

ÉVOLUTION DU NIVEAU D'EAU DANS LES PRINCIPAUX BASSINS D'EAUX SOUTERRAINS DU MONDE ET IMPACTS POTENTIELS SUR LES POPULATIONS

Maya COSTANTINI¹, Jeanne COLIN², Bertrand DECHARME³

¹ CNRM, Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France, maya.costantini@meteo.fr

² CNRM, Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France, jeanne.colin@meteo.fr

³ CNRM, Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France, bertrand.decharme@meteo.fr

Résumé : Le sixième rapport du GIEC (AR6) a montré une hausse du niveau des eaux souterraines liée à l'augmentation des précipitations dans certains des plus grands bassins aquifères, mais aussi une diminution de ce niveau dans d'autres régions plus sèches, notamment en raison de prélèvements. Néanmoins, bien que ces ressources soient essentielles aux activités humaines et aux écosystèmes, l'AR6 ne présente pas d'étude s'appuyant sur des modèles couplés globaux. L'analyse des simulations que nous avons réalisées en suivant différents scénarios de changement climatique, montre une augmentation (diminution) du niveau des aquifères dans 40% à 52% (20% à 26%) de l'aire couverte par les 218 plus grands bassins aquifères du monde. Ces évolutions pourraient affecter 31% à 43% de la population en 2100.

Mots-Clés : Aquifères, Modèles Climatiques Globaux, Impacts humains, CMIP6.

Summary: The IPCC Sixth Assessment Report (AR6) showed an increase in groundwater levels due to increased precipitation in some of the largest aquifers and a decrease in groundwater levels in other, drier regions, partly due to withdrawals. Nevertheless, although these resources are essential to human activities and ecosystems, the AR6 does not present a study based on global coupled models. The analysis of simulations that we have carried out following different climate change scenarios shows an increase (decrease) in the level of aquifers in 40% to 52% (20% to 26%) of the area covered by the 218 largest aquifer basins of the world. These changes could affect 31% to 43% of the population in 2100.

Keywords: Aquifers, Global Climate Models, Human impacts, CMIP6.

Introduction

Les aquifères, structures géologiques perméables contenant des eaux souterraines, constituent la plus grande réserve d'eau douce liquide terrestre. Or, l'impact du changement climatique sur le cycle hydrologique, ainsi que sur notre consommation d'eau, commence déjà à se faire sentir (Scanlon 2012). L'étude de l'évolution future de ces réserves d'eau douce avec le changement climatique revêt donc une importance particulière, notamment pour la mise en place des plans d'adaptation et d'atténuation relatifs à la gestion de l'eau. Jusqu'alors, un nombre restreint d'études se sont penchées sur la question de l'évolution future du niveau d'eau dans les aquifères (Wada 2012, Reinecke 2021) à l'échelle globale, et une seule d'entre elles (Wu et al, 2020) en utilisant un modèle de climat global ou un modèle du système Terre. Pourtant, seule l'utilisation de modèles couplés globaux permet de prendre en compte les rétroactions existant entre les aquifères et le climat, sans lesquelles les projections à long terme de l'évolution hydrologique terrestre pourraient être biaisées (Boé 2020).

Dans cette étude, nous analysons des projections à l'horizon 2100 du niveau d'eau dans les aquifères à échelle globale, réalisées par le modèle global de climat et le modèle du système Terre développés au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) : CNRM-CM6-1 et CNRM-ESM2-1 (Voldoire 2019, Sférian 2019). Les simulations analysées ont été produites dans le cadre de CMIP6 (sixième phase du

Coupled Model Intercomparison Project) (O'Neill 2017). Pour la période future, elles suivent 4 scénarios d'évolution de concentration de gaz à effet de serre (SSP126, SSP245, SSP370 et SSP585) (Eyring 2016).

Les modèles du CNRM incluent une paramétrisation des aquifères non-confinés dans les 218 plus grands bassins aquifères. Ils simulent l'évolution du niveau d'eau dans les aquifères (WTD : Water Table Depth) via un schéma diffusif 2D des flux d'eaux souterraines prenant également en compte les échanges d'eau avec les fleuves et les sols non-saturés (Decharme 2019). Les prélèvements d'eau d'origine humaine (pour l'irrigation, l'eau potable, l'usage domestique ou industriel) ne sont pas toutefois représentés dans ces modèles.

Dans une première partie, nous analysons l'évolution de WTD et des deux variables qui le pilotent : les précipitations et l'évapotranspiration. Ensuite, nous réalisons une étude multi-modèles pour comparer les précipitations et l'évapotranspiration simulées par les modèles du CNRM aux résultats obtenus par le reste des modèles ayant participé à CMIP6. Dans une dernière partie, nous étudions les potentiels impacts de nos résultats sur les populations à l'aide de projections de densité de population pour 2100. Cela nous permet d'établir une carte des risques liés à l'évolution du niveau d'eau dans les aquifères, ainsi que des zones où ils devraient être les plus rudement touchés par les prélèvements d'eau.

1. Projections future du niveau d'eau dans les aquifères

Les cartes de la Figure 1 montrent l'évolution de WTD (Figure 1.A), des précipitations (Figure 1.B) et de l'évapotranspiration (Figure 1.C), entre les périodes 1985-2014 et 2071-2100 pour le scénario SSP370. Pour WTD, on observe un dipôle Nord-Sud en Europe et en Amérique du Nord avec une élévation de WTD au nord et un approfondissement au sud. Les aquifères ont également tendance à s'approfondir dans la région méditerranéenne, le sud de l'Afrique, l'Amazonie, l'Australie, l'Amérique centrale et dans certaines parties de la Chine. Tandis qu'en Afrique centrale, en Inde, en Indonésie et à l'est de l'Argentine, WTD se rapproche de la surface. Cette répartition spatiale des augmentations et diminution de WTD est la même dans tous scénarios. En chaque point de grille, l'intensité des scénarios a un impact sur l'intensité du changement mais pas sur son signe. La répartition spatiale entre l'augmentation et la diminution de WTD est très proche de celle des précipitations (Figure 1.B), ce qui indique la présence d'un lien fort entre ces deux variables.

Les cartes de corrélations obtenues via des régressions linéaires en chaque point de grille entre les projections de WTD et celles des précipitations, montrent en effet un R^2 supérieur à 0,8 sur la plupart des régions (résultats non-montrés). De manière générale, le niveau d'eau dans les aquifères augmente lorsque les précipitations augmentent et vice versa. En effet, ce sont les précipitations qui viennent nourrir les rivières et les sols et ainsi par extension, les aquifères. Les précipitations sont donc le principal facteur influent sur WTD. L'évapotranspiration quant à elle, dépend aussi principalement des précipitations. C'est pourquoi l'évolution de WTD suit aussi l'évolution de l'évapotranspiration (voir Figure 1.C). Il y a néanmoins quelques zones où l'influence de l'évapotranspiration prévaut sur celle des précipitations. Ces endroits sont caractérisés par une absence d'évolution significative des précipitations (voir Figure 1.D).

Afin d'explorer les incertitudes liées à nos projections, nous avons souhaité réaliser une étude multi-modèles de la réponse des aquifères face au changement climatique. Malheureusement, parmi les modèles participant à CMIP6, seuls ceux du CNRM représentent les processus hydrologiques impliquant les aquifères non-confinés. Il est néanmoins possible de réaliser une analyse multi-modèles de l'évolution des précipitations et de l'évapotranspiration, qui pilotent les variations de WTD avec le changement climatique (résultats non montrés ici). Nos résultats montrent une bonne adéquation entre l'ensemble des modèles de CMIP6 et ceux du CNRM. Les moyennes annuelles globales de précipitation et d'évapotranspiration simulées par CNRM-CM6-1 et CNRM-ESM2-1 restent dans la fourchette des valeurs simulées par les autres

modèles CMIP6. Pour ces deux variables, le signe de l'évolution (augmentation/diminution entre les périodes 1985-2014 et 2071-2100) est en accord avec la moyenne multi-modèles sur au moins 71% des bassins aquifères (WTD) (Wilks 2016).

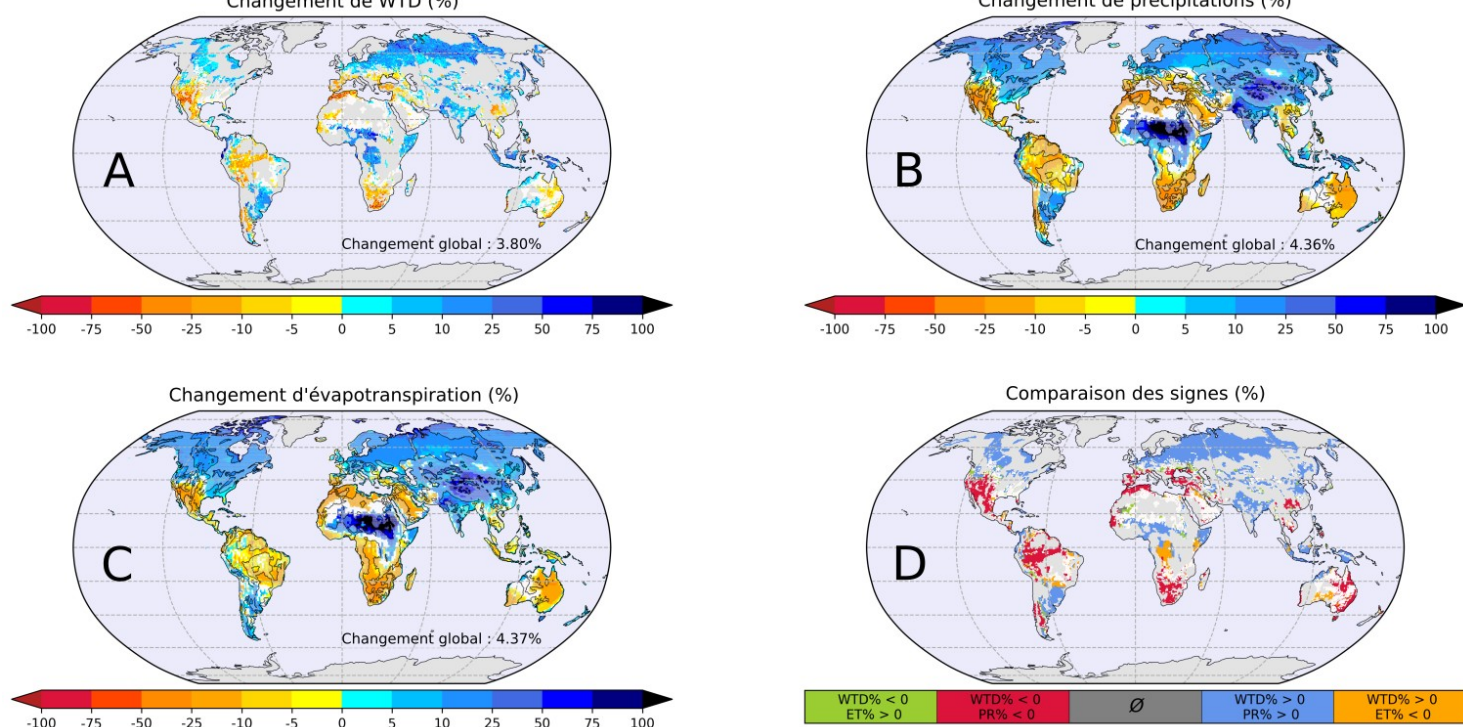


figure 1 : Changements (en %) de WTD (A), des précipitations (B) et de l'évapotranspiration (C) entre les périodes historiques 1985-2014 et 2071-2100, suivant le scénario SSP370. A, B et C : Les zones bleues (rouges) correspondent à une augmentation (diminution) des variables. Les zones blanches correspondent à des régions où l'évolution des variables avec le changement climatique a été déterminée comme statistiquement non significatif en utilisant le test FDR à 95 % (Wilks 2016). Pour les cartes de précipitation et d'évapotranspiration (B et C), la localisation des bassins aquifères représentés par ISBA-CTRIP est mise en valeur pour faciliter la comparaison avec WTD (A). D : Comparaison des signes d'évolution en % de WTD avec les précipitations (PR), ou l'évapotranspiration (ET) en cas de désaccord entre l'évolution de PR et celle de WTD. Les régions blanches correspondent aux zones où l'évolution de WTD a été déterminée comme statistiquement non significative avec le test FDR à 95% (Wilks 2016). De Costantini et al. 2022, in prep.

2. Potentiels Impacts humains en 2100

Nous utilisons ensuite nos projections de WTD ainsi que des projections de densité de population en 2100 dans l'objectif de déterminer les potentiels impacts de la variation des eaux souterraines sur les activités humaines et vice versa. Nous avons créé ces projections de densité de population à partir de données de densité de population de 2015 (SEDAC 2018) et des projections de densité de population par pays, réalisées dans le cadre de CMIP6 (KC 2017). Nous trouvons que 39% à 52% (respectivement 20% à 26%) de la surface couverte par les 218 bassins aquifères de notre étude serait affectée, en 2100, par une augmentation (respectivement diminution) du niveau des eaux souterraines (voir Figure 2). Pour le scénario SSP370, 49% de la population mondiale vivrait au-dessus de ces aquifères en 2100 et dépendrait donc directement de leurs ressources (voir Figure 3). Cela correspondrait à environ 1 milliard (respectivement 4 milliards) de personnes impactées par leur diminution (respectivement augmentation). Néanmoins, les personnes vivant directement au-dessus des aquifères ne seront pas les seules impactées. En étudiant régionalement nos résultats, nous montrons que 16% de la population mondiale en 2100 (soit environ 2 milliards de personnes pour le scénario SSP370) habitent dans des régions qui seraient globalement touchées par une diminution des ressources en eau souterraines. De plus, une augmentation de la densité de population et/ou un climat plus chaud pourrait engendrer un accroissement du volume d'eau prélevé

(agriculture, industrie, usage domestique, ...) (Scanlon 2012). Or, nos modèles ne représentent pas les prélèvements d'eau réalisés par les populations. C'est pourquoi, dans certaines régions, la diminution/augmentation du niveau des aquifères a pu être sous-estimée/sur-estimée.

Nos résultats nous amènent à identifier trois types de situations à risque pour les populations. La première se produit dans les zones modérément peuplées où une élévation du niveau d'eau des aquifères est prévue. Ces régions ne devraient pas connaître de stress hydrique marqué car le risque que les prélèvements humains dans les aquifères dépassent leur niveau de recharge y est faible. Cependant, la remontée des eaux souterraines vers la surface pourrait conduire à un risque d'inondations via la saturation des aquifères et des sols superficiels. Cette saturation pourrait ainsi contribuer aux inondations associées aux périodes d'intenses précipitations. Le second cas correspond aux zones très peuplées où une élévation du niveau d'eau dans les aquifères est attendue. En plus de l'augmentation du risque d'inondation évoqué précédemment, la forte densité de population est susceptible d'être associée à d'importantes quantités d'eaux souterraines prélevées dans ces régions. Cependant nos modèles, ne prennent pas en compte ces prélèvements, ce qui pourrait mener à un inversement de la tendance à l'élévation de WTD. Le cas échéant, la population de ces régions pourrait en réalité être confrontée à une diminution du niveau d'eau des aquifères. C'est le cas en dans le nord de l'Inde où le niveau d'eau dans les aquifères est déjà en train de diminuer (Rodell 2009). La dernière situation correspond aux zones modérément à fortement peuplées qui devraient subir une diminution de leurs ressources en eaux souterraines. Une forte densité de population induit des prélèvements d'eau importants et donc une diminution accrue du niveau des aquifères. Cela risque de mener à des situations de fort stress hydrique, particulièrement dans les régions qui sont déjà très dépendantes des aquifères.

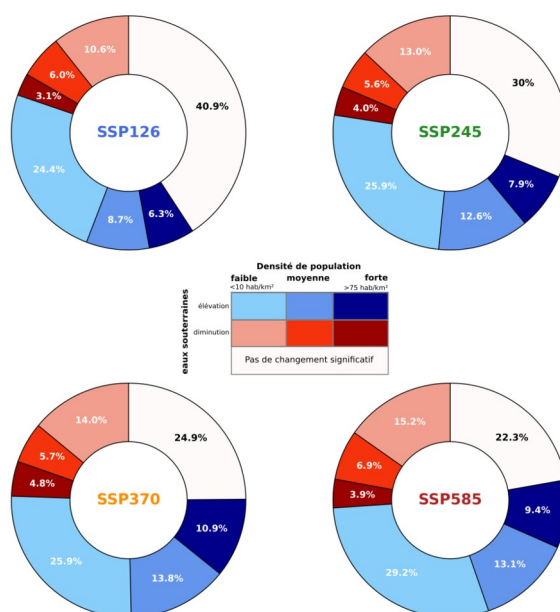


figure 2 : Répartition de la part de diminution (rouge) et d'augmentation (bleu) de WTD sur la surface couverte par les aquifères de notre étude. L'intensité de la couleur indique la densité de population prévue en 2100. Les couleurs claires correspondent aux zones de moins de 10 habitants par kilomètre carré et les couleurs foncées aux zones de plus de 75 habitants par kilomètre carré. De Costantini et al. 2022, in prep.

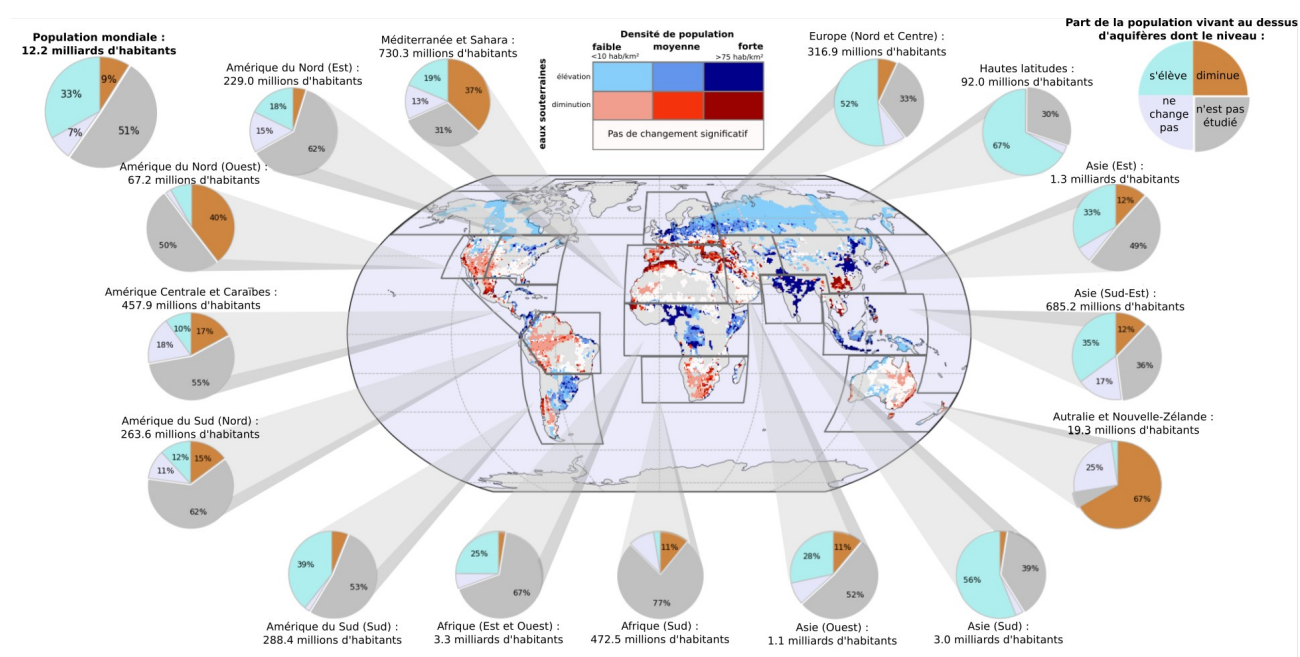


figure 3 : Évolution de WTD et densité de population en 2100 pour le scénario SSP370. Comme dans la Fig.2, le bleu (rouge) correspond à une augmentation (diminution) de WTD, tandis que l'intensité de la couleur indique la densité de population en 2100. Le camembert global (coin gauche) représente la distribution de la population mondiale qui pourrait être affectée par une hausse (turquoise) ou une baisse (marron) de WTD, ou qui est susceptible de vivre au-dessus d'un bassin aquifère où les changements futurs ne sont pas significatifs (blanc) ou sur des zones non étudiées (gris). Les mêmes camemberts sont donnés pour chaque région. Les régions ont été définies comme celles utilisées dans l'Atlas des projections climatiques globales et régionales de l'Annexe 1 de l'AR5. De Costantini et al. 2022, in prep.

Conclusion

Les modèles du CNRM prévoient une élévation globale du niveau d'eau des aquifères, malgré des diminutions dans plusieurs régions. En fonction du scénario, 0,7 à 1,1 milliards (respectivement 1,4 à 4 milliards) de personnes pourraient être directement impactées par une diminution (respectivement une augmentation) des ressources aquifères en 2100. Ces résultats complètent l'AR6 (IPCC 2021) qui ne présente pas d'évolution future globale du niveau d'eau des aquifères d'après des modèles couplés globaux. Néanmoins, afin de mieux évaluer les incertitudes sur la réponse des aquifères au changement climatique, nous plaidons en faveur d'une approche multi-modèles plus complète, qui s'appuierait sur des modèles climatiques couplés globaux ou des modèles du système Terre, incluant une représentation réaliste des aquifères et des rétroactions qui leur sont associées. Accroître notre confiance dans les projections des ressources hydrologiques constitue en effet une question à fort enjeu car elle conditionne la mise en œuvre de mesures d'atténuation et d'adaptation relative à la ressource en eau. Au-delà de la nécessité de prendre en compte une représentation valable des processus aquifères dans les modèles climatiques globaux, nous soulignons le besoin de représenter les prélèvements d'eau, notamment dans le cadre de l'agriculture. En effet, 70% des prélèvements aquifères sont destinés à l'irrigation (Panda 2021) et représentent 42% de l'eau utilisée pour irriguer (Döll 2012). La représentation des prélèvements d'eau souterraine et de leur évolution future est susceptible de moduler, voire d'inverser par endroits, certains de nos résultats (Wada 2016, Wu 2020). Ces changements, ainsi que la modification de l'évapotranspiration et/ou des processus

hydrologiques induits par l'irrigation, pourraient affecter en retour le climat, d'où la nécessité d'inclure ces processus dans des modèles climatiques couplés.

Bibliographie

- Boé J., 2021 : The physiological effect of CO₂ on the hydrological cycle in summer over Europe and land-atmosphere interactions. *Clim. Chang.* **167**, 1–20
- Decharme B. et al., 2019 : Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, 1207–1252
- Döll P. et al., 2012 : Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *J. Geodyn.* 59-60
- Eyring V. et al., 2016 : Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model. Dev.* **9**, 1937–1958
- Hausfather Z. & Peters G. P., 2020 : Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature* **577**, 618–620
- IPCC, 2021 : Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- KC S. & Lutz W., 2017 : The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Glob. Environ. Chang.* **42**, 181–192
- O'Neill B. C. et al., 2017 : The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Glob. Environ. Chang.* **42**, 169–180
- Panda D. K., et al., 2021 : Groundwater depletion in northern India: Impacts of the sub-regional anthropogenic land-use, socio-politics and changing climate. *Hydrol. Process.* **35**
- Reinecke R. et al., 2021 : Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels : a global-scale multi-model ensemble study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **25**, 787–810
- Rodell, M., Velicogna, I. & Famiglietti, J. S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature* **460**, 999–1002
- Scanlon B. R. et al., 2012 : Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proc. Natl. Acad. Sci. United States Am.* **109**, 9320–9325
- SEDAC, 2018. : Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center
- Séférian R. et al., 2019 : Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, 4182–4227
- Voldoire A. et al., 2019 : Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, 2177–2213
- Wada Y. et al., 2012 : Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.* **39**, 1–6
- Wada Y., 2016 : Impacts of Groundwater Pumping on Regional and Global Water Resources. *Terr. Water Cycle Clim. Chang.*
- Wilks D. S., 2016 : "The stippling shows statistically significant grid points": How research results are routinely overstated and overinterpreted, and what to do about it. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **97**, 2263–2273
- Wu W.-Y. et al., 2020 : Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nat. Commun.* **11**, 1–9