
LETTRE

ACCÈS OUVERT

Prévisibilité mondiale des températures extrêmes

Pour citer cet article : Erin Coughlan de Perez et al 2018 *Environ. Res. Lett.* **13** 054017

Consultez l'article [en ligne](#) pour les mises à jour et modifications.

Contenu en rapport

[Temporal trends in human vulnerability to excessive heat](#)

Scott C Sheridan and Michael J Allen

[How do I know if I've improved my continental scale flood early warning system?](#)

Hannah L Cloke, Florian Pappenberger, Paul J Smith et al.

[Improved sub-seasonal meteorological forecast skill using weighted multi-model ensemble simulations](#)

Niko Wanders and Eric F Wood

Ce document a été traduit en français par la Croix-Rouge de Belgique avec le soutien de la Direction générale Coopération au développement et Aide humanitaire (DGD)

ACC contenu

REÇU
13 décembre 2017
Révisé
05 mars 2018
ACCEPTÉ POUR
PUBLICATION
23 mars 2018
PUBLIÉ
2 mai 2018

Le contenu original de ce travail peut être utilisé selon les termes de [Creative Commons Licence Attribution 3.0](#). Toute diffusion ultérieure de cette œuvre doit conserver l'attribution à l'auteur ou aux auteurs, ainsi que le titre de l'ouvrage, la citation de la revue et la DOI.



Recherche environnementale

LETTRE

ACCÈS OUVERT

Prévisibilité mondiale des températures extrêmes

Erin Coughlan de Perez^{1,2,3,8}, **Maarten van Aalst**^{1,3,4}, **Konstantinos Bischiniotis**³, **Simon Mason**², **Hannah Nissan**², **Florian Pappenberger**⁵, **Elisabeth Stephens**⁶, **Ervin Zsoter**⁵ et **Bart van den Hurk**^{6,7}

¹Centre climatique de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, La Haye, Pays-Bas

²Institut international de recherche sur le climat et la société, Université Columbia, New York, États-Unis d'Amérique

³Institut des études de l'environnement, Université libre d'Amsterdam, Pays-Bas

⁴Département des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des politiques publiques, University College London, Londres, Royaume-Uni

⁵Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, Reading, Royaume-Uni

⁶École d'archéologie, de géographie et des sciences de l'environnement, Université de Reading, Reading, Royaume-Uni

⁷Institut météorologique royal des Pays-Bas (KNMI), De Bilt, Pays-Bas

⁸Auteur à qui toute correspondance doit être adressée.

E-mail : coughlan.erin@gmail.com

Mots clés : chaleur, froid, extrêmes, gestion des risques climatiques, vérification des prévisions climatiques, climat, préparation

Du matériel supplémentaire pour cet article est disponible [en ligne](#)

Résumé

Les températures extrêmes sont l'une des principales causes de décès et de maladie dans les pays, développés et en voie de développement, et les chaleurs extrêmes devraient augmenter dans de nombreuses régions. Afin de réduire les risques, des plans canicule et grand froid ont été efficacement mis en œuvre dans le monde entier.

Cependant, une grande partie de la population mondiale n'est pas encore protégée par de tels systèmes, avec de nombreuses régions où les données sont rares mais qui sont aussi très vulnérables. Dans cette étude, nous évaluons au niveau mondial en quels lieux de tels systèmes ont le potentiel d'être efficaces pour réduire le risque de températures extrêmes, en caractérisant : (1) la fréquence moyenne à long terme des vagues de chaleur et de froid, (2) le caractère saisonnier de ces extrêmes, et (3) la prévisibilité à court terme de ces événements extrêmes, trois à dix jours à l'avance.

En utilisant à la fois les modèles de prévisions météorologiques de la NOAA et du CEPMMT, nous développons des cartes mondiales avec une première approximation des localisations susceptibles de bénéficier de l'élaboration de plans de préparation saisonniers et/ou de systèmes d'alerte précoce à court terme pour les températures extrêmes. Les zones extra-tropicales montrent généralement des compétences à court terme et une forte saisonnalité ; dans les zones tropicales, la plupart des localisations présentent également l'une de ces qualités ou les deux. En fait, près de 5 milliards de personnes vivent dans des régions où les vagues de chaleur et/ou de froid sont

saisonniers et prévisibles. Les investissements dans l'adaptation au climat dans ces régions peuvent tirer parti de la saisonnalité et de la prévisibilité pour réduire les risques pour les populations vulnérables.

Introduction

Les températures extrêmes sont l'un des principaux facteurs de morbidité et de mortalité pour de nombreuses personnes parmi les plus vulnérables de la planète, notamment les nourrissons et les personnes âgées (Bai et al 2014, Egondi et al 2015, Fouillet et al 2006, Gosling et al 2008, Hashizume et al 2009, Huynen et al 2001). Les températures extrêmes entraînent 75 % des décès liés au climat (CRED et al 2015), ainsi qu'une augmentation de la morbidité (Astrom et al 2011, Li et al 2015) dans les pays à haut revenu. Par exemple, on estime que la vague de chaleur de 2003 a causé un excédent de 15 000 décès en France, et qu'au Bangladesh la mortalité augmentait d'environ 20 % les jours de forte chaleur (Fouillet et al 2006, Nissan et al 2017). En Inde en 2003, une vague de froid a tué plus de 900 personnes, et des températures inhabituellement froides ont entraîné un excédent de 370 décès à Moscou en 2006 (De et al 2005, Revich et Shaposhnikov 2008).

Pourtant, la température peut être considérée comme l'une des variables météorologiques de surface la plus prévisible (Haiden et al 2015), et les systèmes d'action précoce en cas de températures extrêmes ont prouvé qu'ils pouvaient sauver des vies dans le monde entier (Ebi et al 2004, Tan et al 2007, Toloo et al 2013, Weisskopf et al 2002).

Les Plans d'action sanitaire contre la chaleur et les Plans grand froid définissent les rôles et les responsabilités concernant les mesures de préparation saisonnière, les mesures précoces à court terme, ainsi que les mesures d'intervention et de rétablissement (Public Health England 2015). En cas de canicule, les responsables de gestion des catastrophes assurent la distribution d'eau et de boisson, des centres de rafraîchissement et des visites aux membres isolés de la communauté (Hajat et al 2010a, Knowlton et al 2014).

Pour les vagues de froid, les interventions typiques incluent la fourniture de couvertures, d'un abri et d'un soutien financier pour les frais de chauffage des ménages vulnérables (Daiski 2005, Fazel et al 2014, Hwang et al 2005, Wolf et al 2010).

Une grande partie de la population mondiale n'est actuellement pas couverte par de tels systèmes (Bittner et al 2013, République française 2015). La mise en œuvre de plans pour les conditions météorologiques extrêmes exige des capacités importantes des agences locales, et de nombreux gouvernements et organisations de la société civile ont montré un intérêt croissant pour ces plans ces dernières années (Coughlan de Perez et al 2014, Fouillet et al 2008, IFRC 2009).

Le but de cette étude est d'identifier dans le monde les zones pouvant bénéficier de systèmes d'alerte précoce de températures extrêmes. Pour déterminer en quels lieux de tels systèmes d'action précoce sont susceptibles d'avoir un impact, nous analysons les trois facteurs suivants pour toutes les régions habitées dans le monde : (1) présence prolongée de vagues de chaleur et de froid, (2) caractère saisonnier des vagues de chaleur et de froid, et (3) prévisibilité à court terme des vagues de chaleur et de froid, 3 à 10 jours à l'avance.

D'abord, pour établir des cartes de la présence à long terme de vagues de chaleur et de froid, nous devons définir les vagues de chaleur et de froid. La définition d'un événement dommageable extrême dépend de l'acclimatation locale, de la démographie, de l'état de santé, des normes culturelles, des vêtements, du niveau d'activité physique et de l'accès à un abri à température contrôlée (Hajat et al 2010b, Reid et al 2009). Une revue d'études sur les vagues de chaleur et la morbidité, (Li et al 2015) a montré que les effets vont de 163,7 % d'augmentation de maladies chez les personnes âgées en Australie à 19 % d'augmentation du nombre de naissances avant terme en Italie. Une revue d'études mondiales a révélé que les taux de mortalité augmentaient d'au moins 5 % les jours de canicule dans de nombreuses villes et que les fortes chaleurs étaient responsables d'un plus grand nombre de décès chaque année aux États-Unis, plus que toutes les autres catastrophes naturelles

combinées (Astrom et al 2011, Klinenberg 2015). Les vagues de froid ont été associées à une augmentation moyenne de 4 % du risque de décès dans les villes américaines. Une étude a révélé une augmentation de 13 % de la mortalité à Shanghai (Ma et al 2013, Wang et al 2016). Une méta-revue d'études sur des périodes de froid de deux jours montre un accord général quant à une élévation de la mortalité, en particulier chez les personnes âgées (Ryti et al 2016).

Les courbes température-mortalité sont normalement utilisées pour modéliser la relation entre différentes amplitudes de températures extrêmes et leur impact local. Même avec un accès aux données de santé, il n'est pas facile de déterminer avec précision les relations température-mortalité en raison de la nature variable de la vulnérabilité de la population à la chaleur et au froid. Lorsque de telles relations ont été évaluées, les indices simples de chaleur et de froid relatif tendent à avoir une association égale avec les impacts locaux à celle de définitions plus complexes des vagues de chaleur et de froid (Barnett et al 2010, Dixon et al 2005, Nissan et al 2017). En fait, la plupart des définitions de vague de chaleur et de froid qui ont été dérivées des relations de mortalité locales ont tendance à avoir un impact aux centiles extrêmes de la climatologie de la température locale (Astrom et al 2011, Gasparrini et al 2015).

Nous définissons donc la chaleur et le froid comme des températures extrêmes par rapport au climat local ; lorsque les températures sont constamment supérieures ou inférieures à cet extrême relatif, nous supposons qu'il y aura une augmentation de la morbidité ou de la mortalité dans les groupes locaux les plus vulnérables. Ces impacts dépendront toujours du contexte local, notamment de la disponibilité d'interventions de santé publique et de systèmes d'alerte précoce efficaces.

Dans le deuxième facteur, nous étudions les possibilités de prendre des mesures rapides en fonction de la saisonnalité, en identifiant les zones présentant un cycle annuel de température distinct. La préparation avant les mois à haut risque (l'été, par exemple) serait particulièrement importante si les compétences de prévision à court terme sont médiocres ou si la capacité de maintenir un système d'alerte précoce est limitée.

Pour le troisième facteur, nous analysons les prévisions météorologiques à court terme, qui permettent une action rapide juste avant et pendant un événement extrême. Nous utilisons ici le mot « compétence » pour désigner la capacité du modèle à prévoir correctement les vagues de chaleur ou de froid, parfois également appelée « précision » ou « qualité des prévisions ». Nous n'avons pas connaissance de vérifications globales existantes pour les prévisions de température qui montrent une compétence pour les extrêmes relatifs. Plusieurs évaluations de prévisions d'événements extrêmes ont été effectuées pour des emplacements spécifiques, le plus souvent dans des zones riches en données, comme les États-Unis (Hamill et al 2013, Koster et al 2010). Les zones contenant des données d'observation éparses ont rarement fait l'objet de recherche, y compris une grande partie de l'Afrique, car des observations sont nécessaires à la fois pour l'initialisation et l'évaluation.

Les événements extrêmes, par définition, ont des échantillons de petite taille. Par conséquent, les prévisions mondiales ont tendance à être évaluées pour des extrêmes ou des extrêmes agrégés dans l'espace afin d'en accroître la taille (Barnston and Mason 2011, Gilleland et al 2010, Haiden et al 2015, Skok et Roberts 2016). Cependant, des prévisions sont produites et des mesures sont prises sur la base de ces prévisions, à des échelles beaucoup plus petites que ces agrégations. Les variations de compétences au sein de l'agrégat spatial seraient très pertinentes pour les districts et autres petites localités, où les compétences diffèrent de l'agrégat. Globalement, il existe un écart considérable entre les pratiques actuelles de vérification météorologique et les besoins de la société (Pappenberger et al 2008).

Pour comprendre la variabilité locale des capacités prévisionnelles, nous calculons la qualité à court terme des prévisions de température extrême pour des quadrillages individuelles de 1 degré dans le monde entier. Des échantillons de grande taille sont générés à partir de deux produits de nouvelle prédiction, contenant respectivement 20 et 31 années de données quotidiennes. Nous vérifions tout d'abord chaque modèle de prévision par rapport à son propre produit d'analyse, générant ainsi une carte globale des

résultats au niveau des quadrillages, non affectée par la disponibilité des données observées. Pour vérifier les modèles spatiaux de prévisibilité, nous effectuons ensuite des évaluations ponctuelles dans des emplacements contenant des données de station disponibles. Ce document ne vise pas à établir les sources de prévisibilité dans tous les sites ; il cartographie plutôt la prévisibilité elle-même.

Dans cette étude, nous déterminons où dans le monde se trouvent les températures extrêmes, si elles peuvent être anticipées dans le cadre d'un cycle saisonnier et si elles peuvent être prédites par les prévisions météorologiques. Nous utilisons des ensembles de données rediffusés provenant de deux institutions de prévision majeures : la NOAA (Administration nationale américaine des océans et de l'atmosphère) et le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Nos résultats constituent donc une approximation de premier ordre de la compétence prévisionnelle des tendances mondiales. Sur la base des résultats de l'analyse de saisonnalité et de prévisibilité à court terme, nous identifions la combinaison optimale de mesures préparatoires pour différentes régions du globe.

Méthodes

Où se produisent les vagues de chaleur et de froid ?

Les se matérialisent en raison d'une combinaison de danger, de vulnérabilité et d'exposition. Pour voir où ces risques se produisent, nous définissons un seuil d'événement extrême par rapport à la climatologie locale. Une valeur de température quotidienne étiquetée comme , par exemple, le 95 %percentile, implique que la température est supérieure à cette valeur pendant 5 % des jours des données climatologiques. Bien que le seuil représente un événement extrême par rapport à ce à quoi la population générale est acclimatée, la vulnérabilité varie selon les groupes de personnes et sera affectée par les capacités de santé publique.

Les vagues de chaleur individuelles sont donc définies comme une température quotidienne maximale (Tmax) supérieure au percentile 95 de toutes les températures quotidiennes maximales dérivées de la climatologie locale et par la température minimale quotidienne (Tmin) supérieure au percentile 95 de toutes les températures minimales quotidiennes, pendant deux jours consécutifs. Les vagues de froid sont des épisodes au cours desquels la température quotidienne maximale (Tmax) est inférieure au percentile 5 de toutes les températures maximales quotidiennes et la température minimale quotidienne est inférieure au percentile 5 de toutes les températures minimales quotidiennes, pendant deux jours consécutifs. Les percentiles sont relatifs à la climatologie de chaque modèle à chaque endroit. Nous avons évalué d'autres percentiles et durées dans l'analyse de sensibilité. Toute période de deux jours qui remplit cette définition est considérée comme un événement unique, qu'elle chevauche ou non un autre événement de deux jours.

Les deux modèles globaux utilisés ici produisent des nouvelles prévisions , ou prévisions a posteriori, utilisant la version actuelle du modèle pour des prévisions à des dates historiques. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour évaluer les compétences du modèle de prévision en cours d'exploitation. Le 'GEFS Reforecast v2' de la NOAA est produit à intervalles de 3 et 6 heures entre 1985 et 2015 (31 ans), à une résolution de 1 degré. Les nouvelles prévisions du CEPMMT sont produites à la résolution de la prévision actuelle (~18 km dans cette étude), à des intervalles de 6 heures, seulement deux jours par semaine ; elles sont produites les lundis et les jeudis des 20 dernières années à compter de la date à laquelle les prévisions sont publiées (CEPMMT [2017](#)). Nous avons ensuite corrigé ces prévisions en utilisant une méthode bilinéaire à la résolution de 1 degré. Pour les deux produits, nous calculons les températures minimales et maximales quotidiennes, en partant du principe que l'amplitude des maxima/minima est bien capturée par les données à cette résolution temporelle.

Pour estimer s'il existe ou non des risques de vagues de chaleur et de froid en un lieu donné, nous calculons la fréquence des jours de vagues de chaleur et de froid au jour 0 (délai initial) de la prévision NOAA, qui est ensuite utilisée pour la vérification. Les prévisions CEPPMT n'étant disponibles que deux jours par semaine, nous utilisons le produit d'analyse CEPPMT, disponible quotidiennement et servant à initialiser les prévisions. Des vagues de chaleur et de froid de journées extrêmement chaudes/froides consécutives se produisent rarement à certains endroits. Par conséquent, la présente étude se concentre sur des zones présentant en moyenne plus de cinq vagues de chaleur/froid sur 31 ans.

Enfin, nous combinons la fréquence des risques avec les estimations de la densité de population ajustées par l'ONU pour 2015, établies par le Centre pour le réseau international d'information sur les sciences de la terre (CIESEN Center for International Earth Science Information Network [2016](#)), pour identifier les endroits où l'humanité est exposée à ces dangers.

Où les vagues de chaleur et de froid suivent-elles un schéma saisonnier distinct ?

Dans cette section, toute période de 90 jours est définie comme une saison, afin d'éviter l'utilisation de mois calendrier. Nous voulons identifier le nombre de vagues de chaleur survenues, en moyenne, au fil des années et de chaque saison. À partir du 1^{er} janvier, nous identifions combien d'années ont connu une vague de chaleur/de froid pendant les 90 jours commençant le 1^{er} janvier. Nous répétons ensuite pour les 90 jours à compter du 2 janvier, etc., jusqu'à ce que nous ayons fait cela pour 366 saisons possibles. Nous cartographions les sites avec un cycle annuel distinct, dans lequel au moins une de ces saisons possibles de 90 jours avait une vague de chaleur/de froid, telle que définie ci-dessus, pendant plus de la moitié des années d'analyse. Les données utilisées sont le jour 0 (premier délai) des prévisions NOAA et le produit d'analyse des prévisions CEPPMT.

Où sont les compétences en prévision à court terme des vagues de chaleur/de froid ?

Ici, nous analysons dans quelle mesure les deux modèles globaux peuvent prédire les vagues de chaleur et de froid avec des délais de 3 ou 10 jours, afin de fournir une perspective globale. Les prévisions nationales et les modèles de zone limitée pourraient être meilleurs que ces résultats, en raison de l'assimilation de données locales ou de la résolution topographique. Ils pourraient également avoir de moins bons résultats dans les cas où il existe des lacunes en matière de données et de technologie. Par conséquent, nos résultats fournissent une première indication et peuvent également servir de point de départ et de comparaison pour les résultats du modèle local.

Les données de station relatives à la température étant limitées dans de nombreuses régions du monde, nous effectuons deux vérifications : une vérification comparant chaque modèle à sa propre analyse et une autre en vérifiant chaque modèle par rapport aux données de station échantillonnées à proximité dans le monde. Pour la première, nous analysons les prévisions NOAA et CEPPMT en vérifiant les vagues de chaleur et de froid aux délais de 3 et 10 jours par rapport au premier délai de prévision (NOAA) et à la nouvelle analyse ERA-Interim Land (CEPPMT), comme indiqué ci-dessus. Certains biais peuvent exister. Par exemple, les simulations rétroactives du CEPPMT sont dérivées d'une version de modèle plus récente, avec une résolution supérieure à celle de la nouvelle analyse à laquelle il est comparé.

Pour la deuxième vérification, nous avons sélectionné la base de données disponibles gratuitement de 57 Stations du réseau de climatologie historique mondial, version 2, afin de fournir un échantillon de régions et de climats différents. Beaucoup de grandes villes ont été sélectionnées. Les villes sont souvent les zones les plus touchées par les vagues de chaleur en raison de la concentration de population de leur vulnérabilité et de leur exposition, ainsi que de l'effet d'îlot thermique urbain. Les actions préparatoires en milieu

urbain peuvent également toucher beaucoup de gens assez rapidement. Toutes les stations sélectionnées ont connues au moins cinq vagues de chaleur ou de froid au cours de la période 1985-2015. Pour comparer les données de la station avec les températures prévues, nous extrayons les délais de 3 et 10 jours des produits de prévision quadrillées en utilisant une interpolation par le voisin le plus proche aux coordonnées de la station. Comme les définitions de vague de chaleur et de froid utilisent des percentiles relatifs à la climatologie des données elles-mêmes, nous n'effectuons pas de correction pour l'effet îlot thermique urbain, qui n'est probablement pas pris en compte dans la nouvelle analyse mais se produirait dans les données de la station, ou toute différence d'élévation entre la station et le modèle.

Les deux prévisions ont 11 facteurs de l'ensemble, et nous calculons la probabilité de l'événement extrême comme le nombre d'ensembles qui prévoient l'événement divisé par le nombre de facteurs. Cela repose sur plusieurs hypothèses, notamment que les ensembles représentent des scénarios futurs de probabilité égale et qu'il y a suffisamment d'ensembles pour représenter tout l'éventail des futurs possibles. Cependant, avec un si petit nombre d'ensembles, il n'est pas possible de représenter tout l'éventail des futurs possibles. Par exemple, si tous les 11 facteurs de l'ensemble montrent une vague de chaleur possible dans 10 jours, cela sera enregistré comme un risque à 100 % de vague de chaleur. Pour éviter une prévision trop confiante, où tous les ensembles prévoient l'événement ou le non-événement, nous avons ajouté un facteur naïf de l'ensemble comme critère de référence qui prévoit toujours l'événement à 0,5 au lieu de 0 ou 1 dans les facteurs normaux de l'ensemble, comme dans Broecker (2012). Avec l'ajout de ce facteur, la probabilité de l'événement ne sera jamais égale à 0 % ou 100 %. Dans notre exemple, si tous les ensembles prévoient une vague de chaleur dans 10 jours, la prévision serait de 11,5/12, soit une probabilité de 96 % d'une vague de chaleur.

Il existe de nombreuses façons de calculer la compétence d'une prévision. Ici, nous avons calculé l'aire sous la courbe caractéristique de fonctionnement du récepteur (ASC) afin d'évaluer la compétence de chaque emplacement à chaque délai, ce qui permet d'évaluer les fausses alarmes et les prévisions correctes (Mason and Graham 2002). Les résultats vont de 0,5 (peu habile) à 1 (essentiellement parfait). Nous déterminons les intervalles de confiance à 95 % à l'aide de 2 000 répliques d'amorçage stratifiées pour générer une ASC ré-échantillonnée (Robin et al 2011).

Nous avons effectué une analyse de sensibilité sur la vérification des prévisions afin d'estimer l'impact des paramètres utilisés dans cette étude. Premièrement, nous avons modifié la définition des vagues de chaleur et de froid en modifiant les percentiles et la durée de la température. Deuxièmement, nous avons utilisé des scores de compétence déterministes (indice de dépendance symétrique extrême et taux de fausses alarmes) pour vérifier la prévision moyenne de l'ensemble. Enfin, nous avons répété l'analyse de la NOAA en utilisant la même période que celle utilisée pour l'analyse plus courte du CEPMMT. Dans tous ces cas, les cartes globales des compétences étaient très similaires à celles présentées ici, ce qui permettait de tirer les mêmes conclusions quant aux emplacements qui ont tendance à avoir plus de prévisibilité que d'autres.

Résultats

Où les vagues de chaleur et de froid se produisent-elles ?

Les vagues de chaleur et de froid se produisent dans différentes régions. Presque le monde entier connaît des vagues de chaleur (zones bleues dans la figure 1 (a)), à l'exception de régions tropicales isolées dont l'Indonésie, l'Afrique Centrale et l'ouest de l'Amérique du Sud. En revanche, selon les deux modèles, de vastes régions du monde ne connaissent pas de froid extrême prolongé. Cela comprend le nord de l'Amérique du Sud, l'Afrique Centrale, certaines parties de l'Afrique de l'Est et de l'Ouest, le sud-est de l'Inde et une grande partie du continent maritime.

Il y a moins de phénomènes de chaleur et de froid extrêmes dans les régions à climat tropical (bleu intense dans la figure 1). Les latitudes nord et la côte orientale de l'Inde ont tendance à avoir le plus grand nombre de vagues de chaleur. Pour les vagues de froids, les latitudes plus élevées ont tendance à en avoir le plus grand nombre.

Il n'y a pas de différences significatives entre la climatologie de la NOAA et celle du CEPMMT ; par conséquent, nous ne présentons ici que les résultats de la NOAA (figure 1). Il existe quelques différences mineures dans les îles du Pacifique, la NOAA modélisant plus d'événements que le CEPMMT.

Où y a-t-il une saisonnalité des vagues de chaleur et de froid ?

En nous concentrant sur les zones où les vagues de chaleur et de froid se produisent et où il y a exposition humaine, nous identifions les régions ayant une saisonnalité distincte qui pourrait être utilisée pour une préparation saisonnière. Dans les ensembles de données de la NOAA et du CEPMMT, presque toutes les zones extra-tropicales du nord ont une saisonnalité distincte (zones vert foncé, figure 2). Certaines parties de l'Afrique orientale et australe, du sud de l'Amérique du Sud et des îles du Pacifique présentent également une

saisonnalité distincte. Cependant, la climatologie des deux modèles affiche des estimations différentes pour ces régions de l'hémisphère sud.

Pour les vagues de froid, il existe un clivage latitudinaire net. Les régions qui sont à 15 degrés de latitude vers le pôle ont des saisons distinctes de vagues de froid, à l'exception de l'intérieur de l'Amérique Centrale, de certaines régions du Mozambique et de l'Australie méridionale.

Où sont les compétences en prévision à court terme des vagues de chaleur/de froid ?

Pour résumer les résultats de la prévisibilité à court terme, nous définissons plusieurs catégories de caractéristiques des prévisions (délai, niveau de compétence), suggérant le type d'action préparatoire pouvant être envisagée. Ces catégories doivent être ajustées en fonction des délais et des niveaux de compétence nécessaires pour des actions locales spécifiques. Elles sont utilisées ici uniquement comme une indication générale des résultats globaux (résultats complets

Figure 1

Occurrence climatique et exposition humaine aux vagues de chaleur (a) et de froid (b) pour le modèle NOAA. Les résultats sont similaires à ceux du modèle CEPMMT. Les zones en beige ont une densité de population inférieure à 1 personne par km² et ne montrent pas d'informations de vague de chaleur/de froid sur une période de 31 ans, et sont donc exclues de cette analyse. Les zones bleues sont les régions où se produisent des vagues de chaleur ou de froid, et les nuances de bleu indique le nombre moyen de jours de vagues de chaleur ou de froid par an.

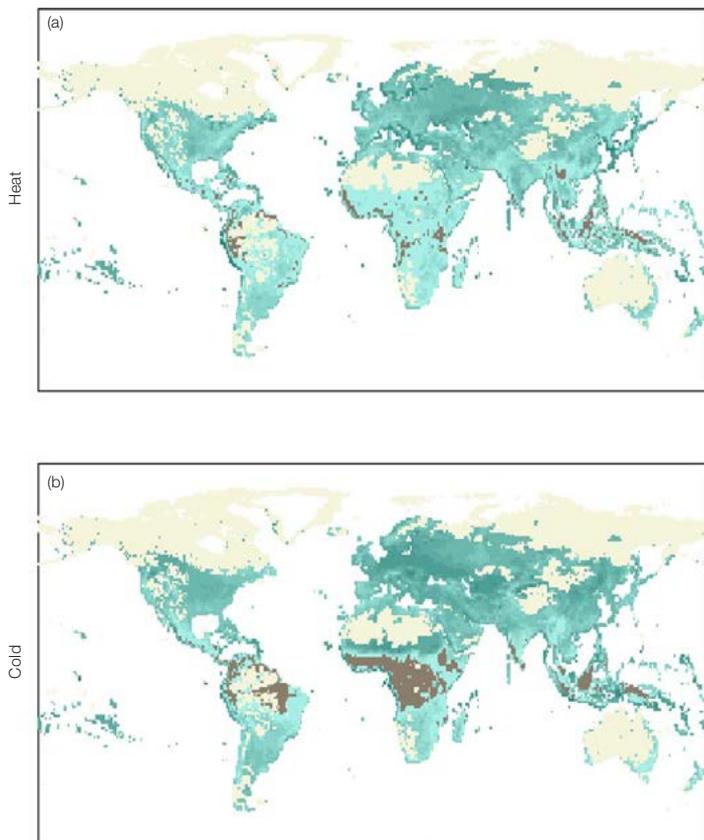
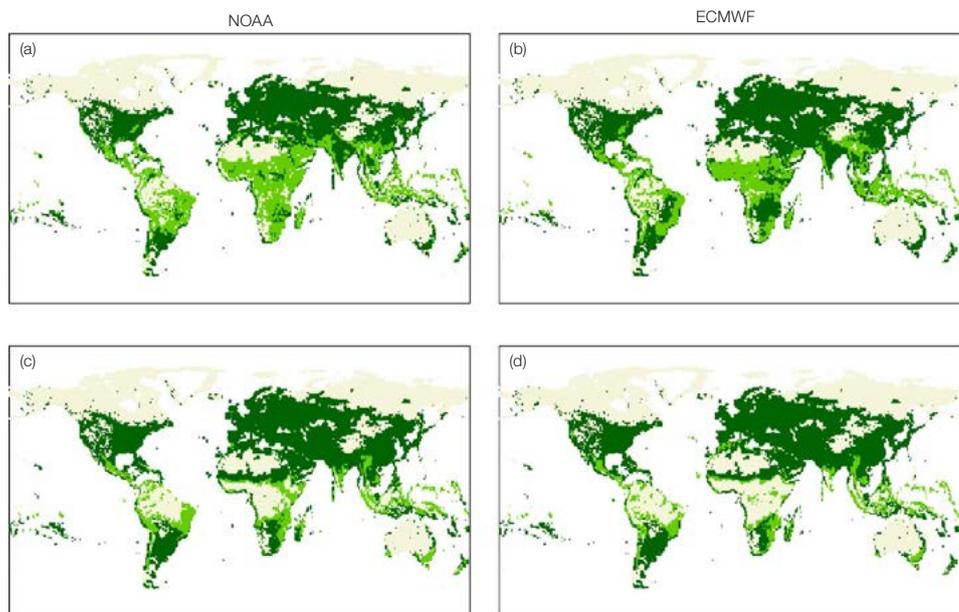


Figure 2

Caractère saisonnier des vagues de chaleur (rangée supérieure) et de froid (rangée inférieure) dans les zones exposées, pour les modèles NOAA (colonne de gauche) et CEPMT (colonne de droite). Le vert foncé indique les régions qui ont une saisonnalité distincte qui pourrait être utilisée pour la préparation saisonnière. Dans ces régions, il y a eu au moins une saison de 90 jours au cours de laquelle il y a eu une vague de chaleur/de froid dans la moitié des années analysées. Les zones vert clair n'ont pas cette saisonnalité. Les zones de couleur crème ont une faible exposition humaine aux vagues de chaleur ou de froid, une combinaison de moins de 1 personne / km² ou peu d'événements extrêmes (combinaison de crème et de marron dans la figure 1).



disponibles dans les informations supplémentaires disponibles à stacks.iop.org/ERL/13/054017/mmedia).

Pour les prévisions de vagues de chaleur avec des délais de 10 jours ou plus, les deux modèles montrent les compétences les plus élevées dans la plupart des pays d'Europe de l'Est, du Moyen-Orient, de l'Inde orientale, de la Russie et du centre des États-Unis et du Canada (figures 3 (a) et (b)). Dans ces régions, nous nous attendons à ce qu'il y ait suffisamment de temps pour prendre des mesures préalables en prévision d'un événement extrême (couleur rouge foncé, figures 3 (a) et (b)). Les prévisions du CEPMT couvrent des zones de cette catégorie plus importantes que la NOAA : respectivement 44 % et 34 % des zones peuplées. En particulier, le CEPMT montre des compétences plus élevées que la NOAA pour des délais plus longs pour la plupart des États-Unis, de la Chine et du sud de l'Europe.

Ces tendances sont confirmées lors de la vérification des données de la station (figure 3 (c)), où la compétence, obtenue en vérifiant le modèle par rapport à son produit d'analyse, est fortement corrélée à la compétence calculée en vérifiant le modèle par rapport aux données de la station. Alors que la vérification de l'analyse de modèle surestime les compétences par rapport à la vérification de la station, les deux ensembles de résultats s'accordent généralement sur les villes les plus compétentes.

Les compétences dans les pays tropicaux sont variées, allant du manque de compétence pour tout délai en Afrique Centrale et dans le continent maritime à des compétences élevées pour des délais longs dans une grande partie du Brésil et dans certaines régions d'Afrique de l'Est. Bien que les deux modèles montrent des résultats différents pour de nombreux sites, il semblerait qu'au moins un des modèles puisse avoir des compétences dans certaines régions d'Afrique de l'Est, d'Afrique australe et d'Amérique du Sud. Aucun des deux modèles ne permet de prédire avec précision les vagues de chaleur dans les Caraïbes, dans la majeure partie d'Afrique Centrale et dans la majeure partie du continent maritime. En résumé, la prévisibilité des vagues de chaleur à 3–10 jours est généralement élevée dans les régions extra-tropicales mais varie d'un endroit à l'autre sous les tropiques.

En ce qui concerne les vagues de froid (figure 4), les modèles NOAA et CEPMT présentent des schémas de compétences globalement similaires. Dans les deux modèles, une action avancée avec une bonne compétence dans un délai de 10 jours est possible dans la plupart des États-Unis, au Canada, en Europe du Nord et de l'Est, en Chine, en Russie et en Asie du Sud-Est. Une bonne compétence dans un délai de trois jours, pour une action rapide, est possible en Afrique australe, en Amérique du Sud, en Amérique Centrale et en Australie. Alors que le modèle de la NOAA montre des domaines de compétences inégales dans le continent maritime, cela ne se reflète pas dans le modèle du CEPMT.

L'un des gradients de compétences les plus importants se trouve en Inde, où les deux modèles possèdent de bonnes compétences en matière de prévision des vagues de froid dans l'ouest de l'Inde, pour se transformer en peu ou pas du tout de compétence au Bangladesh et à proximité.

Discussion

Où investir dans les plans d'action précoce pour les températures extrêmes, et à quoi devraient-ils ressembler ?

Un grand pourcentage de la surface habitée dans le monde pourrait bénéficier de plans canicule et grand froid, intégrant des actions de préparation saisonnière et des actions basées sur des alertes précoces à court terme (voir les zones noires de la figure 5). La population totale vivant dans des zones de prévisibilité à la fois saisonnière et à court terme est de 5 milliards de personnes pour les vagues de chaleur, et de 4,9 milliards pour les vagues de froid. Cette combinaison de saisonnalité et de prévisibilité à court terme est idéale, car une préparation saisonnière peut préparer le terrain pour les réserves et la formation nécessaires pour garantir que les actions à court terme soient aussi étendues et rapides que nécessaire.

Dans les zones extra-tropicales, la saisonnalité et la prévisibilité sont disponibles presque uniformément. Dans ces régions, les blocages atmosphériques provoquent des épisodes de chaleur et de froid persistants, tout comme les interactions de sols secs et de la neige, qui augmentent la prévisibilité des événements extrêmes, tout en offrant la possibilité de prolonger les délais en des échéances sous-saisonnières, précieuses pour une meilleure préparation (Fischer *et al* 2007, Nissan *et al* 2017, Purich *et al* 2014).

Dans les Caraïbes, dans de nombreuses régions du Continent maritime et dans de nombreuses îles du Pacifique, les vagues de chaleur sont peu prévisibles à court terme. Ce manque de prévisibilité est probablement dû au fait que de nombreuses îles sont trop petites pour être représentées avec précision par la résolution de ces modèles globaux, et que les vagues de chaleur peuvent être extrêmement localisées. Il existe une faible variabilité de la température dans les zones maritimes, de sorte que des changements dans la circulation à grande échelle n'entraînent pas des températures remarquablement différentes dans la région. Les modèles à résolution plus élevée pourraient permettre de mieux déterminer les faibles variations des microclimats et des températures dans ces zones. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les effets sur la santé des extrêmes relatifs dans ces régions, où la variabilité absolue n'est pas aussi grande que dans les zones extra-tropicales.

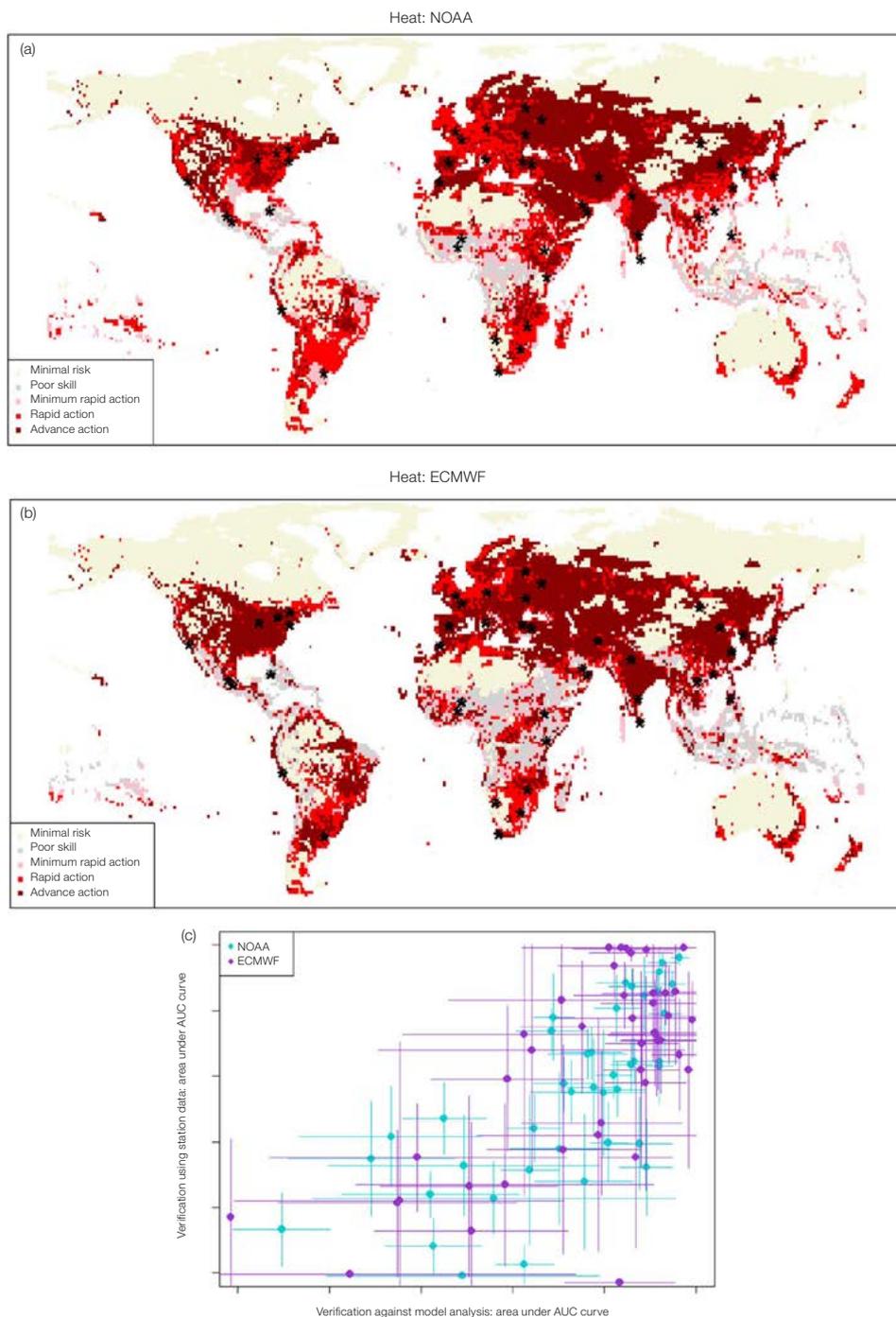
Cependant, de nombreuses îles offrent une bonne prévisibilité à court terme pour les vagues de froid. Les données de la station de Cuba démontrent ce contraste. La prévisibilité des vagues de froid est beaucoup plus grande que celle des vagues de chaleur, probablement parce que les vagues de froid sont causées par des éléments plus importants comme des creux extra-tropicaux qui se sont aventurés vers l'équateur. Dans les régions qui présentent ce contraste, les systèmes d'alerte précoce de temps froid seraient un investissement effectif.

L'inverse est vrai sur la petite bande de la côte ouest de l'Amérique du Sud, où certaines des compétences les plus avancées en matière de prévision des vagues de chaleur se chevauchent avec les compétences les plus faibles en matière de prévision des vagues de froid, comme le reflète l'analyse de modèle et les données de la station de Lima, Pérou. La prévisibilité des vagues de chaleur est probablement calculée lorsque la région reçoit occasionnellement des eaux anormalement chaudes au large des côtes lors des événements El Niño, ce qui a des conséquences sur la santé de la population locale (Checkley *et al* 2000).

Dans de nombreuses régions de l'est de l'Amérique du Sud, il n'y a pas de forte saisonnalité pour les vagues de chaleur ou de froid, mais il existe une bonne prévisibilité à

Figure 3

Habilité à prédire les événements de chaleur extrême dans les modèles NOAA (a) et CEPMMT (b), classés selon la manière dont le modèle pourrait être utilisé pour prendre des mesures. Dans les deux graphiques supérieurs, la compétence est calculée par maille en vérifiant chaque modèle par rapport à sa propre analyse. En rouge foncé, les zones avec une bonne habileté à 10 jours, c.-à-d. action avancée (ASC de ROC > 0,8). En rouge, les zones restantes avec de bonnes compétences à 3 jours, c.-à-d. action rapide (ASC de ROC > 0,8). En rose, les zones restantes avec une compétence limitée à 3 jours, c.-à-d. action rapide minimale (0,7 < ROC < 0,8). En gris, peu d'habileté (ASC de ROC < 0,3). En crème, aucune exposition humaine. Le graphique du bas (c) montre une comparaison des résultats de vérification du modèle par rapport à son analyse (axe x) avec vérification du modèle par rapport aux données de la station (axe y). L'aire sous la courbe ROC est tracée pour toutes les villes marquées d'une étoile noire sur les cartes mondiales, pour la NOAA (en bleu) et le CEPMMT (en violet). Les barres d'erreur représentent des intervalles de confiance à 95 %.



court terme pour ces événements. Dans ces cas, les systèmes d'alerte précoce devraient être prêts tout au long de l'année pour activer rapidement les actions de préparation à court terme, en particulier pour aider les personnes qui pourraient ne pas se préparer adéquatement à de tels événements.

Dans la plupart des régions situées aux basses latitudes en Afrique, la climatologie des températures extrêmes est très différente entre les modèles NOAA et CEPMMT (Donat *et al* 2014). Chaque modèle identifie des endroits spécifiques sur le continent où il existe une saisonnalité (figure 3) ou une bonne prédiction des vagues de chaleur (figure 4). Par conséquent, la validation et la sélection du modèle seront essentielles pour une action précoce en matière de vague de chaleur dans ces régions, et des résultats multimodales pourraient être meilleurs que de modèles simples. Il existe des limites à l'utilisation de

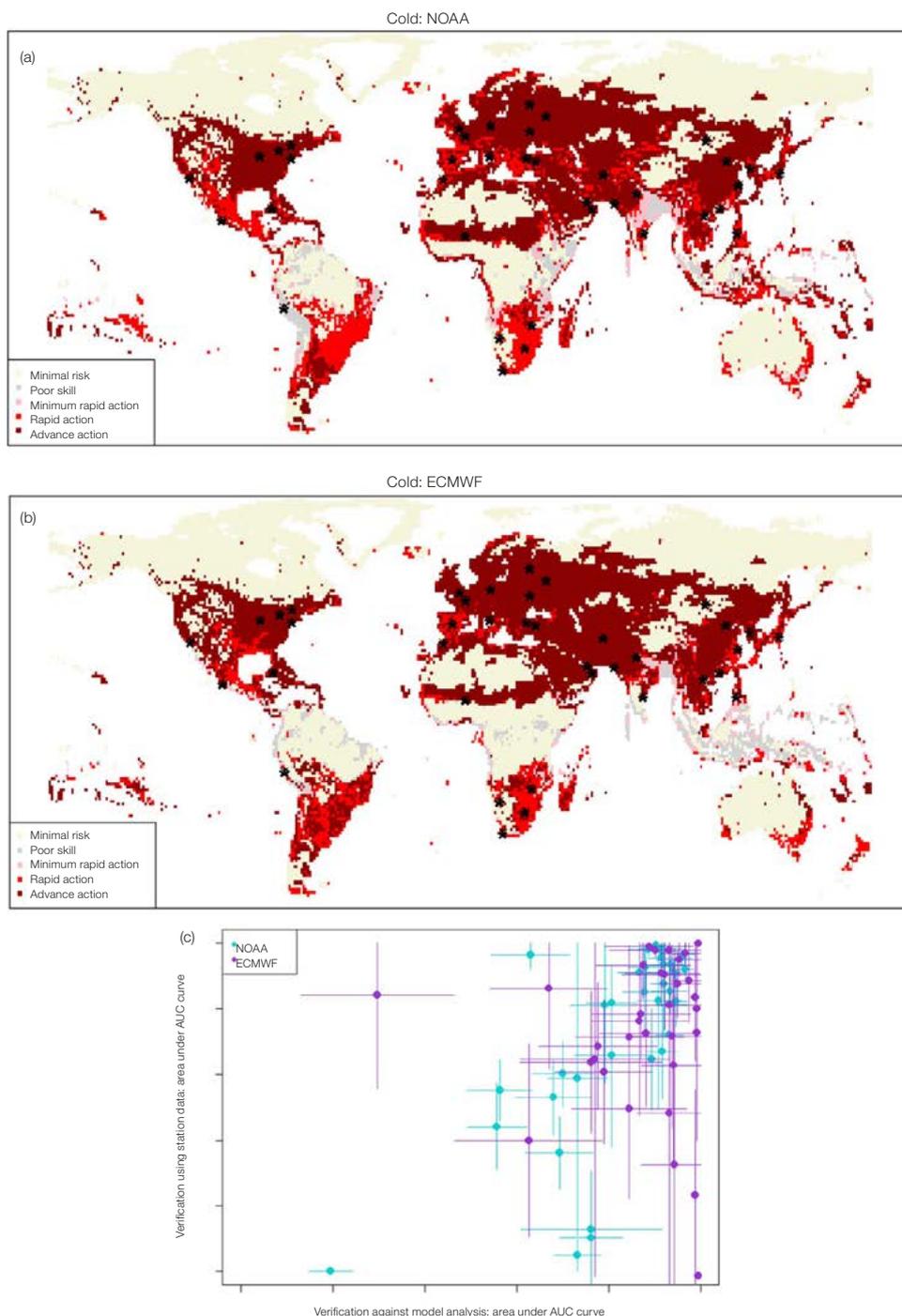
Prévisibilité mondiale des températures extrêmes

appeared in *Recherche environnementale* | Global predictability of temperature extremes | 2 mai 2018 |

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aab94a>

Figure 4

Comme a fig. 3, pour les vagues de froid.



données globales pour une action locale et des observations locales doivent être utilisées dans les emplacements cherchant à vérifier ces résultats.

Le Sahel se distingue comme une zone susceptible d'avoir une excellente prévisibilité pour les vagues de froid, ainsi qu'un cycle saisonnier distinct pouvant être utilisé pour la préparation. Ces prévisions à court terme pourraient être utilisées pour prendre des mesures préparatoires, pour les effets sur la santé, dus au climat et aux conditions météorologiques, p. ex. la grippe ou les maladies respiratoires (Jusot et al 2012).

Dans la majeure partie de l'Inde et du Bangladesh, il existe une forte saisonnalité et une grande prévisibilité pour les vagues de chaleur. Les vagues de chaleur ont tendance à se limiter à la saison estivale précédant la mousson, avant l'arrivée des pluies qui réduisent les températures élevées. La prévisibilité sur les échelles météorologiques

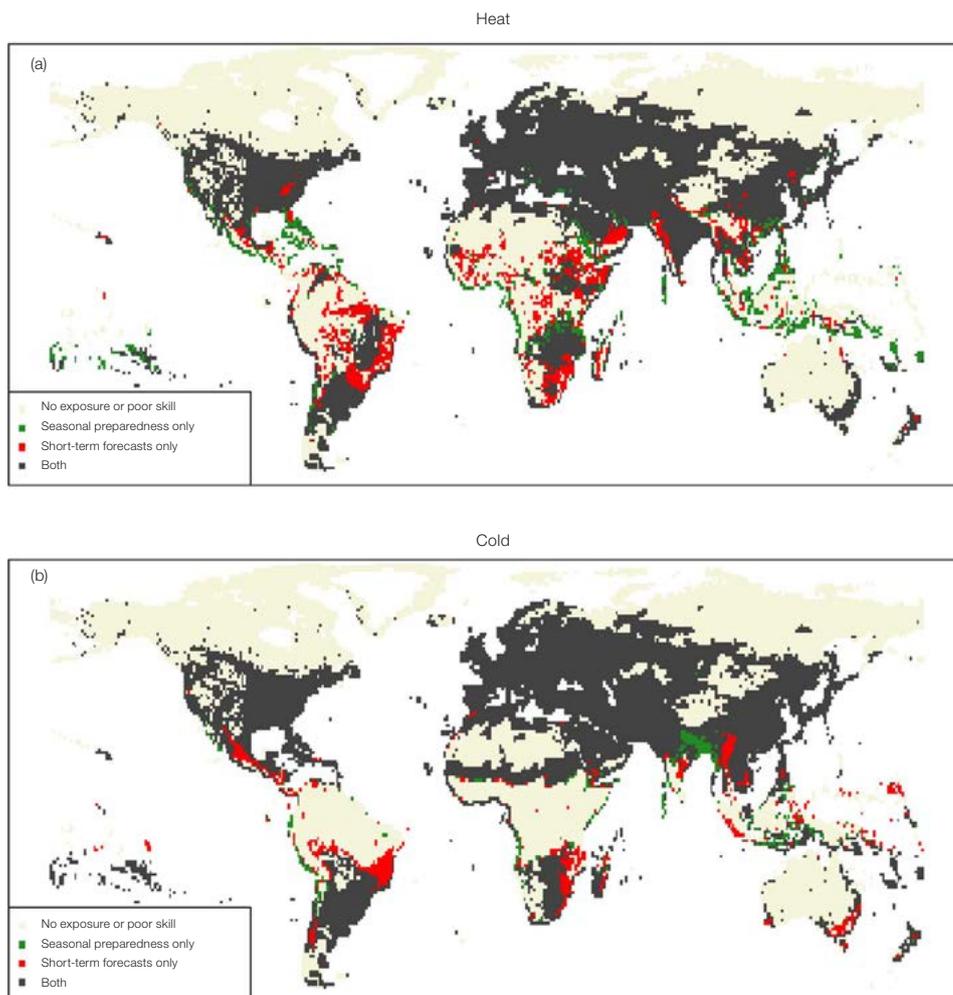
Prévisibilité mondiale des températures extrêmes

appeared in *Recherche environnementale* | *Global predictability of temperature extremes* | 2 mai 2018 |

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aab94a>

Figure 5

Compilation des figures 1-4, indiquant le type de préparation possible pour (a) vagues de chaleur et (b) vagues de froid dans le monde. En noir, zones de prévisions habiles à court terme et de saisonnalité des vagues de chaleur/froid dans les modèles NOAA ou CEPMMT. En vert, zones où seule la saisonnalité peut être utilisée pour la préparation. En rouge, régions où seules les prévisions à court terme peuvent être utilisées pour la préparation. En crème, zones non exposées ou sans climatologie distincte ni compétences prévisionnelles.



temporelles découle d'un schéma de circulation atmosphérique caractéristique et d'un déficit de précipitations normales au début de la mousson, qui se traduisent par une humidité du sol anormalement basse pour cette période de l'année (Nissan *et al* 2017). Les modèles qui représentent mieux l'interaction sol-surface sont susceptibles de fournir de meilleures performances pour prévoir les vagues de chaleur dans cette région.

Pour les vagues de froid cependant, le Bangladesh ne voit de prévisibilité dans aucun des modèles. Les schémas des vagues de froid associés à une variabilité à grande échelle, comme l'oscillation australe El Niño, ne s'étendent pas vers l'est jusqu'au Bangladesh (Ratnam *et al* 2016). Des études de diagnostic sur le climat sont nécessaires pour comprendre les raisons possibles de cette divergence, qui peuvent être liées aux conditions météorologiques dynamiques responsables des vagues de froid dans le Delta du Gange, qui ne sont pas bien capturées par les modèles.

Domaines de recherche ultérieure

Bien que les cartes produites ici fournissent une première indication des régions dans lesquelles une préparation saisonnière et/ou des systèmes d'alerte précoce pourraient être bénéfiques, nos définitions des dangers ont été généralisées sur de vastes zones et doivent être testées avec des données locales de morbidité et de mortalité. En particulier, il serait important d'évaluer la vulnérabilité différentielle des groupes à risque. Par exemple, les migrants ne sont pas nécessairement adaptés aux mêmes températures que la population locale et peuvent être à la fois vulnérables et exposés à des conditions météorologiques dangereuses. En outre, le changement climatique pourrait accroître ou réduire les risques dans de nombreuses régions, en particulier dans les régions à faible risque (Forzieri *et al*

2017). Ces régions doivent utiliser les données de température locales pour surveiller toute modification de la répartition de la température dans un climat en mutation.

En outre, les compétences actuelles en matière de prévision de ces deux modèles globaux ne représentent pas toute la prévisibilité qui pourrait être réalisée avec des recherches ultérieures dans de nombreuses régions. Par exemple, on sait que l'humidité du sol améliore la prévisibilité dans de nombreuses régions du monde, telles que le Bangladesh, mais une initialisation fiable de l'humidité du sol dans les modèles n'est pas simple. L'Afrique, le Continent maritime et l'Asie du Sud ont constaté des compétences inégales et incohérentes entre les modèles ; des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les limites et les facteurs de prévisibilité des températures extrêmes dans ces régions. Des recherches ciblées dans des domaines où il existe des facteurs clairs de prévisibilité mais où les compétences du modèle sont insuffisantes pourraient permettre la mise au point de systèmes d'alerte précoce dans les zones moins desservies.

Les modèles mondiaux sont généralement la seule information disponible pour les zones les plus vulnérables du monde, mais des modèles calibrés localement, combinant des observations locales avec des prévisions, augmenteront probablement les compétences des sites capables de mettre en œuvre cette technologie. Des améliorations des systèmes d'observation de la température seront nécessaires dans de nombreux endroits pour permettre cette vérification et cet étalonnage, et des ensembles multimodale et de post-traitement pourraient encore améliorer les compétences locales. Ces résultats doivent être traités comme une première approximation des tendances globales en matière de compétence et doivent être vérifiés localement.

L'évaluation du modèle réalisée ici s'est concentrée sur les compétences du modèle actuel, ce qui serait obtenu en utilisant ces modèles sans modification. Les compétences opérationnelles sur le terrain pourraient être plus limitées que cela, car les prévisions du CEPMMT, par exemple, ne sont pas librement disponibles dans de nombreux pays, et les prévisions opérationnelles pourraient être dérivées de prévisions non vérifiées qui n'atteignent pas les niveaux de compétences indiqués ici.

Bien que nous évaluons la saisonnalité comme outil de préparation, nous n'évaluons pas les prévisions de température saisonnière dans cette étude. À quelques exceptions près, la plupart des prévisions saisonnières n'estiment pas la probabilité de fortes chaleurs ou de grands froids pendant la saison, mais se concentrent sur les températures moyennes saisonnières. Des prévisions saisonnières d'événements extrêmes pourraient toutefois être développées, évaluées et intégrées dans des systèmes d'alerte précoce, le cas échéant.

Conclusions

Les températures extrêmes restent responsables de pics significatifs de morbidité et de mortalité, mais nous avons montré que, pour la majeure partie du monde, les informations sur la saisonnalité et/ou les prévisions à court terme peuvent aider à anticiper les événements extrêmes avec suffisamment de temps pour réagir. Près de 5 milliards de personnes peuvent en tirer parti pour les vagues de chaleur et les vagues de froid. Pour ces régions, les politiques visant à renforcer la résilience et l'adaptation aux extrêmes (changeants) ne devraient pas se limiter à l'adaptation structurelle, mais également renforcer la capacité d'agir en fonction de la saisonnalité et des alertes précoces.

À mesure que le climat se réchauffe, on s'attend à un impact accru des températures extrêmes sur une grande partie de la surface de la terre, même en tenant compte de l'acclimatation progressive à des températures plus élevées (Huang *et al* 2011, IPCC 2012). Les systèmes d'alerte précoce constituent un outil puissant pour s'adapter à une augmentation potentielle du risque. Le développement de systèmes d'alerte précoce à l'échelle chaleur-santé doit être envisagé pour une mise en œuvre dans les régions prévisibles (voir figure 5(a)). De tels systèmes ont le potentiel de sauver de nombreuses vies. Celles-ci devraient être étayées par une base de preuves sur l'efficacité de différentes mesures de préparation aux vagues de chaleur et de froid dans différents climats et

niveaux d'urbanisation, ainsi que par une recherche sur les facteurs de succès d'un système d'action précoce performant. Ici, nous indiquons où les systèmes d'alerte précoce peuvent potentiellement fonctionner, mais de nombreuses localités peuvent nécessiter des ressources ou une capacité pour agir sur ces avertissements. Des investissements dans de telles capacités, tels que la mise en place de systèmes de financement fondés sur des prévisions (Coughlan de Perez et al [2015](#)), peuvent garantir qu'une action précoce est entreprise lorsqu'un événement extrême est prédit.

Remerciements

Les auteurs de ce document souhaitent exprimer leur gratitude aux praticiens humanitaires qui ont piloté le financement fondé sur les prévisions dans le monde entier et qui ont posé les questions qui ont conduit à cette recherche. En particulier, le Ministère fédéral des affaires étrangères allemand a élaboré un plan d'action pour l'adaptation de l'aide humanitaire au changement climatique (Rüth [2015](#)), qui a incité à investir dans des plans d'action précoce dans le monde. S. Mason a été financé par l'accord de subvention/coopération NA13OAR4310184 de la US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Les opinions exprimées dans ce document sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de la NOAA ou de ses sous-agences.

Identifiants ORCID

-  Erin Coughlan de Perez
<https://orcid.org/0000-0001-7645-5720>
-  Maarten van Aalst
<https://orcid.org/0000-0003-0319-5627>
-  Florian Pappenberger
<https://orcid.org/0000-0003-1766-2898>
-  Elisabeth Stephens
<https://orcid.org/0000-0002-5439-7563>

Références

- Astrom D O, Forsberg B and Rocklöv J 2011 Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies *Maturitas* **69** 99–105
- Bai L, Cirendunzhu, Woodward A, Dawa, Zhaxisangmu, Chen B and Liu Q 2014 Temperature, hospital admissions and emergency room visits in Lhasa, Tibet: a time-series analysis *Sci. Total Environ.* **490** 838–48
- Barnett A G, Tong S and Clements A C A 2010 What measure of temperature is the best predictor of mortality? *Environ. Res.* **110** 604–11
- Barnston A G and Mason S J 2011 Evaluation of IRIs seasonal climate forecasts for the extreme 15% tails *Weather Forecast.* **26** 545–54
- Bittner M, Matthies E F, Dalbokova D and Menne B 2013 Are European countries prepared for the next big heat-wave? *Eur. J. Public Health* **24** 615–19
- Broecker J 2012 Probability forecasts *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* ed D B Stephenson (New York: Wiley)
- Checkley W, Epstein L D, Gilman R H, Figueroa D, Cama R I, Patz J A and Black R E 2000 Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children *Lancet* **355** 442–50
- CIESIN 2016 *Center for International Earth Science Information Network, C. U.: Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals 4th edn* (NASA Socioeconomic Data and Applications Center) (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>)
- Coughlan de Perez E, van den Hurk B, van Aalst M, Jongman B, Klose T and Suarez P 2014 Forecast-based financing: an approach for catalyzing humanitarian action based on extreme weather and climate forecasts *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* **2** 3193–218
- Coughlan de Perez E, van den Hurk B, van Aalst M K, Jongman B, Klose T and Suarez P 2015 Forecast-based financing: an approach for catalyzing humanitarian action based on extreme weather and climate forecasts *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **15** 895–904
- CRED, EM-DAT and UNISDR 2015 The Human Cost of Weather Related Disasters 1995–2015 (www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf)
- Daiski I 2005 The health bus: healthcare for marginalized populations, policy *Polit. Nurs. Pract.* **6** 30–8
- De U S, Dube R K and Rao G S P 2005 Extreme weather events over India in the last 100 years *J. Indian Geophys. Union* **9** 173–87
- Dixon P G, Brommer D M, Hedquist B C, Kalkstein A J, Goodrich G B, Walter J C, Dickerson C C, Penny S J and Cerveny R S 2005 Heat mortality versus cold mortality *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **86** 937–43
- Donat M G, Sillman J, Wild S, Alexander L V, Lippmann T and Zwiers F W 2014 Consistency of temperature and precipitation extremes across various global gridded in situ and reanalysis datasets *J. Clim.* **27** 5019–35
- Ebi K L, Teisberg T J, Kalkstein L S, Robinson L and Weiher R F 2004 Heat watch/warning systems save lives: estimated costs and benefits for Philadelphia 1995–98 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **85** 1067–73
- ECMWF: Documentation and Support 2017 (www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support) (Accessed: 24 October 2017)
- Egondi T, Kyobutungi C and Rocklöv J 2015 Temperature variation and heat wave and cold spell impacts on years of life lost among the urban poor population of Nairobi, Kenya *Int. J. Environ. Res. Public Health* **12** 2735–48
- Fazel S, Geddes J R and Kushel M 2014 The health of homeless people in high-income countries: descriptive epidemiology, health consequences, and clinical and policy recommendations *Lancet* **384** 1529–40
- Fischer E M, Seneviratne S I, Vidale P L, Luthi D and Schar C 2007 Soil moisture—atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave *J. Clim.* **20** 5081–99
- Forzieri G, Cescatti A, Batista F and Feyen L 2017 Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: a data-driven prognostic study *Lancet Planet Heal.* **1** e200–8
- Fouillet A, Rey G, Laurent F, Pavillon G, Bellec S, Guihenneuc-Jouyaux C, Clavel J, Jouglu E and Hémon D 2006 Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **80** 16–24
- Fouillet A et al 2008 Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave *Int. J. Epidemiol.* **37** 309–17
- Gasparrini A et al 2015 Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study *Lancet* **386** 369–75
- Gilleland E, Ahijevych D A, Brown B G and Ebert E E 2010 Verifying forecasts spatially *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1365–76
- Gosling S N, Lowe J A, McGregor G R, Pelling M and Malamud B D 2008 Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature *Clim. Change* **92** 299–341
- Haiden T, Janousek M, Bauer P, Bidlot J, Dahoui M, Ferranti L, Prates F, Richardson D S and Vitart F 2015 Evaluation of ECMWF forecasts, including 2014–2015 upgrades *ECMWF Tech. Memo.* **765** 1–51
- Hajat S, O'Connor M and Kosatsky T 2010a Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection *Lancet* **375** 856–63
- Hajat S, O'Connor M and Kosatsky T 2010b Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection *Lancet* **375** 856–63
- Hamill T M, Bates G T, Whitaker J S, Murray D R, Fiorino M, Galarneau T J, Zhu Y and Lapenta W 2013 Noaa second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1553–66
- Hashizume M, Wagatsuma Y, Hayashi T, Saha S K and Streetfield K 2009 The effect of temperature on mortality in rural Bangladesh — a population-based time-series study *Int. J. Epidemiol.* **38** 1689–97
- Huang C, Barnett A G, Wang X, Vaneckova P, FitzGerald G and Tong S 2011 Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review *Environ. Health Perspect.* **119** 1681–90
- Huynen M M, Martens P, Schram D, Weijenberg M P and Kunst A E 2001 The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population *Environ. Health Perspect.* **109** 463–70
- Hwang S W, Tolomiczenko G, Kouyoumdjian F G and Garner R E 2005 Interventions to Improve the Health of the Homeless *Am. J. Prev. Med.* **29** 311–19
- IFRC 2009 IFRC: World Disasters Report: Focus on early warning, early action
- IPCC 2012 *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* ed C B Field, V Barros, T F Stocker and Q Dahe (Cambridge: Cambridge University Press)
- Jusot J-F, Adamou L and Collard J 2012 Influenza transmission during a one-year period (2009–2010) in a Sahelian city: low temperature plays a major role *Influenza Other Respi. Viruses* **6** 87–9
- Klinenberg E 2015 *Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago* (Chicago: University of Chicago Press)
- Knowlton K et al 2014 Development and implementation of South Asia's first heat-health action plan in Ahmedabad (Gujarat, India) *Int. J. Environ. Res. Public Health* **11** 3473–92
- Koster R D et al 2010 Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: first results from a multi-model experiment *Geophys. Res. Lett.* **37** 1–6

- Li M, Gu S, Bi P, Yang J and Liu Q 2015 Heat waves and morbidity: current knowledge and further direction-A comprehensive literature review 5256–83
- Ma W, Yang C, Chu C, Li T, Tan J and Kan H 2013 The impact of the 2008 cold spell on mortality in Shanghai, China *Int. J. Biometeorol.* **57** 179–84
- Mason S and Graham N E 2002 Areas beneath the relative operating characteristics (ROC) and relative operating levels (ROL) curves: statistical significance and interpretation *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **128** 2145–66
- Nissan H, Burkart K, Coughlan de Perez E, van Aalst M and Mason S 2017 Defining and predicting heat waves in Bangladesh *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **56** 2653–70
- Pappenberger F, Scipal K and Buizza R 2008 Hydrological aspects of meteorological verification *Atmos. Sci. Lett.* **9** 43–52
- Public Health England 2015 Heatwave plan for England, London (www.gov.uk/government/publications/heatwave-plan-for-england)
- Purich A, Cowan T, Cai W, van Rensch P, Uotila P, Pezza A, Boschat G and Perkins S 2014 Atmospheric and oceanic conditions associated with southern Australian heat waves: a CMIP5 analysis *J. Clim.* **27** 7807–29
- Ratnam J V, Behera S K, Annamalai H, Ratna S B, Rajeevan M and Yamagata T 2016 ENSOs far reaching connection to Indian cold waves *Sci. Rep.* **6** 1–12
- Reid C E, Neill M S O, Gronlund C J, Brines S J, Brown D G, Diez-roux A V and Schwartz J 2009 Mapping community determinants of heat vulnerability *Environ. Health Perspect.* 1730–36
- Republique Francaise 2015 Climate Risk & Early Warning Systems (<http://newsroom.unfccc.int/media/454810/crews-presentation.pdf>)
- Revich B and Shaposhnikov D 2008 Excess mortality during heat waves and cold spells in Moscow, Russia *Occup. Environ. Med.* **65** 691–6
- Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, Sanchez J and Müller M 2011 pROC : an open-source package for R and S + to analyze and compare ROC curves *BMC Bioinformatics* **12**
- Rüth A 2015 *Framework: Action Plan of the Federal Foreign Office for Humanitarian Adaptation to Climate Change* (Berlin) (www.preventionweb.net/english/professional/policies/v.php?id=43609)
- Ryti N R I, Guo Y and Jaakkola J J K 2016 Global association of cold spells and adverse health effects: a systematic *Environ. Health Perspect.* **124** 12–22
- Skok G and Roberts N 2016 Analysis of fractions skill score properties for random precipitation fields and ECMWF forecasts *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **142** 2599–610
- Tan J, Zheng Y, Song G, Kalkstein L S, Kalkstein A J and Tang X 2007 Heat wave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003 *Int. J. Biometeorol.* **51** 200
- Toloo G, Fitzgerald G, Aitken P, Verrall K and Tong S 2013 Evaluating the effectiveness of heat warning systems: systematic review of epidemiological evidence *Int. J. Public Health* **58** 667–81
- Wang Y, Shi L, Zanobetti A and Schwartz J D 2016 Estimating and projecting the effect of cold waves on mortality in 209 US cities *Environ. Int.* **94** 141–9
- Weisskopf M G, Anderson H A, Foldy S, Lawrence P, Blair K, Török T J and Rumm P D 2002 Heat wave morbidity and mortality, Milwaukee, Wis, 1999 vs 1995: an improved response? **92** 830–3
- Wolf J, Adger W N and Lorenzoni I 2010 Heat waves and cold spells: an analysis of policy response and perceptions of vulnerable populations in the UK *Environ. Plan. A* **42** 2721–35