

Étude de l'impact de l'usage et du changement d'usage des sols sur le recyclage de l'humidité et les régimes de précipitation

Sofie A. te Wierik, Erik L. H. Cammeraat, Joyeeta Gupta, Yael A. Artzy-Randrup

Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands ; Geography, Planning and International Development Studies, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands

Date de première publication : 25 juin 2021

Article traduit de l'anglais par Fanny Morizot (Agence Medis Terra) pour le compte de l'association [Pour une hydrologie régénérative](#)

RESUME

L'eau verte, désignant la part d'humidité du sol disponible pour les végétaux, constitue une fraction importante de l'eau douce terrestre. Le changement d'usage des sols modifie les dynamiques de l'eau verte par des interactions observables à l'échelle microscopique (entre le sol et les végétaux) ainsi qu'à l'échelle macroscopique (entre la surface continentale et l'atmosphère). La déforestation massive et l'intérêt croissant suscité par des projets de reforestation soulèvent la question suivante : de tels changements d'usage des sols à grande échelle ont-ils des effets éco-hydrologiques majeurs via le processus de recyclage de l'humidité continentale ? L'étude de ce sujet requiert une compréhension globale et mécaniste (c'est-à-dire des mécanismes causaux) des dynamiques de l'eau verte en lien avec le changement d'usage des sols. Cette étude d'articles aborde la question susmentionnée au moyen d'une revue exploratoire (*scoping review*) s'appuyant sur des travaux portant à la fois sur des observations empiriques et sur des approximations issues de simulations des effets hydrologiques du changement d'usage des sols dans différentes régions du monde. Les résultats montrent que la vulnérabilité aux changements d'usage des sols varie selon les régions, et que ces changements peuvent affecter l'hydrologie des paysages, tant à l'échelle locale qu'à distance. On constate par ailleurs que si de nombreuses études se concentrent sur le plan mondial ou sur les forêts tropicales humides, un défaut de connaissance persiste à l'égard des régions tempérées et des zones arides. L'étude de ces travaux nous amène à proposer des outils analytiques et de nouvelles orientations visant à améliorer notre compréhension des effets du changement d'usage des sols sur les schémas de recyclage de l'humidité. À terme, ces avancées devraient nous permettre de minimiser leurs impacts hydrologiques imprévus sur l'environnement et la société.

1. Introduction

Une partie importante de l'eau douce terrestre est stockée dans les sols. L'eau verte, que l'on définit comme la part d'humidité du sol disponible pour les végétaux, permet la croissance des plantes et joue un rôle déterminant sur leurs structures et leur fonctionnement (Eagleson, 2002). Réciproquement, les couverts végétaux régissent de nombreux processus de l'eau verte, tels que la capacité d'infiltration d'un sol, l'évaporation, ou la percolation (Figure 1). En modifiant l'ampleur et le rythme des phénomènes d'évaporation et de transpiration, les changements de couverts végétaux influencent les dynamiques de l'eau verte et, par conséquent, les schémas de recyclage de l'humidité (Wang-Erlandsson et al., 2014). Le recyclage de l'humidité continentale (ou TMR pour *Terrestrial Moisture Recycling*)

désigne le processus selon lequel « l'eau continentale évaporée gagne l'atmosphère et y est transportée selon les vents dominants pour ensuite retomber plus loin sous forme de pluie » (Keys et al., 2017 : 15). À l'échelle mondiale, 57 % de l'eau de pluie continentale (tombée sur les terres émergées) retourne vers l'atmosphère grâce aux phénomènes d'évaporation et de transpiration (Eagleson, 2003 ; Tuinenburg et al., 2020). 70 % de cette fraction retombe sous forme de pluie sur les terres émergées (Tuinenburg et al., 2020). Par conséquent, l'évaporation et la transpiration continentales représentent 40 % des précipitations totales tombant sur les terres à l'échelle mondiale (Van Der Ent et al., 2010). Le recyclage de l'humidité continentale constitue ainsi une voie hydrologique majeure dans la distribution de l'eau à l'échelle mondiale.

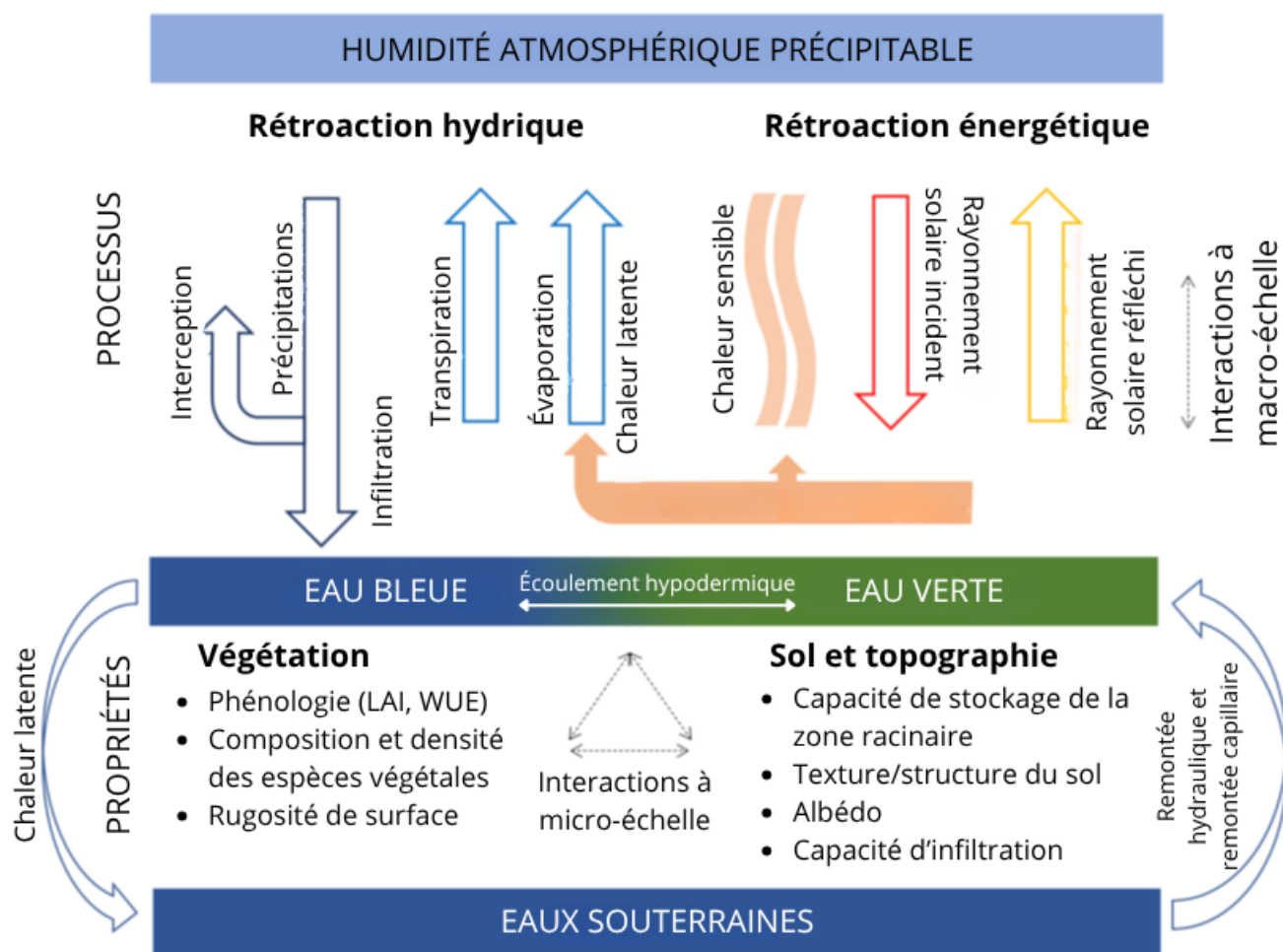


Figure 1. Vue d'ensemble des propriétés et processus impliqués dans la dynamique du recyclage de l'humidité. (LAI = Indice foliaire (*Leaf Area Index*); WUE = Efficacité d'Utilisation de l'Eau (*Water Use Efficiency*)). Les interactions à l'échelle microscopique se produisent à la surface terrestre entre le système végétation–sol–eau. Les interactions à l'échelle macroscopique se produisent entre la surface terrestre et le climat régional, et sont représentées par des échanges d'humidité, d'énergie et de quantité de mouvement¹. Les interactions avec les nappes phréatiques influencent également l'eau bleue et l'eau verte (Lo & Famiglietti, 2010).

Les changements d'usage des sols d'origine anthropique (humaine) liés à l'augmentation des besoins en alimentation, carburant, fibres et bois (Schyns et al., 2019) influencent les schémas de recyclage de l'humidité continentale. Selon certaines études, la déforestation et la réduction de la végétation peuvent perturber ce recyclage et affecter les régimes de précipitations régionaux (Keune & Miralles, 2019; Savenije, 1995; Zemp et al., 2014; Zemp, Schleussner, Barbosa, & Rammig, 2017; Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al., 2017). La déforestation et la dégradation des sols entraînent la perte d'écosystèmes naturels et pourraient réduire la résilience des forêts résiduelles en affectant les schémas de recyclage de l'humidité continentale (Zemp, Schleussner, Barbosa, & Rammig, 2017; Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al.,

2017). En parallèle, on observe un intérêt croissant pour l'afforestation² comme moyen de capture et de stockage biologiques du carbone (BCSC) visant à atténuer le changement climatique (ONU, 2015), ainsi que pour la restauration des écosystèmes, reconnue pour son rôle dans le maintien des multiples contributions de la nature aux populations (NCP) (Ellis et al., 2019). Bastin et al. (2019) estiment que le potentiel mondial de restauration forestière permettrait de réhabiliter 0,9 milliard d'hectares de couvert forestier, avec un stockage associé de 205 Gt de carbone. Entre 2000 et 2012, 80 millions d'hectares de sol ont été reforestés ou afforestés (Bentley & Coomes, 2020). Si les plantations forestières peuvent modifier le climat aussi bien régionalement (Branch & Wulfmeyer, 2019) qu'à l'échelle mondiale (Swann et al., 2012) par le biais des

¹En mécanique classique, la quantité de mouvement (p) d'un point matériel de masse (m), animé d'une vitesse (v), est définie comme produit de la masse et de la vitesse : $p = mv$.

²L'afforestation ou boisement est une plantation d'arbres ayant pour but d'établir un état boisé sur une surface longtemps restée dépourvue d'arbre, ou n'ayant éventuellement jamais (aux échelles humaines de temps) appartenu à l'aire forestière. Elle se distingue du reboisement ou de la reforestation qui sont réalisés par l'homme sur une surface déboisée par lui. source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Afforestation>

interactions terre-atmosphère, elles sont également susceptibles de perturber l'hydrologie des bassins versants et les dynamiques sédimentaires (Farley et al., 2005), comme l'ont montré de nombreux projets forestiers à travers le monde (l'introduction d'Eucalyptus exotique en Afrique du Sud par exemple) (Albaugh et al., 2013).

Par conséquent, dans un contexte de raréfaction des ressources en eau, il est impératif de considérer aussi bien les effets de la déforestation que ceux de la reforestation sur le cycle hydrologique (Sterling et al., 2013). Nous manquons de données précises sur les effets du changement d'usage des sols sur les schémas de recyclage de l'humidité continentale (Spracklen et al., 2018), et sur l'hypothèse avancée que la déforestation et la reforestation sont susceptibles de perturber ou d'intensifier (respectivement) ces schémas. Cette étude a donc pour vocation d'établir une synthèse de notre compréhension actuelle du rôle de la végétation en répondant à la question suivante : **De quelle façon l'usage et le changement**

2. Contexte historique et théorique

Historiquement, les changements de couvert végétal induits par l'activité humaine ont modifié de vastes zones de la surface terrestre ainsi que les processus hydrologiques qui leur sont associés. Le débat relatif à l'impact des forêts sur l'hydrologie s'articule sur la question suivante : les arbres sont-ils des consommateurs ou des producteurs nets d'eau ? (Andréassian, 2004 ; Ellison et al., 2012) Si les forêts mobilisent l'eau via les processus de transpiration et d'évaporation (réduisant ainsi la disponibilité locale de l'eau), elles améliorent également l'infiltration et la capacité de rétention hydrique du sol (augmentant ainsi cette disponibilité locale). C'est l'équilibre entre ces processus, dans des contextes spécifiques, qui déterminent si la végétation est un consommateur ou un producteur net d'eau (Peña-Arancibia et al., 2019). Afin d'étudier l'effet des forêts à l'échelle des bassins versants, de nombreuses études hydrologiques employant l'approche par bassins appariés (*paired-catchment approaches*) ont été menées depuis les années 1970 (Bosch & Hewlett, 1982). La suppression des forêts s'accompagne généralement d'une augmentation du débit des cours d'eau, tandis que le reboisement entraîne une diminution de ce débit (en moyenne de 23 % sur 5 ans et de 38 % sur 25 ans) (Farley et al., 2005 ; Filoso et al., 2017). Cependant, l'augmentation du couvert forestier réduit également les débits de pointe et les crues destructrices en augmentant la capacité d'infiltration des sols. Dans certains cas, on observe que le débit des cours d'eau s'est également partiellement rétabli (Bentley & Coomes, 2020). Les effets hydrologiques de la déforestation et de la restauration forestière sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants restent cependant variables, en raison de la diversité des facteurs paysagers impliqués (Andréassian, 2004 ; Filoso et al., 2017).

À l'échelle planétaire, les propriétés biophysiques de la végétation régulent le cycle hydrologique et le climat. Les

d'usage des sols affectent-ils les régimes de précipitation via le processus de recyclage de l'humidité continentale ?

En nous appuyant sur des études fondées sur l'observation et la modélisation menées à travers le monde, nous répondrons à cette question au moyen d'une revue exploratoire (*scoping review*), et proposerons une synthèse de l'état actuel des connaissances sur les effets du changement d'usage des sols sur le recyclage de l'humidité continentale. Après avoir présenté le contexte historique et théorique, nous décrirons la méthodologie de cette revue, puis nous exposerons les résultats, comprenant, d'une part, des évaluations mondiales et régionales des effets empiriques du changement d'usage des sols, et, d'autre part, les implications de ces effets en matière de gouvernance de ces changements.

interactions entre la biosphère et l'atmosphère comprennent les échanges d'eau, d'énergie, et de quantité de mouvement (interactions biophysiques), ainsi que des échanges de gaz (interactions biogéochimiques), qui contribuent conjointement à la formation des régimes climatiques observés.

L'étude de ces interactions au moyen de modèles numériques a permis d'améliorer notre compréhension des effets de la couverture des sols sur le climat mondial. Le modèle illustratif de Daisyworld (Watson & Lovelock, 1983) met en évidence les propriétés d'autorégulation de la végétation (ici des fleurs de pâquerettes) qui contribuent à stabiliser la température atmosphérique grâce aux rétroactions radiatives. Une expérience de pensée similaire proposée par Kleidon et al. (2000) explore l'effet de la végétation sur le système climatique en conceptualisant deux modèles de mondes opposés — un « monde désertique » et une « planète verte » — en intégrant à la fois des rétroactions radiatives et hydrologiques. La simulation montre qu'une planète verte génère trois fois plus d'évaporation et de transpiration continentales, deux fois plus de précipitations, et entraîne une baisse de la température de surface. Le recyclage de l'humidité continentale y augmente du fait d'une disponibilité énergétique accrue liée au rayonnement absorbé, ainsi que de l'augmentation de la capacité de rétention hydrique des sols associée à la couverture arborée. Bien que ces modèles extrêmes soient irréalistes, ils mettent en évidence l'effet climatique significatif des interactions au sein du système biosphère-atmosphère.

2.1. Théorie du recyclage de l'humidité et du changement d'usage des sols

La théorie des liens entre les forêts et les précipitations remonte au XVe siècle (voir Bennett & Barton, 2018). Les observations réalisées lors de la colonisation européenne du continent américain ont conduit des naturalistes à soutenir que les précipitations au-dessus des vastes forêts

continentales provenaient en partie de l'évaporation des forêts elles-mêmes. Par ailleurs, la déforestation observée sur certaines îles colonisées, telles que les Açores, a été associée à une diminution des précipitations. Toutefois, faute d'outils permettant de quantifier ces phénomènes, ces hypothèses n'ont pu être vérifiées (Bennett & Barton, 2018). Les biogéographes considéraient alors que la répartition de la végétation observée résultait de régimes météorologiques plus ou moins stables (les précipitations étant considérées comme une variable externe, indépendante de l'influence de la végétation elle-même) (van Noordwijk & Ellison, 2019). Dans les années 1970, la baisse des précipitations observée au Sahel a été attribuée à une diminution du couvert végétal due au surpâturage et à la dégradation des paysages (Charney & Stone, 1975). Savenije (1995) a développé une théorie du recyclage de l'humidité fondée sur les processus hydrologiques, confirmant le rôle causal de la réduction du couvert végétal dans la survenue des épisodes de sécheresse. Des études récentes sur le recyclage de l'humidité continentale mettent en évidence une forte dépendance des régions tropicales humides aux précipitations recyclées, notamment les bassins amazonien et congolais (Wang-Erlandsson et al., 2018). Les progrès des modèles

informatiques et la disponibilité de données climatiques globales ont ravivé l'intérêt pour le recyclage de l'humidité continentale (Brubaker et al., 1993), interrogeant la mesure dans laquelle la surface terrestre, et en particulier la végétation, contribue aux régimes de précipitations via les échanges de masse, d'énergie et de quantité de mouvement (Bennett & Barton, 2018 ; Bonan, 2008 ; Eltahir & Bras, 1996). La théorie de la pompe biotique (Makarieva & Gorshkov, 2007) postule que les forêts continentales jouent un rôle crucial dans le transport de l'humidité atmosphérique d'origine océanique vers l'intérieur des continents. Ces nouvelles avancées ont conduit à l'idée que les forêts influencent le climat et contribuent à la formation des précipitations. Par conséquent, la déforestation entraînerait une diminution des précipitations via des rétroactions opérant à la fois aux échelles micro et macroscopique (figure 2). De nombreuses études montrent cependant que la déforestation entraîne des effets plus complexes, à l'échelle locale comme régionale, sur le climat et l'atmosphère (Boers et al., 2017 ; Chen et al., 2019 ; Ruiz-Vásquez et al., 2020 ; Silva et al., 2016 ; Zemp, Schleussner, Barbosa, & Rammig, 2017 ; Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al., 2017), qui compliquent les prévisions des régimes de précipitations.

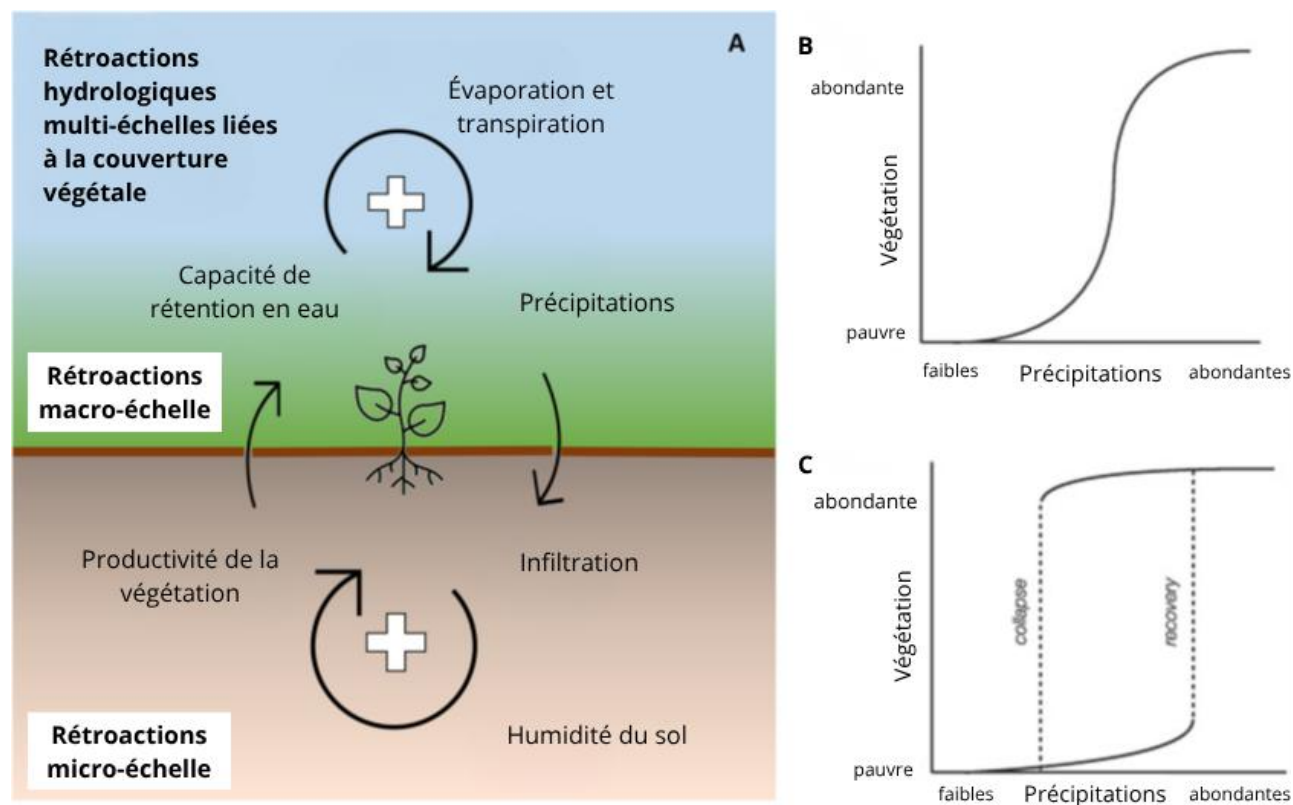


Figure 2. Schéma conceptuel des rétroactions hydrologiques multi-échelles liées à la couverture végétale. (A) À l'échelle micro, la couverture végétale augmente la capacité d'infiltration du sol via des modifications de ses propriétés (par exemple, la structure racinaire), ce qui accroît l'humidité du sol et, par conséquent, la productivité végétale. À l'échelle macroscopique, l'augmentation de la capacité de rétention en eau du paysage accroît l'évaporation et la transpiration, ce qui peut ensuite conduire à une augmentation des précipitations. La boucle de rétroaction positive à l'échelle microscopique est liée à l'échelle macroscopique, les deux cycles se renforçant mutuellement. La déforestation peut perturber ces boucles de rétroaction positives et entraîner une diminution des précipitations. Dans le contexte du changement climatique, ces rétroactions peuvent également être perturbées, dans la mesure où l'intensification des précipitations peut modifier l'infiltration et la rétention en eau du paysage (Huang et al., 2014). (B, C) Le panneau B illustre une relation non linéaire (et parfois discontinue, panneau C) entre les précipitations et la végétation (panneaux B et C, d'après Keys et al., 2019).

2.2 Approches, outils et méthodes pour l'analyse du recyclage de l'humidité

La boîte à outils hydrologique permettant d'évaluer l'effet du changement d'usage des sols sur les précipitations comprend des méthodes numériques, statistiques et chimiques (Gimeno et al., 2012). Les méthodes numériques s'appuient sur des modèles couplés surface continentale-végétation et des modèles climatiques afin de représenter les interactions pertinentes entre la biosphère et l'atmosphère. À l'échelle mondiale, des modèles de circulation générale (GCM) ont été couplés à des modèles dynamiques de végétation afin de simuler les interactions entre le climat et la végétation (voir par exemple Foley et al., 1998). Il existe également des modèles mécanistes qui décomposent le flux ascendant d'humidité observé en différents flux, permettant de quantifier la contribution relative des flux régulés par la végétation (Wang-Erlandsson et al., 2014), ou qui s'appuient sur le bilan verticalement intégré de l'humidité atmosphérique pour comprendre l'impact des flux d'humidité sur l'ensemble des couches de l'atmosphère (Chen et al., 2019). Des modèles de suivi de l'humidité atmosphérique contraints par des données météorologiques permettent ensuite d'identifier les sources et les puits de ces flux ascendants d'humidité, et de suivre les trajectoires de l'humidité dans le temps, vers l'amont et l'aval (Keune & Miralles, 2019 ; van der Ent et al., 2014 ; Zemp et al., 2014). Ces simulations peuvent ensuite être synthétisées sous forme d'indicateurs quantifiant la dépendance régionale à l'humidité recyclée. Le *ratio de recyclage des précipitations* ρ , par exemple, est défini comme le rapport entre la part des précipitations issue de l'évaporation des surfaces continentales (P_E), et celle issue des sources océaniques (P_O) (van der Ent et al., 2014) :

$$\rho = P_E / P_O$$

À l'inverse, le *ratio de recyclage de l'évaporation* désigne la part d'évaporation régionale qui retombe sur les surfaces continentales sous forme de précipitations. Toutefois, l'effet du changements d'usage des sols sur les schémas de recyclage de l'humidité reste difficile à prévoir du fait des incertitudes liées aux processus multi-échelles à l'œuvre dans l'atmosphère : les modèles de traçage dynamique de l'humidité (Keune & Miralles, 2019 ; Keys et al., 2012 ; Tuinenburg et al., 2020 ; Van Der Ent et al., 2010) et les modèles de partitionnement statique de l'humidité (Wang-Erlandsson et al., 2014) traitent principalement des processus hydrologiques dits de « premier ordre » (tels que les flux d'évaporation, les relations sources-puits). Des effets de « second ordre » peuvent apparaître lorsque les processus de « premier ordre » influencent les propriétés et processus atmosphériques, notamment l'énergie statique humide de la couche limite (Eltahir, 1998), la stabilité humide globale et la convection (Kooperman et al., 2018), ainsi que les

schémas de circulation à l'échelle continentale et mondiale (Makarieva et al., 2009, 2014). Par ailleurs, les hypothèses concernant le mélange vertical de l'atmosphère constituent la principale source d'incertitude des modèles de suivi de l'humidité (Tuinenburg et al., 2020).

Les approches statistiques mettent en relation les mesures de changement d'usage des sols et les variations observées des précipitations. (Sterling et al., 2013). Les variations de l'évapotranspiration totale (TET) peuvent également être estimées à partir de tours à flux, d'imagerie satellitaire et de données climatiques (Shivers et al., 2019). La causalité entre le changement d'usage des sols et les modifications des régimes de précipitations reste toutefois difficile à démontrer du fait de l'influence de nombreux autres facteurs biophysiques et climatiques susceptibles d'expliquer les variations des précipitations (par exemple, les circulations atmosphériques à méso-échelle) (Spracklen et al., 2018). Par ailleurs, les méthodes statistiques ne permettent pas d'estimer de manière satisfaisante les indicateurs de recyclage des précipitations ou de l'évaporation.

Les approches chimiques s'appuient sur des mesures isotopiques permettant de remonter aux différentes sources d'humidité et de quantifier leur contribution aux précipitations locales (Zhao et al., 2019). Les rapports isotopiques stables de l'hydrogène et de l'oxygène (c'est-à-dire la signature isotopique de l'eau, définie par les proportions relatives de ses isotopes stables) varient selon les différentes sources d'humidité (advection, évaporation ou transpiration) et renseignent ainsi sur l'origine de l'humidité atmosphérique (Gat, 1996).

Les ratios de recyclage des précipitations et de l'évaporation constituent des indicateurs de l'intensité du couplage hydrologique entre la surface terrestre et l'atmosphère. On les utilise pour identifier les réponses locales, régionales ou à distance des précipitations à l'évaporation et à la transpiration de surface (Goessling & Reick, 2011). Ils dépendent de la géométrie (forme) des surfaces considérées et de l'échelle d'analyse : l'évaporation d'une surface infiniment petite contribue de manière négligeable aux précipitations, tandis que la Terre entière présente un ratio de recyclage de l'humidité égal à 1 (Trenberth, 1999). Du fait de l'hétérogénéité spatiale rencontrée lors des changements d'échelle, la relation entre échelle et recyclage suit une loi non linéaire (Dominguez et al., 2006). Au-delà de la forme et de l'échelle, la localisation spécifique à la surface de la Terre influence également fortement l'amplitude des ratios de précipitation et d'évaporation (Ma et al., 2019 ; Tuinenburg et al., 2020).

Le *precipitationshed*³, que l'on qualifiera en français de bassin source des précipitations (Keys et al., 2012) caractérise la dépendance spatiale entre les régions sources et les régions réceptrices de l'humidité atmosphérique. Il

³Les concepts de *precipitationshed* et *evaporationshed* développés dans ce paragraphe n'ayant pas encore d'équivalence standard dans la littérature francophone, nous formulons ici les propositions d'équivalence suivantes en

français : bassin source des précipitations et bassin de réception des précipitations issues de l'évaporation (respectivement).

correspond à « l'atmosphère située au vent ainsi qu'à la surface terrestre en amont qui contribue à l'évaporation alimentant les précipitations (par exemple les pluies) d'un site donné » (Keys et al., 2012 : 734), de manière similaire aux connexions hydrologiques entre zones amont et aval d'un bassin versant. Il constitue ainsi un cadre analytique permettant d'identifier la zone source des précipitations d'une région d'intérêt (qui est alors la région réceptrice). À l'inverse, l'*evaporationshed* (Van der Ent et al., 2013) désigne le bassin de réception des précipitations issues de l'évaporation d'une région donnée.

Contrairement aux bassins versants, les bassins source des précipitations sont définis de manière statistique, en ce sens qu'ils ne possèdent pas de frontières fixes et qu'ils sont soumis à des variations interannuelles et intra-annuelles (Keys et al., 2012). De manière similaire, le concept de réseau de recyclage des précipitations à l'échelle des bassins versants (*watershed precipitation recycling network*) établit des connexions en matière d'humidité atmosphérique à l'échelle des bassins versants, afin d'identifier la manière dont l'évaporation dans un bassin contribue aux précipitations dans un autre (Keune & Miralles, 2019). Bien que les estimations du taux de recyclage de l'humidité continentale constituent, du fait de la succession de processus intervenant dans l'atmosphère, des indicateurs limités de l'effet des variations de l'évaporation sur les précipitations (Goessling & Reick, 2011), elles sont utiles pour évaluer la vulnérabilité d'une région aux changements de l'évaporation au sein de son bassin source des précipitations.

3. Méthodologie

En l'absence de revue systématique existante, une revue exploratoire de la littérature (*scoping review*) portant sur les schémas de recyclage de l'humidité en lien avec les changements d'usage des sols (LUC) a été réalisée à partir

des critères de recherche suivants dans Scopus⁴ : "*Terrestrial moisture recycling*" OR "*Moisture Recycling*" AND "*Atmospheric*" OR "*Land-Atmosphere*" OR "*Land-atmosphere dynamics*" OR "*Land-use change*" AND "*moisture recycling*" (1 106 résultats au 5 octobre 2020). Les publications pertinentes ont ensuite été sélectionnées. Des références supplémentaires ont été identifiées par recherche rétrospective des références bibliographiques (*backtracking*) et par recherche manuelle, puis intégrées au corpus documentaire.

Les références sélectionnées ont été analysées afin d'identifier : (1) les mécanismes et rétroactions pertinents au sein du système sol-végétation-climat, en particulier les dynamiques opérant aux échelles micro et macroscopique ; et (2) les observations empiriques ainsi que les simulations de modélisation portant sur les changements hydrologiques quantitatifs associés aux changements d'usage des sols.

Nous avons distingué les études fondées sur des observations et les études fondées sur des simulations en fonction du caractère *ex post* ou *ex ante* des résultats présentés : les études empiriques sont fondées sur les données et reconstruisent des observations passées ou actuelles ; les simulations de modèles explorent des scénarios futurs. Les études alimentant des modèles mécanistes avec des données issues de l'observation pour analyser des processus passés ou actuels ont été classées comme « mixtes ». Par ailleurs, les études empiriques ont été classées en fonction du biome dominant de la zone d'étude. Dans le cas de régions d'études transcontinentales (par ex., de Vrese et al., 2016), la région réceptrice a été retenue comme biome principal. Lorsque les régions d'étude traversaient plusieurs biomes (par ex., Syktus & McAlpine, 2016), le biome de plus grande superficie a été retenu comme biome principal. Les études essentiellement théoriques ou de type revue de littérature n'ont pas été incluses dans cette analyse de fréquence (Figure 3).

⁴NDT : s'agissant d'un élément méthodologique précis, la requête a été conservée sous sa forme anglophone telle qu'elle a été entrée dans Scopus. En voici une traduction libre : « recyclage de l'humidité continentale » OR « recyclage de l'humidité » AND « atmosphérique » OR « terre-atmosphère

» OR « dynamique terre-atmosphère » OR « changement d'usage des sols » AND « recyclage de l'humidité ».

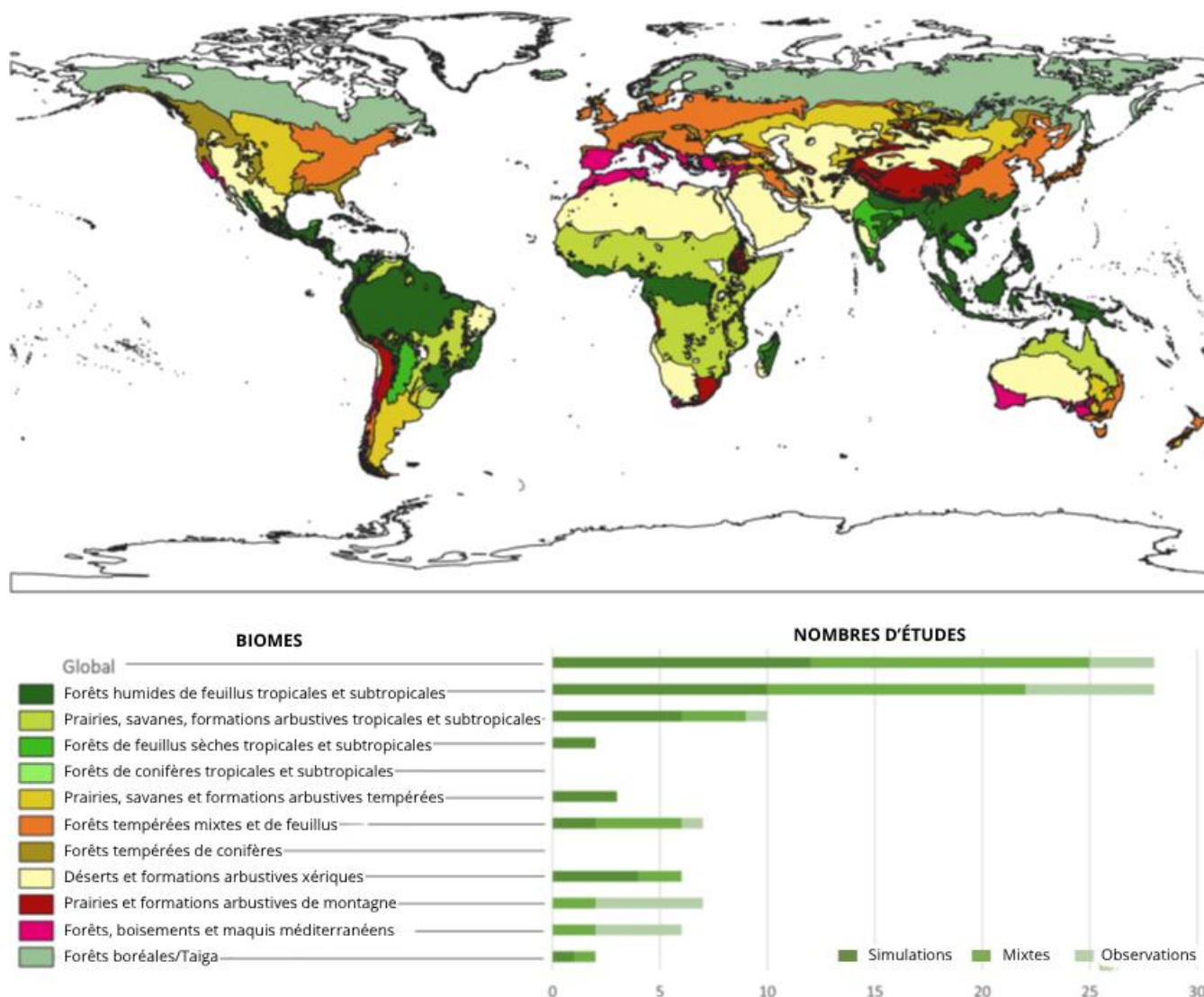


Figure 3. Aperçu du nombre et du type d'études réalisées pour chaque biome. Au total, 99 études ont été incluses. Les biomes tels que « roches et glaces » et « eaux continentales » sont exclus de la figure. Les biomes sont issus de Olson, David M. et al. (2001).

4. Résultats

Ce chapitre présente les résultats de la revue exploratoire et s'organise en trois sections : une section décrivant les schémas spatio-temporels généraux du recyclage de l'humidité (section 4.1), une section empirique présentant les éléments de preuves — issus de simulations et d'observations — de l'impact du changement d'usage des sols sur les régimes de précipitations (section 4.2), et une section consacrée aux instruments de gouvernance (section 4.3).

4.1. Schémas de recyclage de l'humidité

La littérature sur le recyclage de l'humidité continentale révèle une forte variabilité spatio-temporelle de la contribution de l'humidité recyclée aux précipitations régionales. Gimeno et al. (2012) ont déjà analysé la variation des sources d'humidité (océaniques et continentales) selon

les régions du globe. Certaines régions reçoivent la majeure partie de leurs précipitations de sources océaniques (par ex. l'Europe occidentale), tandis que d'autres dépendent d'une humidité d'origine continentale (par ex. les régions intérieures comme la savane d'Afrique de l'Est et la steppe mongole) (Miralles et al., 2016). Certaines régions dépendent largement de l'humidité recyclée au sein de leur propre bassin versant (par ex., 32 % des précipitations sur l'Amazonie proviennent du bassin lui-même) (Staal et al., 2018), tandis que d'autres dépendent de l'évaporation issue d'autres bassins versants (par ex., 89 % des précipitations sur le bassin du Nil proviennent de sources situées en dehors de ce bassin) (Mohamed et al., 2005).

Des zones clé (*hotspots*) de fortes rétroactions régionales sur les précipitations sont observées dans différents contextes : les zones de transition (prairies et savanes), notamment dans les régions semi-arides et de mousson (Green et al., 2017) ;

les régions où le soulèvement orographique (lorsque l'air est forcé de s'élever au contact des reliefs) génère des épisodes de précipitations (Van Der Ent et al., 2010) ; les hautes terres subtropicales caractérisées par une forte évaporation et de faibles flux advectifs d'humidité ; et les zones de convergence (rencontre de masses d'air) (Trenberth, 1999).

Des gradients traduisant une augmentation de la dépendance des précipitations au recyclage de l'humidité à mesure que l'on s'éloigne des côtes ont également été observés (Njitchoua et al., 1999 ; Rios-Entenza et al., 2014).

La variabilité saisonnière du recyclage de l'humidité continentale (Tuinenburg et al., 2012) s'explique par le fait que la surface des terres émergées est plus chaude que l'océan en été, ce qui entraîne des taux de recyclage des précipitations continentales plus élevés (Dominguez et al., 2006 ; Szeto, 2002). Durant la saison humide, une plus grande disponibilité de l'humidité à la surface terrestre accroît l'importance relative de l'évaporation de surface dans les précipitations (Van Der Ent et al., 2010). En été, 74 % des précipitations au-dessus des bassins versants européens proviennent de l'humidité évaporée fournie par d'autres bassins versants (Keune & Miralles, 2019). Certaines régions dépendent fortement de l'humidité recyclée pour produire les pics de précipitations printanières (Holgate et al., 2020 ; Rios-Entenza et al., 2014).

La variabilité interannuelle des schémas de recyclage de l'humidité peut être expliquée par des cycles météorologiques tels que l'oscillation australe El Niño (ENSO) (Z.Yang et al., 2018), l'oscillation nord-atlantique (NAO) et les cycles de mousson (Guo et al., 2019). Les anomalies météorologiques, telles que les épisodes de précipitations extrêmes ou de sécheresse, peuvent être attribuées à une forte évaporation continentale (Kelemen et al., 2016) ou à une faible advection (transport horizontal de l'humidité) (Bisselink & Dolman, 2009). Dans le bassin du Congo, des épisodes de précipitations extrêmes ont été associés à une diminution du recyclage de l'humidité, en lien avec une disponibilité relativement plus faible en humidité des sols et un ruissellement de surface plus important (Saeed et al., 2013). En réponse au changement climatique, de tels épisodes de précipitations extrêmes devraient devenir plus fréquents et l'intensité des précipitations devraient augmenter (Emori & Brown, 2005 ; Seager et al., 2010 ; Sun et al., 2007 ; Trenberth et al., 2003). Cette évolution devrait entraîner une augmentation de la part du ruissellement et une réduction de l'infiltration de l'humidité des sols (Lan et al., 2016), avec des effets susceptibles de se propager via des téléconnexions atmosphériques (interactions climatiques à distance entre régions du globe) (Boers et al., 2019).

Les échelles spatiales des précipitations variant entre 500 et 7 000 km (Van Der Ent & Savenije, 2011), l'eau évaporée est susceptible de précipiter en dehors du bassin hydrologique dont elle est issue. Dans le nord de la Chine, 15 à 50 % des précipitations sont issues de l'humidité continentale locale, c'est-à-dire du bassin hydrologique

considéré (Zhao et al., 2019). Les précipitations dans les forêts du sud-ouest du bassin amazonien proviennent en grande partie de la transpiration et de l'évaporation d'autres parties du bassin (Staal et al., 2018). Le bassin du Congo dépend largement de l'humidité évaporée en Afrique de l'Est et, en retour, alimente en précipitations la région du Sahel. Les cascades de recyclage de l'humidité dans cette région semblent s'établir sous l'effet des régimes dominants de vents continentaux (Zemp et al., 2014). Les cascades de recyclage de l'humidité en Amérique du Sud représentent environ 10 % des précipitations totales du continent. Dans le bassin de La Plata, 17 à 18 % des précipitations proviennent de telles cascades, principalement issues de l'Amazonie, la topographie des Andes orientant les masses d'air humides amazoniennes vers le bassin de La Plata. Le recyclage local de l'humidité est dominant dans les régions montagneuses (par exemple le plateau tibétain et les Andes), en raison du soulèvement orographique (Dominguez et al., 2006 ; Kong & Pang, 2016). Autour du plateau tibétain, 50 à 80 % des précipitations sont issues de l'eau évaporée localement (An et al., 2017 ; Kurita & Yamada, 2008). On y observe une augmentation du recyclage de l'humidité, que l'on peut expliquer par le changement climatique, qui accroît à la fois les taux d'évaporation et de précipitations dans la région (An et al., 2017).

Dans les régions tropicales, les échelles spatiales des précipitations sont généralement plus courtes (500 à 2 000 km). Les précipitations y sont fortement influencées par les dynamiques diurnes et monsoniques (Giles et al., 2021, Tuinenburg et al., 2012), caractérisées par de fortes rétroactions liées à l'humidité du sol (l'évapotranspiration locale favorise des précipitations l'après-midi) et par une courte durée de vie des masses d'air. En Amazonie, environ un tiers des précipitations provient du bassin lui-même, dont 60 % sont issus de la transpiration des plantes (Staal et al., 2018). La capacité de ces plantes à accéder à l'humidité des sols profonds est importante pour maintenir leur activité transpiratoire en saison sèche (Wang-Erlandsson et al., 2014) et soutenir ainsi les précipitations même lorsque les apports océaniques par advection sont faibles (Staal et al., 2018). En moyenne, 46 % de la transpiration retombent sous forme de précipitations dans le bassin, contre 70 % durant la seule saison sèche (Staal et al., 2018). Dans le bassin du Gange, le recyclage de l'humidité varie entre 5 et 60 %, avec des valeurs faibles en hiver et élevées en été pendant la mousson. La variabilité spatiale du budget hydrique atmosphérique (70 % de différence interbassins) est très probablement due aux systèmes d'irrigation qui contribuent à accroître l'évaporation locale, même durant la saison sèche (Tuinenburg et al., 2012). L'évapotranspiration (TET) issue des seuls systèmes d'irrigation en Inde peut représenter jusqu'à 40 % des précipitations dans certaines régions d'Afrique de l'Est (de Vrese et al., 2016). Lorsque l'évaporation est élevée, la distance parcourue par l'humidité est généralement plus courte, ce qui peut s'expliquer par le déclenchement de précipitations locales par convection.

Dans les régions où l'eau constitue un facteur limitant, la part du recyclage de l'humidité continentale varie généralement peu entre la saison humide et la saison sèche. Dans le bassin du Nil, la variabilité interannuelle du recyclage de l'humidité est faible, comprise entre 8 et 14 %. À l'échelle annuelle, plus de 89 % des ressources en eau proviennent de l'extérieur du bassin (Mohamed et al., 2005). Toujours dans ce type de régions, les taux de recyclage observés pendant la saison humide varient fortement : ils ne sont que de 3 % dans les Pampas sud-américaines, contre 28 % dans le Kalahari. Durant la saison sèche, ce taux peut atteindre 34 % dans le Kalahari (Miralles et al., 2016). Au Sahel, le recyclage local de l'humidité semble important durant la période post-mousson, en raison de l'humidité des sols et du reverdissement de la végétation (Yu et al., 2017). Dans les régions caractérisées par une saison sèche, on observe une corrélation entre la forte productivité de la végétation et l'augmentation de l'évaporation et de la transpiration, lesquelles contribuent à une augmentation des précipitations (Green et al., 2017). Cela implique que, dans les régions sèches, le fait de retenir l'eau localement (c'est-à-dire d'empêcher un ruissellement rapide) pourrait entraîner une intensification des précipitations locales pendant la saison humide et la période post-mousson. La mise en place de dispositifs de collecte de l'eau, tels que les demi-lunes

(Figure 4), peut améliorer la rétention de l'humidité dans le paysage et modifier le méso climat via des changements de température de surface (Castelli et al., 2019). De nombreuses régions semi-arides dépendent du recyclage de l'humidité pour leur production agricole pendant la saison de croissance, ce qui les rend également vulnérables, sur le plan socio-économique, aux variations des précipitations (Dominguez et al., 2006). Les épisodes secs dans ces régions peuvent favoriser un couplage terre-atmosphère amplificateur (rétroactions du système terre-atmosphère renforçant les anomalies d'aridité), susceptible d'intensifier les sécheresses (Miralles et al., 2016). Ainsi, les patterns du recyclage de l'humidité continentale dans le temps et dans l'espace apparaissent fortement variables et influencés par la géographie locale, le climat, la topographie et les caractéristiques de la végétation. Gimeno et al. (2020) proposent une revue approfondie du transport atmosphérique de l'humidité et de l'établissement des relations sources-puits, mais n'abordent pas explicitement la manière dont les changements de couverture des sols influencent ces relations via la régulation de l'humidité par la végétation (Keys et al., 2016). Les paragraphes suivants se concentrent donc sur l'état des connaissances concernant l'impact des changements de végétation sur le transport atmosphérique de l'humidité et son recyclage.



Figure 4. Mise en place de demi-lunes pour capter le ruissellement dans des paysages dégradés du Baviaanskloof Hartland, en Afrique du Sud (Source : Living Lands, 2020).

4.2 Effets du changement d'usage des sols sur les régimes de précipitations

Cette section examine les résultats des études d'observation et de modélisation portant sur l'impact du changement d'usage des sols sur le recyclage de l'humidité continentale. Les indicateurs de recyclage de l'humidité (par exemple le taux de recyclage de l'évaporation) ne permettent pas d'estimer directement l'impact du changement d'usage des sols sur les précipitations. Cette limite s'explique par les incertitudes liées aux modifications du bilan atmosphérique de l'humidité (Goessling & Reick, 2011), ainsi que par le rôle actif joué par l'eau dans le système climatique.

Bien que des diminutions temporaires de l'évaporation aient été associées à des effets significatifs sur les précipitations (Keys et al., 2014), les études examinant spécifiquement l'impact du changement d'usage des sols sur les précipitations restent peu nombreuses. Cela n'a rien de surprenant : les changements d'échelle, les limites de disponibilité des données et la difficulté d'établir des liens de causalité dans des systèmes complexes compliquent la mise en évidence d'effets clairement attribuables (Spracklen et al., 2018). Dans cette section, nous examinons d'abord le rôle de la végétation dans le recyclage de l'humidité de façon générale, avant d'aborder plus spécifiquement les effets de la déforestation et de la reforestation.

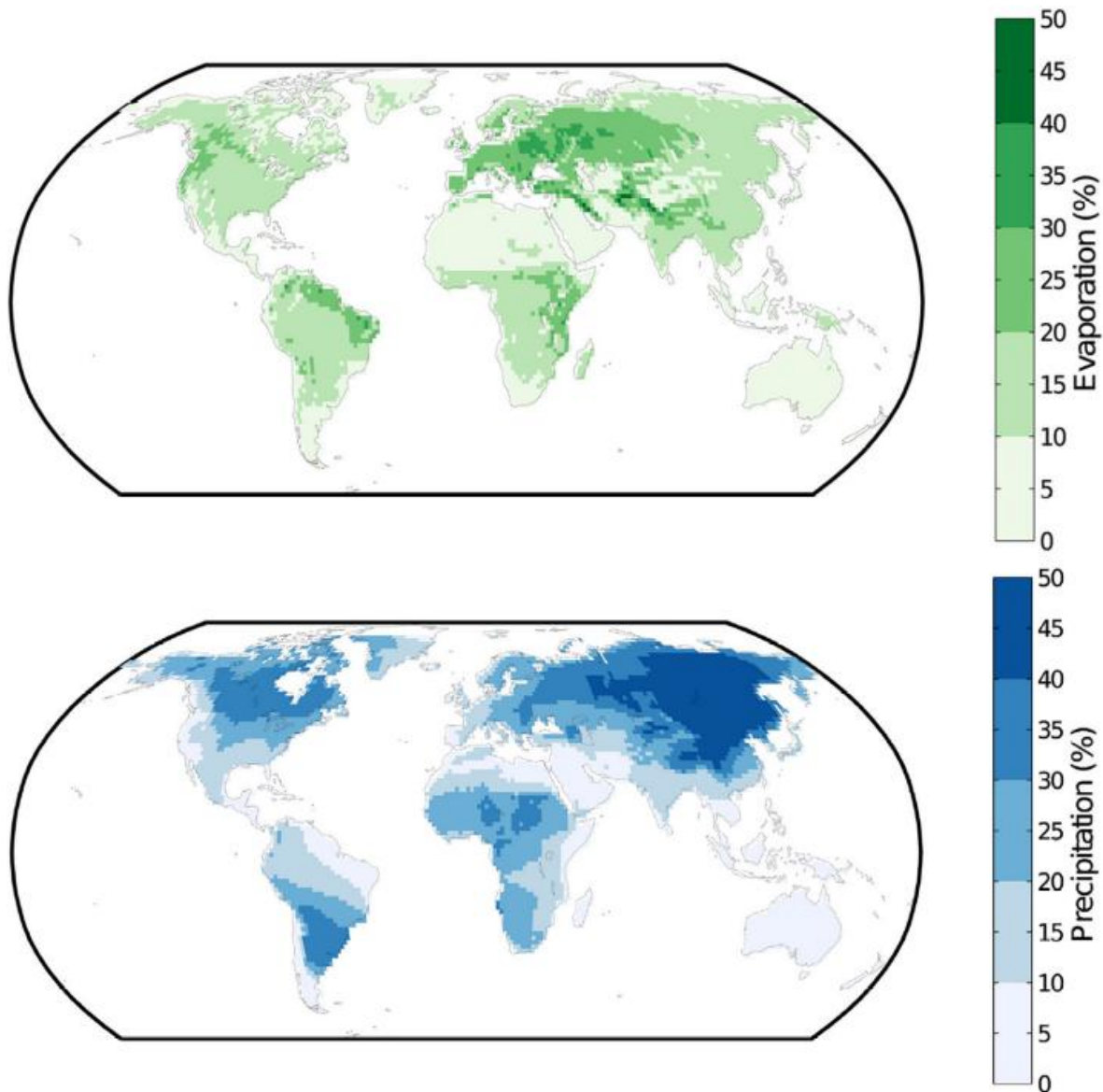


Figure 5. Régions sources (en haut) : pourcentage de l'évaporation régulée par la végétation qui retombe sous forme de précipitations sur les terres. Source : figure reproduite d'après Keys et al. (2016). Régions puits (en bas) : pourcentage des précipitations provenant de l'évaporation régulée par la végétation. Les données sont générées à l'aide du modèle de suivi de l'humidité atmosphérique eulérien Water Accounting Model à deux couches (WAM-2layers). Source : figure reproduite avec l'autorisation des auteurs, d'après Keys et al. (2016).

4.2.1 Effet de la végétation sur les flux ascendants d'humidité

La végétation contrôle l'évapotranspiration totale (TET) selon les dynamiques suivantes : l'intensité, les sources et les échelles temporelles (Wang-Erlandsson et al., 2014). Une analyse globale comparant l'état actuel de la végétation à un scénario hypothétique sans végétation montre que 22 % des précipitations sur les terres émergées sont régulées par la végétation (Figure 5) (Keys et al., 2016). La contribution relative de la végétation présente une forte variabilité spatiale. Dans certaines régions, comme le Mato Grosso au Brésil — une vaste zone marquée par des taux élevés de changement d'usage des sols et une grande diversité d'usages — jusqu'à 45 % de l'évaporation est régulée par la végétation. En comparaison, un scénario sans végétation serait associé à

une moindre variabilité interannuelle des précipitations et à une forte diminution (–45 %) des apports pluviométriques durant la saison sèche. Cela indique que, dans cette région, le recyclage de l'humidité régulé par la végétation contribue de manière importante aux précipitations durant la saison sèche (Keys et al., 2016). D'autres approches proposent des estimations de la contribution relative des flux régulés par la végétation, tels que la transpiration et l'interception, à partir de modèles mécanistes de partitionnement. Par exemple, Wang-Erlandsson et al. (2014) utilisent une approche mécaniste pour montrer que la transpiration représente 59 % de l'évapotranspiration totale (TET) moyenne mondiale. Par ailleurs, différentes conversions d'usage des sols⁵ (changements marqués de type d'usage) sont associées à des effets spécifiques sur l'évapotranspiration totale (TET) (Figure 6) (Sterling et al., 2013).

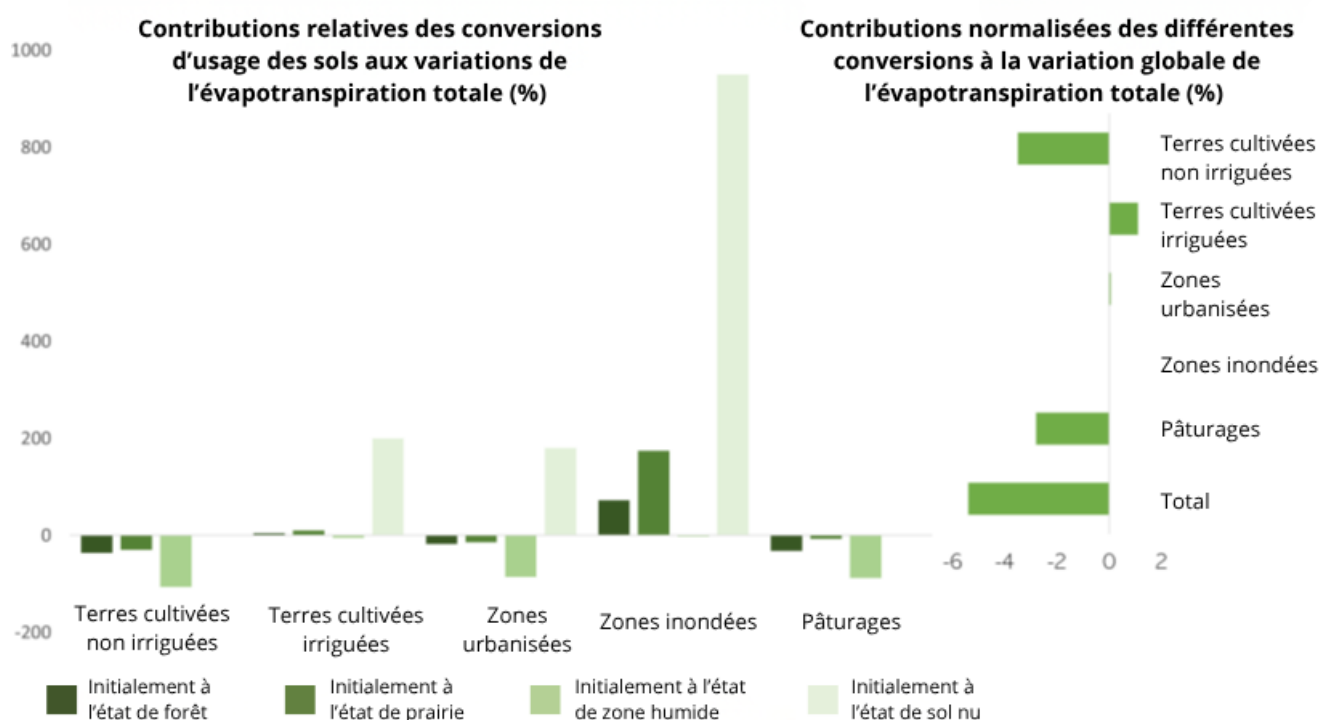


Figure 6. Contributions de différents types de conversions d'usage des sols aux variations de l'évapotranspiration totale (TET). Le graphique horizontal à gauche présente les contributions relatives des conversions d'usage (d'une couverture initiale vers une couverture anthropisée) aux variations de l'évaporation et de la transpiration totales à l'échelle globale (TET). Par exemple, la conversion de sols nus en zones inondées augmente la TET locale de plus de 900 % sur ces surfaces. Le graphique de droite présente les contributions normalisées des différentes conversions à la variation globale de la TET (%), montrant que la conversion en terres agricoles non irriguées a entraîné une réduction de près de 4 % de la TET globale. (Données issues de Sterling et al. 2013).

À gauche, la Figure 6 montre les contributions relatives de différentes conversions d'usage des sols aux variations de l'évapotranspiration totale (TET). À droite, elle présente la contribution des conversions d'usage des sols à la variation totale de la TET à l'échelle globale. À l'échelle globale, il apparaît que la conversion en terres agricoles non irriguées

a réduit l'évapotranspiration totale (TET) de 3,5 %. Les zones de forte variabilité de l'évapotranspiration totale (TET) consécutive aux changements d'usage des sols se situent en Afrique de l'Ouest, en Asie du Sud-Est et en Europe de l'Est. Ces régions ont connu des conversions d'usage des terres à grande échelle, passant de forêts et de

⁵La « conversion d'usage des sols » désigne ici un changement marqué, structurel, et généralement durable l'usage ou de la fonction des terres (par ex. forêt vers agriculture irriguée).

prairies à des terres agricoles irriguées et non irriguées (Sterling et al., 2013). Par ailleurs, les observations du « verdissement » de la Terre (augmentation de l'indice foliaire liée à l'accroissement des concentrations atmosphériques en carbone) montrent une augmentation de l'évapotranspiration totale (TET) globale (12 mm par an) et des précipitations (12,1 mm par an), ce qui est susceptible d'avoir un impact significatif sur l'humidité des sols dans les régions sèches (Zeng et al., 2018). Les changements d'usage des sols situés à proximité de l'océan pourraient avoir un impact plus important sur les régimes de précipitations sous le vent, en raison de l'effet des cascades d'humidité se déplaçant vers l'intérieur des terres (Schaeffli et al., 2012). Les précipitations et le couvert forestier sont positivement corrélées le long des trajectoires de transport

4.2.2 Déforestation

L'effet de la déforestation sur les schémas de recyclage de l'humidité est influencé par (1) des modifications directes de l'intensité et de la temporalité des flux d'humidité, et (2) des modifications indirectes de la circulation atmosphérique liées aux échanges d'énergie, d'humidité et de quantité de mouvement. La perte de couverture végétale peut fortement affecter l'infiltration, l'interception et le stockage de l'humidité à la surface des terres (van Luijk et al., 2013), déclenchant une « boucle de rétroaction amplificatrice d'érosion des sols » qui entraîne progressivement une perte de résilience des écosystèmes (Flores et al., 2019). Cette boucle de rétroaction réduit également les flux d'humidité ascendants, ce qui peut favoriser des sécheresses et des vagues de chaleur autoentretenu par le biais de rétroactions terre-atmosphère (Miralles et al., 2019). Dans de nombreuses régions où l'expansion agricole a entraîné une diminution de l'évapotranspiration totale (TET), des réductions des précipitations ont été observées sous le vent (Wang-Erlandsson et al., 2018).

Dans la plupart des cas, ces effets ont été observés en dehors du bassin versant concerné, ce qui indique que les changements d'usage des sols tendent davantage à produire des effets à distance que des effets locaux. Ces effets à distance peuvent résulter de modifications de la circulation atmosphérique entraînant un déplacement de la zone de convergence intertropicale (ITCZ), lequel modifie à son tour les régimes de précipitations de mousson dans l'ensemble de la ceinture tropicale (Devaraju et al., 2015). Toutefois, dans le bassin amazonien, les rétroactions locales sont exceptionnellement fortes et contribuent à étendre l'aire de répartition géographique des forêts tropicales (Staal, Fetzer, et al., 2020 ; Staal, Flores, et al., 2020).

Des relations significatives entre déforestation et précipitations ont été observées à l'échelle de 30 à 50 km, suggérant des effets locaux de la déforestation plus importants qu'on ne le pensait (Spracklen et al., 2018). Une méta-analyse de modèles climatiques met en évidence une relation inverse entre déforestation et précipitations, celle-ci entraînant une diminution moyenne de 12 % des

atmosphérique de l'humidité dans les régions tropicales (Spracklen et al., 2012). L'air circulant au-dessus d'une végétation dense génère plus du double de précipitations que l'air circulant au-dessus d'une végétation clairsemée. Toutefois, les mécanismes à l'origine de cette observation restent débattus : une première explication postule qu'une augmentation de la TET au-dessus de la canopée forestière intensifie le cycle hydrologique, en supposant l'absence de modification de la circulation atmosphérique (Spracklen et al., 2012), tandis qu'une autre théorie avance un effet « secondaire » de l'évapotranspiration forestière, qui créerait un système de basse pression attirant ensuite l'humidité atmosphérique en provenance des océans (Makarieva et al., 2014).

précipitations annuelles dans le bassin amazonien (Spracklen & Garcia-Carreras, 2015). Pendant les saisons et les années sèches, lorsque les apports d'humidité océanique sont faibles, le recyclage de l'humidité joue un rôle relativement plus important.

Dans ce contexte, la réduction du couvert forestier peut déclencher un processus auto-amplificateur, conduisant à une augmentation des pertes forestières lors des épisodes de sécheresse (Bagley et al., 2014 ; Zemp et al., 2014). Cette rétroaction renforçante sécheresse-déforestation devrait gagner en intensité à mesure que la perte de couvert forestier se poursuit (Staal, Fetzer, et al., 2020 ; Staal, Flores, et al., 2020). Dans le cas de la déforestation amazonienne, un point de bascule a été proposé (Boers et al., 2017), correspondant à un seuil critique du fonctionnement de la cascade d'humidité vers l'ouest, laquelle conditionne l'alimentation en précipitations de certaines régions dépendantes de l'évaporation forestière en amont. Le franchissement de ce seuil entraînerait une diminution importante des précipitations dans les régions situées sous le vent, compromettant ainsi la production agricole locale (Lawrence & Vandecar, 2015). À l'aide de réseaux de recyclage de l'humidité basés sur des observations, Zemp, Schleussner, Barbosa et Rammig (2017) ainsi que Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota et al. (2017) montrent que la déforestation amazonienne peut réduire les précipitations de la saison sèche dans le bassin de La Plata situé au sud, jusqu'à 20 %.

La perte progressive de résilience forestière peut déclencher des effets climatiques supplémentaires, qui conduisent à une réduction durable des surfaces forestières le long de la cascade de recyclage de l'humidité (Zemp, Schleussner, Barbosa, & Rammig, 2017 ; Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al., 2017). La déforestation le long de la cascade perturbe la circulation de la mousson, initialement alimentée par la chaleur latente libérée lors des précipitations au-dessus de la forêt tropicale. Cette libération de chaleur crée un gradient de pression entre l'océan et le continent, ce qui renforce l'afflux d'air humide provenant de l'Atlantique (Boers et al., 2017). La déforestation réduit l'évapotranspiration jusqu'à un point où l'humidité atmosphérique devient insuffisante pour permettre la

libération de chaleur latente, ce qui conduit alors à un apport d'humidité atmosphérique en provenance de l'océan. Par ailleurs, l'air circulant au-dessus des zones déforestées est relativement plus sec, en raison de taux d'évapotranspiration plus faibles (la forêt amazonienne intacte ajoute en moyenne 3 à 4 mm de transpiration à l'atmosphère). L'effet de cascade (Zemp, Schleussner, Barbosa, & Rammig, 2017 ; Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al., 2017) pourrait donc se traduire par une réduction des précipitations sous le vent.

L'augmentation de l'ampleur de la déforestation amazonienne entraîne des modifications de la rugosité de surface (Spracklen et al., 2018) et des circulations thermiques (Ruiz-Vásquez et al., 2020), ainsi que de la couche limite atmosphérique, de la stabilité atmosphérique (Bagley et al., 2014) et de l'intensité des mouvements ascendants (Silva et al., 2016). Dans les zones déforestées de plus de 10 km de largeur, les modifications de la rugosité de surface et de la chaleur sensible peuvent déjà déclencher des changements de circulation à méso-échelle, entraînant une redistribution des précipitations. À très grande échelle (100 à 1 000 km), la déforestation peut modifier les propriétés atmosphériques et conduire à des changements hydro climatiques à l'échelle macroscopique (Spracklen et al., 2018). Lawrence et Vandecar (2015) soulignent l'existence possible d'une relation non linéaire entre l'échelle de la déforestation tropicale et les variations des précipitations, introduisant une « taille critique de surface forestière » (ou « patch forestier ») nécessaire au maintien des régimes de précipitations. Dans les régions ayant connu une déforestation à grande échelle, des retards dans le début de la saison des pluies ont été observés (Butt et al., 2011).

Certaines zones déforestées présentent une augmentation des précipitations totales. Dans le sud-ouest du Brésil, des observations satellitaires suggèrent une augmentation des nuages convectifs et des cumulus en saison sèche au-dessus des zones déforestées (Negri et al., 2004). Cela pourrait s'expliquer par un réchauffement accru de la surface dans les zones déforestées, générant des mouvements ascendants de l'air qui attirent l'humidité atmosphérique des zones voisines. Des configurations de déforestation fragmentée peuvent également favoriser une augmentation des précipitations : les lisières des forêts tropicales présentent une transpiration plus élevée que l'intérieur de la forêt, en raison d'effets microclimatiques, ce qui peut contribuer à une hausse des précipitations. La déforestation augmente les échanges d'énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère, ce qui entraîne des circulations thermiques conduisant à une augmentation observée des précipitations dans certaines régions de l'Amazonie (Chagnon & Bras, 2005). Une étude de modélisation réalisée sur le continent maritime montre que la déforestation accroît l'instabilité atmosphérique, générant des mouvements ascendants de l'air et une convergence renforcée de l'humidité, ce qui se traduit ensuite par une augmentation des précipitations et des températures de surface (Chen et al., 2019).

Des modifications saisonnières des précipitations ont également été observées en réponse à la déforestation. Dans les régions tropicales, le changement d'usage des sols a un effet plus prononcé sur les précipitations de la saison sèche (Bagley et al., 2014). Dans les climats froids, l'effet de la couverture neigeuse est important : l'augmentation de l'albédo (capacité de la surface à réfléchir le rayonnement solaire) consécutive à la réduction du couvert forestier en Russie prolonge la saison neigeuse, abaisse la température de l'air et la transpiration, et réduit les taux de recyclage de l'humidité (Notaro & Liu, 2008). Dans les climats arides, comme au Sahel, la réduction de la végétation — qui entraîne une augmentation de l'albédo et une baisse de l'évapotranspiration — pourrait avoir prolongé les sécheresses lors des épisodes extrêmes du XXe siècle dans ces régions (Charney & Stone, 1975 ; Savenije, 1995). Le recyclage de l'humidité évaporée dans la bande sahélienne semble avoir contribué de manière significative aux régimes de précipitations dans la région pendant la saison des pluies. Les modifications des flux d'énergie et d'humidité ont pu affecter la convection ainsi que la circulation du courant-jet d'est africain (Yu et al., 2018).

4.2.3 Reforestation et afforestation

Bien que, en théorie, l'augmentation du couvert végétal puisse avoir un effet positif sur les régimes de précipitations locaux, les connaissances restent limitées quant aux conditions bioclimatiques et aux échelles spatiales et temporelles requises pour que la reforestation augmente le recyclage de l'humidité. Le plateau de Loess en Chine a connu une longue période de dégradation sévère due à une agriculture intensive, suivie d'une reforestation à grande échelle à partir des années 2000 dans le cadre du programme Grain for Green, qui a permis de doubler le couvert végétal du plateau, de 31 % en 1999 à 59 % en 2013 (Bai et al., 2019). Les tendances de l'évapotranspiration totale (TET) à l'échelle des sous-bassins indiquent une augmentation significative (principalement en période estivale) de 3,45 mm par an (Bai et al., 2019). La productivité de la végétation a contribué à cette tendance à la hausse de la TET à hauteur de 93 % (Bai et al., 2019). Des simulations de reforestation à l'aide de modèles climatiques régionaux en Afrique de l'Ouest et au Sahel montrent que la reforestation peut augmenter les précipitations de 3,6 % à 14,4 % (Oguntunde et al., 2014). Toutefois, la localisation de la reforestation joue un rôle important dans les changements climatiques à grande échelle et dans la distribution spatiale des précipitations simulées (Bamba et al., 2019). La reforestation accroît la rugosité de surface, ce qui réduit le gradient de température atmosphérique et peut entraîner un retard dans l'installation de la mousson (Oguntunde et al., 2014). Un scénario de modélisation de la restauration potentielle des forêts claires

australienne (de type *woodlands*)⁶ sur des terres marginales montre une augmentation de l'évaporation, qui conduit à une hausse de la formation nuageuse et des précipitations dans la région. Le mécanisme à l'origine de l'augmentation de l'évaporation pourrait être la capacité de ces forêts claires à accéder à l'humidité des sols profonds (Syktus & McAlpine, 2016). Branch et Wulfmeyer (2019) évaluent les possibilités d'augmentation des précipitations par des approches de bio-géoingénierie (plantations forestières visant explicitement à accroître les précipitations) dans les régions désertiques et concluent que les plantations agroforestières renforcent la convergence des vents locaux, augmentent la couverture nuageuse et les précipitations. Ces conclusions doivent toutefois être interprétées avec prudence (voir section 4.3.2). Les études régionales portant sur les effets de la reforestation et de l'afforestation restent peu nombreuses. Bien que, dans certains cas, des éléments montrent qu'elles peuvent augmenter les précipitations locales via une hausse de la TET, de nombreuses variables climatiques et géographiques conditionnent les effets finaux sur les régimes de précipitations locaux et régionaux (Keys et al., 2012). Swann et al. (2012) montrent que l'expansion forestière dans les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord augmenterait l'évaporation relative et l'absorption d'énergie, ce qui affecterait par la suite la circulation atmosphérique ainsi que les régimes de précipitations en Amazonie, au Sahel et au-dessus des océans.

4.3 Outils de gouvernance du recyclage de l'humidité

Dans certaines conditions, le changement d'usage des sols peut affecter les précipitations locales ou régionales et redistribuer — intentionnellement ou non — les ressources en eau (Figure 7). Afin de garantir une utilisation équitable et durable de l'eau, il est nécessaire d'aborder les enjeux de gouvernance liés aux interactions entre usage des sols et ressources en eau, et de prévenir les effets indésirables à l'échelle locale ou régionale. Keys et al. (2017) définissent la gouvernance transfrontalière du recyclage de l'humidité comme « les tentatives de pilotage des processus sociaux et

environnementaux entre pays et de leurs objectifs parfois conflictuels », centrées sur les interactions entre les sociétés humaines et les dynamiques de recyclage de l'humidité. La littérature fait émerger trois instruments de gouvernance : la planification spatiale, les études d'impact et la fixation de limites.

4.3.1 Approches de planification spatiale

La planification spatiale peut permettre de protéger ou de renforcer les processus de recyclage de l'humidité. L'identification de zones clé (*hotspots*) de sources de recyclage de l'humidité (Zemp, Schleussner, Barbosa, & Rammig, 2017 ; Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al., 2017) peut contribuer à la délimitation d'aires de protection forestière. Par ailleurs, une étude récente évaluant le potentiel d'augmentation des précipitations au-dessus d'une municipalité bolivienne grâce à une « reforestation intelligente » en amont montre que 7,1 millions d'hectares reboisés pourraient augmenter les précipitations sur la ville de 1,25 % ($5,8 \times 10^8 \text{ m}^3$) par an ($5,8 \times 10^8 \text{ m}^3$) (Weng et al., 2019). Les auteurs estiment que la gestion des « rivières atmosphériques » — la pratique consistant à redistribuer les flux d'eau atmosphériques par des changements d'usage des sols stratégiques et intentionnels — pourrait couvrir entre 22 % et 59 % de la demande en eau de la ville d'ici 2030 (Weng et al., 2019). Par ailleurs, en considérant les trajectoires de recyclage de l'humidité, généralement orientées des zones côtières vers l'intérieur des terres, les efforts de reboisement pourraient être déployés progressivement le long de cette trajectoire afin de renforcer le recyclage de l'humidité et d'améliorer les chances de succès des projets de reforestation (Ellison & Ifejika Speranza, 2020 ; Fagan et al., 2020). Toutefois, des enjeux d'échelles temporelle et spatiale subsistent : les interventions visant à renforcer le recyclage de l'humidité prendraient plusieurs décennies pour produire un effet significatif (Keys & Falkenmark, 2018) et nécessiteraient des changements d'usage des sols importants à l'échelle horizontale (bien qu'aucune recherche n'ait encore abordé cette question d'échelle).

⁶Les *woodlands* australiens ou « forêts claires » sont des formations végétales ouvertes dominées par des arbres dispersés, principalement des

eucalyptus, avec une couverture arborée discontinue permettant le développement d'une strate herbacée continue.

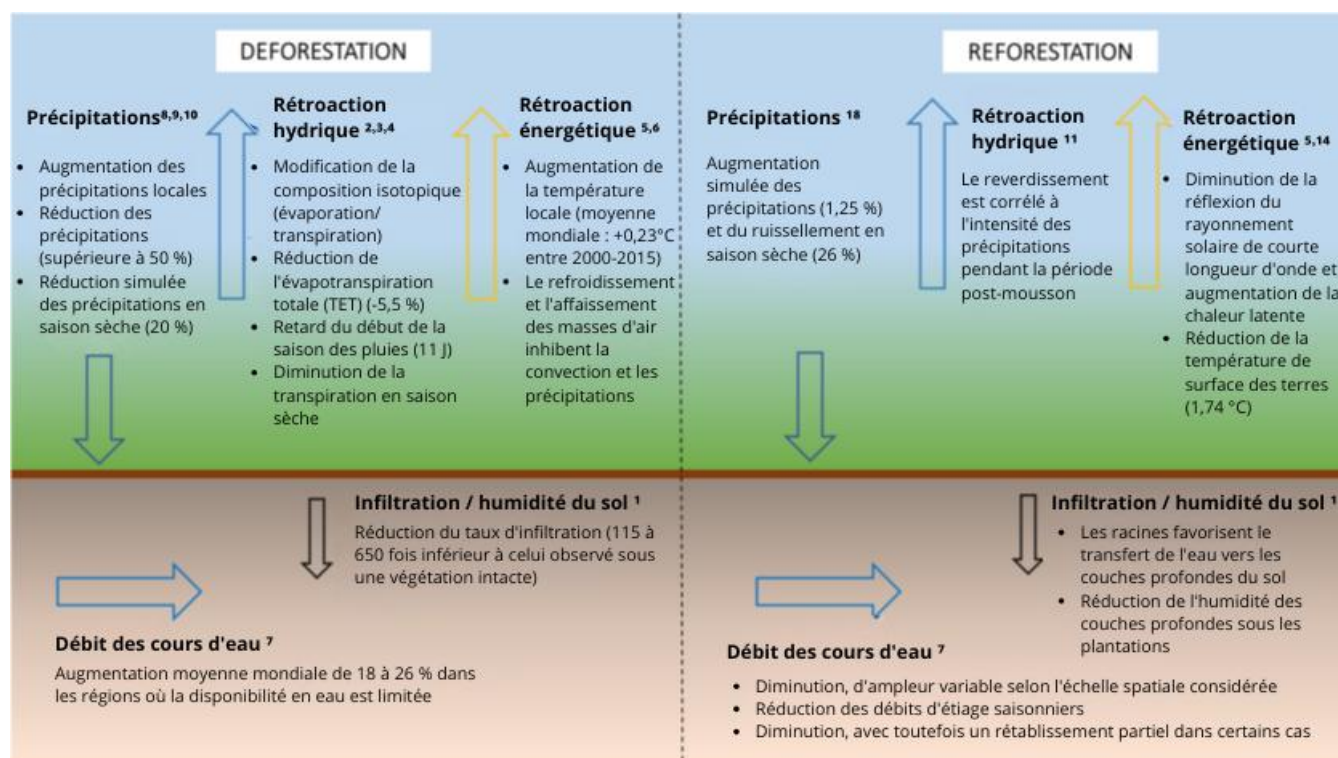


Figure 7. Schéma récapitulatif des connaissances relatives aux effets du changement d'usage des sols (déforestation et reforestation) sur les différents processus contrôlant les schémas de recyclage de l'humidité. Bien que les preuves d'un effet de la reforestation ou de la restauration écologique sur l'augmentation des précipitations restent limitées, les relations positives observées avec le verdissement de la végétation (Yu et al., 2017) suggèrent un possible renforcement de la rétroaction positive végétation-précipitations lorsque la productivité végétale augmente. Références : (1) van Luijk et al. (2013), (2) Sterling et al. (2013), (3) Butt et al. (2011), (4) Zemp, Schleussner, Barbosa, and Rammig (2017), Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al. (2017), (5) Duveiller et al. (2018), (6) Charney and Stone (1975), (7) Peña-Arancibia et al. (2019), (8) Negri et al. (2004), (9) Spracklen et al. (2012), (10) Zemp, Schleussner, Barbosa, and Rammig (2017), Zemp, Schleussner, Barbosa, Hirota, et al. (2017), (11) Yu et al. (2017), (12) Cammeraat et al. (2010), (13) L. Yang et al. (2012), (14) Castelli et al. (2019), (15) Filoso et al. (2017), (16) Brown (2005), (17) Bentley and Coomes (2020), and (18) Weng et al. (2019).

4.3.2 Études d'impact

Les contributions de la nature aux populations (NCP, *Nature's Contributions to People*) associées au recyclage de l'humidité continentale sont « diffuses et spatialement étendues » (Ellis et al., 2019), ce qui pose des défis en matière de gouvernance (Keys et al., 2016). L'analyse des bassins source des précipitations (*precipitationsheds*) (Keys et al., 2017) permet d'identifier et de quantifier les échanges d'humidité atmosphérique entre pays et fournit un cadre pour les évaluations d'impact portant sur les effets du changement d'usage des sols sur le recyclage de l'humidité continentale, ainsi que sur les effets de ces changements sur différentes contributions de la nature aux populations (NCP). Des études de cas régionales sont nécessaires pour analyser les arbitrages hydrologiques en intégrant explicitement les rétroactions entre les terres et l'atmosphère ainsi que les schémas de recyclage de l'humidité continentale (Ellison & Ifejika Speranza, 2020 ; Wang & D'Odorico, 2019). Par exemple, bien que la bio-géoingénierie puisse accroître les précipitations dans certaines régions (Branch & Wulfmeyer, 2019), ses bénéfices potentiels doivent être mis en balance avec les effets négatifs qu'elle peut avoir sur l'hydrologie de

surface et souterraine (Wang & D'Odorico, 2019 ; L. Yang et al., 2012), ainsi qu'avec ses effets en cascade sur les systèmes socio-écologiques. Il est donc nécessaire de disposer d'un cadre robuste d'évaluation des impacts permettant d'appréhender les arbitrages sociaux et environnementaux, y compris transfrontaliers, associés aux interventions sur le recyclage de l'humidité continentale.

4.3.3 Fixation de limites

Les progrès des technologies d'observation de la Terre permettent une compréhension détaillée des usages de l'eau, de l'échelle locale à l'échelle mondiale. Les mesures de la TET et de la productivité primaire nette des végétaux (NPP pour *Net Primary Productivity*), obtenues par imagerie satellitaire, permettent de suivre l'utilisation de l'eau verte. Par exemple, le projet WaPOR de la FAO met à disposition une plateforme de suivi fondée sur des données de télédétection, qui mesure la productivité annuelle brute de la biomasse et met en relation la production de biomasse avec l'évapotranspiration réelle. Les données ainsi produites facilitent la comptabilité de l'eau et permettent une gestion de l'eau verte fondée sur des interventions ciblées, lorsque la croissance de la végétation locale, par exemple, menace les

ressources en eau bleue. Sur le plateau de Loess en Chine, la forte augmentation de la productivité primaire nette (NPP) et de la TET consécutive au programme de reboisement Grain for Green s'est faite au détriment du débit des cours d'eau, ce qui pourrait être jugé indésirable du point de vue sociétal (Feng et al., 2016). En conséquence, un plafond régional de productivité primaire nette (NPP) — défini comme une valeur limite de la NPP moyenne destinée à maîtriser l'équilibre entre l'utilisation de l'eau par la végétation et le débit des cours d'eau — a été proposé pour prévenir les pénuries d'eau susceptibles d'affecter les populations (Feng et al., 2016). Par ailleurs, un suivi étroit de l'utilisation de l'eau verte et de la vulnérabilité régionale permet également d'adopter des mesures restreignant l'utilisation d'espèces végétales à forte demande en eau.

La gouvernance du recyclage de l'humidité et des interactions entre l'usage des sols et les ressources en eau n'en est qu'à ses débuts. Les approches de planification spatiale, les évaluations d'impact et la fixation de limites constituent des instruments de gouvernance proposés en réponse au caractère diffus et à la vaste extension spatiale des interactions entre usage des sols et ressources en eau via le recyclage de l'humidité continentale. Par ailleurs, des instruments économiques et réglementaires, tels que les paiements pour services écosystémiques (PSE), ainsi que les accords et mécanismes de coopération transfrontaliers, pourraient faciliter la mise en œuvre de ces approches. Leur application concrète dans le contexte du recyclage de l'humidité continentale demeure toutefois encore largement méconnue. Ainsi, outre la nécessité de développer des outils permettant de traiter les arbitrages dans la gouvernance du recyclage de l'humidité continentale, il est nécessaire d'orienter les recherches vers les avantages, les limites et les articulations entre les approches économiques et réglementaires du recyclage de l'humidité d'une part, et les cadres juridiques internationaux et transnationaux d'autre part (notamment le droit international de l'eau et les accords transfrontaliers). Les principes consacrés par le droit international de l'eau renvoient à l'obligation de ne pas causer de dommage significatif (Rahaman, 2009), ce qui implique que les États peuvent être tenus responsables lorsque les changements d'usage des sols semblent avoir un impact négatif sur les régimes de précipitations dans le cadre d'accords internationaux. Une approche de gouvernance « universelle » est probablement inadaptée, en raison (1) de la variabilité spatiale et temporelle des interactions terre-atmosphère et de la circulation de l'eau associée, et (2) des enjeux de mise à l'échelle liés aux réponses non linéaires du recyclage de l'humidité continentale au changement d'usage des sols.

5. Conclusions

La dynamique continue des changements d'usage des sols à l'échelle mondiale, l'amélioration de la compréhension des interactions biosphère-atmosphère et l'augmentation du stress hydrique soulèvent la question des effets de ces changements sur les dynamiques et les mécanismes de rétroaction liés à l'eau et aux précipitations dans le système sol-végétation-climat. Cette revue exploratoire (*scoping review*) visait à dresser un état des connaissances sur le recyclage de l'humidité en lien avec le changement d'usage des sols et a permis de dégager cinq grandes conclusions :

- Premièrement, une part importante des précipitations continentales à l'échelle mondiale est régulée par la végétation, ce qui implique que le changement d'usage des sols peut fortement influencer les régimes de précipitations. Au cours des dernières décennies, le changement d'usage des sols a entraîné une réduction significative de la TET à l'échelle mondiale.
- Deuxièmement, la déforestation a réduit les précipitations locales, perturbé les cascades de recyclage de l'humidité (en diminuant les précipitations sous le vent), intensifié les sécheresses, retardé le début de la saison des pluies et, dans certains cas, accru les précipitations locales sous l'effet de processus microclimatiques. De manière générale, les effets sur les précipitations sont plus susceptibles d'être non locaux et de se produire en dehors du bassin versant.
- Troisièmement, les mécanismes de rétroaction dominants et leurs effets varient fortement selon les régions. Dans les régions tropicales humides, on observe des effets locaux plus prononcés du changement d'usage des sols sur le recyclage de l'humidité, ce qui suggère une plus grande sensibilité de la végétation aux mécanismes de rétroaction liés à la sécheresse et aux perturbations. Dans les régions limitées en eau, comme le Sahel, les effets des rétroactions liées à l'énergie pourraient être plus prononcés. Toutefois, les régions tempérées et arides restent relativement peu étudiées.
- Quatrièmement, on observe des zones clé (*hotspots*) de recyclage de l'humidité le long des gradients océan-continent, dans les régions montagneuses et les zones de transition. Ces *hotspots* pourraient nécessiter une protection ciblée afin d'éviter la perturbation des schémas de recyclage de l'humidité continentale.
- Enfin, les effets de la reforestation sur les schémas de recyclage de l'humidité semblent dépendre de l'échelle et de la localisation spatiale des projets. Dans l'ensemble, ces effets restent largement inexplorés. Bien que cela soit compréhensible compte tenu de la complexité de la question, il est nécessaire de poursuivre l'exploration des arbitrages hydrologiques multi-échelles potentiels liés à la reforestation.

Les modèles couplés surface terrestre–climat permettent d'explorer des scénarios spécifiques de changement d'usage des sols afin d'identifier les modifications des régimes de précipitations en fonction de leur localisation spatiale et de leur échelle. Des outils analytiques permettant d'étudier les réseaux atmosphériques de l'eau, tels que les cascades de recyclage de l'humidité (Schaeffli et al., 2012), les bassins atmosphériques (Keune & Miralles, 2019) ou encore les bassins source de précipitations et les bassins de réception des précipitations issues de l'évaporation (Keys et al., 2014), peuvent appuyer les dispositifs de comptabilité de l'eau ainsi que les évaluations d'impact environnemental et social (Bagley et al., 2012), et contribuer à la gouvernance du recyclage de l'humidité continentale. La notion de gouvernance des eaux vertes et atmosphériques (te Wierik et al., 2020) suppose notamment la prise en compte, entre autres, des arbitrages liés à la capacité de la végétation à redistribuer les flux d'eau. Cela implique, par exemple, que les politiques d'atténuation du changement climatique fondées sur la séquestration du carbone prennent explicitement en compte les effets hydroclimatiques à l'échelle du bassin source des précipitations, afin d'éviter des impacts hydrologiques inattendus, affectant les populations et écosystèmes.

Références

- Albaugh, J. M., Dye, P. J., & King, J. S. (2013). Eucalyptus and water use in South Africa. *International Journal of Forestry Research*, 2013, 1–11. <<https://doi.org/10.1155/2013/852540>>
- An, W., Hou, S., Zhang, Q., Zhang, W., Wu, S., Xu, H., et al. (2017). Enhanced recent local moisture recycling on the northwestern Tibetan Plateau deduced from ice core deuterium excess records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(23), 12541–12556. <<https://doi.org/10.1002/2017JD027235>>
- Andréassian, V. (2004). Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1–27. <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>>
- Bagley, J. E., Desai, A. R., Dirmeyer, P. A., & Foley, J. A. (2012). Effects of land cover change on moisture availability and potential crop yield in the world's breadbaskets. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014009. <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014009>>
- Bagley, J. E., Desai, A. R., Harding, K. J., Snyder, P. K., & Foley, J. A. (2014). Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? *Journal of Climate*, 27(1), 345–361. <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00369.1>>
- Bai, M., Mo, X., Liu, S., & Hu, S. (2019). Contributions of climate change and vegetation greening to evapotranspiration trend in a typical hilly-gully basin on the Loess Plateau, China. *The Science of the Total Environment*, 657, 325–339. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.360>>
- Bamba, A., Diallo, I., Touré, N. E., Kouadio, K., Konaré, A., Dramé, M. S., et al. (2019). Effect of the African greenbelt position on West African summer climate: A regional climate modeling study. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1), 309–322. <<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2589-z>>
- Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., et al. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76–79. <<https://doi.org/10.1126/science.aax0848>>
- Bennett, B. M., & Barton, G. A. (2018). The enduring link between forest cover and rainfall: A historical perspective on science and policy discussions. *Forest Ecosystems*, 5(1), 5. <<https://doi.org/10.1186/s40663-017-0124-9>>
- Bentley, L., & Coomes, D. A. (2020). Partial river flow recovery with forest age is rare in the decades following establishment. *Global Change Biology*, 26, 1458–1473. <<https://doi.org/10.1111/gcb.14954>>
- Bisselink, B., & Dolman, A. J. (2009). Recycling of moisture in Europe: Contribution of evaporation to variability in very wet and dry years. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(9), 1685–1697. <<https://doi.org/10.5194/hess-13-1685-2009>>
- Boers, N., Goswami, B., Rheinwalt, A., Bookhagen, B., Hoskins, B., & Kurths, J. (2019). Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. *Nature*, 566(7744), 373–377. <<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0872-x>>
- Boers, N., Marwan, N., Barbosa, H. M. J., & Kurths, J. (2017). A deforestation-induced tipping point for the South American monsoon system. *Scientific Reports*, 7, 41489. <<https://doi.org/10.1038/srep41489>>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449. <<https://doi.org/10.1126/science.1155121>>
- Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1), 3–23. <[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2)>
- Branch, O., & Wulfmeyer, V. (2019). Deliberate enhancement of rainfall using desert plantations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(38), 18841–18847. <<https://doi.org/10.1073/pnas.1904754116>>
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in

Remerciements

Les auteurs remercient l'Institute for Advanced Study (IAS) et l'Institute for Interdisciplinary Studies (IIS) de l'Université d'Amsterdam pour l'opportunité et le soutien ayant permis de mener ce type de recherche interdisciplinaire dans le cadre de l'Interdisciplinary Doctorate Agreement (IDA). La présente étude a bénéficié d'un financement dans le cadre de l'Interdisciplinary Doctorate Agreement de l'Université d'Amsterdam.

Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent l'absence de conflits d'intérêts liés à cette étude.

Déclaration de disponibilité des données

Pour la rédaction de l'article de revue « Reviewing moisture recycling dynamics: implications of land-use change on green and atmospheric water », aucune nouvelle base de données n'a été créée. Nous nous appuyons sur les résultats de travaux déjà publiés. Les données présentées dans la Figure 6 sont disponibles dans Sterling et al. (2013).

- vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 28–61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Brubaker, K. L., Entekhabi, D., & Eagleson, P. S. (1993). Estimation of continental precipitation recycling. *Journal of Climate*, 6(6), 1077–1089. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2)
- Butt, N., de Oliveira, P. A., & Costa, M. H. (2011). Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 116, D11120. <https://doi.org/10.1029/2010JD015174>
- Cammeraat, E. L. H., Cerdà, A., & Imeson, A. C. (2010). Ecohydrological adaptation of soils following land abandonment in a semi-arid environment. *Ecohydrology*, 3, 421–430. <https://doi.org/10.1002/eco.161>
- Castelli, G., Castelli, F., & Bresci, E. (2019). Mesoclimate regulation induced by landscape restoration and water harvesting in agroecosystems of the Horn of Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 275, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.002>
- Chagnon, F. J. F., & Bras, R. L. (2005). Contemporary climate change in the Amazon. *Geophysical Research Letters*, 32, L13703. <https://doi.org/10.1029/2005GL022722>
- Charney, J., Stone, P. H., & Quirk, W. J. (1975). Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism. *Science*, 187, 434–435. <https://doi.org/10.1126/science.187.4175.434>
- Chen, C.-C., Lo, M.-H., Im, E.-S., Yu, J.-Y., Liang, Y.-C., Chen, W.-T., et al. (2019). Thermodynamic and dynamic responses to deforestation in the maritime continent: A modeling study. *Journal of Climate*, 32(12), 3505–3527. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0310.1>
- Devaraju, N., Bala, G., & Modak, A. (2015). Effects of large-scale deforestation on precipitation in the monsoon regions: Remote versus local effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(11), 3257–3262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423439112>
- de Vrese, P., Hagemann, S., & Claussen, M. (2016). Asian irrigation, African rain: Remote impacts of irrigation. *Geophysical Research Letters*, 43(8), 3737–3745. <https://doi.org/10.1002/2016GL068146>
- Dominguez, F., Kumar, P., Liang, X.-Z., & Ting, M. (2006). Impact of atmospheric moisture storage on precipitation recycling. *Journal of Climate*, 19(8), 1513–1530. <https://doi.org/10.1175/JCLI3691.1>
- Duveiller, G., Hooker, J., & Cescatti, A. (2018). The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 9, 679. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02810-8>
- Eagleson, P. S. (2002). *Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function*.
- Eagleson, P. S. (2003). *Dynamic hydrology*. The Maple Press Company.
- Ellis, E. C., Pascual, U., & Mertz, O. (2019). Ecosystem services and nature's contribution to people: Negotiating diverse values and tradeoffs in land systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.05.001>
- Ellison, D., Futter, M. N., & Bishop, K. (2012). On the forest cover-water yield debate: From demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 18(3), 806–820. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x>
- Ellison, D., & Ifejika Speranza, C. (2020). From blue to green water and back again: Promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel. *The Science of the Total Environment*, 739, 140002. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140002>
- Eltahir, E. A. B. (1998). A soil moisture–rainfall feedback mechanism: 1. Theory and observations. *Water Resources Research*, 34(4), 765–776. <https://doi.org/10.1029/97WR03499>
- Eltahir, E. A. B., & Bras, R. L. (1996). Precipitation recycling. *Reviews of Geophysics*, 34(3), 367–378. <https://doi.org/10.1029/96RG01927>
- Emori, S., & Brown, S. J. (2005). Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophysical Research Letters*, 32(17), L17706. <https://doi.org/10.1029/2005GL023272>
- Fagan, M. E., Leighton Reid, J., Holland, M. B., Drew, J. G., & Zahawi, R. A. (2020). How feasible are global forest restoration commitments? *Conservation Letters*, e12700.
- Farley, K. A., Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2005). Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11(10), 1565–1576. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x>
- Feng, X., Fu, B., Piao, S., Wang, S., Ciais, P., Zeng, Z., et al. (2016). Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 6(11), 1019–1022. <https://doi.org/10.1038/nclimate3092>
- Filoso, S., Bezerra, M. O., Weiss, K. C., & Palmer, M. A. (2017). Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. *PLoS ONE*, 12(8), e0183210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183210>
- Flores, B. M., Staal, A., Jakovac, C. C., Hirota, M., Holmgren, M., & Oliveira, R. S. (2019). Soil erosion as a resilience drain in disturbed tropical forests. *Plant and Soil*, 450, 11–25. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04097-8>
- Foley, J. A., Levis, S., Prentice, I. C., Pollard, D., & Thompson, S. L. (1998). Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 4(5), 561–579. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.t01-1-00168.x>
- Gat, J. R. (1996). Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24, 225–262. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225>
- Giles, J. A., Ruscica, R. C., & Menéndez, C. G. (2021). Warm-season precipitation drivers in northeastern Argentina: Diurnal cycle of the atmospheric moisture balance and land–atmosphere coupling. *International Journal of Climatology*, 41(S1), 768–778. <https://doi.org/10.1002/joc.6724>
- Gimeno, L., Stohl, A., Trigo, R. M., Dominguez, F., Yoshimura, K., Yu, L., et al. (2012). Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. *Reviews of Geophysics*, 50, RG4003. <https://doi.org/10.1029/2012RG000389>
- Gimeno, L., Vázquez, M., Eiras-Barca, J., Sorí, R., Stojanovic, M., Algarra, I., et al. (2020). Recent progress on the sources of continental precipitation. *Earth-Science Reviews*, 201, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103070>
- Goessling, H. F., & Reick, C. H. (2011). What do moisture recycling estimates tell us? *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(10), 3217–3235. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3217-2011>
- Green, J. K., Konings, A. G., Alemohammad, S. H., Berry, J., Entekhabi, D., Kolassa, J., et al. (2017). Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere. *Nature Geoscience*, 10(6), 410–414. <https://doi.org/10.1038/ngeo2957>
- Guo, L., Ent, R. J. van der, Klingaman, N. P., Demory, M.-E., Vidale, P. L., Turner, A. G., et al. (2019). Moisture sources for East Asian precipitation. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 657–672. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0188.1>
- Holgate, C. M., Evans, J., van Dijk, A. I. J. M., Pitman, A. J., & Virgilio, G. (2020). Australian precipitation recycling and evaporative source regions. *Journal of Climate*, 33, 8721–8735. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0926.1>
- Huang, J.-C., Lee, T.-Y., & Lee, J.-Y. (2014). Observed magnified runoff response to rainfall intensification under global warming. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034008>

- Kelemen, F. D., Ludwig, P., Reyers, M., Ulbrich, S., & Pinto, J. G. (2016). Evaluation of moisture sources for the Central European summer flood of May/June 2013 based on regional climate model simulations. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68, 29288. <<https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.29288>>
- Keune, J., & Miralles, D. G. (2019). A precipitation recycling network to assess freshwater vulnerability: Challenging the watershed convention. *Water Resources Research*, 55(11), 9947–9961. <<https://doi.org/10.1029/2019WR025310>>
- Keys, P. W., Barnes, E. A., Ent, R. J. van der, & Gordon, L. J. (2014). Variability of moisture recycling using a precipitationshed framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 3937–3950. <<https://doi.org/10.5194/hess-18-3937-2014>>
- Keys, P. W., & Falkenmark, M. (2018). Green water and African sustainability. *Food Security*, 10(3), 537–548. <<https://doi.org/10.1007/s12571-018-0790-7>>
- Keys, P. W., Porkka, M., Wang-Erlandsson, L., Fetzner, I., Gleeson, T., & Gordon, L. J. (2019). Invisible water security: Moisture recycling and water resilience. *Water Security*, 8, 100046. <<https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100046>>
- Keys, P. W., van der Ent, R. J., Gordon, L. J., Hoff, H., Nikoli, R., & Savenije, H. H. G. (2012). Analyzing precipitationsheds to understand the vulnerability of rainfall dependent regions. *Biogeosciences*, 9(2), 733–746. <<https://doi.org/10.5194/bg-9-733-2012>>
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L., & Gordon, L. J. (2016). Revealing invisible water: Moisture recycling as an ecosystem service. *PLOS ONE*, 11(3), e0151993. <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151993>>
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L., Gordon, L. J., Galaz, V., & Ebbesson, J. (2017). Approaching moisture recycling governance. *Global Environmental Change*, 45, 15–23. <<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.007>>
- Kleidon, A., Fraedrich, K., & Heimann, M. (2000). A green planet versus a desert world: Estimating the maximum effect of vegetation on the land surface climate. *Climatic Change*, 44(4), 471–493. <<https://doi.org/10.1023/A:1005559518889>>
- Kong, Y., & Pang, Z. (2016). A positive altitude gradient of isotopes in precipitation over the Tianshan Mountains: Effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation. *Journal of Hydrology*, 542, 222–230. <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.007>>
- Kooperman, G. J., Chen, Y., Hoffman, F. M., Koven, C. D., Lindsay, K., Pritchard, M. S., et al. (2018). Forest response to rising CO₂ drives zonally asymmetric rainfall change over tropical land. *Nature Climate Change*, 8, 434–440. <<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0144-7>>
- Kurita, N., & Yamada, H. (2008). The role of local moisture recycling evaluated using stable isotope data from over the Tibetan Plateau during the monsoon season. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 760–775. <<https://doi.org/10.1175/2007JHM945.1>>
- Lan, C.-W., Lo, M.-H., Chou, C., & Kumar, S. (2016). Terrestrial water flux responses to global warming in tropical rainforest areas. *Earth's Future*, 4(5), 210–224. <<https://doi.org/10.1002/2015EF000350>>
- Lawrence, D., & Vandecar, K. (2015). Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, 5(1), 27–36. <<https://doi.org/10.1038/nclimate2430>>
- Living Lands (2020). Personal communication, 17-06-2020.
- Lo, M.-H., & Famiglietti, J. S. (2010). Effect of water table dynamics on land surface hydrologic memory. *Journal of Geophysical Research*, 115, D22118. <<https://doi.org/10.1029/2010JD014191>>
- Ma, Q., Zhang, M., Wang, L., & Che, Y. (2019). Quantification of moisture recycling in the river basins of China and its controlling factors. *Environmental Earth Sciences*, 78, 392. <<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8404-z>>
- Makarieva, A. M., & Gorshkov, V. G. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1013–1033.
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., & Li, B.-L. (2009). Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological Complexity*, 6(3), 302–307. <<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.11.004>>
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., Sheil, D., Nobre, A. D., Bunyard, P., & Li, B.-L. (2014). Why does air passage over forest yield more rain? *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 411–426. <<https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0190.1>>
- Miralles, D. G., Gentile, P., Seneviratne, S. I., & Teuling, A. J. (2019). Land-atmosphere feedbacks during droughts and heatwaves: State of the science and current challenges. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 19–35. <<https://doi.org/10.1111/nyas.13912>>
- Miralles, D. G., Nieto, R., McDowell, N. G., Dorigo, W. A., Verhoest, N. E. C., Liu, Y. Y., et al. (2016). Contribution of water-limited ecoregions to their own supply of rainfall. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124007. <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124007>>
- Mohamed, Y. A., van den Hurk, B. J. J. M., Savenije, H. H. G., & Bastiaanssen, W. G. M. (2005). Hydroclimatology of the Nile: Results from a regional climate model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3), 263–278. <<https://doi.org/10.5194/hess-9-263-2005>>
- Negri, A. J., Adler, R. F., Xu, L., & Surratt, J. (2004). The impact of Amazonian deforestation on dry season rainfall. *Journal of Climate*, 17(6), 1306–1319. <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1306:TIOADO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1306:TIOADO>2.0.CO;2)>
- Njitchoua, R., Sigha-Nkamdjou, L., Dever, L., Marlin, C., Sighomnou, D., & Nia, P. (1999). Variations of the stable isotopic compositions of rainfall events from the Cameroon rain forest, Central Africa. *Journal of Hydrology*, 223(1–2), 17–26. <[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00087-6)>
- Notaro, M., & Liu, Z. (2008). Statistical and dynamical assessment of vegetation feedbacks on climate over the boreal forest. *Climate Dynamics*, 31(6), 691–712. <<https://doi.org/10.1007/s00382-008-0368-8>>
- Oguntunde, P. G., Abiodun, B. J., Lischeid, G., & Merz, C. (2014). Modelling the impacts of reforestation on the projected hydroclimatology of Niger River Basin, West Africa. *Ecohydrology*, 7(1), 163–176. <<https://doi.org/10.1002/eco.1343>>
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., et al. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933–938. <[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)>
- Peña-Arancibia, J. L., Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M., & van Dijk, A. I. J. M. (2019). Forests as "sponges" and "pumps": Assessing the impact of deforestation on dry-season flows across the tropics. *Journal of Hydrology*, 574, 946–963. <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.064>>
- Rahaman, M. M. (2009). Principles of international water law: Creating effective transboundary water resources management. *International Journal of Sustainable Society*, 1(3), 207. <<https://doi.org/10.1504/IJSSOC.2009.027620>>
- Rios-Entenza, A., Soares, P. M. M., Trigo, R. M., Cardoso, R. M., & Miguez-Macho, G. (2014). Moisture recycling in the Iberian Peninsula from a regional climate simulation. *Journal of Geophysical Research*, 119, 5895–5912. <<https://doi.org/10.1002/2013JD021274>>
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation. *Climate Dynamics*, 54, 4169–4189. <<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>>
- Saeed, F., Haensler, A., Weber, T., Hagemann, S., & Jacob, D. (2013). Representation of extreme precipitation events leading to opposite

- climate change signals over the Congo basin. *Atmosphere*, 4, 254–271. <<https://doi.org/10.3390/atmos4030254>>
- Savenije, H. H. G. (1995). New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sahel. *Journal of Hydrology*, 167(1–4), 57–78. <[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02632-L](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02632-L)>
- Schaeffli, B., van der Ent, R. J., Woods, R., & Savenije, H. H. G. (2012). An analytical model for soil–atmosphere feedback. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1863–1878. <<https://doi.org/10.5194/hess-16-1863-2012>>
- Schyns, J. F., Hoekstra, A. Y., Booij, M. J., Hogeboom, R. J., & Mekonnen, M. M. (2019). Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11), 4893–4898. <<https://doi.org/10.1073/pnas.1817380112>>
- Seager, R., Naik, N., & Vecchi, G. A. (2010). Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle. *Journal of Climate*, 23(17), 4651–4668. <<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3655.1>>
- Shivers, S. W., Roberts, D. A., McFadden, J. P., & Tague, C. (2019). Atmospheric water vapor variations over a complex agricultural region. *PLOS ONE*, 14(12), e0226014. <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226014>>
- Silva, M. E. S., Pereira, G., & Rocha, R. P. (2016). Local and remote climatic impacts due to land use degradation in the Amazon Arc of Deforestation. *Theoretical and Applied Climatology*, 125, 609–623. <<https://doi.org/10.1007/s00704-015-1516-9>>
- Spracklen, D. V., Arnold, S. R., & Taylor, C. M. (2012). Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, 489, 282–285. <<https://doi.org/10.1038/nature11390>>
- Spracklen, D. V., Baker, J. C. A., Garcia-Carreras, L., & Marsham, J. H. (2018). The effects of tropical vegetation on rainfall. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 193–218. <<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030136>>
- Spracklen, D. V., & Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42, 9546–9552. <<https://doi.org/10.1002/2015GL066063>>
- Staal, A., Fetzer, I., Wang-Erlandsson, L., Bosmans, J. H. C., Dekker, S. C., van Nes, E. H., et al. (2020). Hysteresis of tropical forests in the 21st century. *Nature Communications*, 11, 4978. <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18728-7>>
- Staal, A., Flores, B. M., Aguiar, A. P. D., Bosmans, J. H. C., Fetzer, I., & Tuinenburg, O. A. (2020). Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 15, 044024. <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>>
- Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., et al. (2018). Forest–rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539–543. <<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>>
- Sterling, S. M., Ducharne, A., & Polcher, J. (2013). The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 3, 385–390. <<https://doi.org/10.1038/nclimate1690>>
- Sun, Y., Solomon, S., Dai, A., & Portmann, R. W. (2007). How often will it rain? *Journal of Climate*, 20, 4801–4818. <<https://doi.org/10.1175/JCLI4263.1>>
- Swann, A. L. S., Fung, I. Y., & Chiang, J. C. H. (2012). Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation. *PNAS*, 109(3), 712–716. <<https://doi.org/10.1073/pnas.1116706108>>
- Syktus, J. I., & McAlpine, C. A. (2016). More than carbon sequestration: Biophysical climate benefits of restored savanna woodlands. *Scientific Reports*, 6, 29194. <<https://doi.org/10.1038/srep29194>>
- Szeto, K. K. (2002). Moisture recycling over the Mackenzie basin. *Atmosphere-Ocean*, 40(2), 181–197. <<https://doi.org/10.3137/ao.400207>>
- te Wierik, S. A., Gupta, J., Cammeraat, E. L. H., & Artzy-Randrup, Y. A. (2020). The need for green and atmospheric water governance. *WIREs Water*, 7(2). <<https://doi.org/10.1002/wat2.1406>>
- Trenberth, K. E. (1999). Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *Journal of Climate*, 12(5), 1368–1381. <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1368:AMRROA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1368:AMRROA>2.0.CO;2)>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1218. <<https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>>
- Tuinenburg, O. A., Hutjes, R. W. A., & Kabat, P. (2012). The fate of evaporated water from the Ganges basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D01107. <<https://doi.org/10.1029/2011JD016221>>
- Tuinenburg, O. A., Theeuwes, J. J. E., & Staal, A. (2020). High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation. *Earth System Science Data*, 12, 3175–3188. <<https://doi.org/10.5194/essd-12-3175-2020>>
- UN (2015). Paris Agreement. <https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf>
- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B., & Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46, W09525. <<https://doi.org/10.1029/2010WR009127>>
- van der Ent, R. J., & Savenije, H. H. G. (2011). Length and time scales of atmospheric moisture recycling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1853–1863. <<https://doi.org/10.5194/acp-11-1853-2011>>
- van der Ent, R. J., van Dijk, W. I. J. M., & Savenije, H. H. G. (2013). Oceanic sources of continental precipitation and the correlation with sea surface temperature. *Water Resources Research*, 49, 3993–4004. <<https://doi.org/10.1002/wrcr.20296>>
- van der Ent, R. J., Wang-Erlandsson, L., Keys, P. W., & Savenije, H. H. G. (2014). Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 2: Moisture recycling. *Earth System Dynamics*, 5, 471–489. <<https://doi.org/10.5194/esd-5-471-2014>>
- van Luijk, G., Cowling, R. M., Riksen, M. J. P. M., & Glenday, J. (2013). Hydrological implications of desertification: Degradation of South African semi-arid subtropical thicket. *Journal of Arid Environments*, 91, 14–21. <<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.022>>
- van Noordwijk, M., & Ellison, D. (2019). Rainfall recycling needs to be considered in defining limits to the world's green water resources. *PNAS*, 116(17), 8102–8103. <<https://doi.org/10.1073/pnas.1903554116>>
- Wang, L., & D'Odorico, P. (2019). Water limitations to large-scale desert agroforestry projects for carbon sequestration. *PNAS*, 116(50), 24925–24926. <<https://doi.org/10.1073/pnas.1917692116>>
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J., & Savenije, H. H. G. (2014). Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth System Dynamics*, 5, 441–469. <<https://doi.org/10.5194/esd-5-441-2014>>
- Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Keys, P. W., van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., & Gordon, L. J. (2018). Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 4311–4328. <<https://doi.org/10.5194/hess-22-4311-2018>>
- Watson, A. J., & Lovelock, J. E. (1983). Biological homeostasis of the global environment: The parable of Daisyworld. *Tellus B*, 35(4), 284–289. <<https://doi.org/10.3402/tellusb.v35i4.14616>>

- Weng, W., Costa, L., Lüdeke, M. K. B., & Zemp, D. C. (2019). Aerial river management by smart cross-border reforestation. *Land Use Policy*, 84, 105–113. <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.010>>
- Yang, L., Wei, W., Chen, L., & Mo, B. (2012). Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 475, 111–122. <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.041>>
- Yang, Z., Huang, W., Qiu, T., He, X., Wright, J. S., & Wang, B. (2018). Interannual variation and regime shift of evaporative moisture sources for winter precipitation over Southern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 13168–13185. <<https://doi.org/10.1029/2018JD029513>>
- Yu, Y., Notaro, M., Wang, F., Mao, J., Shi, X., & Wei, Y. (2017). Observed positive vegetation–rainfall feedbacks in the Sahel dominated by moisture recycling mechanism. *Nature Communications*, 8, 02021. <<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02021-1>>
- Yu, Y., Notaro, M., Wang, F., Mao, J., Shi, X., & Wei, Y. (2018). Validation of a statistical methodology for extracting vegetation feedbacks: North African ecosystems in CESM. *Journal of Climate*, 31(4), 1565–1586. <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0220.1>>
- Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., van der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., et al. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 13337–13359. <<https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>>
- Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., et al. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation–atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, 8, 14681. <<https://doi.org/10.1038/ncomms14681>>
- Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., & Rammig, A. (2017). Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, 44, 6182–6190. <<https://doi.org/10.1002/2017GL072955>>
- Zeng, Z., Piao, S., Li, L. Z. X., Wang, T., Ciais, P., Lian, X., et al. (2018). Impact of Earth greening on the terrestrial water cycle. *Journal of Climate*, 31, 2633–2650. <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0236.1>>
- Zhao, L., Liu, X., Wang, N., Kong, Y., Song, Y., He, Z., et al. (2019). Contribution of recycled moisture to local precipitation in the inland Heihe River Basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 316–335. <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.014>>