la période 2016–2020 ont été utilisées à des fins d'essais et de validation.

Au cours du projet, deux produits de réanalyse différents ont été utilisés : le système de réanalyse océanique CAFE60 de la CSIRO (O'Kane *et al.* 2021a, O'Kane *et al.* 2021b) et le système de réanalyse océanique ACCESS-S du Bureau de météorologie australien (Australian Community Climate and Earth-System Simulator-Seasonal). Ces produits sont intéressants, car toutes les variables d'état de l'océan sont reprises dans le même maillage spatial et les systèmes d'assimilation des données permettent d'obtenir des valeurs pour tous les lieux à tous les instants au cours de la période historique. Étant donné qu'ACCESS-S est un service opérationnel fourni par le Bureau de météorologie australien, le présent article se concentre sur ce système de réanalyse et de prévision.

ACCESS-S

ACCESS-S est le système opérationnel de prévisions saisonnières couplé océan-atmosphère du Bureau de météorologie australien. ACCESS-S1 (version 1) (Hudson *et al.* 2017) a été mis en place en août 2018, puis le système a été amélioré, avec la conception d'ACCESS-S2 (version 2) (Wedd *et al.*, article soumis pour publication) en octobre 2021. ACCESS-S2 est le système utilisé dans la présente étude. Le modèle océanique est « *eddy-permitting* » (intégrant l'effet des tourbillons) avec une résolution de 0,25 degré et 75 niveaux verticaux, la couche supérieure (1 mètre de profondeur) représentant la température à la surface de la mer. Les conditions initiales du modèle océanique sont définies à l'aide d'un système d'assimilation des données faiblement couplé, qui assimile les profils de température *in situ* et les observations de salinité (Wedd *et al.*, article soumis pour publication). La réanalyse des données océaniques maillées ainsi obtenue est utilisée dans cette étude pour produire des données d'entrée sur les paramètres de subsurface, qui servent à entraîner les modèles ARA.

Sélection des régions

Le domaine du Pacifique Sud-Ouest a été divisé en quatre sous-domaines régionaux, sur la base de la moyenne temporelle du rapport de l'énergie cinétique tourbillonnaire

[1] CSIRO Oceans and Atmosphere, Hobart, Australie. Jason.Hartog@csiro.au
[2] CSIRO Oceans and Atmosphere, Hobart, Australie.
[3] Global-Change Ecology Research Group, Université de la Sunshine Coast, Queensland, Australie.
[4] Bureau de météorologie, Melbourne, Victoria, Australie.

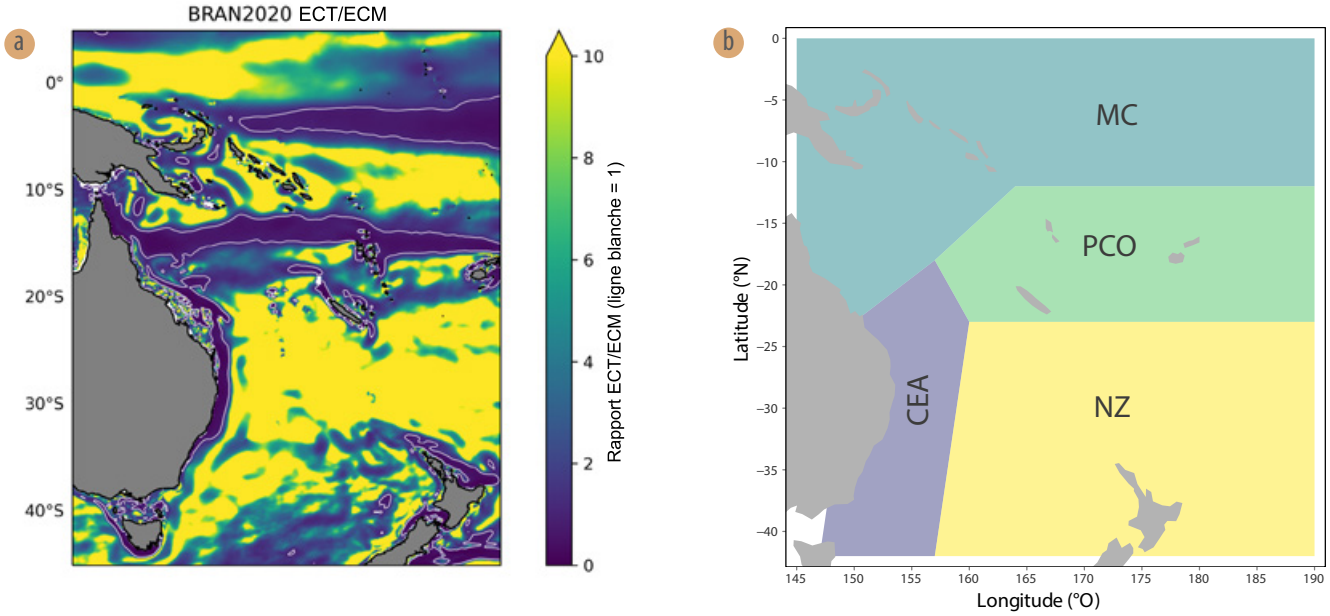

Figure 1 – a) Rapport ECT/ECM ; et b) les quatre régions définies pour l'analyse. CEA = région dominée par le courant est-australien ; MC = région équatoriale et de la mer de Corail ; PCO = Pacifique Centre-Ouest ; et NZ = Nouvelle-Zélande.

sur l'énergie cinétique moyenne (ECT/ECM, Figure 1a). Ce résultat a été obtenu à l'aide de BRAN2020, un système de réanalyse de l'océan quasi mondial dit « *eddy-resolving* » (une partie significative du spectre des tourbillons est résolue) (Chamberlain *et al.* 2021), puis utilisé pour définir les limites des régions dominées par des tourbillons méso-échelle ou des courants moyens.

Quatre régions principales ont été définies en combinant l'analyse ECT/ECM à un découpage géographique des pays de la WCPFC. Ces régions sont désignées comme suit dans le présent article : la région dominée par le courant est-australien (CEA), la région équatoriale et de la mer de Corail (MC), le Pacifique Centre-Ouest (PCO) et la Nouvelle-Zélande (NZ). Ces régions sont représentées dans la Figure 1b.

Résultats

L'ensemble des résultats de cette modélisation figureront dans le rapport que s'apprête à publier la FRDC, mais afin d'illustrer la démarche choisie dans le cadre de la présente étude, le cas du thon jaune est examiné ici pour l'ensemble du domaine et les quatre sous-régions. Bien que le pouvoir prédictif des modèles soit généralement faible (avec des valeurs maximales pour R^2 établies à 0,45), il reste intéressant de se demander quelles sont les variables océaniques qui expliquent le mieux la déviance dans les captures par unité d'effort (CPUE) pour chaque espèce et région. Les variables les plus influentes ne sont pas du tout les mêmes d'une région à l'autre (Figure 2). Pour le thon jaune, la salinité de surface (SS), l'énergie

Tableau 1. Liste des variables océaniques disponibles à partir des données de réanalyse d'ACCESS-S2 (produits directs et dérivés) utilisées dans les ARA. Données bathymétriques tirées de TerrainBase (https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gravity/1999/document/html/tbase.html).

Variable	Description
ECT300	Énergie cinétique tourbillonnaire – somme pondérée de 0 à 300 m
CT300	Contenu thermique de la couche supérieure (0-300 m)
PCM	Profondeur de la couche de mélange
HSM	Hauteur de la surface de la mer (corrigée)
SS	Salinité de surface
TSM	Température de surface de la mer
PT	Profondeur de la thermocline
T500	Température à 500 m
U100	Vitesse est-ouest à 100 m
V100	Vitesse nord-sud à 100 m
Bathy	Bathymétrie

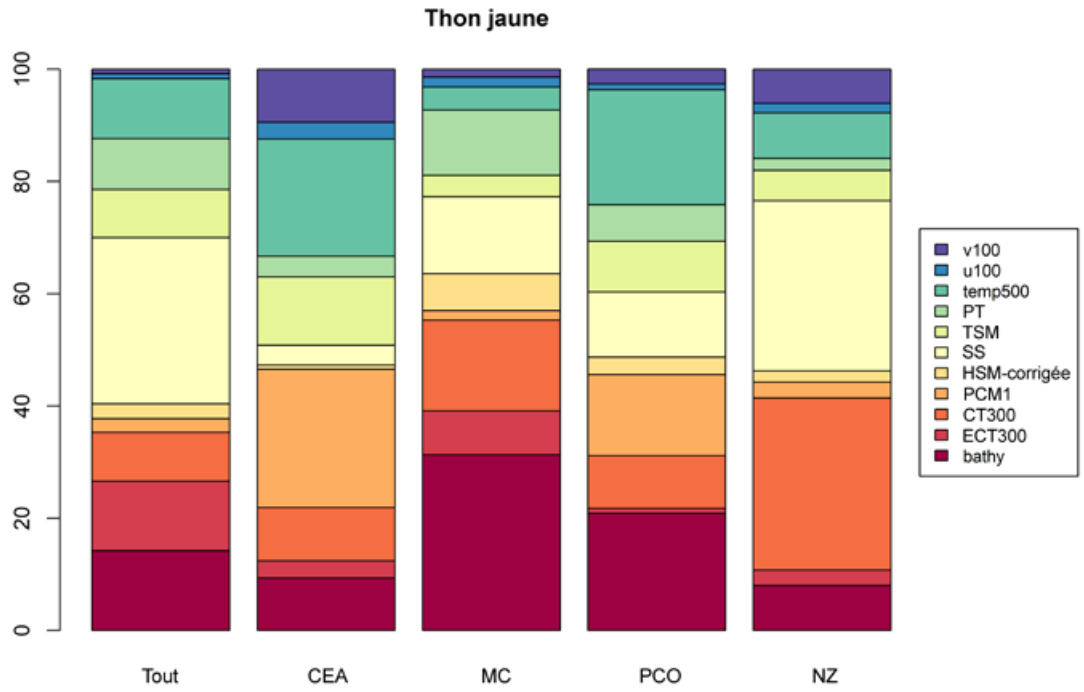

Figure 2. Contributions relatives de chaque variable océanique reprise dans les ARA pour le thon jaune, par région (Tout = l'ensemble du domaine ; CEA = région dominée par le courant est-australien ; MC = région équatoriale et de la mer de Corail ; PCO = Pacifique Centre-Ouest ; et NZ = Nouvelle-Zélande) (voir Figure 1b). Voir le Tableau 1 pour la définition des variables océaniques.

cinétique tourbillonnaire intégrée de 0 à 300 m de profondeur (ECT300) et la température à 500 m de profondeur (T500) sont les variables les plus influentes lorsque l'on considère l'ensemble du domaine. Par contre, dans la sous-région CEA, ce sont la profondeur de la couche de mélange (PCM), T500 et la température de surface de la mer (TSM) qui se sont révélés les meilleurs prédicteurs, ce qui démontre l'importance de tenir compte à la fois de la région et des variables de subsurface décrivant la structure de l'océan.

Prévisions de l'état de l'océan et de la répartition des prises

L'un des objectifs du projet était de déterminer s'il était possible de réaliser des prévisions de la répartition des cinq espèces principales pour l'Australie et des partenaires de la région à l'aide des modèles d'habitat élaborés dans le cadre de ce travail. Bien que les ARA modélisent les prises plutôt que

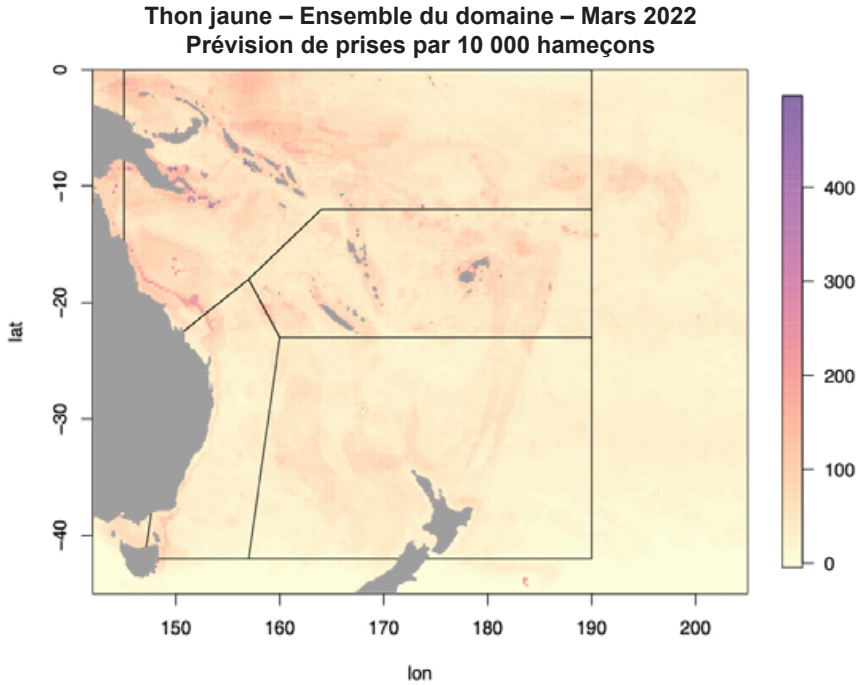

Figure 3. Exemple de carte illustrant les CPUE prévues pour le thon jaune dans le modèle portant sur l'ensemble du domaine en mars 2022, selon les prévisions réalisées avec ACCESS-S2, produites en janvier 2022.

l'abondance des poissons, ils peuvent tout de même être utilisés pour prévoir la répartition des prises plutôt que la répartition des poissons directement. Malheureusement, pour l'instant, les variables océaniques utilisées pour l'élaboration des modèles ARA avec ACCESS-S2 ne sont pas toutes disponibles sous la forme de prévisions temps-réel. Actuellement, quatre variables sont disponibles : la température de surface de la mer (TSM), la hauteur de la surface de la mer (HSM), le contenu thermique de la couche supérieure (0-300 m) (CT300) et la profondeur de la couche de mélange (PCM). Afin de pouvoir utiliser les ARA pour effectuer des prévisions, les modèles ont donc été réentraînés en utilisant uniquement ces quatre variables et des données bathymétriques. Un exemple de prévision des CPUE de thon jaune dans le modèle appliqué à l'ensemble de la région est donné dans la Figure 3.

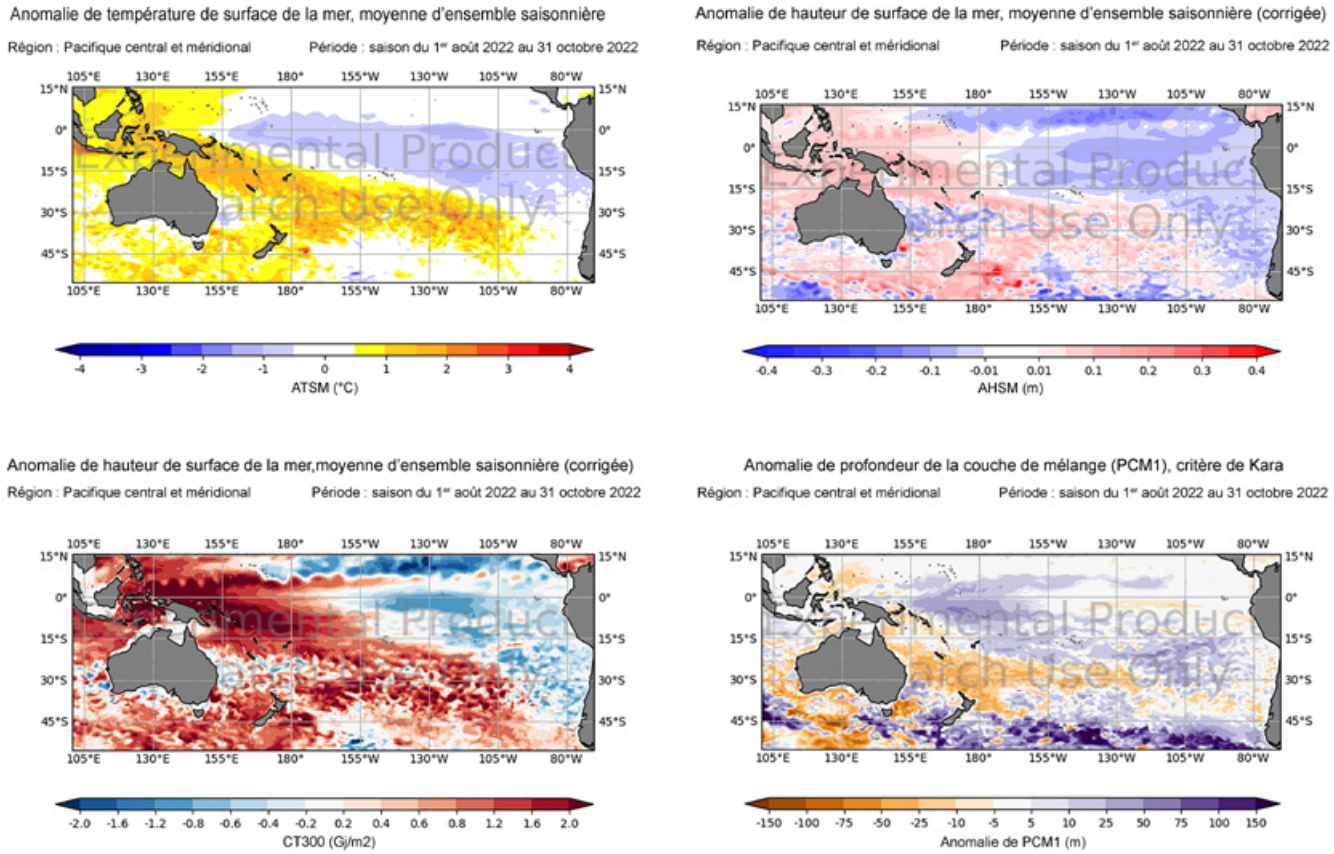

Figure 4. Exemple de prévisions expérimentales effectuées avec ACCESS-S concernant l'état de la surface et de la subsurface de l'océan pour la saison s'étalant d'août à octobre 2022. Chaque prévision se présente comme une anomalie (déviation par rapport à la moyenne à long terme) pour la variable illustrée et montre la moyenne d'ensemble (ME) des 99 passes de modèles.

Tableau 2. Portails et sites Web sur les prévisions réalisées à l'aide d'ACCESS-S.

Nom	URL
Programme océanien de soutien climat et océans (COSPPac)	http://oceanportal.spc.int/portal/app.html#climate
Perspectives obtenues à l'aide d'ACCESS-S pour le Pacifique et l'océan mondial et surveillance du climat océanien	http://access-s.clide.cloud/
Perspectives saisonnières de températures de l'océan pour l'Australie	http://www.bom.gov.au/oceanography/oceantemp/sst-outlook-map.shtml
Prévision des vagues de chaleur océaniques	https://research.csiro.au/cor/climate-impacts-adaptation/marine-heatwaves/dynamical-forecasting-of-marine-heatwaves/

Des prévisions océaniques opérationnelles réalisées à l'aide d'ACCESS-S sont publiées sur les portails Web repris dans le Tableau 2. Une page est par ailleurs consacrée à un projet expérimental de prévisions océaniques saisonnières en temps réel, en vue de la réalisation d'essais avec les partenaires et les clients du projet (voir les exemples fournis dans la Figure 4).

Autres applications

En parallèle des travaux présentés dans le présent article, nous avons appliqué des prévisions saisonnières à d'autres pêcheries thonières (Hobday *et al.* 2011 ; Eveson *et al.* 2015 ; http://www.cmar.csiro.au/gab-forecasts/index.html), ainsi qu'à l'élevage de crevettes et de saumons (Hobday *et al.* 2014 ; Spillman *et al.* 2015). De manière générale, les prévisions se sont révélées utiles jusqu'à trois mois, en fonction du lieu et du moment de l'année. Ces applications ont démontré que les prévisions effectuées au moyen d'un modèle dynamique offraient une solution viable pour la gestion des risques environnementaux auxquels sont exposés les secteurs de l'économie maritime dans un contexte d'évolution du climat (Hobday *et al.* 2018).

Remerciements

Nous remercions la Communauté du Pacifique (CPS) de nous avoir transmis des données sur les pêcheries du Pacifique occidental et central, ainsi que l'Office australien de gestion de la pêche (AFMA) qui nous a communiqué des données sur les pêcheries de thonidés et de poissons à rostre de la côte est de l'Australie. Nous remercions les membres du Tropical Tuna Resource Assessment Group ainsi que Simon Nicol, John Hampton et Patrick Lehodey de la CPS pour les informations qu'ils nous ont fournies sur les pêcheries.

Références

Chamberlain M.A., Oke P.R., Fiedler R.A.S., Beggs H.M., Brassington G.B. and Divakaran P. 2021. Next generation of Bluelink ocean reanalysis with multiscale data assimilation: BRAN2020, Earth System Science Data 13:5663–5688. https://doi.org/10.5194/essd-13-5663-2021

Eveson J.P., Hobday A.J., Hartog J.R., Spillman C.M. and Rough K.M. 2015. Seasonal forecasting of tuna habitat in the Great Australian Bight. Fisheries Research 170:39–49. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165783615001496

Hobday A.J., Hartog J.R., Spillman C.M. and Alves O. 2011. Seasonal forecasting of tuna habitat for dynamic spatial management. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 68:898–911.

Hobday A.J., Spillman C.M., Eveson J.P. and Hartog J.R. 2014. Seasonal forecasting for decision support in marine fisheries and aquaculture. Fisheries Oceanography. https://doi:10.1111/fog.12083

Hobday A.J., Spillman C.M., Eveson J.P., Hartog J.R., Zhang X., Brodie S. 2018. A framework for combining seasonal forecasts and climate projections to aid risk management for fisheries and aquaculture. Frontiers in Marine Science 5(137).

Hudson D., Alves O., Hendon H.H., Lim E., Liu, G., Luo J.-J., MacLachlan C., Marshall A.G., Shi L., Wang G., Wedd R., Young G., Zhao M. and Zhou X. 2017. ACCESS-S1: The new Bureau of Meteorology multi-week to seasonal prediction system. Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science 67:3(132–159). https://doi: 10.22499/3.6703.001

O'Kane T.J., Sandery P.A., Kitsios V., Sakov P., Chamberlain M.A., Collier M.A., Fiedler R., Moore T.S., Chapman C.C., Sloyan B.M., and Matear R.J. 2021. CAFE60v1: A 60-year large ensemble climate reanalysis. Part I: System design, model configuration, and data assimilation. Journal of Climate, 34(13):5153–5169.

O'Kane T.J., Sandery P.A., Kitsios V., Sakov P., Chamberlain M.A., Squire D.T., Collier M.A., Chapman C.C., Fiedler R., Harries D., Moore T.S., Richardson D., Risbey J.S., Schroeter B.J.E., Schroeter S., Sloyan B.M., Tozer C., Watterson I.G., Black A., Quinn C. and Matear R.J. 2021. CAFE60v1: A 60-year large ensemble climate reanalysis. Part II: Evaluation. Journal of Climate 34(13):5171–5194.

Scales, K.L., Moore, T.S., Sloyan, B., Spillman, C.M., Eveson, J.P., Patterson, T.A., Williams, A.J., Hobday, A.J., Hartog, J.R. (in prep.). Forecast-ready models of tuna and billfish catches to support fisheries adaptation to global variability and change.

Spillman C. M., Hartog J.R., Hobday A.J. and Hudson D. 2015. Predicting environmental drivers for prawn aquaculture production to aid improved farm management. Aquaculture 447:56–65.

Wedd R., Alves O., de Burgh-Day C., Down C., Griffiths M., Hendon H.H., Hudson D., Li S., Lim E., Marshall A.G., Shi L., Smith P., Smith G., Spillman C.M., Wang G., Wheeler M.C., Yan H., Yin Y., Young G., Zhao M., Yi X. and Zhou X. In Review. ACCESS-S2: The upgraded Bureau of Meteorology multi-week to seasonal prediction system. Journal of Southern Hemisphere Earth System Science.