



## La forêt, un acteur majeur du recyclage de l'eau à la source des nuages et des précipitations

Yves Brunet

Gaëtan Noual, Margaux Peyrot, Patrick Le Moigne, Christine Lac

**INRAE**



# Une variété de réponses de l'ennuagement à la présence de forêt



*Heilblum et al. (2014)*

*Teuling (2013)*



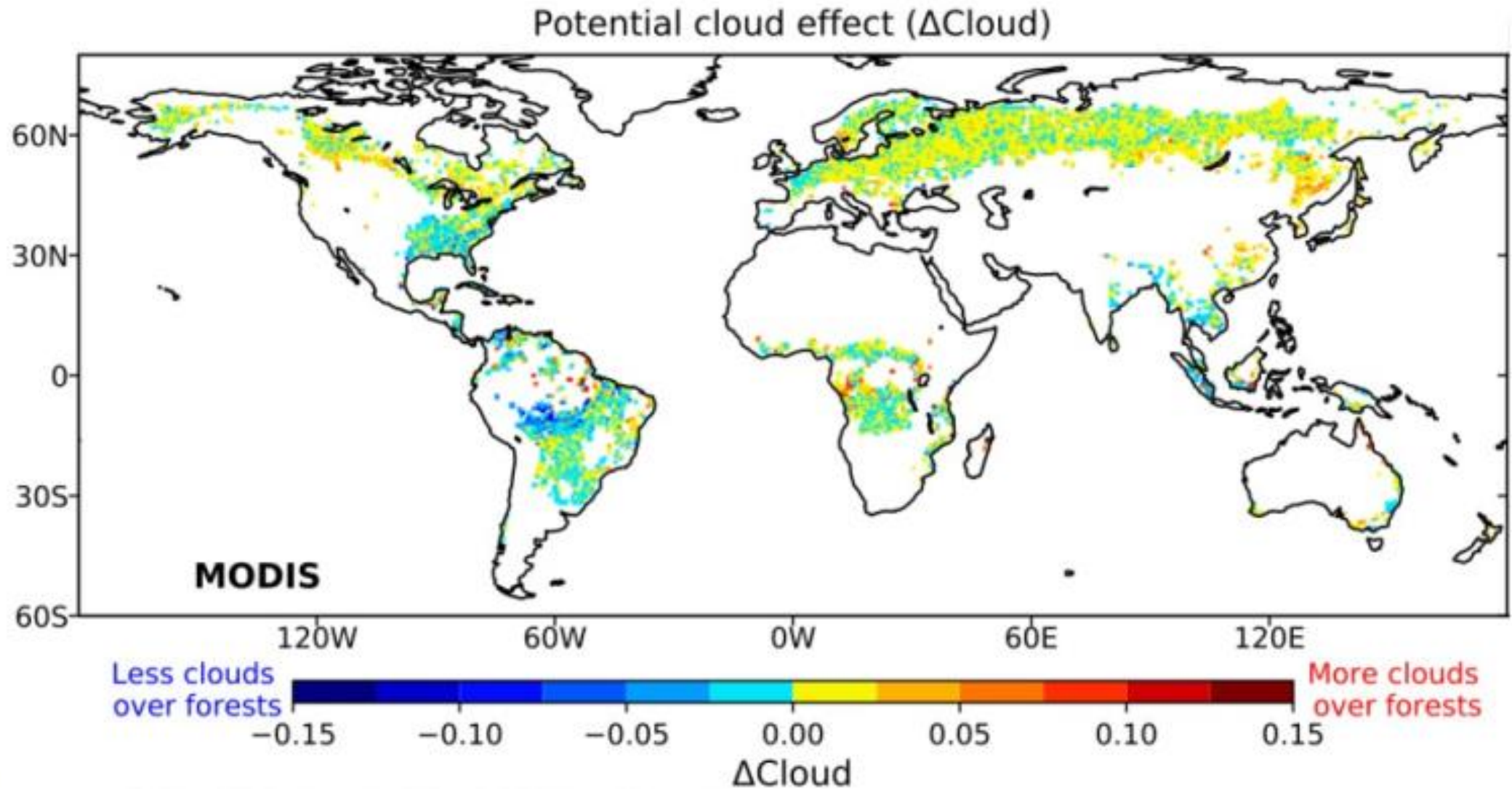
*US Geol survey (2021)*



*Noual et al. (2023)*



# Une variété de réponses de l'ennuageement à la présence de forêt



# Régions tropicales : un rôle « ambivalent » des forêts sur les nuages ?

## Échelle continentale

La déforestation entraîne une baisse des précipitations

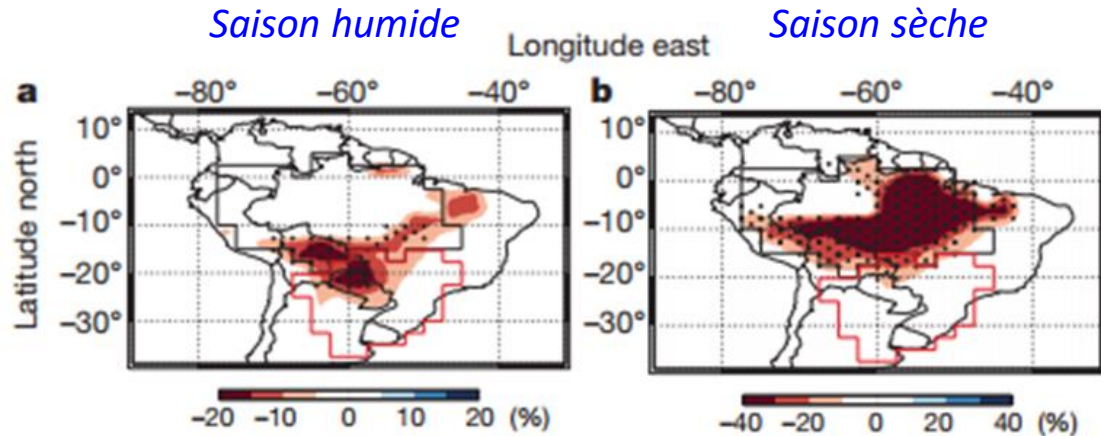
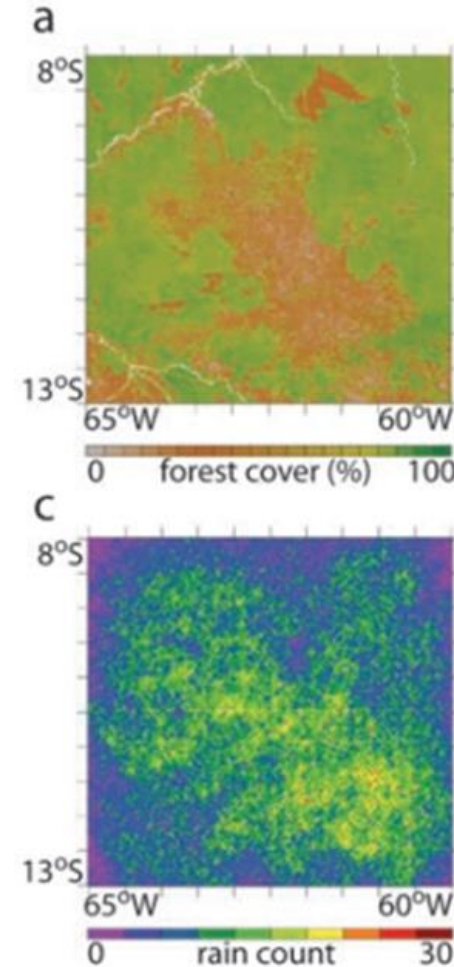


Figure 4 | Simulated percentage change in precipitation due to 2000–2050 business-as-usual deforestation of the Amazon basin. a, Wet season; b, dry season. Stippling denotes regions where the simulated precipitation anomaly differs from the present-day (1998–2010) rainfall by more than 1 s.d. The Amazon (black) and Rio de la Plata (red) basins are marked.

*Spracklen et al. (2012)*

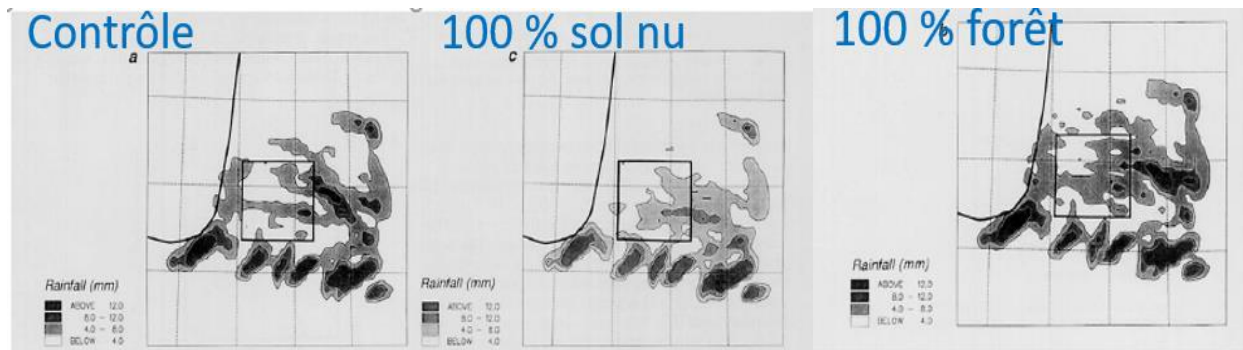
## Échelle régionale



*Chagnon, Bras (2005)*

- Zone de Rondonia en Amazonie (5° x 5°)
- Ennuagement plus important sur les zones déforestées
- Précipitations plus fortes

## Échelle régionale



*Blith et al. (1994)*

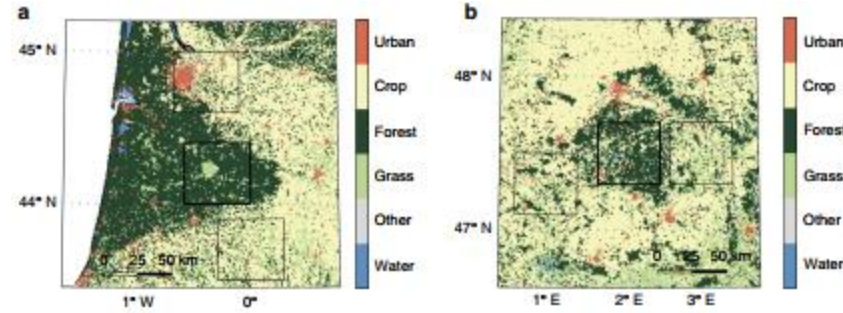
### Peu d'études sur les forêts tempérées

- Campagne Hapex-Mobilhy (mi-80, S-O France)
- La présence de forêt augmente la formation des nuages et les précipitations

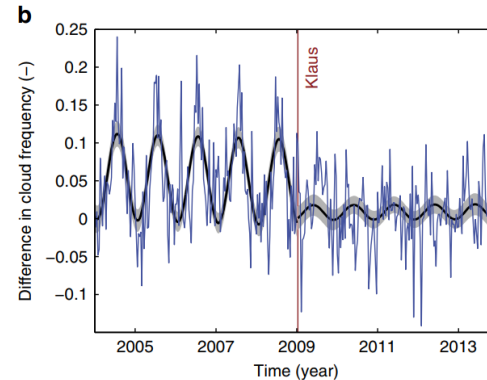
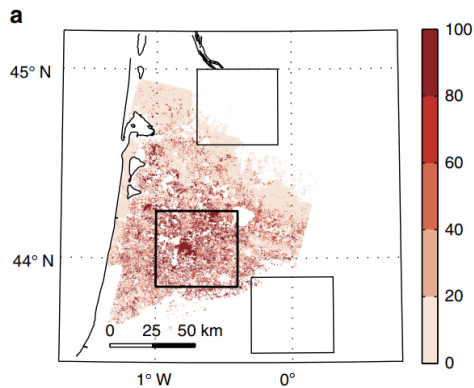
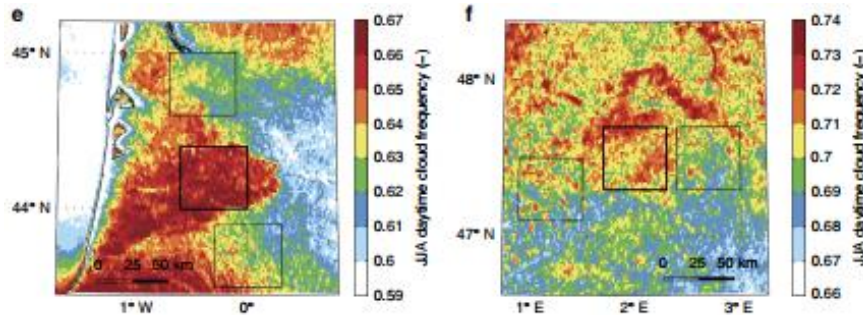


# Régions tempérées : des observations clés (Teuling et al., 2017)

## Occupation des sols



## Fréquence d'ennuagement JJA



## ARTICLE

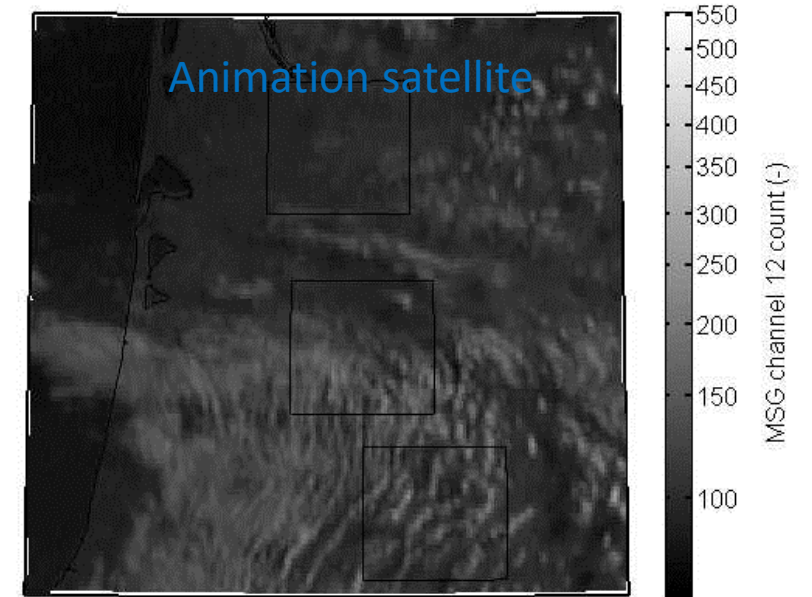
Received 15 Apr 2016 | Accepted 25 Nov 2016 | Published 11 Jan 2017

DOI: 10.1038/ncomms14065 OPEN

## Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests

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

## Animation satellite



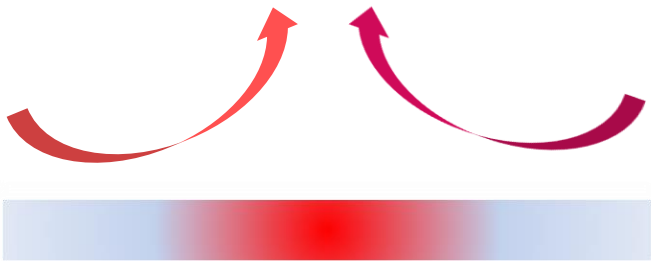
- Sur 2 régions forestières (Landes, Sologne)

- 10 années de données à 15 min issues de satellites géostationnaires

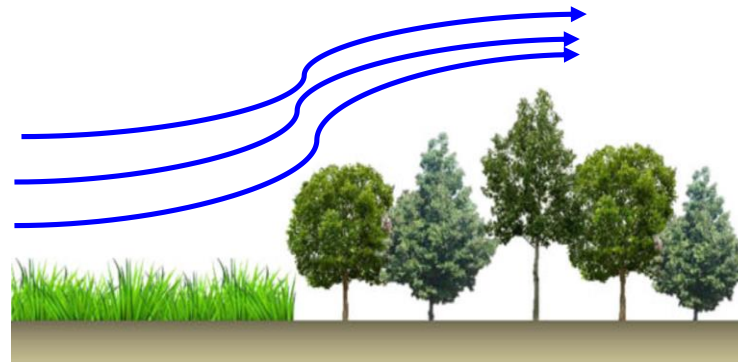
- Comparaison avant/après tempête Klaus (janvier 2009)

# Formation de nuages

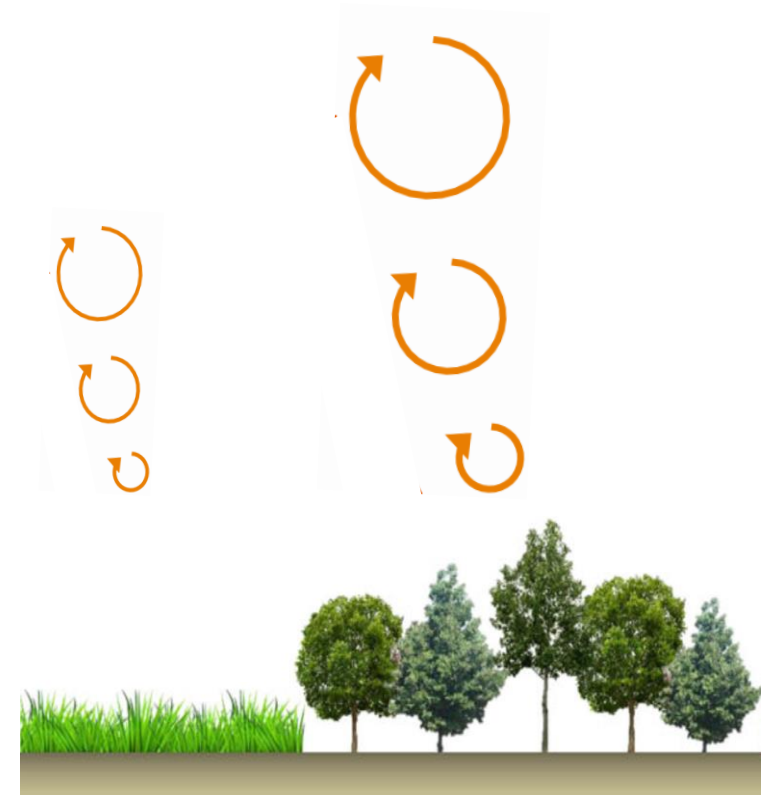
- Présence d'eau (évaporation)
- Mécanismes d'ascendance (refroidissement)
- Condensation (aérosols)



**Convection thermique**



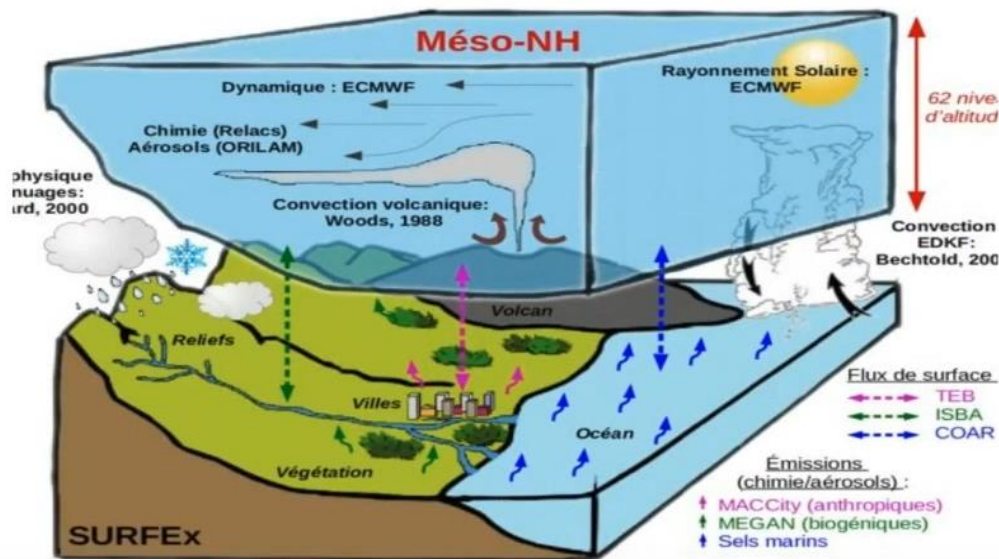
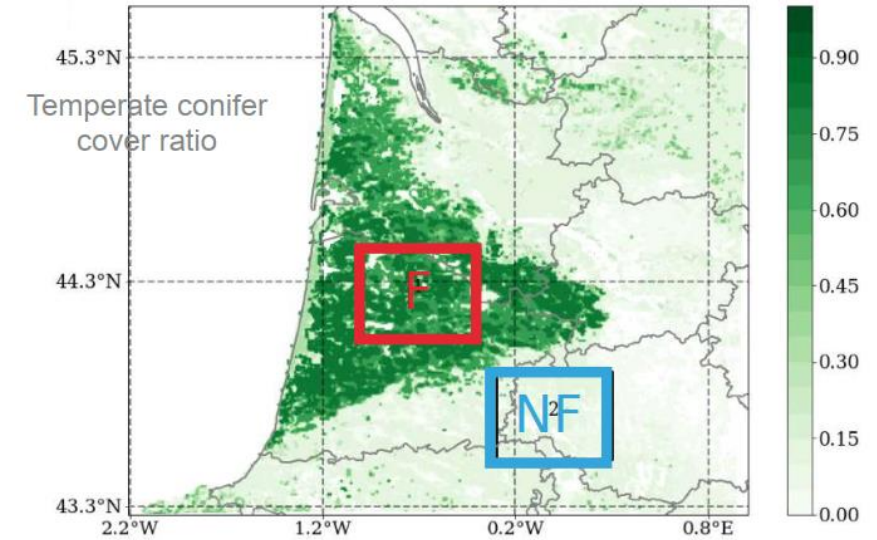
**Convergence de vent**



**Turbulence**

# Une étude numérique (INRAE-CNRM)

- Peut-on **simuler** ces effets d'ennuagement ?
- Quels **processus** provoquent un ennuagement préférentiel au-dessus de la forêt ?
- Quel est l'impact de **changements d'occupation** du sol (afforestation, déforestation...) ?



Source: Brice Foucart

**Meso-NH**, 1998  
CNRM  
Laboratoire d'Aérodologie

**SURFEX**,  
Météo-France

- Thèse de Gaëtan Noual (2023)
- Médaille d'argent 2024 de l'AAF (section 2)

## JGR Atmospheres

Simulating the Effects of Regional Forest Cover and Windthrow-Induced Cover Changes on Mid-Latitude Boundary-Layer Clouds

G. Noual<sup>1,2</sup>, Y. Brunet<sup>1</sup>, P. Le Moigne<sup>2</sup>, and C. Lac<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISPA, INRAE, Villenave d'Ornon, France, <sup>2</sup>CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

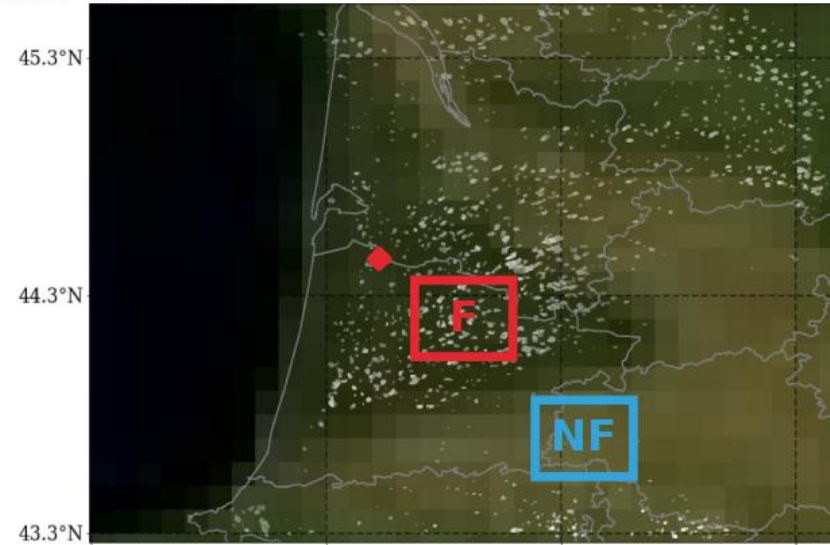


# Le modèle simule l'ennuagement au-dessus de la forêt

Observation 9 July 2013 13 UTC

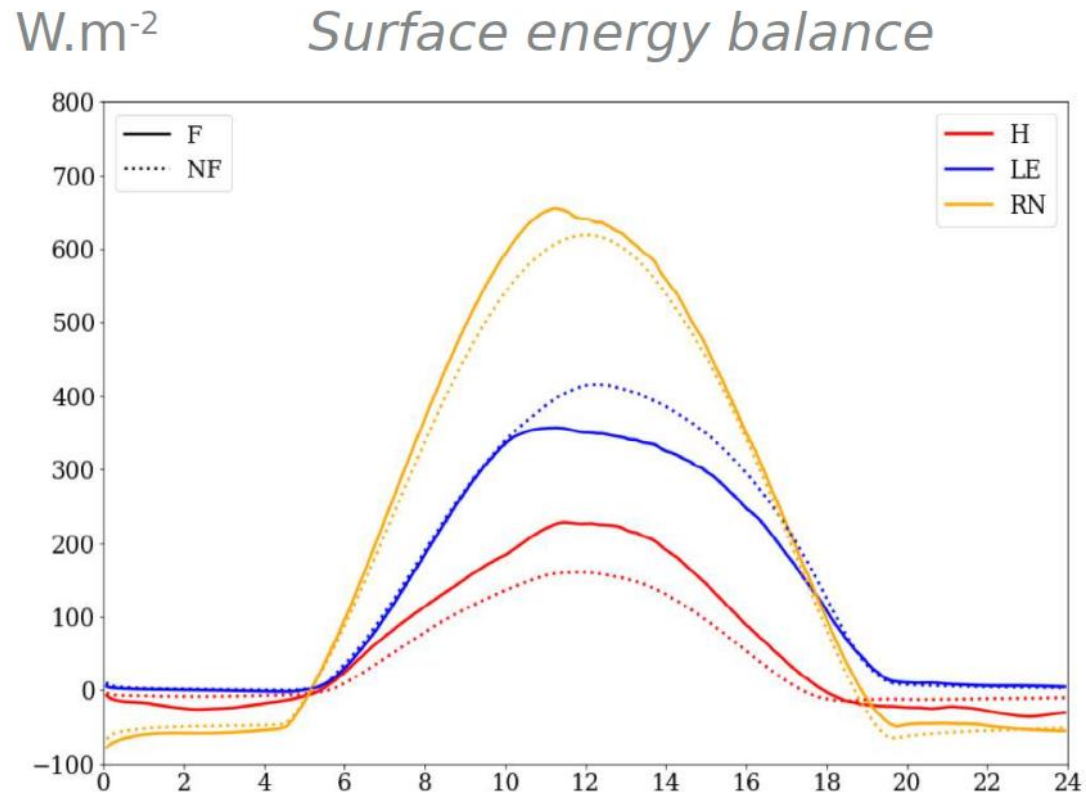


Simulation

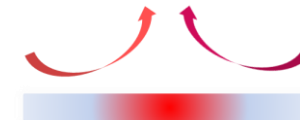


# Comparaison forêt / non-forêt

- Différence « forêt – non-forêt » : bilan d'énergie

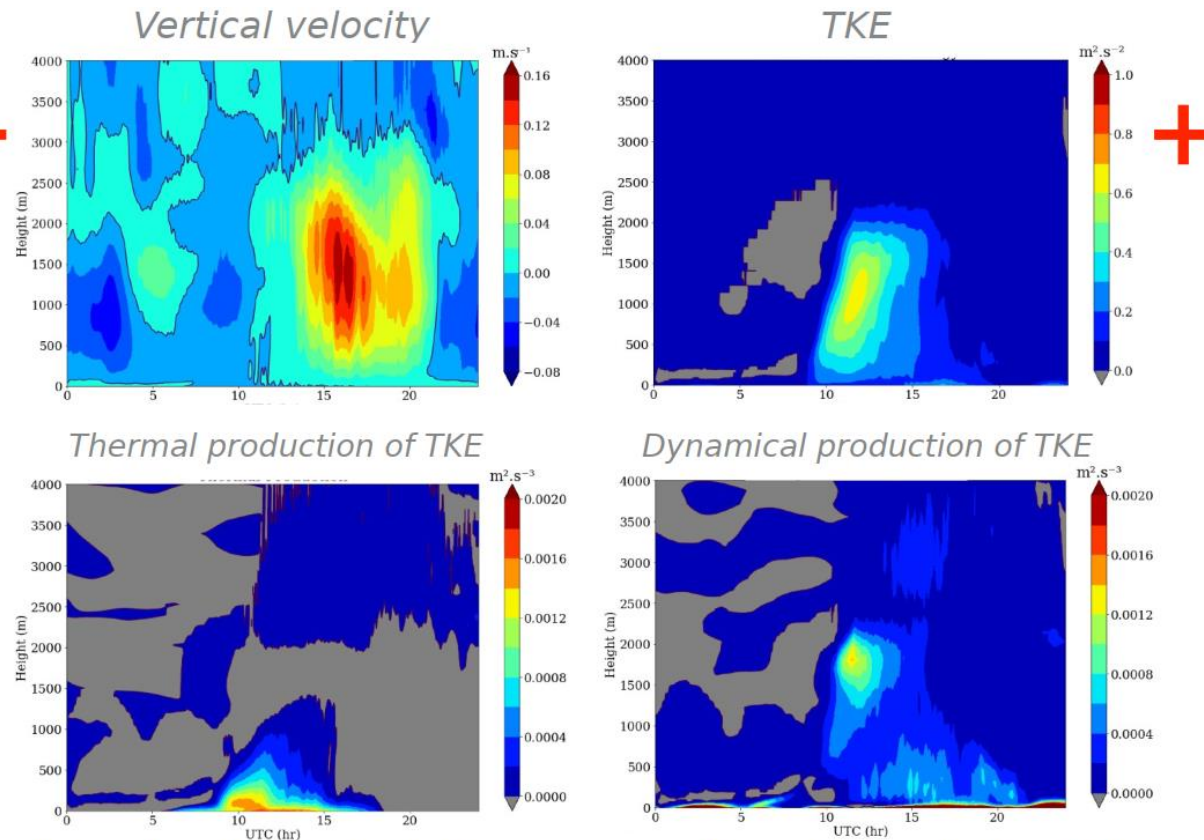


- Effet important de l'**albedo** : plus d'énergie absorbée → convection thermique plus importante au-dessus de la forêt



# Comparaison forêt / non-forêt

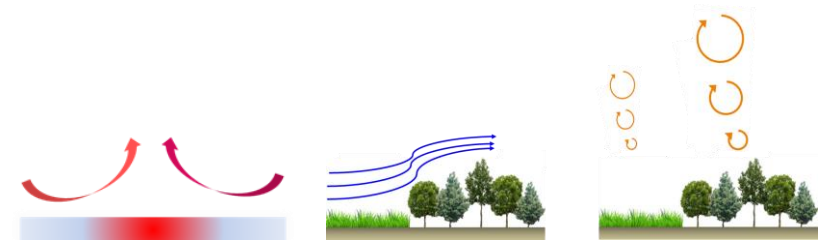
- Différence « forêt – non-forêt » : mécanismes



- Thermal production in the lower part of the BL due to higher H

- Dynamical production in the upper part due to higher roughness

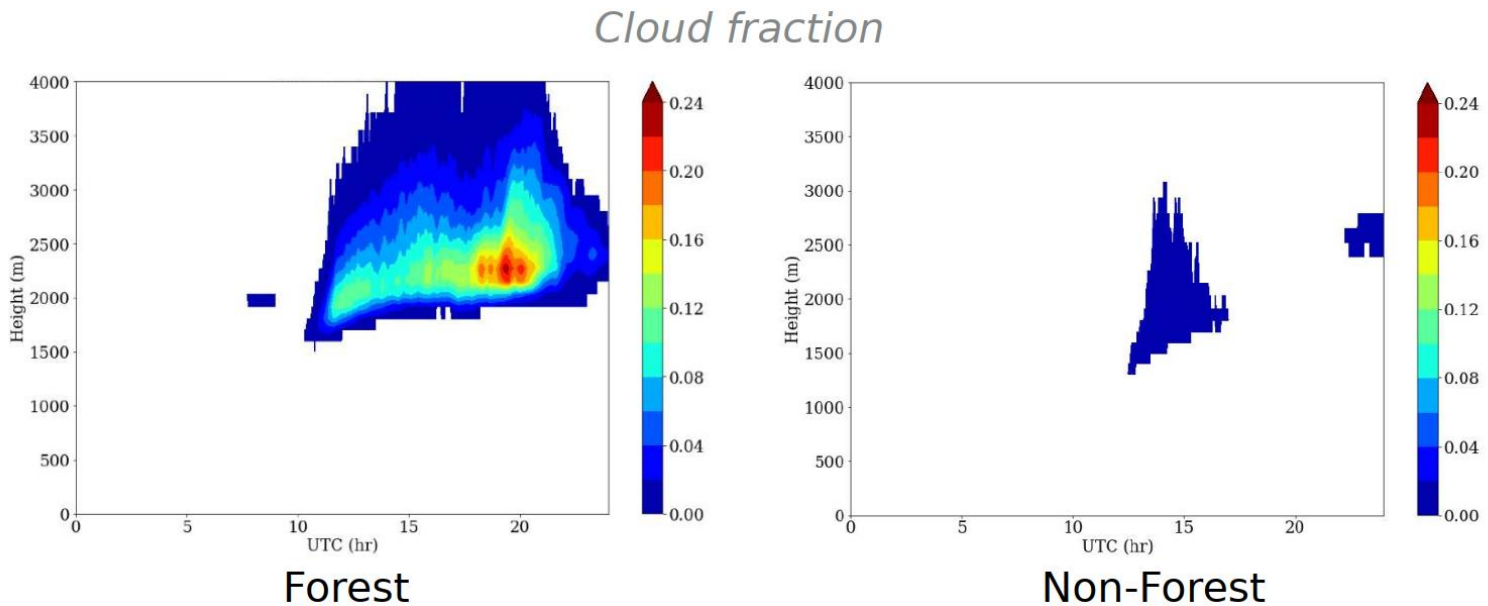
- Ascendances plus fortes
- Turbulence plus forte
  - D'origine thermique (flux de chaleur)
  - D'origine dynamique (frottement)





# Comparaison forêt / non-forêt

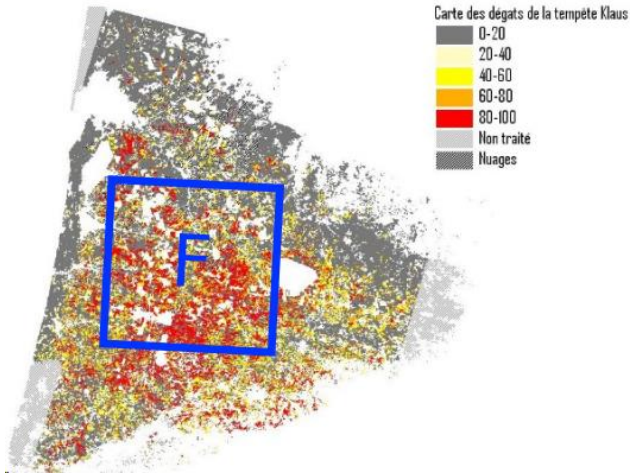
- Différence « forêt – non-forêt » : ennuagement



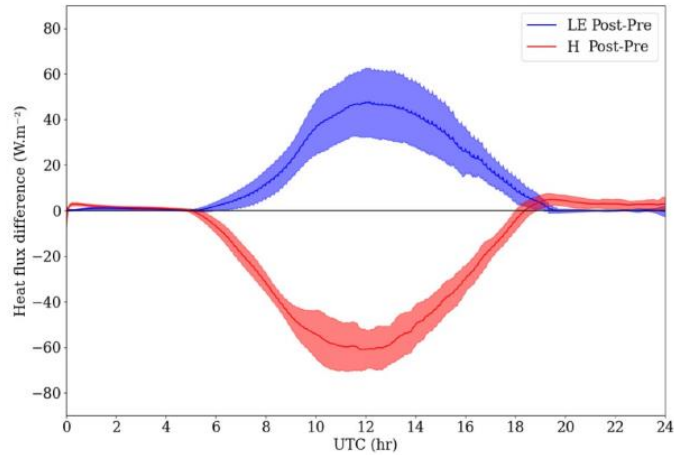
- Ennuagement plus important (couvert nuageux, quantité d'eau liquide)
- Base et sommet plus élevés

# L'effet de la tempête Klaus (janvier 2009)

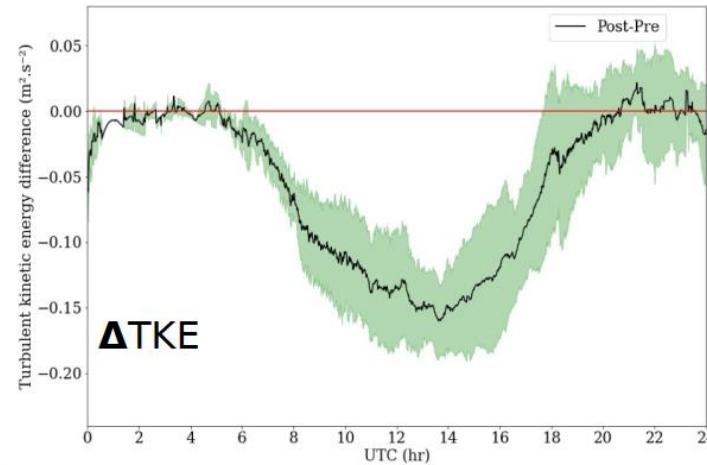
- Baisse de couverture forestière (- 30 % au centre)



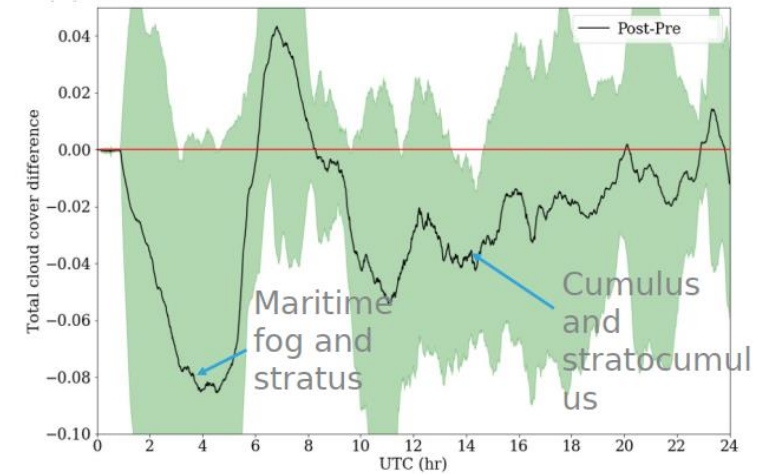
→ Statistiques sur 15 journées  
(après Klaus – avant Klaus)



- 20 % flux H, + 20 % flux LE



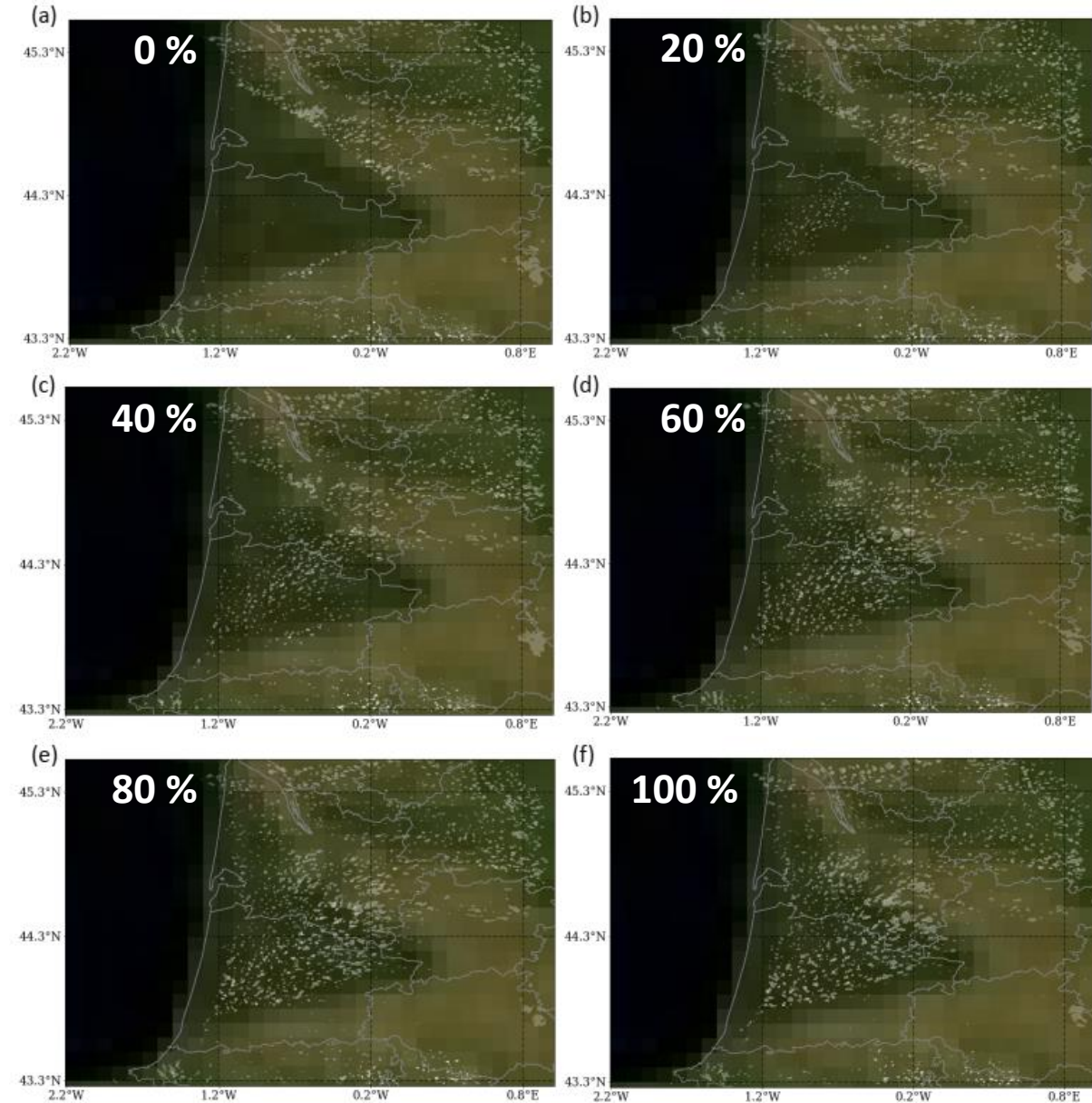
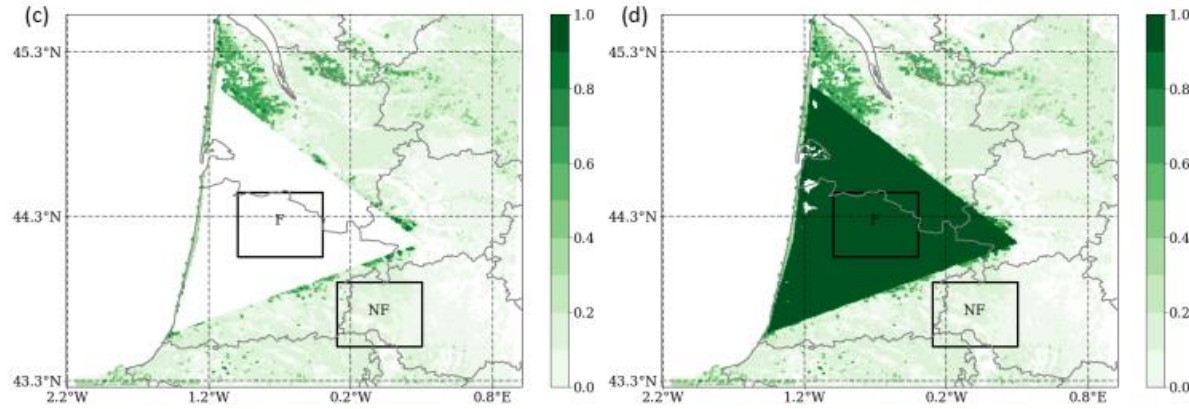
- 18 % TKE



- 25 % couverture nuageuse  
(- 30 % d'eau liquide)

# Impact de la fraction de surface forestière

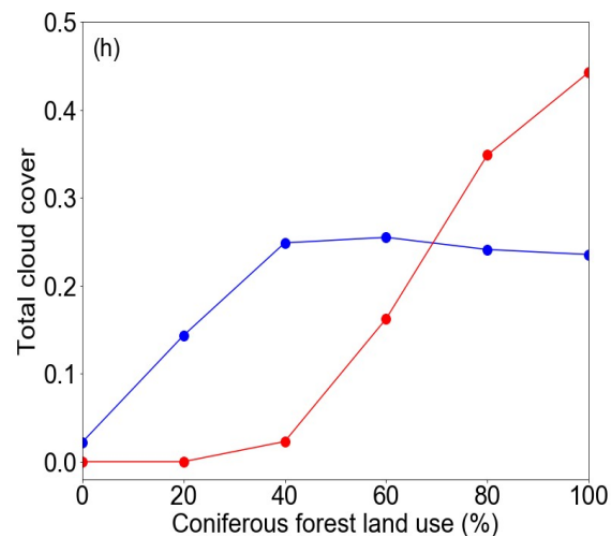
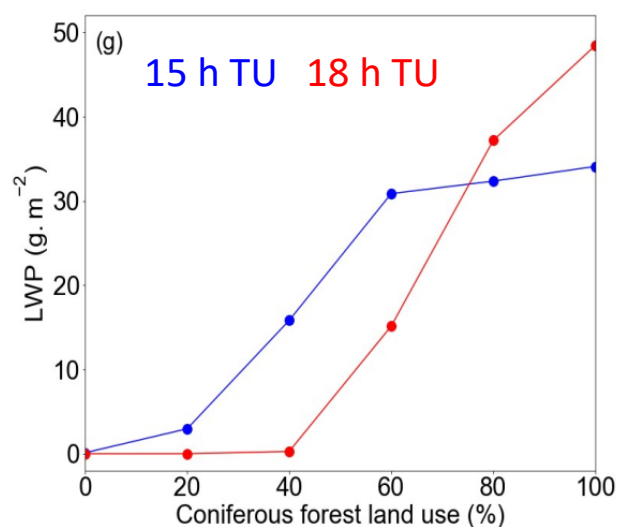
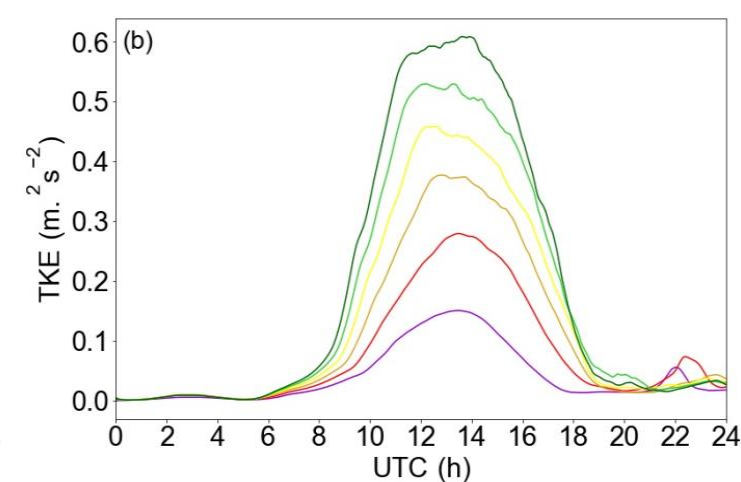
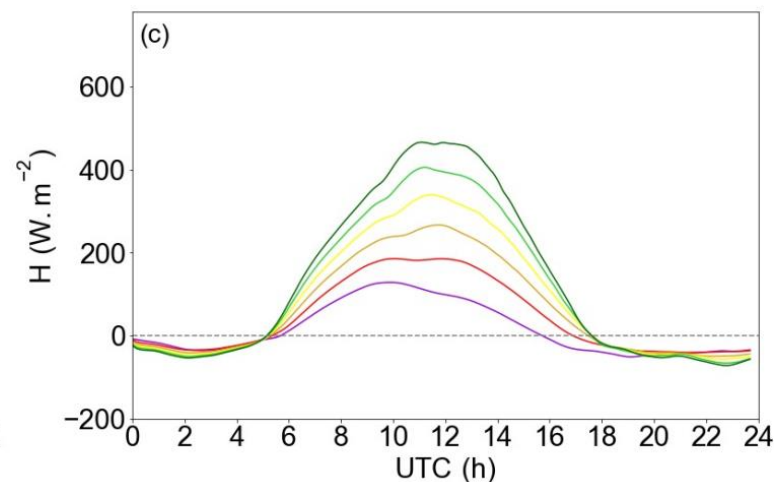
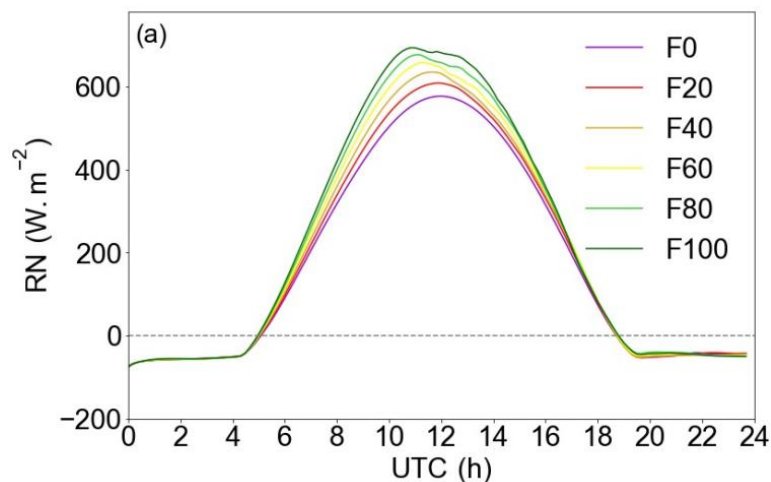
- Simulations numériques :  
fraction de forêt de 0 % à 100 %





# Impact de la fraction de surface forestière

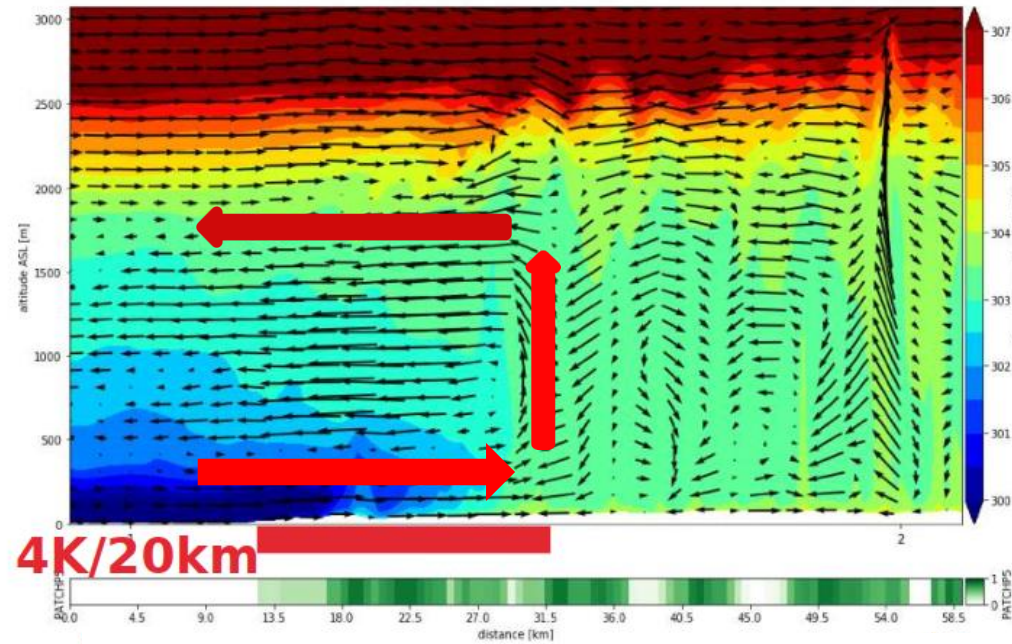
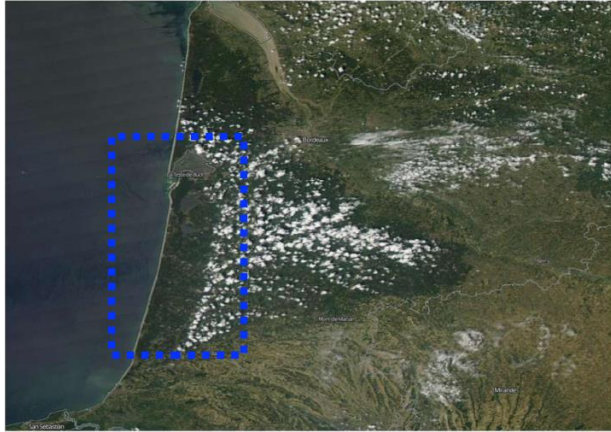
- Simulations numériques : fraction de forêt de 0 % à 100 %



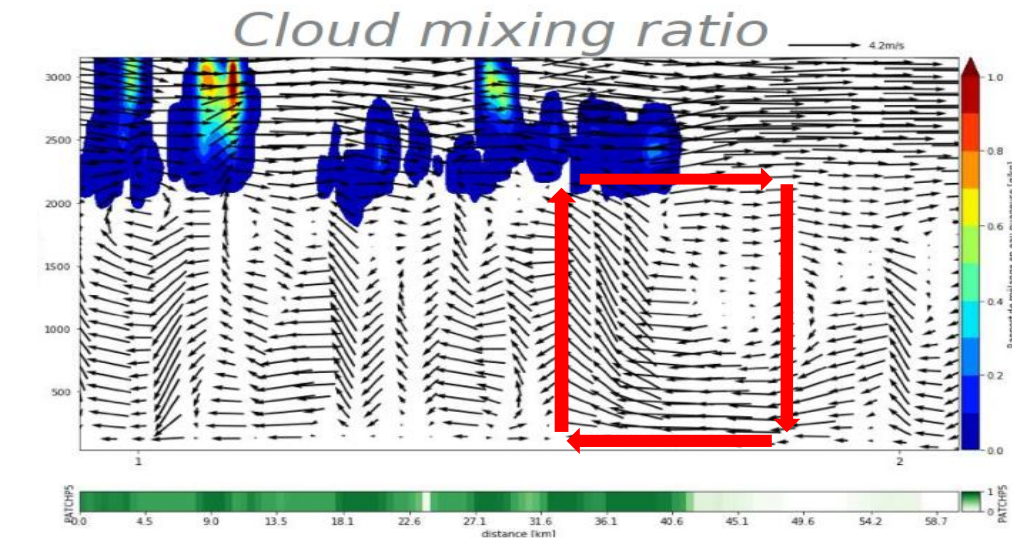
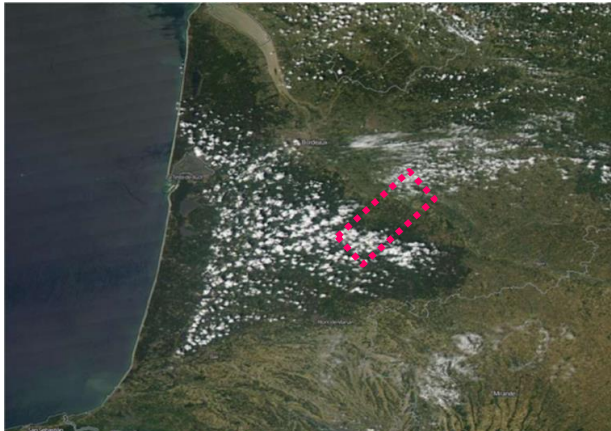
- % Forêt ↑ : énergie mieux captée, convection thermique ↑, turbulence ↑
- % Forêt ↑ : couvert nuageux ↑, quantité d'eau liquide ↑
- Surtout sensible pour les % Forêt intermédiaires

# Brise de mer, brise de forêt

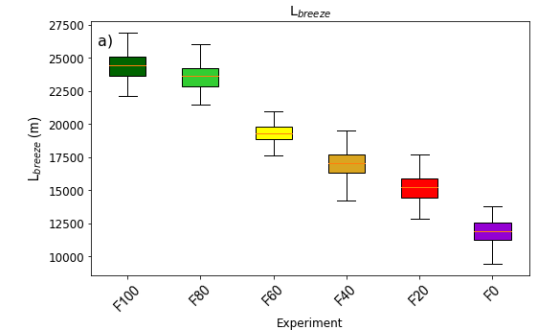
- Brise de mer



- Brise de forêt



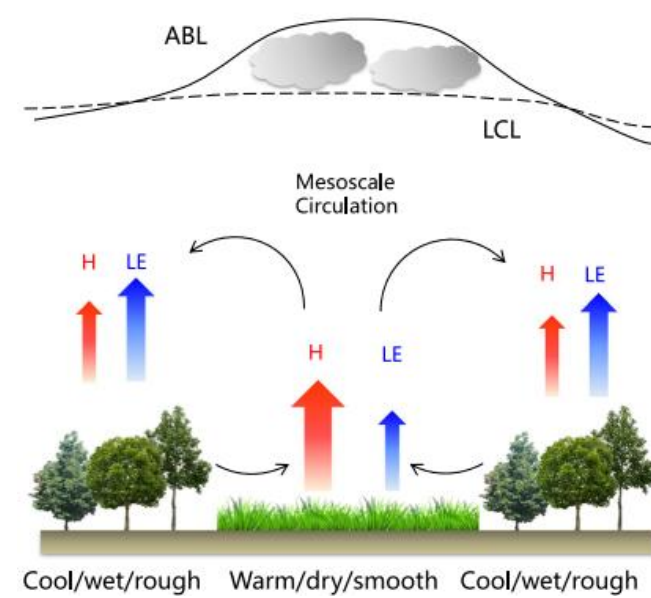
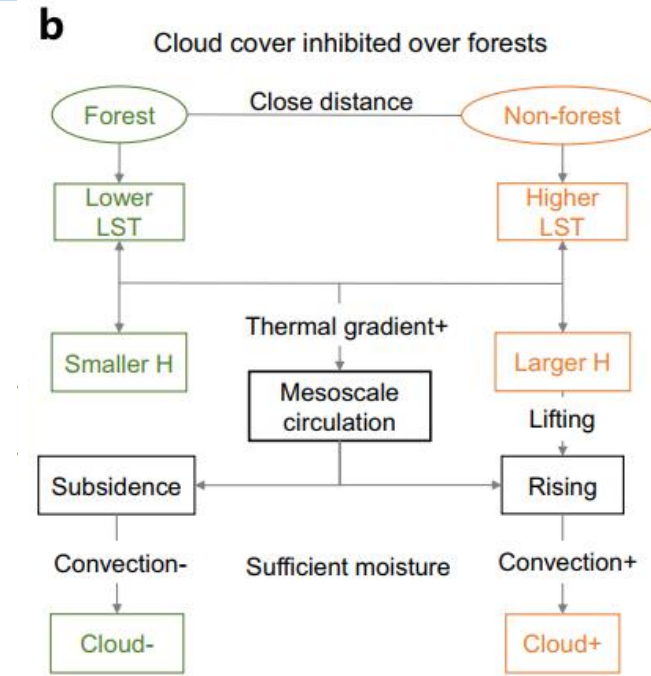
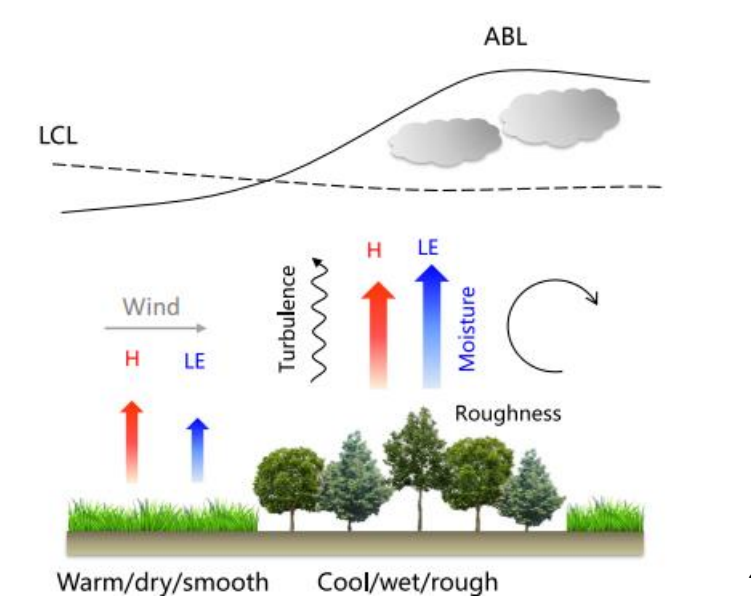
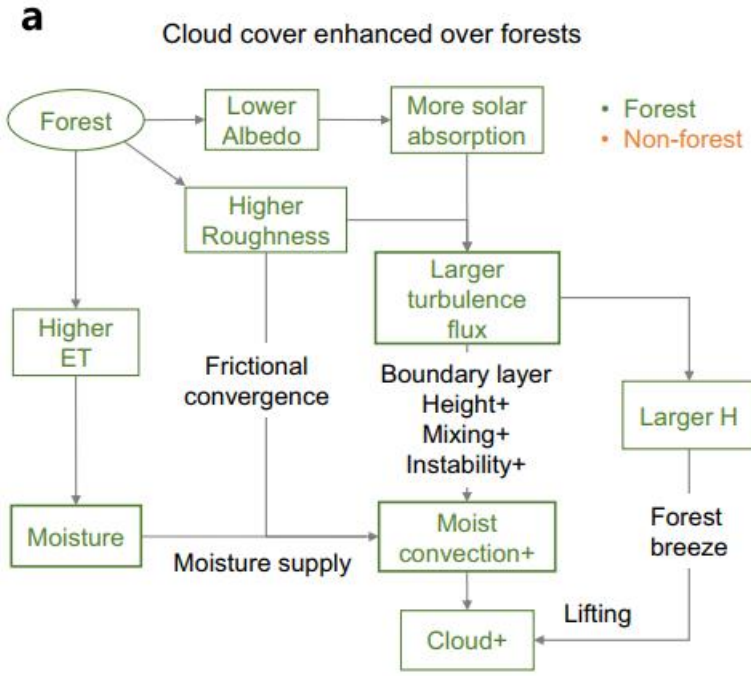
- La forêt **renforce** la brise de mer (longueur)



- Les nuages se forment au **front de brise**
- Circulation locale à la transition cultures-forêt (« **brise de forêt** »)
- Formation possible de **nuages**



# Régions tempérées, régions tropicales



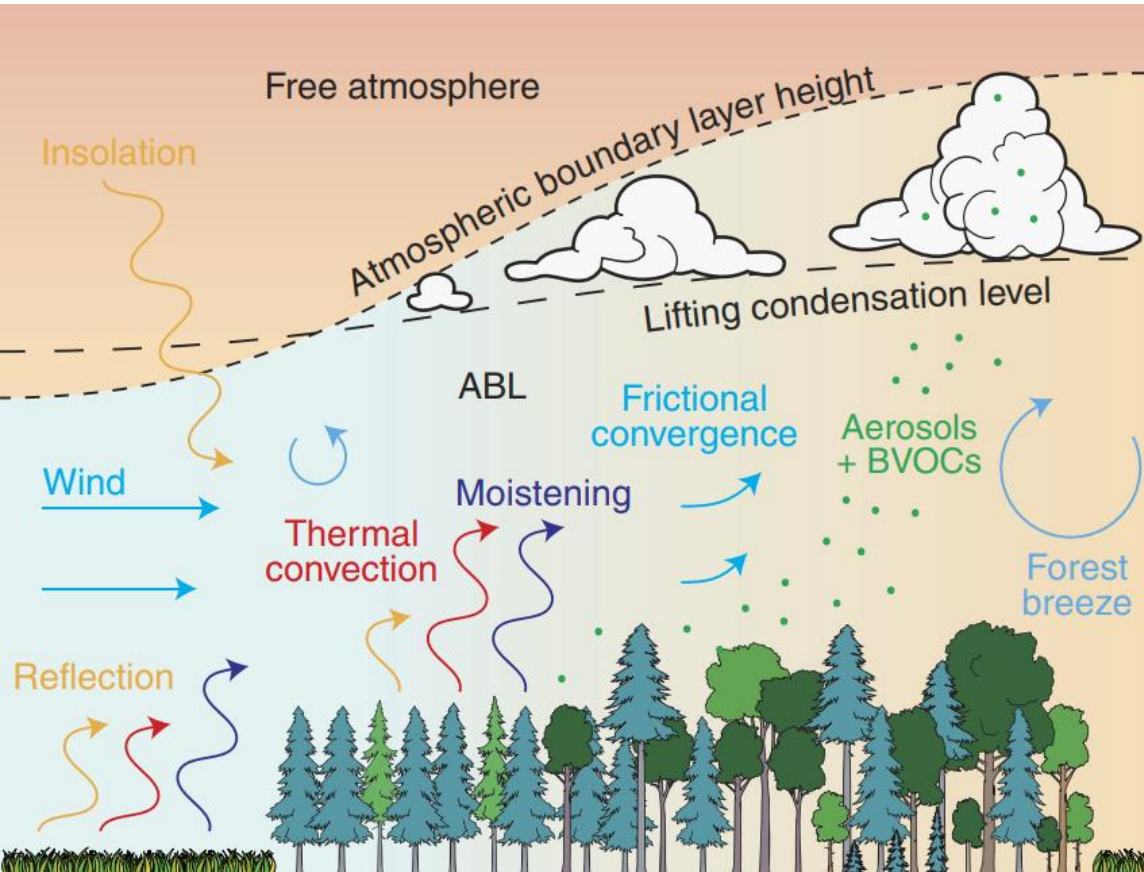
*Xu et al. (2022)*

Zone tempérée  
forêt  
+  
cultures

Zone tropicale  
forêt  
+  
déforestation



# Rôle de la forêt dans la formation des nuages : résumé



Teuling et al. (2017)

- Un ensemble interactif et complexe de processus physiques et biogéochimiques, ayant un rôle actif dans la formation des nuages
- Albedo plus faible → plus d'énergie radiative captée
- Rugosité plus élevée → convergence + turbulence plus forte
- Enracinement plus profond, meilleure interception de l'eau → bonne disponibilité de l'eau
- Flux de chaleur et d'humidité potentiellement élevés (dépend de l'humidité disponible)
- Rôle important de la mosaïque régionale (forêt vs non-forêt)
- Brise de forêt (convergence-divergence)
- Rôle additionnel, sur la condensation, de bioaérosols (bactéries, aérosols provenant de COVB)

- Surfaces végétales (forêts) : rôle **direct** dans les bilans d'eau et d'énergie (alimentation de l'atmosphère), et rôle **indirect** via l'ennuage et les précipitations.
- Domaine complexe, encore mal compris (**rétroactions** : albedo-  $\rightarrow$   $R_n+$   $\rightarrow$  nuages  $\rightarrow$   $R_n-$ ).
- **Phénomènes convectifs** non pris en compte en modélisation climatique, et ignorés dans les approches locales.
- Nécessité d'**observations** et de **modèles de simulation** prenant en compte finement le fonctionnement de la végétation. Nébulosité vs. Précipitation.

# Perspectives (échelles régionales)

- Conséquences de changements d'usage des sols : fermes solaires (cf. projet Horizeo, parc solaire 3 x 3 km), mise en culture, urbanisation, dégâts (incendies, tempêtes), politiques forestières (taxation...).
- Implications potentielles pour la gestion forestière, l'aménagement du territoire, les modalités d'atténuation du changement climatique (vastes zones boisées sur la façade ouest des villes, alternances de bandes boisées et non boisées...) : « services climatiques » rendus par les forêts.
  - Effet de la taille des aménagements ? Très mal connu. Pas d'effet sensible en dessous de 5-10 km (Avisar et Schmidt, 1998 ; Patton et al., 2005)
  - Effets microclimatiques mieux connus

