



# **Preuves observationnelles d'une augmentation de la couverture nuageuse au-dessus des forêts d'Europe occidentale**

**Adriaan J. Teuling & alt**

**Janvier 2017**

**Traduit de l'anglais par traducteur Google**



# Preuves observationnelles d'une augmentation de la couverture nuageuse au-dessus des forêts d'Europe occidentale

*Adriaan J. Teuling (1), Christopher M. Taylor (2,3), Jan Fokke Meirink (4), Lieke A. Melsen (1), Diego G. Miralles (5,6), Chiel C. van Heerwaarden (7), Robert Vautard (8), Annemiek I. Stegehuis (8), Gert-Jan Nabuurs (9) & Jordi Vila - Guerau de Arellano (7)*

DOI : 10.1038/ncomms14065 OPEN

## NOTA

Le DOI **10.1038/ncomms14065** fait référence à un article scientifique publié dans la revue *Nature Communications*. Ce DOI est un identifiant numérique permanent qui permet d'accéder de manière fiable à l'article, en le redirigeant vers sa page de publication officielle. L'article portant ce DOI a été publié en 2014. Le terme « OPEN » indique que l'article est accessible librement au public, sans restriction d'accès.

**ARTICLE** reçu le 15 avril 2016 | Accepté le 25 novembre 2016 | Publié le 11 janvier 2017

Les forêts influencent directement l'hydrologie et le climat régionaux en régulant les flux d'eau et de chaleur. Les effets indirects, via la formation de nuages et des précipitations, peuvent jouer un rôle important dans le recyclage de l'humidité à l'échelle continentale, mais restent mal compris à l'échelle régionale.

En particulier, l'impact des forêts tempérées sur la couverture nuageuse est largement méconnu.

**Nous présentons ici des preuves observationnelles d'une forte augmentation de la couverture nuageuse au-dessus de vastes régions forestières d'Europe occidentale, basées sur l'analyse de données géostationnaires à résolution de 15 minutes sur 10 ans.**

De plus, nous montrons que les importants chablis provoqués par le cyclone Klaus dans la forêt des Landes ont entraîné une diminution significative de la couverture nuageuse locale les années suivantes.

Le développement important des nuages le long des bordures sous le vent des grandes zones forestières est cohérent avec une circulation mésométéorologique de type brise forestière.

Nos résultats soulignent la nécessité de prendre en compte les impacts sur la formation des nuages lors de l'évaluation des services hydriques et climatiques des forêts tempérées, notamment à proximité des zones densément peuplées.

---

1 - Groupe d'hydrologie et de gestion quantitative de l'eau, Université et Centre de recherche de Wageningen, Droevendaalsesteeg 3a (Bâtiment Lumen), 6708PA Wageningen, Pays-Bas.

2 - Centre d'écologie et d'hydrologie, Wallingford OX10 8BB, Royaume-Uni.

3 - Centre national d'observation de la Terre, Wallingford OX10 8BB, Royaume-Uni.

4 - Institut royal météorologique des Pays-Bas, 3730AE De Bilt, Pays-Bas.

5 - Département des sciences de la Terre, Université VU, 1081HV Amsterdam, Pays-Bas.

6 - Laboratoire d'hydrologie et de gestion de l'eau, Université de Gand, B-9000 Gand, Belgique.

7 - Groupe de météorologie et de qualité de l'air, Université et Centre de recherche de Wageningen, 6708PA Wageningen, Pays-Bas.

8 - LSCE/IPSL, Laboratoire CEA/CNRS/UVSQ, 91191 Gif-sur-Yvette, France.

9 - Recherche environnementale (Alterra), Université et Centre de recherche de Wageningen, 6708PA Wageningen, Pays-Bas. Toute correspondance et demande de matériel doit être adressée à A.J.T. (courriel : ryan.teuling@wur.nl).

---

Les forêts sont mondialement reconnues pour leur rôle dans l'atténuation du changement climatique grâce à leur capacité à stocker d'importantes quantités de carbone (1–3). Elles ont également un impact direct sur le climat mondial en modifiant les bilans hydriques et énergétiques de surface (1,4). Cependant, à des échelles de 100 à 1 000 km (1), il a été démontré que les forêts peuvent aussi modifier le cycle hydrologique par effets indirects sur les nuages et les précipitations, dus aux interactions entre la surface terrestre et l'atmosphère (5). Ceci pourrait avoir des implications profondes pour la gestion forestière, l'aménagement du territoire et l'atténuation locale du changement climatique. Le processus de formation des nuages et les impacts indirects des conditions de surface terrestre sur les nuages sont encore mal compris, malgré son rôle central dans le système climatique et les projections climatiques (6). De ce fait, les simulations et projections modélisées impliquant ces processus présentent une grande disparité (7).

Les effets directs (thermodynamiques) des forêts sur les échanges d'eau et d'énergie à la surface terrestre sont généralement bien compris. Les forêts ont un albédo plus faible (c'est-à-dire qu'elles apparaissent plus sombres), ce qui leur permet d'absorber davantage d'énergie solaire que leur environnement (1,4). La canopée forestière offre également une surface plus rugueuse (8), favorisant ainsi un échange efficace de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement entre la surface terrestre et l'atmosphère, tout en tempérant la température de surface et en augmentant encore l'énergie nette disponible. L'énergie excédentaire qui en résulte est soit utilisée pour l'évaporation ou la transpiration de l'eau (phénomène appelé évapotranspiration), soit pour le réchauffement de la couche limite atmosphérique (CLA) (9). Les effets biophysiques indirects des forêts sont plus incertains. Une évapotranspiration plus élevée favorise généralement le développement de cumulus peu profonds (10,11), bien que, dans certaines conditions atmosphériques, une faible humidité du sol, plutôt qu'une forte, soit connue pour favoriser la formation de nuages et les précipitations (10,12). D'autres études ont également mis en évidence l'importance des flux de chaleur sensible, de la convergence par frottement et de la circulation à méso-échelle induite par l'hétérogénéité pour la formation des nuages (13–15). De plus, les émissions de composés organiques volatils biogéniques (COVB) par les arbres favorisent la couverture nuageuse (16). Les COVB, très réactifs, s'oxydent rapidement pour former des aérosols organiques secondaires (17), qui peuvent croître par condensation et coagulation jusqu'à la taille de noyaux de condensation nuageuse.

Afin d'exclure les effets confondants de la topographie en tant que mécanisme de soulèvement statique facilitant la formation des nuages (24), nous concentrons notre analyse sur les plus grandes forêts tempérées d'Europe sans orographie marquée (Landes et Sologne) et présentant des contrastes marqués entre forêt et terres cultivées dans plusieurs directions. Ceci permet d'étudier les effets de l'utilisation des terres à l'échelle régionale de manière isolée des effets orographiques (liés aux reliefs) confondants. La plupart des autres grandes régions forestières en Europe sont situées dans des zones vallonnées ou montagneuses (26) où les effets de l'utilisation des terres ne peuvent être isolés des effets orographiques sur la seule base d'observations. La superficie forestière (les Landes ont plus de 12 000 km<sup>2</sup>) est également suffisamment importante pour que les conditions de la couche limite aérienne reflètent les conditions de la surface forestière. Les Landes et la Sologne connaissent des conditions climatiques similaires, avec des températures de juin à août (ci-après juin, juillet, août) de 19,3°C et 20,9 °C, et des précipitations JJA de 150 mm et 143 mm pour la Sologne et les Landes, respectivement, bien que leur composition en espèces diffère.

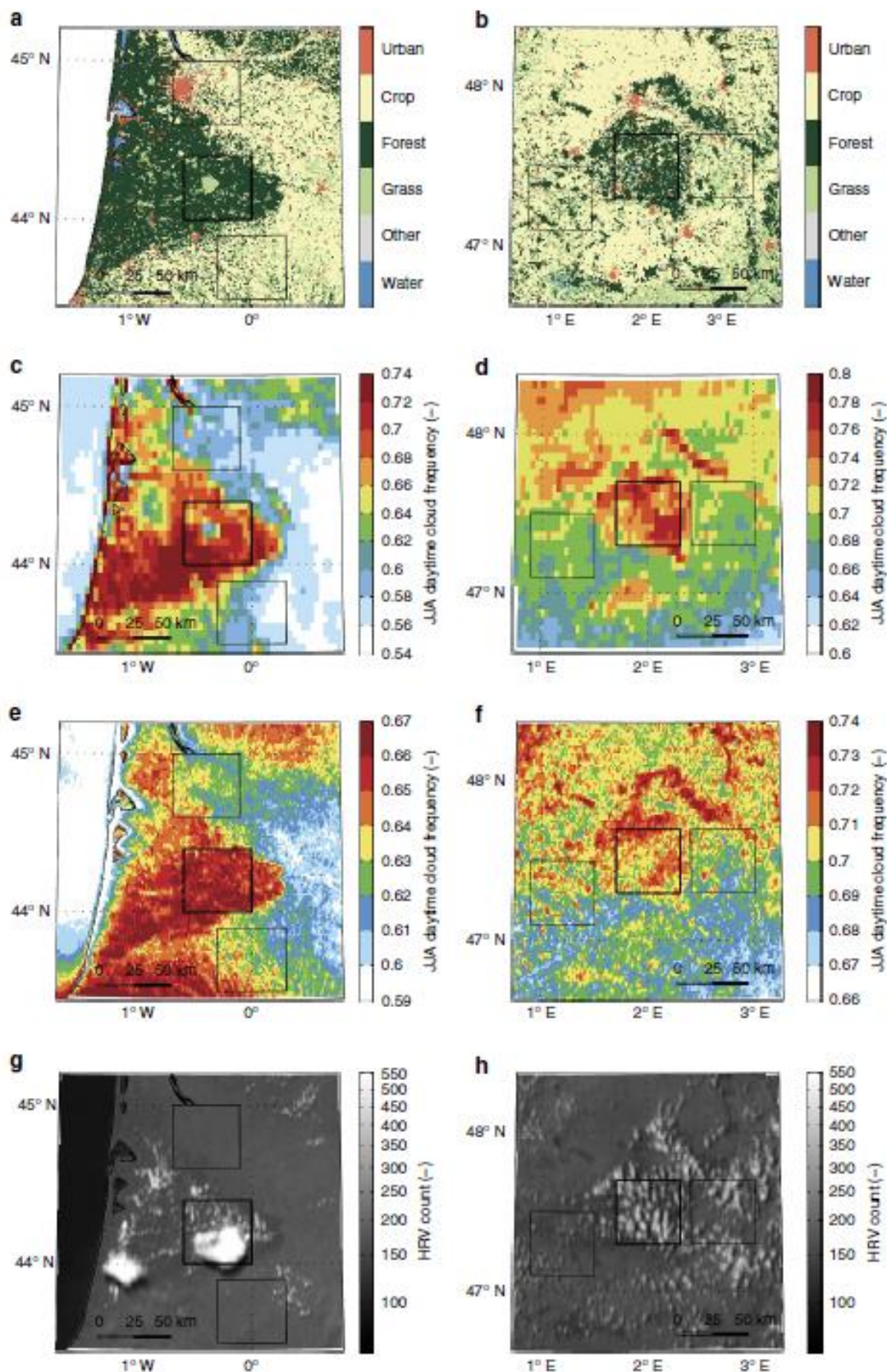
En Sologne, le couvert arboré originel et dominant est composé d'essences feuillues, dominées par le chêne (*Quercus petraea* et *Quercus robur*). La région plus méridionale des Landes est une forêt de pins maritimes plantée, (*Pinus pinaster*).

Nous analysons ici la fréquence des nuages au-dessus des régions forestières des Landes et de la Sologne, à partir d'une décennie d'observations spatiales à haute résolution (jusqu'à 1 km) et temporelles à haute fréquence (15 min) du satellite géostationnaire Meteosat Seconde Génération (MSG). Nous évaluons la fréquence des nuages par la fraction du temps (en journée uniquement, de 6 h à 18 h UTC) pendant lequel des nuages sont détectés dans un pixel. Afin d'accroître la robustesse de nos résultats, nous utilisons deux algorithmes de détection des nuages totalement indépendants (voir Méthodes). L'algorithme des Propriétés Physiques des Nuages (MSG-CPP) utilise les informations de plusieurs canaux MSG (à basse résolution), tandis que l'algorithme Visible Haute Résolution (MSG-HRV utilise uniquement les informations visibles à la plus haute résolution. Notre analyse révèle une forte augmentation de la couverture nuageuse au-dessus de vastes régions forestières d'Europe occidentale. De plus, nous montrons que les importants chablis provoqués par le cyclone Klaus dans les forêts des Landes ont entraîné une diminution significative de la nébulosité locale les années suivantes, suggérant un impact à long terme des extrêmes climatiques sur les écosystèmes forestiers et les interactions entre la surface terrestre et l'atmosphère. Le fort développement de la nébulosité le long des bordures sous le vent des grandes zones forestières est cohérent avec une circulation mésométéorologique (météo à moyenne échelle) due à la brise forestière.

Nous concluons que l'impact des forêts sur les conditions climatiques locales est plus complexe qu'on ne le pensait et peut inclure des effets sur la formation des nuages, la circulation mésométéorologique et éventuellement l'initiation de la convection profonde.

## Résultats

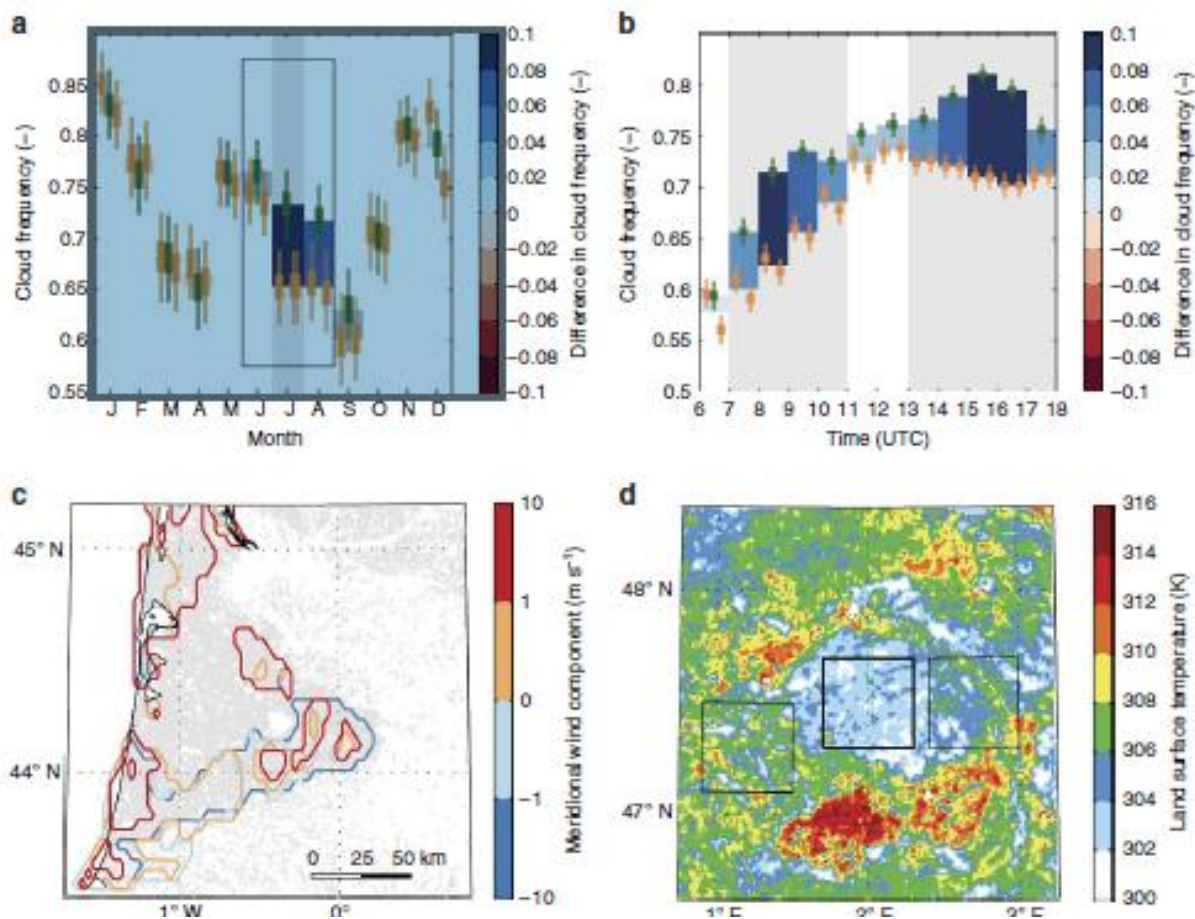
**Différences de fréquence des nuages.** Les Landes et la Sologne présentent toutes deux de vastes zones forestières entourées de cultures et de prairies (Fig. 1a, b), typiques d'une grande partie du paysage d'Europe occidentale (Fig. suppl. 1a). Contrairement à d'autres régions forestières, l'orographie y est quasi inexistante, avec des différences d'altitude maximales (progressives) de l'ordre de 100 à 200 m sur l'ensemble de la région (Fig. suppl. 1b-d). Dans les deux régions, les nuages d'été sont plus fréquents au-dessus des forêts qu'au-dessus des terres agricoles environnantes, la répartition spatiale de la couverture nuageuse reflétant fidèlement celle de la couverture forestière (Fig. 1c-f). L'augmentation relative de la fréquence des nuages en juin-juillet-août au-dessus des forêts est généralement de l'ordre de 0,05 à 0,15. Nous observons des répartitions spatiales similaires pour les deux régions indépendamment de la modélisation des nuages (voir Méthodes). Les analyses de sensibilité des estimations de couverture nuageuse (voir Méthodes et figures supplémentaires 2 à 5) montrent que nos résultats sont robustes pour différents seuils de détection des nuages. Les différences de fréquence quotidienne de couverture nuageuse en juin-juillet-août (JJA) entre les zones forestières et non forestières sont également très significatives (test t de Student pour échantillons indépendants,  $p < 0,05$ ), mais plus marquées pour les Landes ( $p = 10^{-6}$  et  $10^{-5}$  pour 2004-2008) que pour la Sologne ( $p = 0,01$  et  $0,02$  sur la même période). Les zones non forestières ne présentent pas de différence significative ( $p = 0,54$  pour les Landes et  $p = 0,88$  pour la Sologne), ce qui indique que les variations locales de la fréquence des nuages induites par la forêt sont indépendantes des gradients régionaux de la climatologie des nuages. La présence d'un fort gradient nord-sud de couverture nuageuse en Sologne montre que l'occupation des sols locale influence la couverture nuageuse.



**Figure 1 | Couverture forestière et nébulosité estivale.** Cartes d'occupation des sols des Landes (a) et de la Sologne (b).

(c-f) Fréquence moyenne de la nébulosité en juin-juillet-août (JJA) (2004–2008, 6–18 UTC) pour le produit MSG-CPP (c, d), basé sur des modèles physiques, et le produit MSG-HRV (e, f), basé sur des modèles empiriques. (g, h) Instantanés du canal 12 du MSG 17 juillet 2006, 13 UTC (g) et 1er mai 2012, 15 UTC (h). Les carrés noirs indiquent les zones forestières (trait épais) et non forestières (trait fin) servant de référence visuelle et d'analyse dans la figure 2.





**Figure 2 | Évolution temporelle et spatiale de la nébulosité préférentielle au-dessus des forêts.**

Évolution saisonnière (a) et diurne (b) de la différence moyenne de fréquence des nuages en juin-juillet-août (JJA) (indiquée par un encadré dans a) pour la région de Sologne.

(c) Impact de la composante méridienne du vent (10 m) sur la fréquence des nuages en JJA pour les Landes.

(d) Température de surface moyenne (LST) en juillet (2002-2014) d'après MODIS Aqua pour la Sologne. Dans a et b, les traits verticaux épais (fins) indiquent les intervalles de percentile 50 (95) obtenus par bootstrap pour les zones forestières (vertes) et non forestières (orange) de la figure 1. La zone ombrée indique les périodes de différence significative au seuil de confiance de 95 %. Dans c, les courbes de niveau représentent les 90e percentiles afin de tenir compte des différences de fréquence moyenne des nuages en fonction des conditions de vent. Il est à noter qu'un vent méridien positif est un vent soufflant du sud vers le nord. La fréquence des nuages est basée sur le produit MSG-CPP. Voir également la figure supplémentaire 17.

Les effets se superposent aux configurations météorologiques à grande échelle et potentiellement aussi aux variations de l'humidité du sol à des échelles de temps plus courtes (27). Bien que la climatologie calcule des moyennes sur toutes les conditions synoptiques, y compris les jours de couverture nuageuse totale (ou absente), des exemples d'instantanés (Fig. 1 g, h) et d'animations (Vidéos supplémentaires 1 à 4 et figures supplémentaires 6 à 9) basés sur des images à haute résolution, **révèlent l'existence de conditions dans lesquelles les nuages se forment uniquement au-dessus des forêts**. Dans des cas isolés, cela peut même favoriser le déclenchement de la convection profonde (cas du 17 juillet 2006) (*mouvements verticaux intenses d'air dans des couches d'atmosphère instables, pouvant entraîner des orages violents, des cumulonimbus et des cyclones tropicaux.*).

## Dynamique temporelle.

La figure 2 explore certains aspects temporels et spatiaux clés du contraste de fréquence des nuages. La figure 2a révèle l'existence d'un changement saisonnier dans la préférence des nuages pour la Sologne. Durant la période juin-juillet-août (JJA), les nuages ont une nette préférence pour se former au-dessus de la forêt, tandis qu'en dehors de cette période, les différences de fréquence des nuages ne sont pas significatives. Nous utilisons l'indice de végétation amélioré (EVI) pour étudier les liens possibles avec le développement saisonnier de la végétation dans les deux régions.

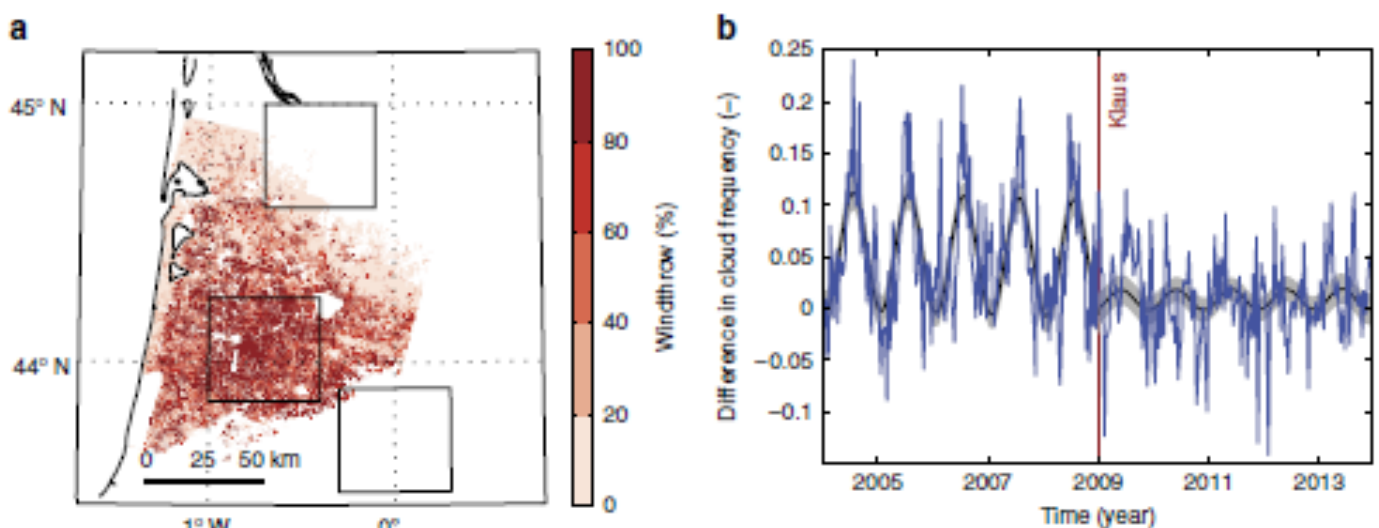
Comparé à l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), largement utilisé, l'EVI est plus sensible à la biomasse et à la structure du couvert forestier. En Sologne, l'EVI est initialement plus élevé au-dessus des zones non forestières environnantes (c'est-à-dire que les abords de la forêt sont plus verts que la forêt elle-même ; figure supplémentaire 10), mais diminue fortement pendant l'été en raison des récoltes, entraînant un fort réchauffement de la surface (figure supplémentaire 11). Pour les Landes, ces dynamiques saisonnières sont moins marquées. Ici, le contraste spatial de l'EVI est généralement plus faible, et des valeurs d'EVI plus élevées et plus faibles peuvent être observées dans les zones environnantes en fin d'été, ce qui suggère que les différences structurelles de la canopée ne sont pas à elles seules un déterminant principal des différences observées dans la fréquence des nuages. Il existe une différence marquée et significative dans les cycles diurnes de la couverture nuageuse JJA au-dessus des forêts et des zones non forestières (Fig. 2b et Fig. suppl. 12 et 13). Au-dessus des forêts, les nuages se développent plus tôt et plus rapidement qu'au-dessus des terres environnantes (pic vers 08h00 UTC), tout en persistant plus longtemps en soirée (différence maximale entre 15h00 et 16h00 UTC). Ceci reflète probablement un début plus précoce et une durée plus longue de l'activité thermique et de l'humidification de la couche limite atmosphérique au-dessus des forêts. Il n'y a pas de différence significative entre 11h00 et 13h00 UTC, ce qui reflète probablement le fait que les nuages se sont complètement développés aussi bien au-dessus des forêts que des zones environnantes.

**Influence des conditions synoptiques.** *(Les **conditions synoptiques** désignent l'ensemble des observations météorologiques recueillies à un moment donné sur une vaste région géographique, souvent à l'aide de cartes où sont tracées les données (pression, température, vents, précipitations, etc.) pour permettre une analyse et une prévision du temps).*

Nous testons la présence de circulations méso-échelles de type brise de forêt<sup>15</sup> en classant tous les jours selon la vitesse du vent (méridienne) (Fig. 2c et Fig. suppl. 14c) et la direction du vent (Fig. suppl. 15 et 16). Cette analyse révèle que la répartition spatiale des nuages dans la grande forêt des Landes est fortement influencée par les conditions de vent. Nous observons une fréquence de nuages plus élevée à la lisière sous le vent (et, dans une moindre mesure, transversalement au vent) de la forêt, quelle que soit la direction du vent. Cet effet de lisière est le plus prononcé pour des vitesses moyennes régionales de vent élevées (41 m/s). Ces observations sont compatibles avec une circulation de type brise de forêt induite par un réchauffement localement accru au-dessus de la forêt<sup>1, 4</sup>, comme cela a déjà été observé dans les Landes<sup>8</sup>. Par temps calme, la convergence au-dessus de la forêt favorise la formation de



nuages. Par vents modérés, le gradient de pression de surface induit thermiquement s'affaiblit en bordure de forêt, du fait de l'advection (*L'advection désigne le transport d'une propriété physique — comme la chaleur, l'humidité, la salinité ou des polluants — par le mouvement d'un fluide, tel que l'air ou l'eau*) d'air froid dans la forêt. À l'inverse, en bordure de forêt, la brise forestière locale s'oppose au flux synoptique, renforçant la convergence et créant des conditions favorables à la convection. Aucune relation claire entre la fréquence des nuages et les conditions de vent régionales n'a été observée pour la plus petite forêt de Sologne (Figures supplémentaires 14 et 16), où les effets de bordure sont plus difficiles à détecter. Nous n'avons pas non plus constaté de forte corrélation entre les conditions synoptiques (mesurées par la pression au niveau de la mer) et la différence de fréquence des nuages (Figure supplémentaire 17), ce qui suggère que les différences de couverture nuageuse entre la forêt et les zones environnantes se produisent sous diverses conditions synoptiques, impliquant possiblement différents mécanismes dominants. La brise forestière induite thermiquement est probablement la plus forte en juin et juillet. L'analyse des observations de température de surface (LST) (Fig. 2d et Fig. suppl. 11) révèle une augmentation progressive de la LST au-dessus des zones environnantes durant la saison estivale. La stabilité de la LST au-dessus de la forêt reflète probablement des taux d'évapotranspiration soutenus tout au long de l'été, tandis que la forte augmentation de la LST au-dessus des zones environnantes (jusqu'à 10 K pour la Sologne) indique une diminution des taux d'évaporation. L'augmentation de la convection thermique qui en résulte compensera l'augmentation de la convection thermique au-dessus de la forêt due à un albédo plus faible.



**Figure 3 | Impact du cyclone Klaus sur les Landes.**

(a) Pourcentage de chablis suite au passage de Klaus le 24 janvier 2009 (données : IGN).

(b) Évolution saisonnière de la nébulosité (ligne bleue) associée à Klaus (ligne verticale rouge), d'après les données MSG-CPP et calculée comme la moyenne en forêt (carré épais correspondant à la zone de chablis maximale) moins la moyenne hors forêt (deux carrés fins en (a)). Les différences moyennes sur dix jours ont été modélisées par une sinusoïde carrée avec tendance (ligne noire épaisse). Les zones ombrées représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

### Impact du cyclone Klaus.

Le 24 janvier 2009, le cyclone Klaus a touché terre dans le sud de la France avec une pression au cœur du cyclone atteignant 965 hPa et des rafales de vent jusqu'à 55 m/s enregistrées dans les stations de basse altitude<sup>13</sup>, provoquant d'importants dégâts dans le sud de la France et le nord

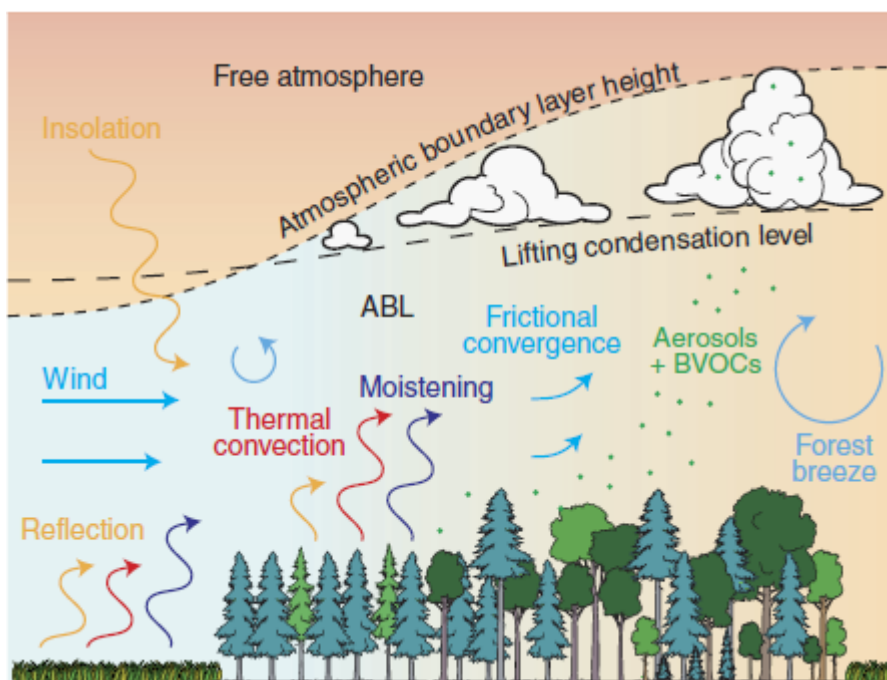
de la péninsule Ibérique. La forêt des Landes a été particulièrement touchée. De nombreux peuplements ont subi d'importants dégâts (Fig. 3a) par chablis, entraînant des arbres déracinés ou cassés par le vent, ce qui a conduit à des émissions de CO<sub>2</sub> estimées à 45 Mt<sup>28</sup>. En raison de l'étendue spatiale et de la quasi-instantanéité des dégâts, **Klaus offre une opportunité unique d'étudier les effets d'une disparition soudaine de la forêt sur la fréquence des nuages.**

D'importantes variations de la fréquence des nuages en juin-juillet-août ont été observées dans la région la plus touchée (Fig. 3b et Fig. S3). Au cours des cinq années suivantes (2009-2013), après le passage de Klaus, des variations locales de la fréquence des nuages allant jusqu'à 0,20 ont été observées par rapport à la période 2004-2008 ( $p = 0,001$  au-dessus de la zone forestière de la figure 3a). En revanche, aucune variation significative n'a été constatée pour les zones situées en dehors de la zone touchée par la tempête ( $p = 0,42$  et  $p = 0,58$ ) ni pour la Sologne ( $p = 0,63$ ). Le moment de ce changement brutal coïncide également avec le passage de Klaus. Avant 2009, la différence présente un cycle saisonnier marqué, avec un pic en été d'une amplitude de 0,114 (0,093-0,135, intervalle de confiance à 95 %), qui diminue de près d'un ordre de grandeur pour atteindre 0,020 (0,002-0,038) après Klaus. Le temps de rétablissement de ces forêts, du moins en ce qui concerne leur impact sur la formation des nuages, est donc largement supérieur à 5 ans et peut-être même beaucoup plus long.

## Discussion

À partir des résultats obtenus, nous proposons un modèle conceptuel de l'impact des forêts tempérées sur la formation des nuages (Fig. 4). Les différences de bilan énergétique de surface influencent probablement la formation des nuages, car plusieurs études ont montré que les variations de convection dues aux seules variations du bilan énergétique de surface peuvent engendrer des différences de couverture nuageuse (10,11). Nos résultats ne contredisent pas le rôle important de l'albédo, postulé dans des études antérieures (21). Les valeurs d'albédo des forêts de Sologne et des Landes se situent généralement entre 0,11 et 0,14, tandis que les zones environnantes sont plus réfléchissantes, avec des valeurs d'albédo comprises entre 0,16 et 0,19 (Fig. suppl. 18). Ces différences sont suffisamment importantes pour influencer la croissance et les propriétés de la couche limite atmosphérique (CLA). Les différences de répartition de l'énergie disponible déterminent également la dynamique de la CLA et le moment d'apparition des cumulus de faible altitude (11), mais elles pourraient être moins importantes que les différences d'albédo (9). Néanmoins, nos résultats concordent avec les flux de chaleur sensible plus élevés observés au-dessus des forêts tempérées<sup>4</sup>, entraînant une augmentation de la couche limite atmosphérique et une brise forestière. Nous pouvons concilier nos résultats avec les études menées en Amazonie<sup>18,19</sup> en reconnaissant que, dans les deux cas, des flux de chaleur sensible plus élevés favorisent la formation de nuages<sup>4,23</sup>.

Bien que cela puisse sembler contredire les températures de surface (TS) plus basses au-dessus des forêts, les différences de rugosité empêchent la TS d'être une mesure directe du flux de chaleur sensible, et la répartition des flux sensibles à la température au-dessus des forêts<sup>4,9</sup> pourrait ne pas être indépendante des conditions de couverture nuageuse. Il convient de noter qu'un mécanisme de soulèvement (fourni par le flux de chaleur sensible) et une humidité suffisante (fournie par le flux de chaleur latente) sont tous deux nécessaires au développement des nuages convectifs. En raison du rayonnement net plus élevé dû à l'effet d'albédo et à la rugosité accrue, les forêts tempérées peuvent présenter des flux de chaleur sensible et latente plus élevés<sup>1,4</sup>.



**Figure 4 | Voies possibles d'influence des forêts tempérées sur la formation de nuages convectifs.**

La couleur de fond indique les zones potentiellement tempérées (bleu : plus froid, rouge : plus chaud). Les flèches indiquent les processus radiatifs (orange), de réchauffement (rouge), d'humidification (bleu), mécaniques (bleu clair) et biogéochimiques (vert). Au-dessus de la forêt, la moindre réflexion du rayonnement solaire incident favorise les échanges turbulents et la convection thermique, augmentant ainsi le niveau de condensation par ascension et la hauteur de la couche limite

atmosphérique. Ce processus est amplifié par la convergence par frottement et le développement d'une brise forestière, et possiblement par la libération de COV biogéniques.

La rugosité aérodynamique a également été identifiée comme un facteur important contrôlant non seulement le bilan énergétique de surface et les conditions de la couche de mélange<sup>29,30</sup>, mais induisant également une turbulence accrue, une convergence par frottement due au ralentissement des masses d'air, des effets de bord et/ou une circulation à méso-échelle<sup>10,14</sup>. L'influence marquée des conditions de vent sur les schémas de renforcement de la nébulosité suggère le développement de circulations à méso-échelle (8) (brise de forêt) se superposant au vent de fond, possiblement influencées par des combinaisons variables de différences de bilan énergétique de surface et de rugosité. Bien que l'existence d'une brise de forêt et sa contribution aux différences de nébulosité aient été confirmées par des expériences dédiées à petite échelle dans les Landes dans le cadre du projet HAPEX-Mobilhy (8), la contribution de ces effets à l'échelle régionale reste à évaluer.

Outre les processus thermodynamiques, la grande distance de transit et le temps de séjour important des nuages (en heures-B) sont également favorables à **la formation d'aérosols organiques secondaires, induite par le taux d'émission plus élevé de COV biogéniques des arbres** dans les forêts de Sologne et des Landes. L'augmentation des concentrations de noyaux de condensation des nuages dans la direction du vent pourrait également contribuer à l'effet observé des conditions de vent sur les schémas d'intensification de la nébulosité (31). En réalité, il existe probablement une interaction complexe entre les processus physiques et biogéochimiques représentés sur la figure 4, où la contribution relative de chaque processus dépendra des conditions synoptiques, de la saisonnalité de la végétation et de l'humidité du sol. La quantification de ces contributions dynamiques et de leurs interactions devrait constituer un axe de recherche prioritaire.

Nos résultats ont des implications importantes pour l'évaluation des services hydriques et climatiques fournis par les forêts tempérées en Europe (21,32). L'augmentation de la couverture nuageuse a le potentiel de compenser localement l'effet de réchauffement dû à un albédo plus faible (16) et peut conduire à une plus grande efficacité d'utilisation de la lumière et de l'eau dans les écosystèmes forestiers (21). Nos résultats soulignent également la nécessité d'inclure les impacts indirects du cycle de l'eau lors de l'évaluation de l'impact des extrêmes climatiques

tels que le cyclone Klaus sur les cycles biogéochimiques et les échanges d'énergie (28,33).

**Des observations empiriques montrent que les forêts peuvent même agir comme une zone source de convection profonde, intensifiant ainsi potentiellement le cycle hydrologique au-dessus des terres émergées.**

Notre étude contribue également à un débat actuel sur l'importance de l'hétérogénéité de la surface terrestre, que ce soit par l'utilisation des terres ou l'humidité du sol, sur les nuages et les précipitations (15,27,34). Bien que notre étude se soit concentrée sur les forêts en l'absence de topographie, nous pensons que les mécanismes à l'origine de l'augmentation de la couverture nuageuse jouent également un rôle en présence d'un mécanisme de soulèvement statique. Cependant, comme le couvert forestier est spatialement corrélé à la topographie (26), il n'est plus possible de démêler ces effets sur la seule base d'observations et une approche de modélisation systématique sera nécessaire. Les recherches futures devront déterminer si la préférence des nuages convectifs au-dessus des forêts est également associée au déclenchement de la convection profonde et à une augmentation des précipitations. Il est possible que cette préférence pour la formation de nuages au-dessus des forêts puisse un jour être exploitée pour atténuer les impacts locaux d'un climat plus chaud, notamment à proximité des zones urbaines.

## Méthodes

**Jeux de données.** Les données principales de cette étude sont issues des mesures de l'imageur visible et infrarouge amélioré (SEVIRI) embarqué à bord des satellites de la série MSG. Dix années de données ont été utilisées pour la période 2004-2013 à une résolution de 15 minutes, soit plus de 350 000 images au total. Pour la majeure partie de l'analyse, nous nous sommes concentrés sur les heures diurnes (6h-18h UTC) de la saison estivale (JJA), réduisant le nombre d'images à  $10 \times 92 \times 48 = 44\,160$  par région. Les données de vitesse du vent à 10 m proviennent d'ERA-Interim. Les produits d'albédo et d'EVI du spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) ont été obtenus sur [lpdaac.usgs.gov](http://lpdaac.usgs.gov). Les données de température de surface (LST) MODIS sont issues d'une analyse globale récente de la dynamique de la LST35. La carte des dégâts causés par la tempête à Klaus a été fournie par l'Inventaire forestier national (disponible sur <http://inventaire-forestier.ign.fr/cartoklaus/carto/afficherCarto>, version 2009). Les cartes d'occupation des sols pour 2010 proviennent de HILDA36-38 (disponibles sur [www.wageningenur.nl/hilda](http://www.wageningenur.nl/hilda)).

**Algorithme CPP.** Nous avons utilisé les produits nuageux SEVIRI générés avec l'algorithme MSG-CPP du KNMI et disponibles à l'adresse <http://data.knmi.nl>. Afin d'éviter les fausses détections, nous n'avons identifié les nuages que lorsque leur épaisseur optique dépassait 0,3. L'algorithme identifie d'abord les pixels nuageux à l'aide d'une série de tests de seuil et de cohérence spatiale appliqués aux réflectances visibles/proche infrarouges mesurées et aux températures de brillance infrarouges (39). Dans un second temps, les propriétés optiques des nuages (épaisseur optique et taille des particules) ont été extraites en faisant correspondre les réflectances observées par satellite aux longueurs d'onde visibles (0,6  $\mu\text{m}$ ) et proche infrarouge (1,6  $\mu\text{m}$ ) aux réflectances simulées de nuages homogènes composés de particules liquides ou de glace. La phase thermodynamique (liquide ou glace) est déterminée dans le cadre de cette procédure, en utilisant une estimation de la température au sommet du nuage comme entrée supplémentaire (40,41). Les canaux ondes courtes MSG-SEVIRI ont été calibrés à l'aide de mesures MODIS42.

**Algorithme HRV.** Un second produit empirique de couverture nuageuse (MSG-HRV) a été dérivé, indépendamment, à partir du canal large bande HRV de SEVIRI (0,4–1,1  $\mu\text{m}$ ). La couverture nuageuse a été identifiée lorsque les mesures de rayonnement (à l'échelle du pixel  $\sim 1\text{ km}$ )

dépassaient le rayonnement climatologique en l'absence de nuages pour ce pixel d'un seuil constant (dix unités). La climatologie du ciel clair a été construite en identifiant la section la plus abrupte des fonctions de distribution cumulatives empiriques de toutes les mesures sur 10 ans, pour chaque heure de la journée et pour chaque période de 10 jours (400 valeurs au total). Nous avons constaté que cette procédure produit des modèles de rayonnement par ciel clair qui concordent bien avec les cartes d'albédo MODIS (figure supplémentaire 18).

**Disponibilité des codes.** Les codes utilisés pour l'analyse et la production du produit cloud MSG-HRV sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

**Disponibilité des données.** Les jeux de données générés et/ou analysés au cours de la présente étude sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

## Références

1. Bonan, G. B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320, 1444–1449 (2008).
2. Hanewinkel, M., Cullmann, D. A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J. & Zimmermann, N. E. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat. Clim. Change* 3, 203–207 (2013).
3. Nabuurs, G.-J. et al. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nat. Clim. Change* 3, 792–796 (2013).
4. Teuling, A. J. et al. Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nat. Geosci.* 3, 722–727 (2010).
5. Spracklen, D. V., Arnold, S. R. & Taylor, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature* 489, 282–285 (2012).
6. Vila`-Guerau de Arellano, J., van Heerwaarden, C. C. & Lelieveld, J. Modelled suppression of boundary-layer clouds by plants in a CO<sub>2</sub>-rich atmosphere. *Nat. Geosci.* 5, 701–704 (2012).
7. Dolinar, E. K., Dong, X., Xi, B., Jiang, J. H. & Su, H. Evaluation of CMIP5 simulated clouds and TOA radiation budgets using NASA satellite observations. *Clim. Dyn.* 44, 2229–2247 (2015).
8. Mahrt, L. & Ek, M. Spatial variability of turbulent fluxes and roughness lengths in HAPEX-MOBILHY. *Bound. Lay. Meteorol.* 65, 381–400 (1993).
9. Van Heerwaarden, C. C. & Teuling, A. J. Disentangling the response of forest and grassland energy exchange to heatwaves under idealized land-atmosphere coupling. *Biogeosci.* 11, 6159–6171 (2014).
10. Ek, M. & Holtslag, A. A. M. Influence of soil moisture on boundary layer cloud development. *J. Hydrometeorol.* 5, 86–99 (2004).
11. Gentine, P., Ferguson, C. R. & Holtslag, A. A. M. Diagnosing evaporative fraction over land from boundary-layer clouds. *J. Geophys. Res.* 118, 8185–8196 (2013).
12. Findell, K. L. & Eltahir, E. A. B. Atmospheric controls on soil moisture boundary layer interactions. Part I: framework development. *J. Hydrometeorol.* 4, 552–569 (2003).

13. Liberato, M. L. R., Pinto, J. G., Trigo, I. F. & Trigo, R. M. Klaus – an exceptional winter storm over northern Iberia and southern France. *Weather* 66, 330–334 (2011).
14. Rieck, M., Hohenegger, C. & van Heerwaarden, C. C. The influence of land surface heterogeneities on cloud size development. *Mon. Wea. Rev.* 142, 3830–3846 (2014).
15. Taylor, C. M. Detecting soil moisture impacts on convective initiation in Europe. *Geophys. Res. Lett.* 42, 4631–4638 (2015).
16. Spracklen, D. V., Bonn, B. & Carslaw, K. S. Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. *Philos. Trans. R. Soc. A* 366, 4613–4626 (2008).
17. Simon, V., Clement, B., Riba, M.-L. & Torres, L. The Landes experiment: monoterpenes emitted from the maritime pine. *J. Geophys. Res.* 99, 16,501–16,510 (1994).
18. Durieux, L., Machado, L. A. T. & Laurent, H. The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. *Remote Sens. Environ.* 86, 132–140 (2003).
19. Wang, J. et al. Impact of deforestation in the Amazon basin on cloud climatology. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 106, 3670–3674 (2009).
20. Ray, D. K. et al. Effects of land use in Southwest Australia: 1. Observations of cumulus cloudiness and energy fluxes. *J. Geophys. Res.* 108, 4414 (2003).
21. Freedman, J. M., Fitzjarrald, D. R., Moore, K. E. & Sakai, R. K. Boundary layer clouds and vegetation–atmosphere feedbacks. *J. Clim.* 14, 180–197 (2001).
22. Rotenberg, E. & Yakir, D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* 327, 451–454 (2010).
23. Carleton, A. M., Adegoke, J., Allard, J., Arnold, D. L. & Travis, D. J. Summer season land cover–convective cloud associations for the Midwest U.S. ‘Corn Belt’. *Geophys. Res. Lett.* 28, 1679–1682 (2001).
24. Gambill, L. D. & Mecikalski, J. R. A satellite-based summer convective cloud frequency analysis over the southeastern United States. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 50, 1756–1769 (2011).
25. Rabin, R. M. & Martin, D. W. Satellite observations of shallow cumulus coverage over the central United States: an exploration of land use impact on cloud cover. *J. Geophys. Res.* 101, 7149–7155 (1996).
26. Sandel, B. & Svenning, J.-C. Human impacts drive a global topographic signature in tree cover. *Nat. Commun.* 4, 2474 (2013).
27. Guillod, B. P., Orlowsky, B., Miralles, D. G., Teuling, A. J. & Seneviratne, S. I. Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall. *Nat. Commun.* 6, 6443 (2015).
28. Gardiner, B. et al. (eds) *Living with Storm Damage to Forests* (European Forest Institute, 2013).
29. Harman, I. N. The role of roughness sublayer dynamics within surface exchange schemes. *Bound. Lay. Meteorol.* 142, 1–20 (2012).



30. Pitman, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *Int. J. Climatol.* 23, 479–510 (2003).
31. Solmon, F., Sarrat, C., Serca, D., Tulet, P. & Rosset, R. Isoprene and monoterpenes biogenic emissions in France : modeling and impact during a regional pollution episode. *Atmos. Environ.* 38, 3853–3865 (2004).
32. Anderson-Teixeira, K. J. et al. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. *Nat. Clim. Change* 2, 177–181 (2012).
33. Reichstein, M. et al. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* 500, 287–295 (2013).
34. Pielke, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Rev. Geophys.* 39, 151–177 (2001).
35. Gallego-Elvira, B. et al. Global observational diagnosis of soil moisture control on the land surface energy balance. *Geophys. Res. Lett.* 43, 2623–2631 (2016).
36. Fuchs, R., Herold, M., Verburg, P. H., Clevers, J. G. P. W. & Eberle, J. Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900–2010. *Glob. Chang. Biol.* 21, 299–313 (2014).
37. Fuchs, R., Verburg, P. H., Clevers, J. G. P. W. & Herold, M. The potential of old maps and encyclopaedias for reconstructing historic continental land cover/use change. *Appl. Geogr.* 59, 43–55 (2015).
38. Fuchs, R., Herold, M., Verburg, P. H. & Clevers, J. G. P. W. A high-resolution and harmonized model approach for reconstructing and analysing historic land changes in Europe. *Biogeosci.* 10, 1543–1559 (2013).
39. Roebeling, R. A., Deneke, H. M. & Feijt, A. J. Validation of cloud liquid water path retrievals from SEVIRI using one year of CloudNET observations. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 47, 206–222 (2008).
40. Roebeling, R. A., Feijt, A. J. & Stammes, P. Cloud property retrievals for climate monitoring: implications of differences between Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) on METEOSAT-8 and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on NOAA-17. *J. Geophys. Res.* 111, 20210 (2006).
41. Stengel, M. et al. CLAAS: the CM SAF cloud property dataset using SEVIRI. *Atm. Chem. Phys.* 14, 4297–4311 (2014).
42. Meirink, J. F., Roebeling, R. A. & Stammes, P. Inter-calibration of polar imager solar channels using SEVIRI. *Atm. Meas. Tech.* 6, 2495–2508 (2013).

## **Remerciements**

Nous remercions Barry Gardiner (INRA) et ses collègues pour leur aide concernant les données de la tempête Klaus.

D.G.M. remercie l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique (NWO) pour son soutien financier (subvention n° 863.14.004). G.-J.N. remercie le projet H2020 PEGASUS pour son soutien (convention de subvention n° 633814).

## Contributions des auteurs

A.J.T. a conçu l'étude et réalisé les analyses. J.F.M. a fourni les données MSG-CPP et a contribué au lancement de l'étude. C.M.T. a fourni les données MSG-HRV et Aqua LST et a contribué à l'analyse. C.M.T., R.V., L.A.M. et D.G.M. ont effectué des analyses complémentaires. Tous les auteurs ont contribué à la rédaction et à l'interprétation des résultats.

## Informations complémentaires

Des informations supplémentaires accompagnent cet article et sont disponibles à l'adresse <http://www.nature.com/naturecommunications>

**Conflits d'intérêts financiers** : Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts financiers.

Les informations relatives aux tirés à part et aux autorisations sont disponibles en ligne à l'adresse <http://npg.nature.com/reprintsandpermissions/>

**Comment citer cet article** : Teuling, A. J. et al. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. Nat. Commun. 8, 14065

doi: 10.1038/ncomms14065 (2017).

**Note de l'éditeur** : Springer Nature reste neutre quant aux revendications territoriales figurant sur les cartes publiées et aux affiliations institutionnelles.

Ce travail est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International.

Les images et autres éléments tiers présents dans cet article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire dans la légende. Si le contenu n'est pas couvert par une licence Creative Commons, les utilisateurs devront obtenir l'autorisation du titulaire des droits pour le reproduire.

Pour consulter une copie de cette licence, rendez-vous sur <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

© Les auteurs 2017

NATURE COMMUNICATIONS | DOI : 10.1038/ncomms14065 ARTICLE

NATURE COMMUNICATIONS | 8:14065 | DOI : 10.1038/ncomms14065 | [www.nature.com/naturecommunications](http://www.nature.com/naturecommunications) 7

*Cette traduction en français a été faite avec le traducteur de Google par Sabine Becker  
le 11 février 2026*