



Travailler avec les plantes, les sols et l'eau pour refroidir le climat et réhydrater les paysages de la Terre

Contexte

Les Foresight Briefs (notes prospectives) sont publiées par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) afin de mettre en lumière un point chaud du changement environnemental, de présenter un sujet scientifique émergent ou de discuter d'une question environnementale actuelle. Le public peut ainsi découvrir ce qui se passe dans son environnement en mutation et les conséquences de ses choix quotidiens. Elles permettent aussi de réfléchir aux orientations futures des politiques. La 25^e édition améliore notre compréhension des relations entrecroisées et des flux d'énergie qui en découlent entre les plantes, les sols et l'eau qui ruisselle sur les sols, ainsi que dans et avec l'atmosphère. Elle explique comment ces relations peuvent contribuer à atténuer le changement climatique, tout en créant en même temps un écosystème résilient.

Résumé

La destruction continue des forêts, la détérioration des sols, la perte subséquente du stockage de l'eau dans les sols et la réduction de la rétention d'eau dans les espaces naturels perturbent la circulation de l'eau dans et à travers l'atmosphère. Cette perturbation provoque des changements majeurs dans les précipitations qui pourraient entraîner une diminution des précipitations et une augmentation des sécheresses et des températures dans de nombreuses régions du monde, et une aggravation du changement climatique. Ces changements affectent le climat à l'échelle d'une région, mais peuvent également avoir un impact sur des régions très éloignées. Comprendre les relations entrecroisées et les flux d'énergie qui en découlent entre les plantes, les sols et l'eau qui ruisselle sur les sols, ainsi que dans l'atmosphère, peut contribuer à atténuer le changement climatique et à créer des écosystèmes plus résilients.

Introduction

La végétation joue un rôle important - et souvent négligé - dans la régulation du climat. Pensez à la différence entre se tenir, par un chaud après-midi d'été, dans un champ labouré et sans végétation ou dans une forêt dense. Il est clair que la conversion, par exemple, de forêts en terres cultivées ou en zones urbaines entraîne des changements majeurs qui peuvent influencer le climat.

Le rayonnement solaire qui atteint la surface d'un champ à végétation dense n'est utilisé qu'à raison de 1 % pour la photosynthèse et de 5 à 10 % pour chauffer l'air (« chaleur sensible »). Plus de 70% du rayonnement est utilisé pour la transpiration des plantes, qui transforme l'eau liquide en vapeur d'eau, un processus très consommateur en énergie (« chaleur latente ») (**Figure 1**). En comptant les surfaces non végétalisées et les surfaces aquatiques,



Crédit photo: Shutterstock.com

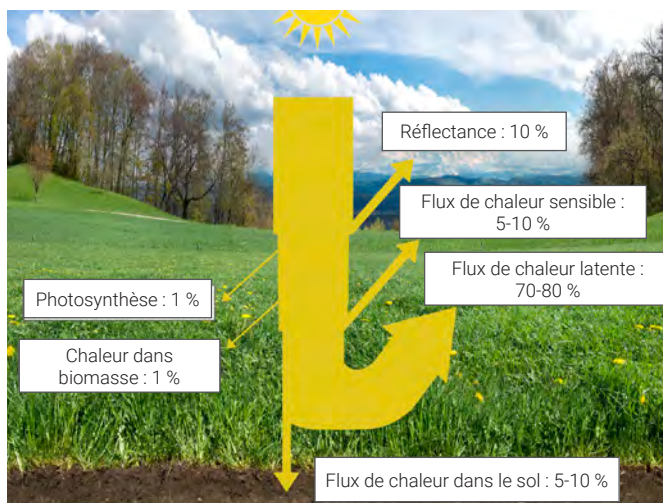
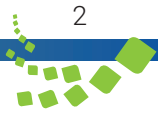


Figure 1 : Distribution de l'énergie solaire incidente sur la végétation¹

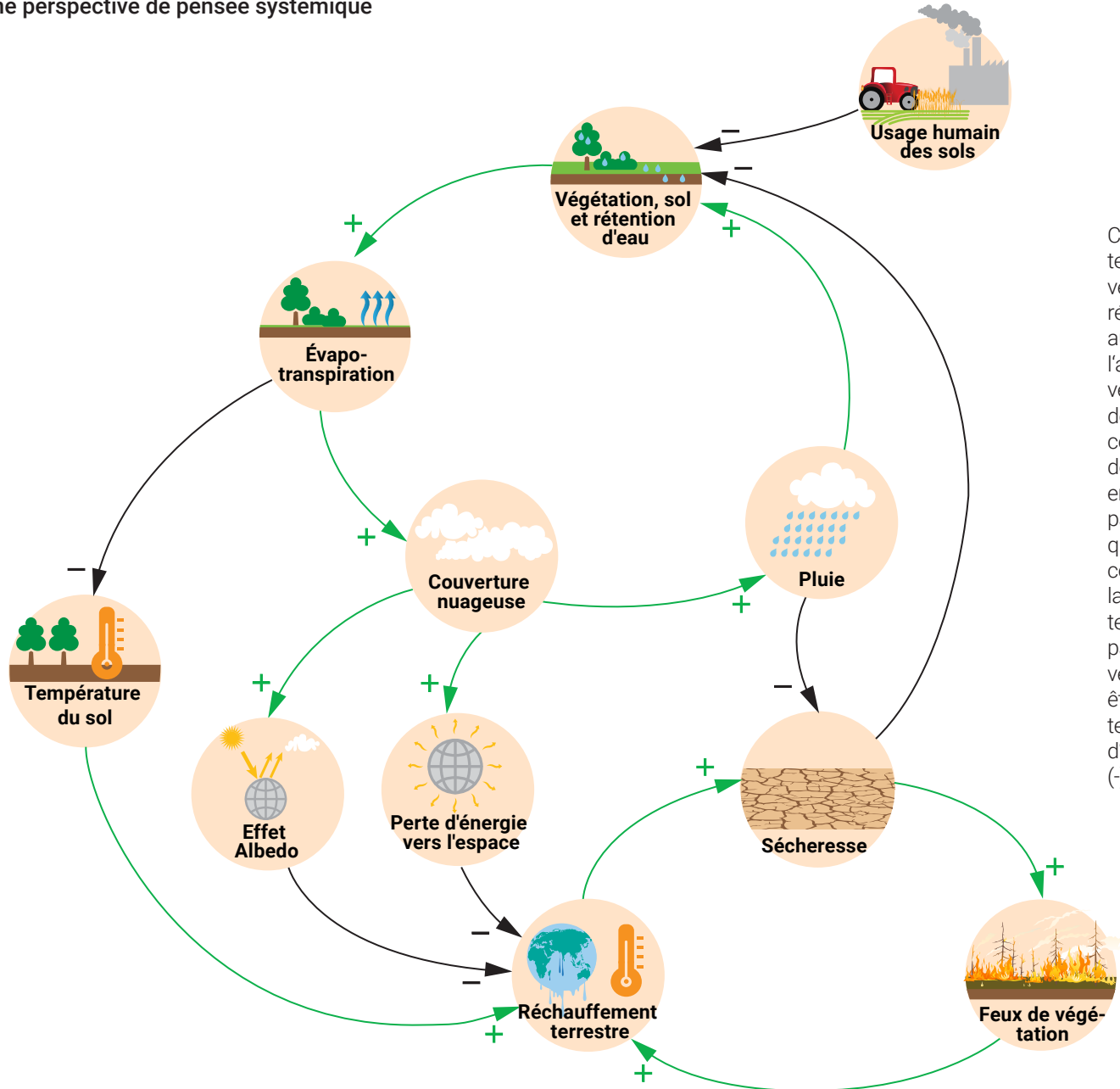
environ 50 % de l'énergie solaire qui atteint le sol est utilisée pour l'évaporation et la transpiration de l'eau (« évapotranspiration »)¹⁻⁴

Toutes ces masses d'air s'élèvent dans l'atmosphère, la vapeur d'eau va finalement se condenser et restituer la même quantité d'énergie que celle qui a été consommée au niveau du sol, une partie en sera dissipée dans l'espace. Les nuages nouvellement créés vont alors réfléchir le rayonnement solaire incident et seront la source de nouvelles précipitations.

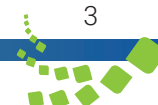
¹ La chaleur latente et la chaleur sensible sont des types d'énergie libérés ou absorbés dans l'atmosphère. La chaleur latente est liée aux changements de phase entre les liquides, les gaz et les solides. La chaleur sensible est liée aux changements de température d'un gaz ou d'un objet sans changement de phase.
ⁱⁱ Les processus combinés d'évaporation et de transpiration de l'eau de la surface de la terre vers l'atmosphère.



Une perspective de pensée systémique



Causes clés influençant ce système - l'utilisation accrue des terres par l'homme a entraîné une réduction de la couverture végétale, une dégradation des sols et une diminution de la rétention d'eau, ce qui réduit directement l'évapotranspiration, augmentant les températures au sol, ce qui a un impact sur l'augmentation de la température mondiale. L'augmentation de la végétation sur les terres accroît la fertilité des sols et la recharge des nappes phréatiques, augmentant ainsi l'évapotranspiration, ce qui entraîne une augmentation de la couverture nuageuse et des précipitations. L'augmentation de la couverture nuageuse entraîne une augmentation du refroidissement de l'atmosphère par une réflexion accrue du rayonnement solaire incident ainsi qu'une augmentation du transfert d'énergie vers l'espace qui, combinées, ont des effets régulateurs sur le réchauffement de la Terre. Lorsque cette rétroaction équilibrante est affaiblie, une terre plus chaude entraîne davantage de sécheresses, aggravées par la réduction des précipitations, et davantage d'incendies de végétation, ce qui réchauffe encore plus la terre. Ces cycles peuvent être inversés grâce à des politiques favorisant une utilisation des terres qui augmente la couverture végétale et améliore la rétention d'eau dans les sols. (+) L'influence est dans la même direction, (-) l'influence est dans la direction inverse.



Pourquoi est-ce important ?

Sur les quelques 120 000 km³ d'eau qui tombent sous forme de précipitations sur les surfaces terrestres chaque année, environ 60 % proviennent des océans et 40 % des terres (voir **Figure 2**).^{5,6} Parmi cette humidité atmosphérique d'origine terrestre, 60 à 80 % proviennent de la transpiration des plantes^{2,7,8}, ce qui démontre le rôle important que joue la végétation dans l'alimentation du cycle des précipitations, ainsi que dans le transfert d'énergie du sol vers la haute atmosphère.

Jusqu'à récemment, l'impact de l'homme sur la vapeur d'eau dans l'atmosphère était considéré comme négligeable par rapport à l'évaporation des océans. Cependant, l'impact de l'homme sur la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère est dû à d'importants changements de la couverture des sols d'origine anthropique, et pas seulement aux émissions industrielles, comme on l'a prétendu précédemment. Or, ces changements de couverture des sols ont une influence majeure sur les cycles de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.⁹⁻¹¹

Près de la moitié des forêts du monde ont disparu depuis le début de l'agriculture (la majeure partie de la déforestation s'est produite après 1950)^{12,13} et a été convertie en champs

beaucoup moins végétalisés. Quels sont les impacts de ces vastes changements provoqués par l'homme sur les flux d'eau et d'énergie de la planète?

Principaux résultats

Les arbres générateurs de vapeur d'eau

Chaque arbre de la forêt est une fontaine d'eau, qui aspire l'eau du sol par ses racines, la pompe à travers le tronc, les branches et les feuilles, et la libère sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère à travers les pores de son feuillage. Par une journée ensoleillée normale, un seul arbre peut transpirer plusieurs centaines de litres d'eau, rafraîchissant son environnement avec une puissance de 70 kWh par 100 litres, ce qui représente un effet de refroidissement équivalent à celui de deux climatiseurs domestiques fonctionnant pendant 24 heures^{14,15}. Par milliards, les arbres créent des rivières d'eau géantes dans l'air (« rivières volantes ») - des rivières qui forment des nuages et créent des précipitations à des centaines, voire des milliers de kilomètres de distance (**Figure 3**)^{16,17}.

L'évapotranspiration source de précipitations

À l'échelle mondiale, 40 à 60 % de la pluie tombant sur terre provient de l'humidité générée par l'évapotranspiration terrestre, principalement par la transpiration des arbres, et transportée par les vents^{11,14,18-20}. Dans certaines régions du monde, cette part s'élève à 70 % des précipitations¹¹. Ce recyclage devient plus dominant à l'intérieur des terres (**Figure 4**).

Les forêts tropicales à larges feuilles persistantes n'occupent qu'environ 10 % de la surface terrestre de la planète, mais contribuent à 22 % de l'évapotranspiration mondiale²², ce qui souligne leur importance pour le cycle de l'eau supra-régional. Les distances typiques parcourues par l'humidité évaporée des continents dans l'atmosphère avant qu'elle ne retombe sur ceux-ci sont de l'ordre de 500-5000 km; l'échelle de temps typique est de 8 à 10 jours^{23,24}. Par exemple, l'humidité qui s'évapore du continent eurasiens est responsable de 80 % des ressources en eau de la Chine¹¹. La principale source de précipitations dans le bassin du Congo est l'humidité qui s'évapore au-dessus de l'Afrique de l'Est, tandis qu'à son tour, elle est une source majeure d'humidité pour les précipitations au Sahel¹¹. L'état de la forêt équatoriale ouest-africaine est particulièrement important pour le débit du Nil²⁵. Cela explique pourquoi, même dans les principaux bassins fluviaux,

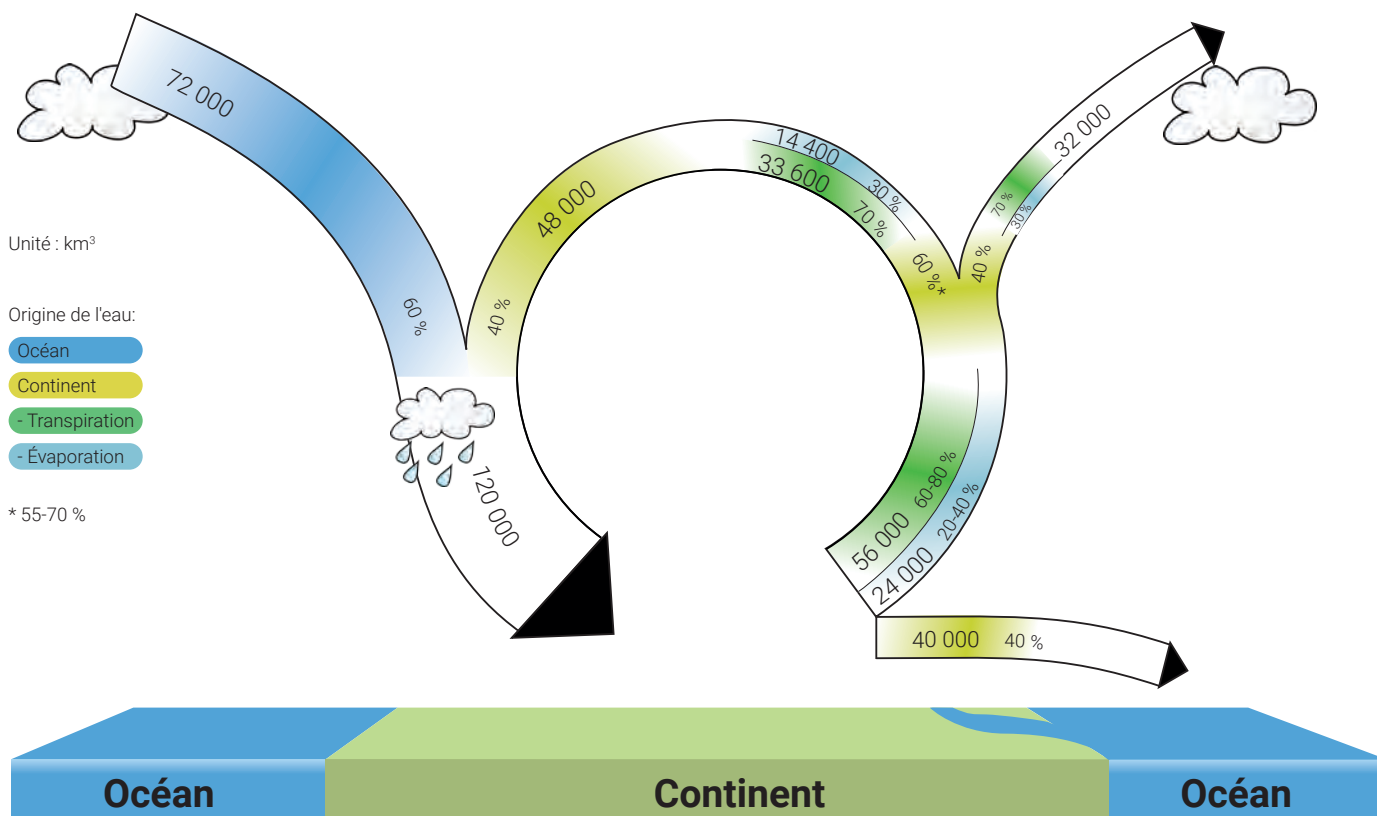


Figure 2 : Flux d'eau dans le monde. Sur les 120 000 km³ de pluie qui tombent sur les continents, 72 000 km³ proviennent des océans et 48 000 km³ des continents. Sur ce total, 60 à 80 % proviennent de la transpiration des plantes et 20 à 40 % de l'évaporation des masses d'eau et des sols. Sur le volume total d'évapotranspiration terrestre, 32 000 km³ retournent à l'océan via l'humidité de l'air, tandis que 40 000 km³ sont drainés par les rivières vers les océans.¹¹

Graphique : Stefan Schwarzer, PNUE/GRID-Genève

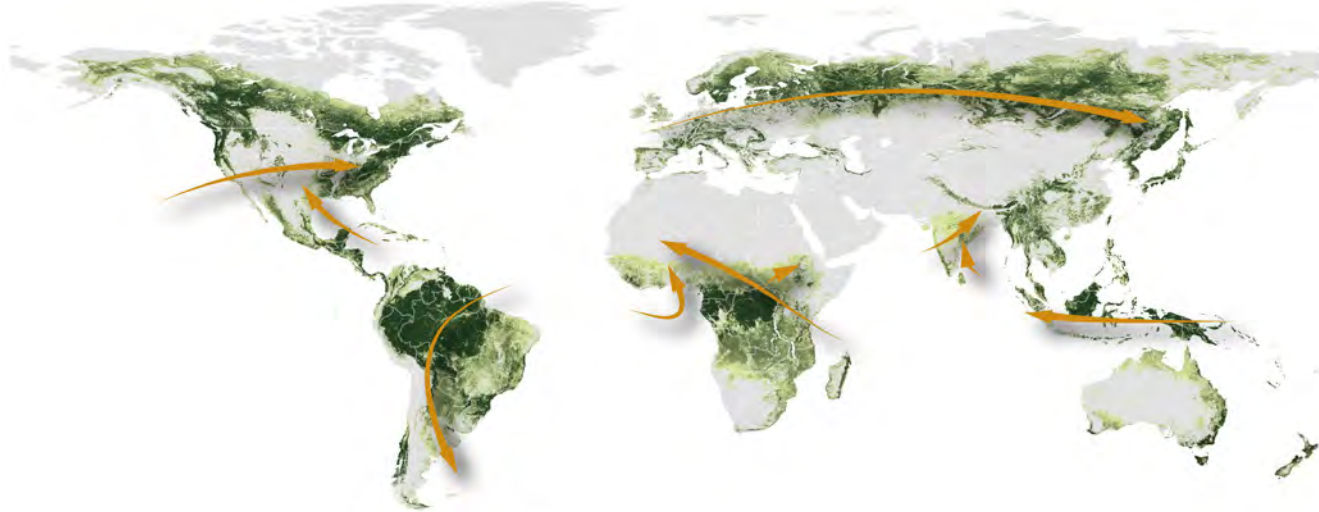
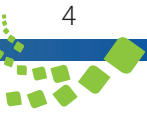


Figure 3 : Les rivières volantes transportent la vapeur d'eau sur de longues distances couvertes par les forêts, qui jouent un rôle essentiel dans la création de cette vapeur, agissant comme une pompe à eau massive en absorbant et en libérant des milliards de litres d'eau sous forme d'humidité. Graphique : adapté de Pearce⁷². Reproduit avec l'autorisation de l'AAAS.

notamment l'Amazone, le Congo et le Yangtze, les précipitations sont plus fortement influencées par les changements d'usage des terres à l'extérieur du bassin qu'à l'intérieur. Même dans plusieurs bassins fluviaux qui ne s'étendent pas sur plusieurs pays, les flux ont été considérablement affectés par les changements d'usage des terres dans d'autres pays²⁶.

Changement d'usage des sols et modification des flux de chaleur

Les modèles montrent que les changements locaux de forêts ou de prairies en terres cultivées réduisent l'évapotranspiration terrestre annuelle de 30 à 40 %²⁷. A l'échelle mondiale, les changements de couverture des sols entre 1950 et 2000 ont réduit l'évapotranspiration terrestre annuelle de 4 à 5 % soit de 3 000 à 3 500 km³, et ont augmenté le ruissellement des eaux de surface de 6,8 %^{27,28}. Les scientifiques ont découvert d'autre part que l'augmentation du couvert végétal a un effet de refroidissement qui provient d'une efficacité accrue du mouvement vertical de chaleur et de vapeur d'eau entre la surface terrestre et l'atmosphère²⁹.

Modifications des régimes atmosphériques dues à la déforestation

Les observations par satellite suggèrent que les forêts ont une influence majeure sur la formation des nuages, et pas

seulement sous les tropiques, mais aussi dans les zones tempérées: la disparition des forêts peut entraîner des diminutions significatives de la couverture nuageuse locale et donc des précipitations³⁰. La modélisation a montré que la déforestation mondiale extensive entre les années 1700 et 1850 a entraîné une diminution des précipitations

de mousson sur le sous-continent indien et le sud-est de la Chine et un affaiblissement associé de la circulation de la mousson d'été en Asie³¹. Sous les tropiques, la convection profonde des cumulus a été considérablement modifiée par les changements de l'environnement (principalement la conversion des forêts en terres cultivées). Cela n'affecte pas seulement les précipitations locales, mais a également un impact sur de longues distances par le biais de processus connus sous le nom de "téléconnexions". Ces téléconnexions peuvent avoir des répercussions à des latitudes plus élevées, ce qui modifie de manière significative le climat dans ces régions^{10,25,32,33}. Même des perturbations relativement faibles de la couverture terrestre dans les tropiques peuvent avoir des conséquences à des latitudes plus élevées^{34,35}, comme les connexions entre l'Amazonie et le nord-ouest des États-Unis³⁶. La disparition des forêts peut également entraîner une diminution des précipitations et un allongement des saisons sèches à l'échelle locale, comme cela a été rapporté par exemple à Rondônia au Brésil³⁷ ou à Bornéo, où il a été constaté que les bassins versants ayant subi la plus grande perte de forêts ont connu une réduction de 15 % des précipitations³⁸. En Inde, les tendances à la baisse des précipitations pendant la mousson correspondent à l'évolution de la couverture forestière en Inde, en raison de la réduction de l'évapotranspiration et de la diminution du recyclage consécutif des précipitations³⁹. Cela illustre les grands mouvements de flux de vapeur d'eau et de précipitations.

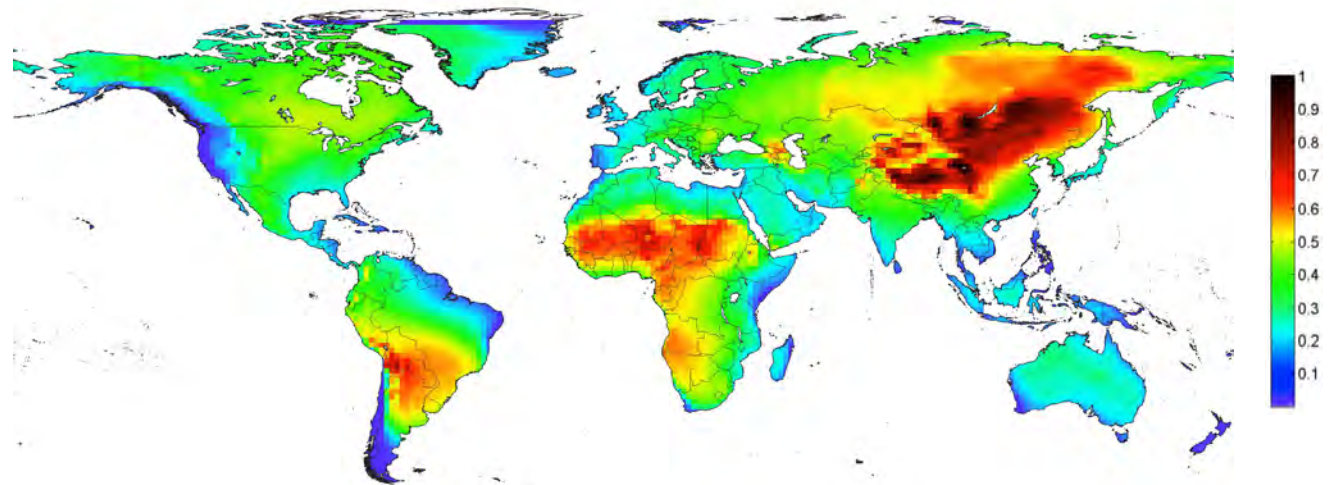


Figure 4 : Taux de recyclage moyen des précipitations continentales (1999-2008). Plus le chiffre est élevé, plus les précipitations proviennent de l'évapotranspiration des terres^{11,21}.

Ré-irradiation du sol nu

Normalement, plus de 50 % du rayonnement solaire atteignant la surface de la terre est converti par évapotranspiration en chaleur latente, qui est à son tour transférée dans l'atmosphère, alimentant le cycle des précipitations, et partiellement renvoyée dans l'espace.

Sur les surfaces nues, par exemple les champs en jachère, les prairies sèches (en été et après la récolte du foin), et sur les surfaces en béton ou en asphalte, le sol absorbe davantage de rayonnement solaire incident, s'échauffe, crée de la chaleur sensible et émettra, proportionnellement à la puissance quatre de sa température absolue (loi de Stefan-Boltzman),

une puissance thermique dans l'atmosphère (Figure 5, Figure 6).

Les différences de température de surface entre ces surfaces nues et les zones boisées peuvent, d'après un exemple en Europe centrale, atteindre 20°C les après-midi d'été (Figure 7)⁴⁰. Sur l'île indonésienne de Sumatra, on a constaté des différences de température entre la forêt et les zones de coupe à blanc allant jusqu'à 10°C, ce qui s'explique, là encore, par un effet de refroidissement par évaporation des forêts, qui l'emporte sur l'effet de réchauffement par albédo généré par les surfaces boisées plus sombres⁴¹.

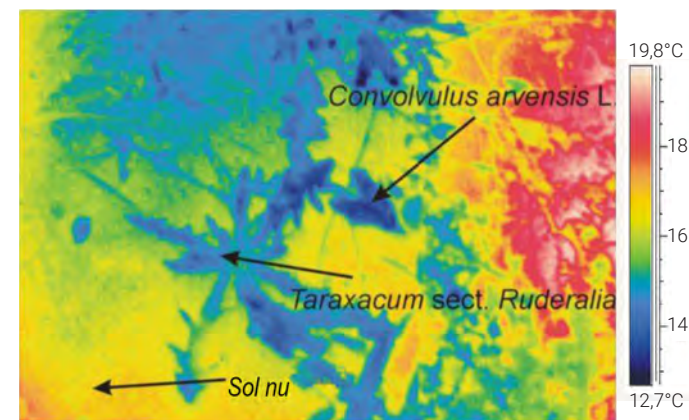
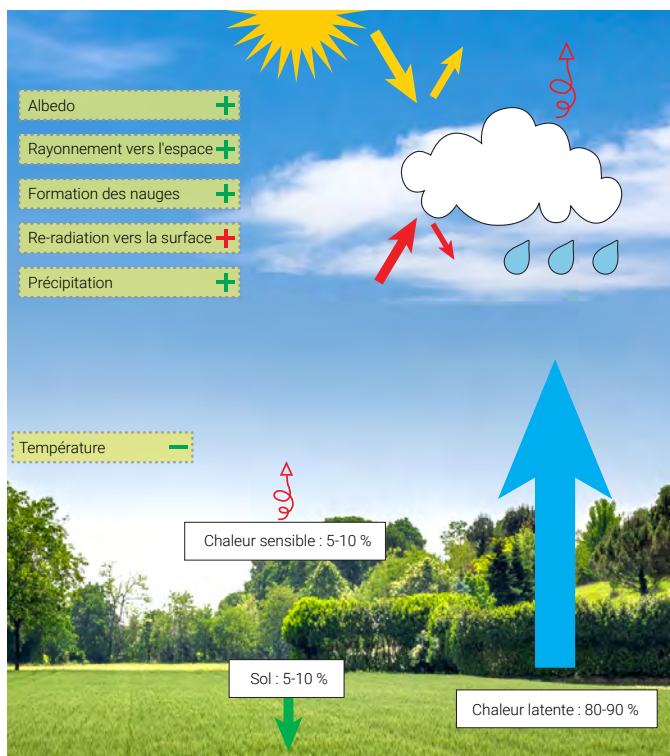


Figure 6 : La même parcelle de végétation éparse photographiée dans le spectre infrarouge et dans le spectre visible. La surface nue du sol est visiblement plus chaude que la surface des feuilles refroidies par la transpiration⁹.

Cela met en évidence le fait que les processus biophysiques locaux déclenchés par la déforestation peuvent effectivement augmenter les températures estivales dans toutes les régions du monde⁴².

La déforestation passée a en effet réduit le flux de chaleur latente sur les terres et augmenté la chaleur sensible sur le sol⁴³⁻⁴⁷. La déforestation a provoqué un réchauffement important au cours de la décennie 2003-2013, pouvant aller jusqu'à 0,28°C de la température moyenne dans les régions

Figure 5 : L'évapotranspiration diminue la température au sol et augmente l'albédo des nuages, le rayonnement vers l'espace pendant le processus de condensation, la formation des nuages et donc les précipitations. L'élimination de la végétation augmente la température au niveau du sol, émet avec l'augmentation de la température du sol une énergie thermique qui augmente de façon exponentielle. L'énergie thermique crée des zones de haute pression qui entravent le passage des masses d'air à basse pression (et donc humides), diminue le potentiel de formation des nuages et réduit ainsi les précipitations. Graphique: Stefan Schwarzer, PNUE/GRID-Genève

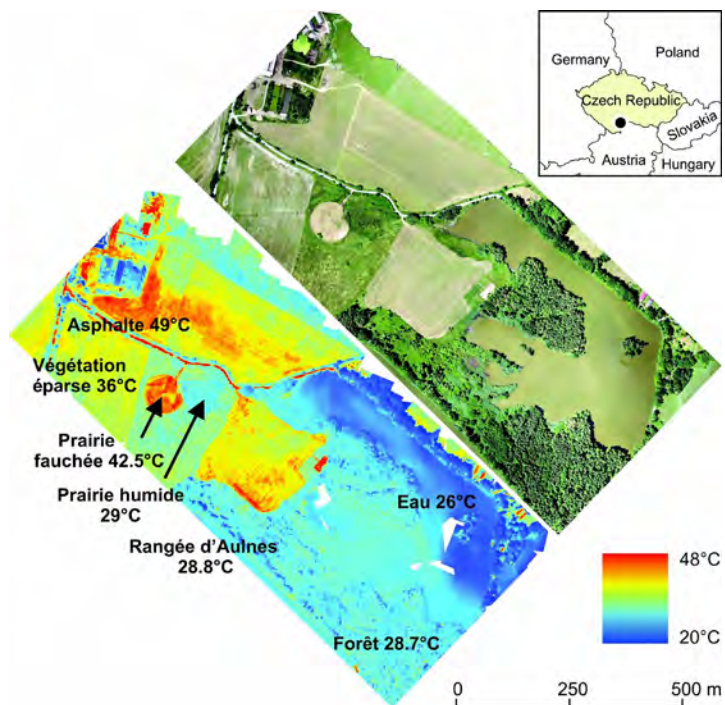


Figure 7 : Distribution de la température de surface dans un paysage mixte^{14,40}.

tropicales, et un fort réchauffement allant jusqu'à 0,32°C dans les régions tempérées du Sud⁴⁸. Au rythme actuel de la déforestation, la disparition des forêts tropicales pourrait ajouter 1,5°C aux températures mondiales d'ici 2100, sans tenir compte des autres augmentations de température dues à l'homme⁴⁹.

Entre 1950 et 2000, la température de surface a augmenté de 0,3°C à l'échelle mondiale en raison des changements de la couverture des sols²⁷. Les perturbations du bilan énergétique à la surface générées par les changements de végétation entre 2000 et 2015 ont entraîné une augmentation moyenne de 0,23°C de la température de surface locale où ces changements de végétation ont eu lieu⁵⁰. Le réchauffement moyen dû aux changements de la couverture des sols peut expliquer 18 à 40 % des tendances actuelles du réchauffement climatique par la réduction de l'évapotranspiration, malgré l'augmentation de l'albédo à la surface du sol^{42,51,52}.

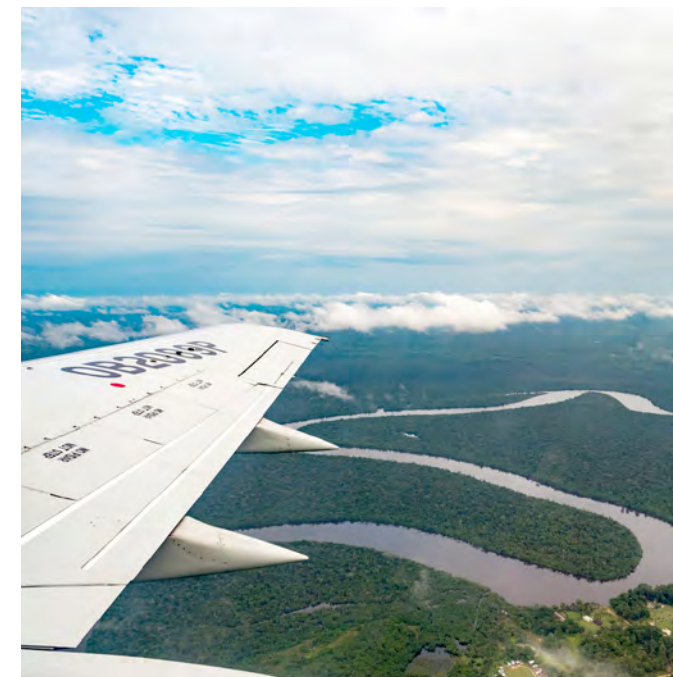
Alerte précoce, problèmes émergents et avenir

Aérosols biogènes pour la formation des nuages

Outre l'importance des forêts pour les flux d'énergie et la génération de précipitations, les grandes forêts semblent être des réacteurs biogéochimiques dans lesquels la biosphère et la photochimie atmosphérique produisent des noyaux pour la formation de nuages et de précipitations, entretenant ainsi le cycle hydrologique⁵³. Les arbres produisent des composés organiques volatils et «libèrent» des micro-organismes - bactéries et spores fongiques, pollen et autres débris biologiques - qui vivent sur les feuilles et se retrouvent en suspension dans l'air pendant et après la pluie dans les écosystèmes forestiers⁵⁴⁻⁵⁷. Dans l'atmosphère, ils génèrent une partie importante de la condensation des nuages et des noyaux de glace, ce qui a un impact sur la formation des nuages et des précipitations^{53,54,57-59}. Les aérosols biogènes peuvent également contribuer à élever la température de congélation en créant des noyaux de glace. Sans ce phénomène, la congélation ne se produirait pas avant que les nuages n'atteignent -15°C ou moins; avec l'aide de ces noyaux de glace, le processus peut être réalisé à des températures proches de 0°C, ce qui permet une formation efficace des nuages et génère de la pluie plus facilement et localement⁵⁹⁻⁶².



Crédit photo: Shutterstock.com

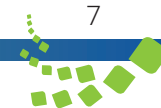


Crédit photo: Shutterstock.com

Les océans, un tampon à double sens

Un tiers des émissions anthropiques de CO₂ et plus de 90 % de la chaleur anthropique supplémentaire émise dans l'atmosphère ont été préalablement absorbés et amortis par les océans. Lorsque nous parlons de l'augmentation de la température globale, nous devons être conscients que nous ne voyons qu'environ 10 % de l'effet total^{63,64}.

L'effet tampon du CO₂ par les océans fonctionne également dans le sens inverse: lorsque nous extrayons du CO₂ de l'atmosphère afin d'y réduire les concentrations de CO₂, les océans réémettent du CO₂ en raison de la différence de pression gazeuse nouvellement créée, en essayant de rétablir l'équilibre de la concentration de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan. Ainsi, sur des périodes de temps plus courtes, une diminution rapide de CO₂ dans l'atmosphère aura du mal à se produire, même si nous parvenons (a) à arrêter les émissions de CO₂ et (b) à développer des solutions naturelles ou techniques de captation du CO₂.



Quelles sont les implications pour les politiques à mettre en œuvre?

La végétation, les sols fertiles et la rétention d'eau doivent être reconnus comme les principaux régulateurs des cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone. Certaines des implications au niveau des politiques sont énumérées ci-dessous :

- Être conscient des **boucles de rétroaction** positives: comme expliqué ci-dessus, lorsque les forêts sont abattues, les terres et le climat deviennent plus secs et plus chauds. Il en résulte des conditions qui exacerbent le risque d'incendies de forêt et de végétation, lesquels émettent du CO₂ et provoquent une nouvelle déforestation, créant ainsi un cercle vicieux^{68,69}. Le changement climatique, la déforestation, la sécheresse et les incendies de forêt forment une triple boucle de rétroactions qui se renforcent (**Figure 8**).
- Compte tenu des téléconnexions des grands écosystèmes forestiers, ceux-ci doivent être considérés comme fournissant des **biens mondiaux**. Le mécanisme REDD+ développé dans le cadre de la CCNUCC pourrait, par exemple, servir de modèle pour reconnaître et financer les services internationaux d'eau et d'énergie fournis par ces forêts.
- Les **régions forestières particulièrement importantes et sensibles** doivent être protégées et gérées en conséquence.
- Il est de la plus haute importance d'**arrêter la déforestation et d'accroître les efforts de reboisement** dans le monde entier.
- Les pratiques agricoles devraient se concentrer sur la **régénération des sols**, la **couverture végétale du sol** tout au long de l'année et l'utilisation de **méthodes agroforestières**ⁱⁱⁱ.



Crédit photo: Shutterstock.com

iii L'agroforesterie est l'intégration d'arbres ou d'arbustes dans les champs et les pâturages.

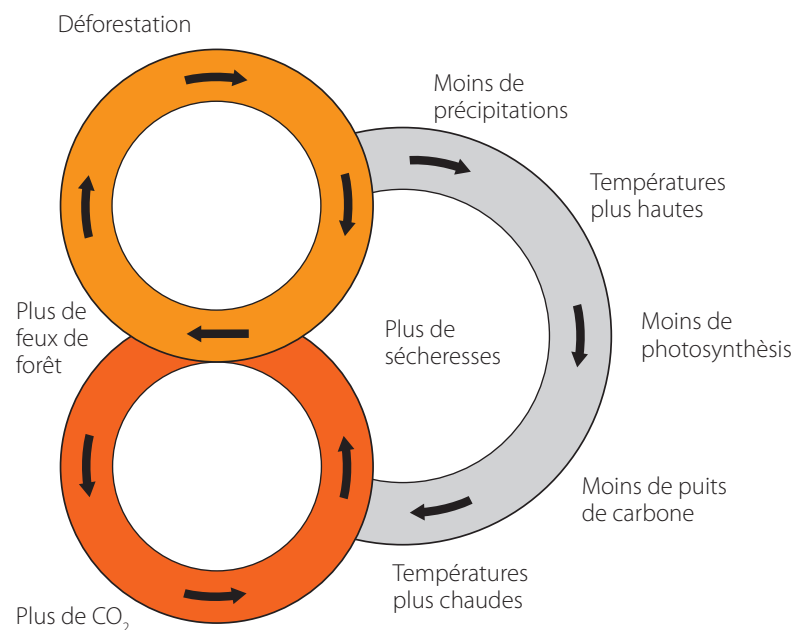


Figure 8 : En raison de la nature interdépendante des incendies de forêt, de la déforestation, de la sécheresse et du changement climatique, isoler l'un des processus ne permet pas de décrire la complexité de l'ensemble interconnecté⁶⁵⁻⁶⁷.

Conclusion

Il est important de comprendre que, dans les sols, les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie sont intimement liés. Le rétablissement des cycles d'humidité atmosphérique et terrestre sur la végétation, dans les sols et dans l'atmosphère est de la plus haute importance pour refroidir la planète et sécuriser les régimes de précipitation dans le monde. L'assèchement des milieux naturels est le prix de l'échec.

L'arrêt de la déforestation, l'augmentation de la reforestation et la mise en œuvre de pratiques agroforestières sont obligatoires si nous voulons réussir à éviter une catastrophe climatique. Une approche systémique est nécessaire pour comprendre et utiliser les modèles sous-jacents de la formation des pluies. Pour faire revenir la pluie dans des régions telles que le Sahel, il ne suffira pas de planter des arbres dans la région; il faudra (re)construire des forêts à partir de la côte pour attirer l'air humide de l'océan vers la terre⁷⁰.

Parallèlement, l'augmentation de la fertilité des sols, de la rétention d'eau et de la protection des sols par les pratiques de l'agriculture biologique régénérative (voir les Foresight Briefs 010 et 013 du PNUE), telles que la couverture végétale tout au long de l'année par le biais de cultures de couverture et de jachères ou la mise en œuvre de l'agroforesterie, représente une autre approche importante pour alimenter les cycles de l'eau et de l'énergie. Trouver des moyens de renforcer la matière organique du sol est l'une des clés du succès pour les grandes régions du monde actuellement cultivées.

D'une manière générale, nous devons changer de paradigme, en valorisant les effets hydrologiques et de refroidissement du climat par la végétation en général et des forêts en particulier, parallèlement à leur potentiel de piégeage du carbone. Les effets de la couverture végétale, et notamment des arbres, sur le climat à l'échelle locale, régionale et continentale offrent des avantages qui doivent être mieux reconnus^{14,32,71}.

Remerciements

Auteur

Stefan Schwarzer, PNUE/GRID-Genève et l'Université de Genève

Réviseurs

Externes

David Ellison, Université de Berne

Prof. Douglas Sheil, Université de Wageningen

Lera Miles, Centre mondial de surveillance pour la conservation du PNUE (UNEP-WCMC)

Eleanor Milne, Université de l'État du Colorado

Réviseurs du PNUE

Angeline Djampou, Barnabas Dickson, Gabriel Labbate, Jane Muriithi, Kaisa Uusimaa, Magda Biesiada, Pascal Peduzzi, Rachel Kosse, Samuel Opiyo, Tim Christophersen, Virginia Gitari, Ying Wang

Equipe Foresight Briefs du PNUE

Alexandre Caldas, Sandor Frigiyik, Audrey Ringler, Esther Katu, Erick Litswa, Pascil Muchesia

Inspiré d'un discours de Walter Jehne

Mentions légales

Les dénominations employées dans cette publication et la présentation des documents qui y figurent n'impliquent en aucun cas l'expression d'une quelconque opinion de la part du PNUE ou des organismes de coopération sur le statut légal de tel ou tel pays, territoire, région ou agglomération, sur les autorités qui les régissent ou sur le tracé de leurs frontières.

© Cartes, photos et illustrations tel que mentionné

Contact

unep-foresight@un.org



Alerte précoce, problèmes émergents et avenir

Bibliographie

- Pokorny, J. et al. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal of Water* 5, 311 (2010).
- Jasechko, S. et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347–350 (2013).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, 311–324 (2009).
- Wang, K. & Dickinson, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability: GLOBAL TERRESTRIAL EVAPOTRANSPIRATION. *Reviews of Geophysics* 50, (2012).
- Ellison, D., Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. & van Noordwijk, M. Upwind forests: managing moisture recycling for nature-based resilience. *Unasylva* 70, 13 (2019).
- Schneider, U. et al. Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere* 8, 52 (2017).
- Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190, 115–117 (2014).
- Wei, Z. et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration: Revisiting Global ET Partitioning. *Geophysical Research Letters* 44, 2792–2801 (2017).
- Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M. & Tóth, E. Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm. 94 (2007).
- Mahmood, R. et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate: LAND COVER CHANGES AND THEIR BIOGEOGRAPHICAL EFFECTS ON CLIMATE. *International Journal of Climatology* 34, 929–953 (2014).
- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research* 46, (2010).
- Crowther, T. W. et al. Mapping tree density at a global scale. *Nature* 525, 201–205 (2015).
- FAO. *State of the world's forests 2012*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012).
- Ellison, D. et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61 (2017).
- Pokorny, J. What can a tree do? (2012).
- Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T. & Kropp, J. P. Aerial and surface rivers: downward impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydro. Earth Syst. Sci.* 22, 911–927 (2018).
- Nobre, A. D. The Future Climate of Amazonia. 42 (2014).
- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 861–880 (1994).
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLOS ONE* 11, e0151993 (2016).
- Staal, A. et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change* 8, 539–543 (2018).
- van der Ent, R. J. A new view on the hydrological cycle over continents. (2014).
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J. & Savenije, H. H. G. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth System Dynamics* 5, 441–469 (2014).
- van der Ent, R. J. & Savenije, H. H. G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 1853–1863 (2011).
- van der Ent, R. J. & Tuinenburg, O. A. The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydro. Earth Syst. Sci.* 21, 779–790 (2017).
- Gebrehiwot, S. G. et al. The Nile Basin waters and the West African rainforest: Rethinking the boundaries. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6, e1317 (2019).
- Wang-Erlandsson, L. et al. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 4311–4328 (2018).
- Sterling, S. M., Ducharme, A. & Polcher, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change* 3, 385–390 (2013).
- Gordon, L. J. et al. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 7612–7617 (2005).
- Chen, C. et al. Biophysical impacts of Earth greening largely controlled by aerodynamic resistance. *Sci. Adv.* 6, eabb1981 (2020).
- Teuling, A. J. et al. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications* 8, (2017).
- Takata, K., Saito, K. & Yasunari, T. Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustrial cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 9586–9589 (2009).
- Pielke, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics* 39, 151–177 (2001).
- Sheil, D. & Murydarso, D. How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis. *BioScience* 59, 341–347 (2009).
- Chase, T. N., Pielke Sr., R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics* 16, 93–105 (2000).
- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, 7393–7408 (1996).
- Medvigy, D., Walko, R. L., Otte, M. J. & Avissar, R. Simulated Changes in Northwest U.S. Climate in Response to Amazon Deforestation*. *Journal of Climate* 26, 9115–9136 (2013).
- Coe, M. T. et al. The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Tropical Conservation Science* 10, 194008291772067 (2017).

- McAlpine, C. A. et al. Forest loss and Borneo's climate. *Environmental Research Letters* 13, 044009 (2018).
- Paul, S. et al. Weakening of Indian Summer Monsoon Rainfall due to Changes in Land Use Land Cover. *Scientific Reports* 6, (2016).
- Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. & Rejšková – Procházková, A. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. *Ecological Engineering* 54, 145–154 (2013).
- Sabajo, C. R. et al. Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences* 14, 4619–4635 (2017).
- Alkama, R. & Cescaati, A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* 351, 600–604 (2016).
- Bounoua, L., Defries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. & Khan, H. Effects of Land Cover Conversion on Surface Climate. 36 (2002).
- Brovkin, V. et al. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics* 26, 587–600 (2006).
- Pitman, A. J. et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters* 36, (2009).
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. & Claussen, M. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change: CLIMATE EFFECTS OF HISTORICAL LAND COVER CHANGE. *Geophysical Research Letters* 37, (2010).
- Zhao, M., Pitman, A. J. & Chase, T. The impact of land cover change on the atmospheric circulation: *Climate Dynamics* 17, 467–477 (2001).
- Li, Y. et al. Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature: IMPACTS OF FOREST CHANGE ON TEMPERATURE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 14,372–14,386 (2016).
- Mahowald, N. M., Ward, D. S., Doney, S. C., Hess, P. G. & Randerson, J. T. Are the impacts of land use on warming underestimated in climate policy? *Environmental Research Letters* 12, 094016 (2017).
- Duvelier, G., Hooker, J. & Cescaati, A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications* 9, (2018).
- Ban-Weiss, G. A., Bala, G., Cao, L., Pongratz, J. & Caldeira, K. Climate forcing and response to idealized changes in surface latent and sensible heat. *Environmental Research Letters* 6, (2011).
- Wolosin, M. & Harris, N. Tropical Forests and Climate Change: The Latest Science. *World Resources Institute* 14 (2018).
- Poschil, U. et al. Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science* 329, 1513–1516 (2010).
- Bigg, E. K., Soubeyrand, S. & Morris, C. E. Persistent after-effects of heavy rain on concentrations of ice nuclei and rainfall suggest a biological cause. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 2313–2326 (2015).
- Bowers, R. M. et al. Characterization of Airborne Microbial Communities at a High-Elevation Site and Their Potential To Act as Atmospheric Ice Nuclei. *Applied and Environmental Microbiology* 75, 5121–5130 (2009).
- Conen, F., Eckhardt, S., Gundersen, H., Stohl, A. & Vttri, K. E. Rainfall drives atmospheric ice-nucleating particles in the coastal climate of southern Norway. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 11065–11073 (2017).
- Joung, Y. S., Ge, Z. & Buie, C. R. Bioaerosol generation by raindrops on soil. *Nature Communications* 8, (2017).
- Després, VivianeR. et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 15598 (2012).
- Morris, C. E. et al. Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology* 20, 341–351 (2014).
- Christner, B. C., Morris, C. E., Foreman, C. M., Cai, R. & Sands, D. C. Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall. *Science* 319, 1214–1214 (2008).
- Lazaridis, M. Bacteria as Cloud Condensation Nuclei (CCN) in the Atmosphere. *Atmosphere* 10, 786 (2019).
- Morris, C. E., Soubeyrand, S., Bigg, E. K., Creamean, J. M. & Sands, D. C. Mapping Rainfall Feedback to Reveal the Potential Sensitivity of Precipitation to Biological Aerosols. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 1109–1118 (2017).
- Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences* 37, 137–142 (2020).
- Pörtner, H.-O. et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers. (2019).
- Hasler, N., Werth, D. & Avissar, R. Effects of Tropical Deforestation on Global Hydroclimate: A Multimodel Ensemble Analysis. *Journal of Climate* 22, 1124–1141 (2009).
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N. & Dolman, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics: CLIMATE CONTROLS ON FIRES. *Global Biogeochem. Cycles* 22, n/a/n-a (2008).
- Zhao, M. & Running, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science* 329, 940–943 (2010).
- Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CB09781139177245.
- International Union of Forest Research Organizations. Global Fire Challenges in a Warming World. (2018).
- Ellison, D. & Speranza, C. I. From blue to green water and back again: Promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel. *Science of The Total Environment* 739, 140002 (2020).
- Lermontand, L., Gentine, P., Swann, A. S., Cook, B. I. & Scheff, J. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 4093–4098 (2018).
- Pearce, F. A controversial Russian theory claims forests don't just make rain—they make wind. Science | AAAS <https://www.sciencemag.org/news/2020/06/controversial-russian-theory-claims-forests-don-t-just-make-raintheymake-wind> (2020).

Pour voir toutes les éditions en ligne et télécharger les notes prospectives du PNUE, rendez-vous sur

<https://wesr.unep.org/foresight>

