

# Influence des changements climatiques sur la dynamique de nos forêts

Philippe BALANDIER, INRAE Clermont-Ferrand

UMR de Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant

**INRAE**

Auvergne  
Rhône-Alpes



**UCA**

UNIVERSITÉ  
Clermont  
Auvergne

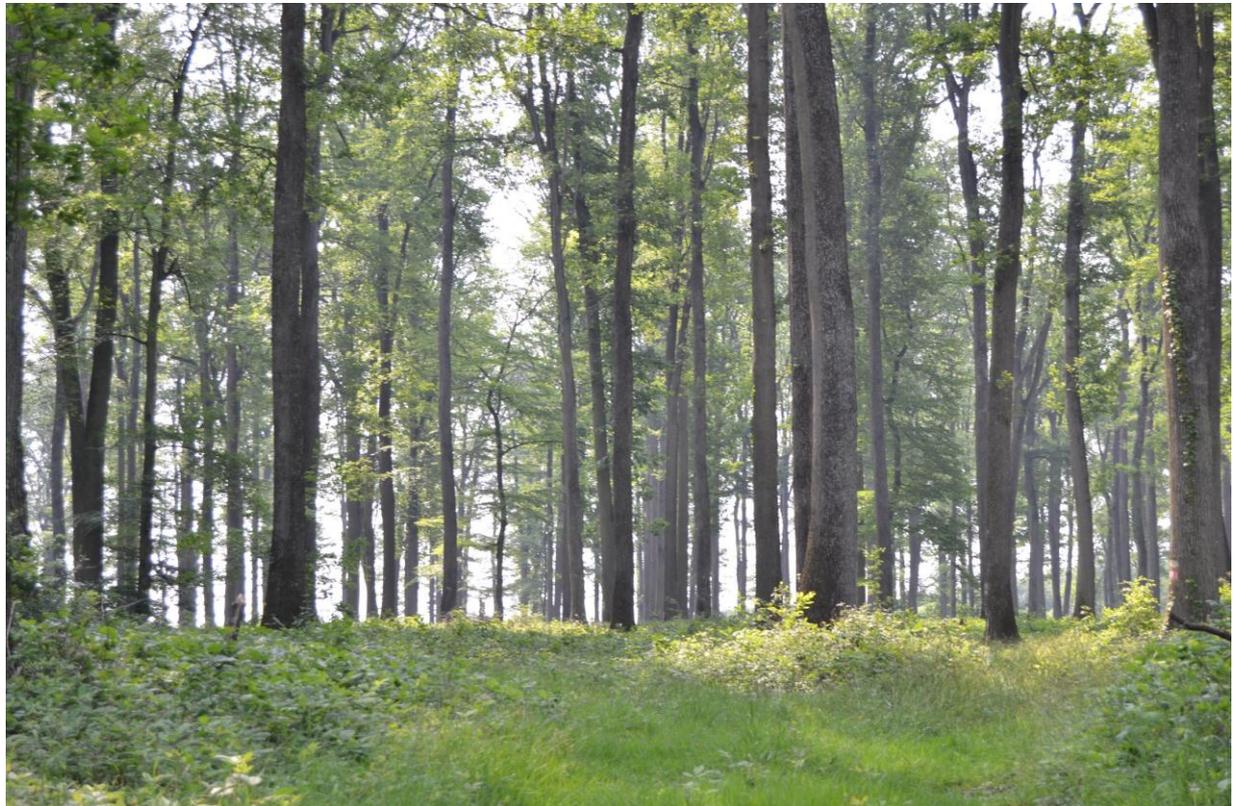
**U.M.R. PIAF**

## L'écosystème forestier

---

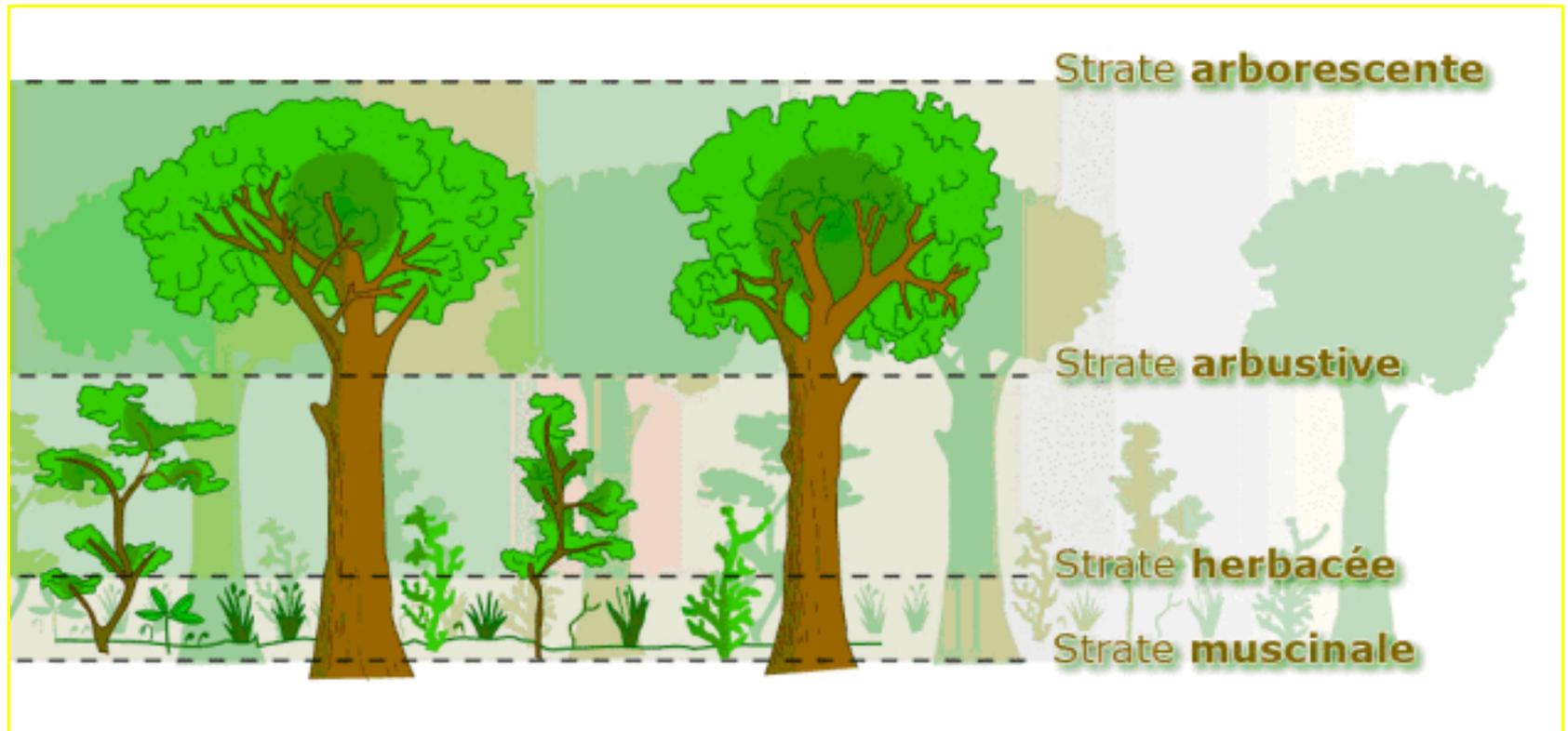
→ Collection d'arbres

→ Sur un sol et un climat donné



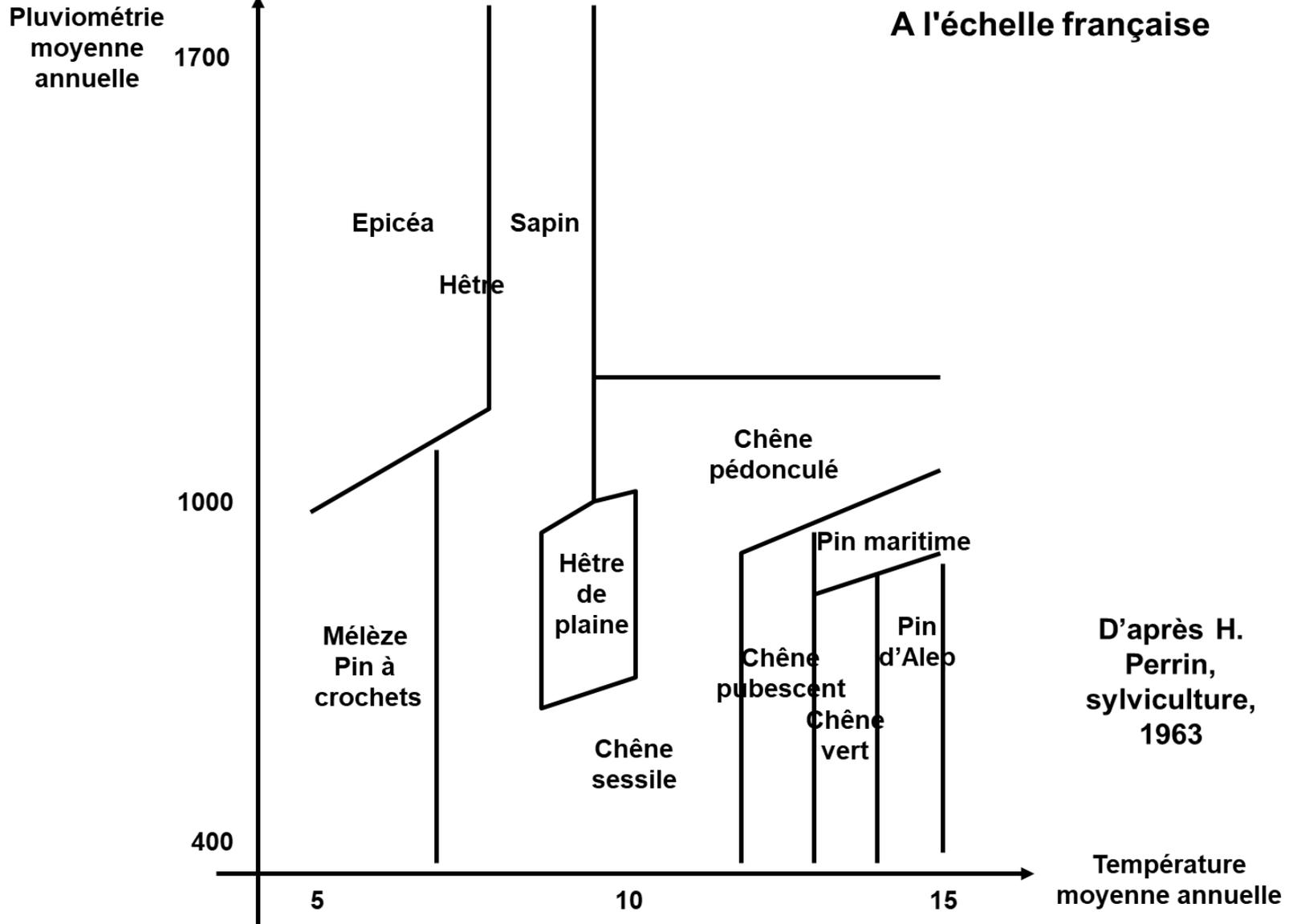
## L'écosystème forestier

→ Structure étagée



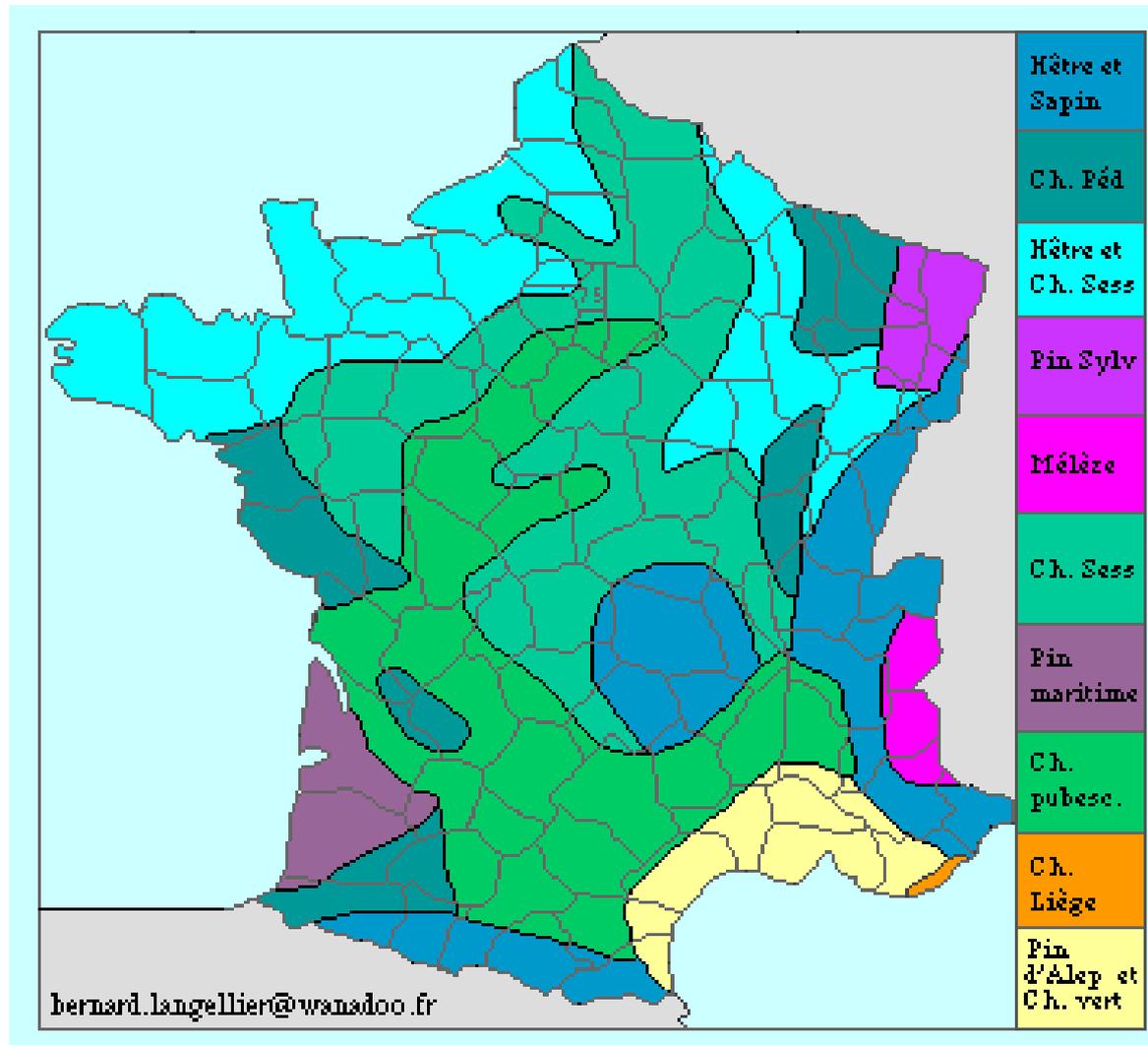
([http://python.espe-bretagne.fr/blog-tice-56/2013/g2foret/co/module\\_Foret\\_2.html](http://python.espe-bretagne.fr/blog-tice-56/2013/g2foret/co/module_Foret_2.html))

# Biogéographie (Chorologie)

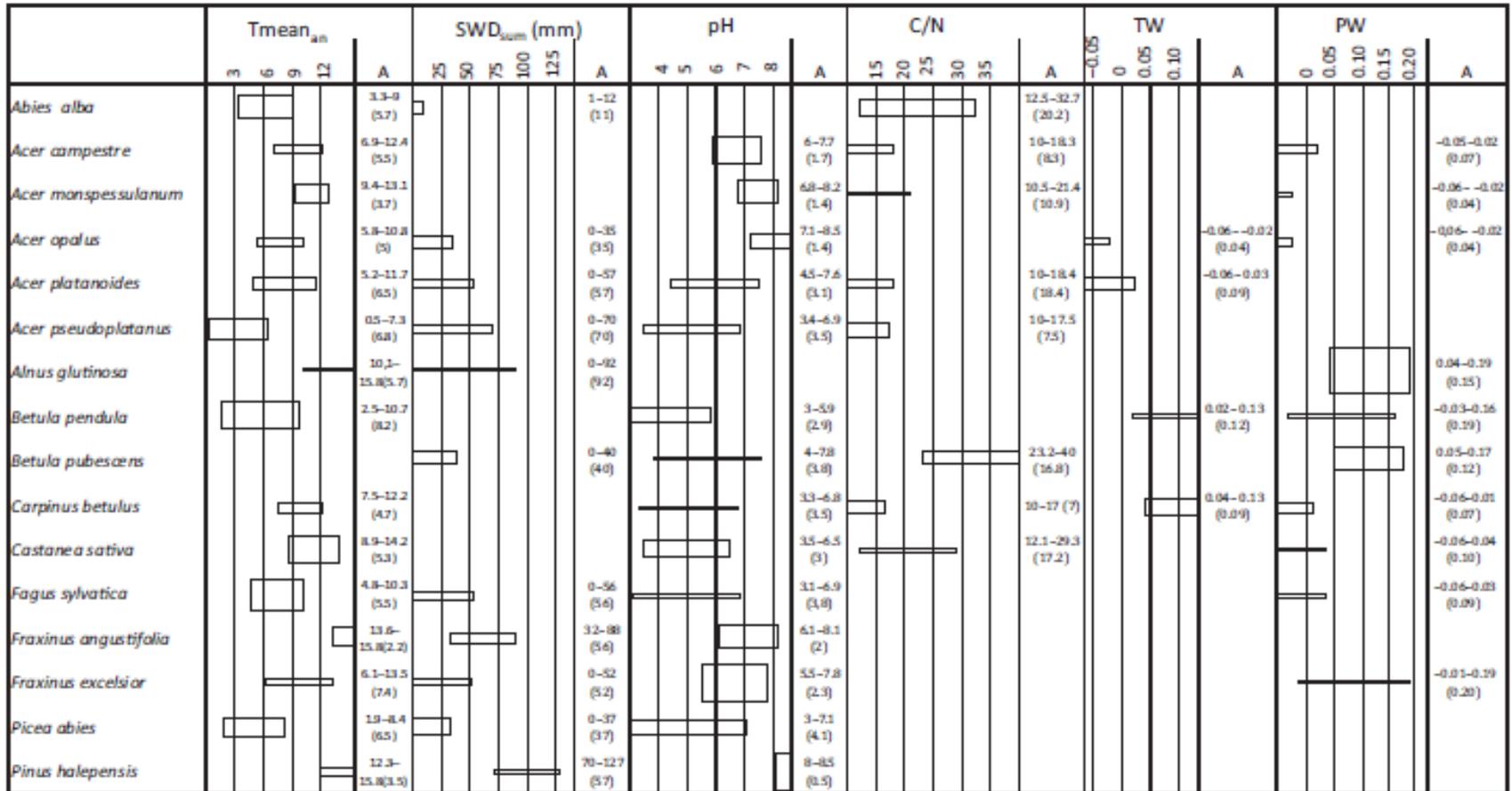


D'après H. Perrin, sylviculture, 1963

# Biogéographie (Chorologie)



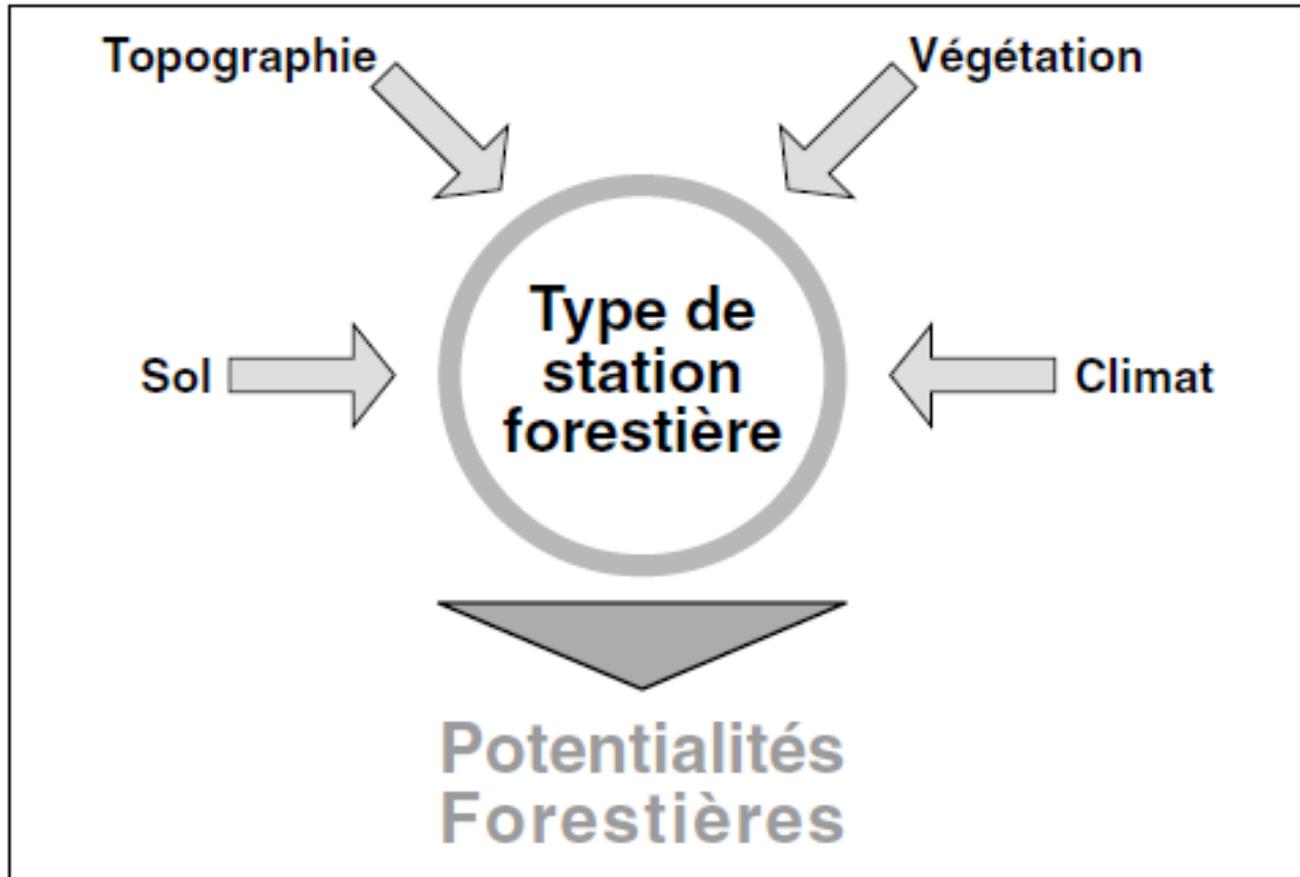
# Autécologie



Piedallu C, Gégout J-C, Lebourgeois F, Seynave I (2016) Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science*, 27, 387-399.

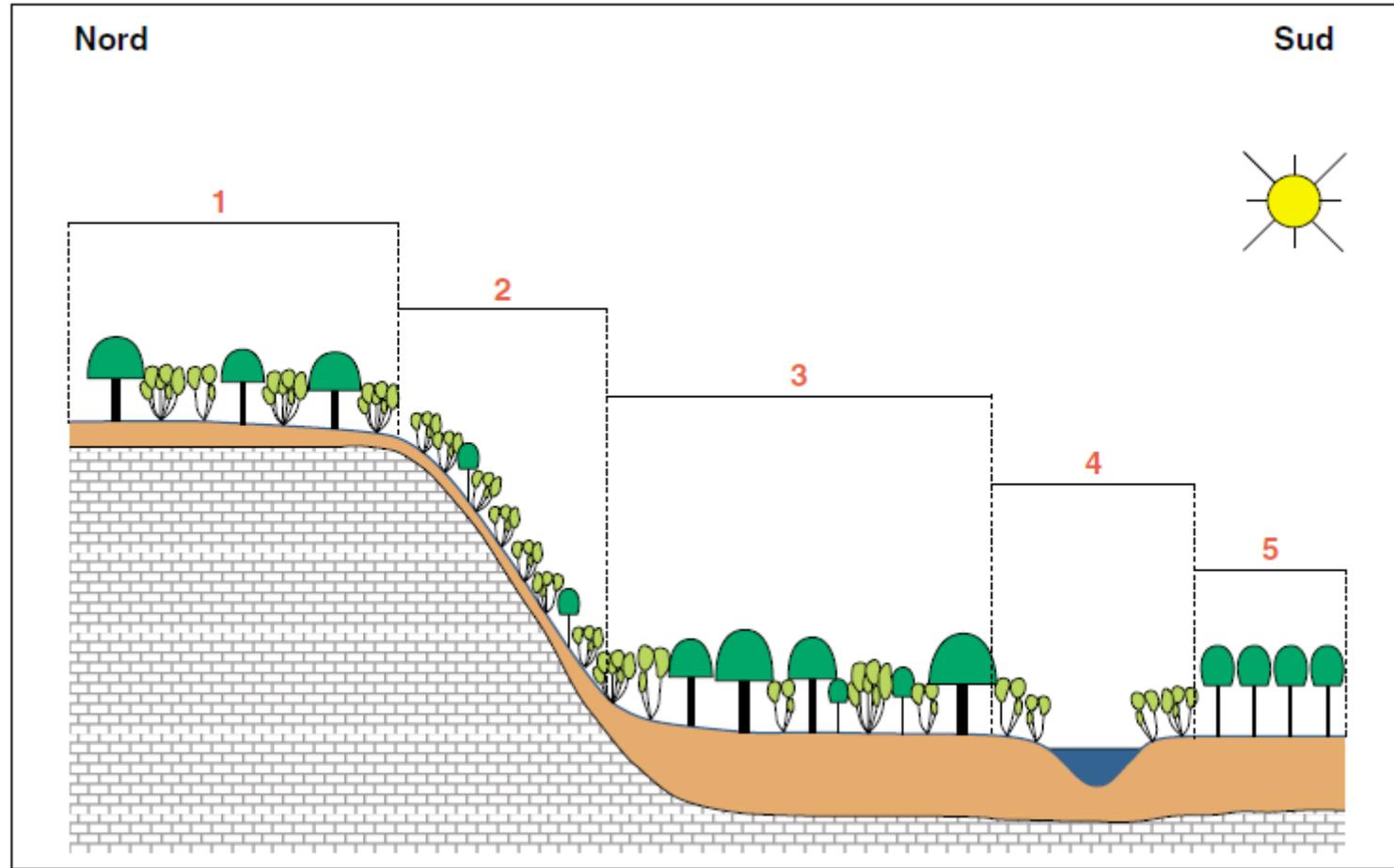
## Station forestière (théorie de la niche)

---



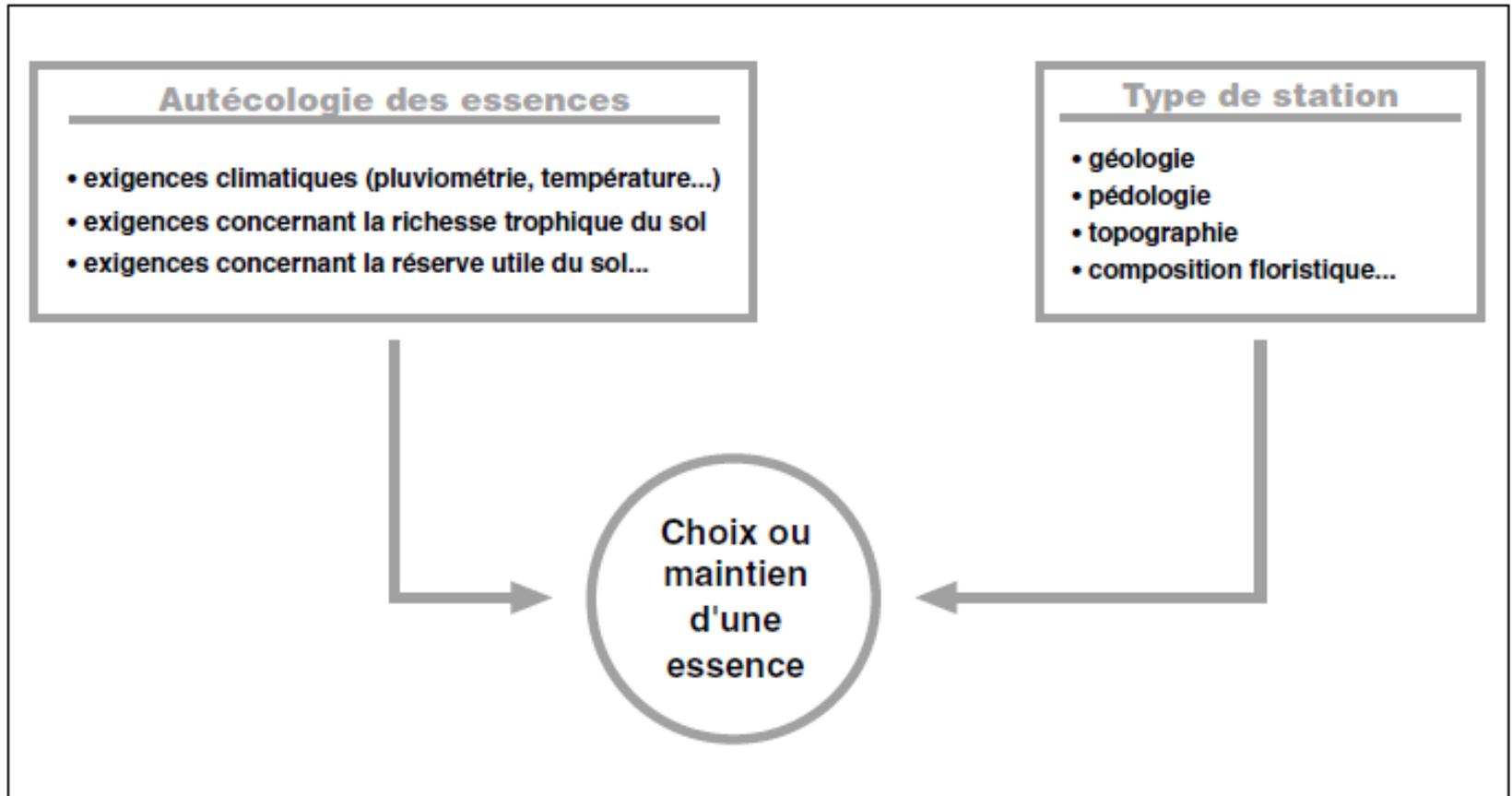
Sylvain Gaudin - 1997

# Station forestière (théorie de la niche)



Sylvain Gaudin - 1997

# Gestion forestière



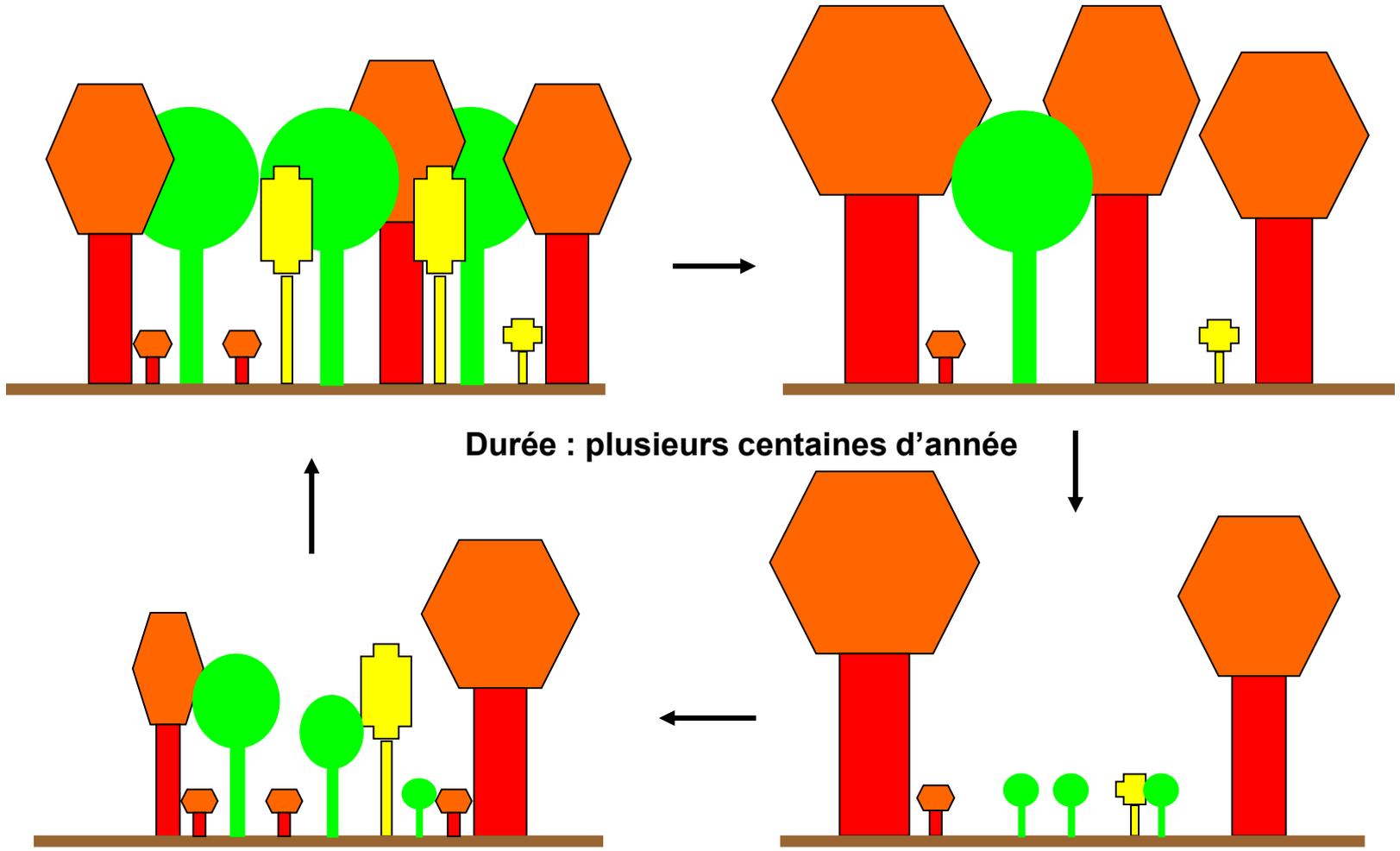
Sylvain Gaudin - 1997

## ● Successions végétales

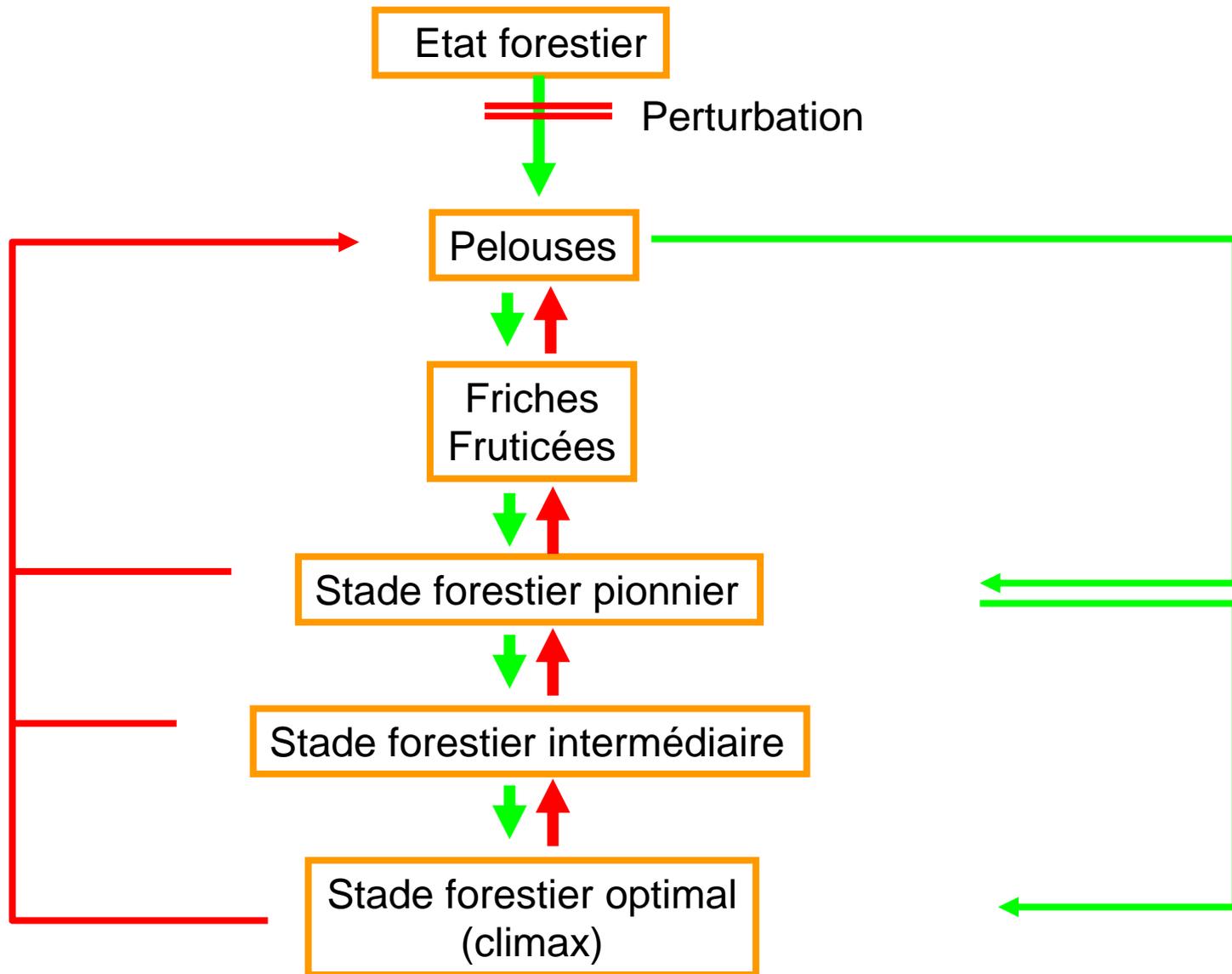
---

→ La forêt est en mouvance permanente et répond à une logique dynamique dans le temps et l'espace

# ● Successions végétales (cycle sylvigénétique)



# Successions végétales (processus externe linéaire)



## ● Successions végétales (groupes fonctionnels d'espèces)

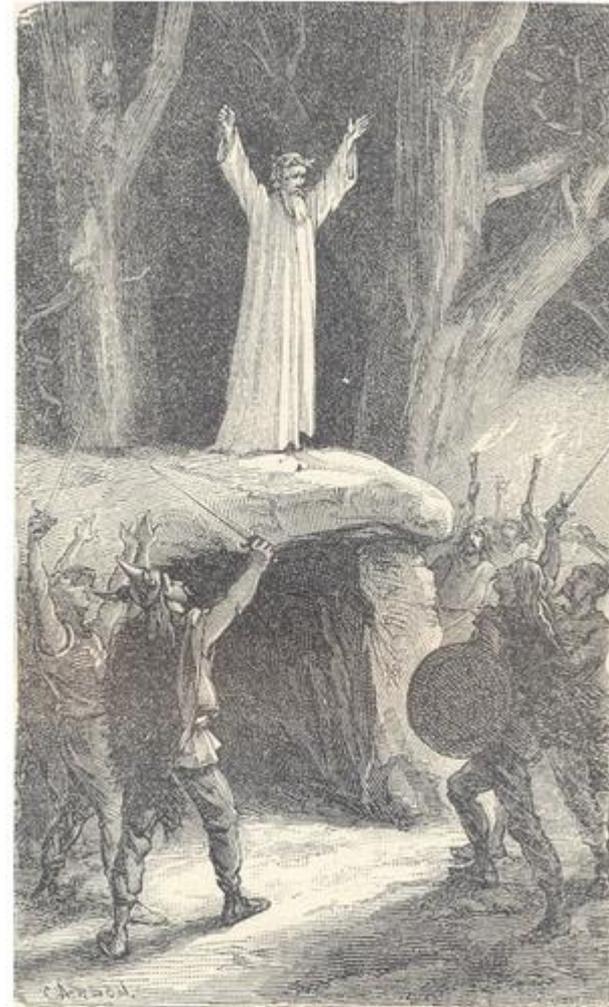
→ Pionnières : courte durée de vie, héliophile, forte production de graines (bouleau, tremble, saules, aulnes, cytise, ...)

→ Post-pionnières : plus longévives, plus ou moins héliophiles (érables, frêne, ormes, tilleul, chênes, merisier, sorbiers, pins, mélèze, ...)

→ Dryades : grande longévité, sciaphile, caractéristiques de la phase de maturité (sapin, épicéa, hêtre)

## ● Successions végétales (groupes fonctionnels d'espèces)

→ En l'absence de fortes perturbations et d'action de l'homme, le célèbre chêne Gaulois devrait être un hêtre ...



(<http://histoiresansgeo.canalblog.com/archives/2008/04/12/8714350.html>)

## ● Successions végétales

---

→ La forêt s'accroît. Sa surface a doublé au XX<sup>e</sup> siècle

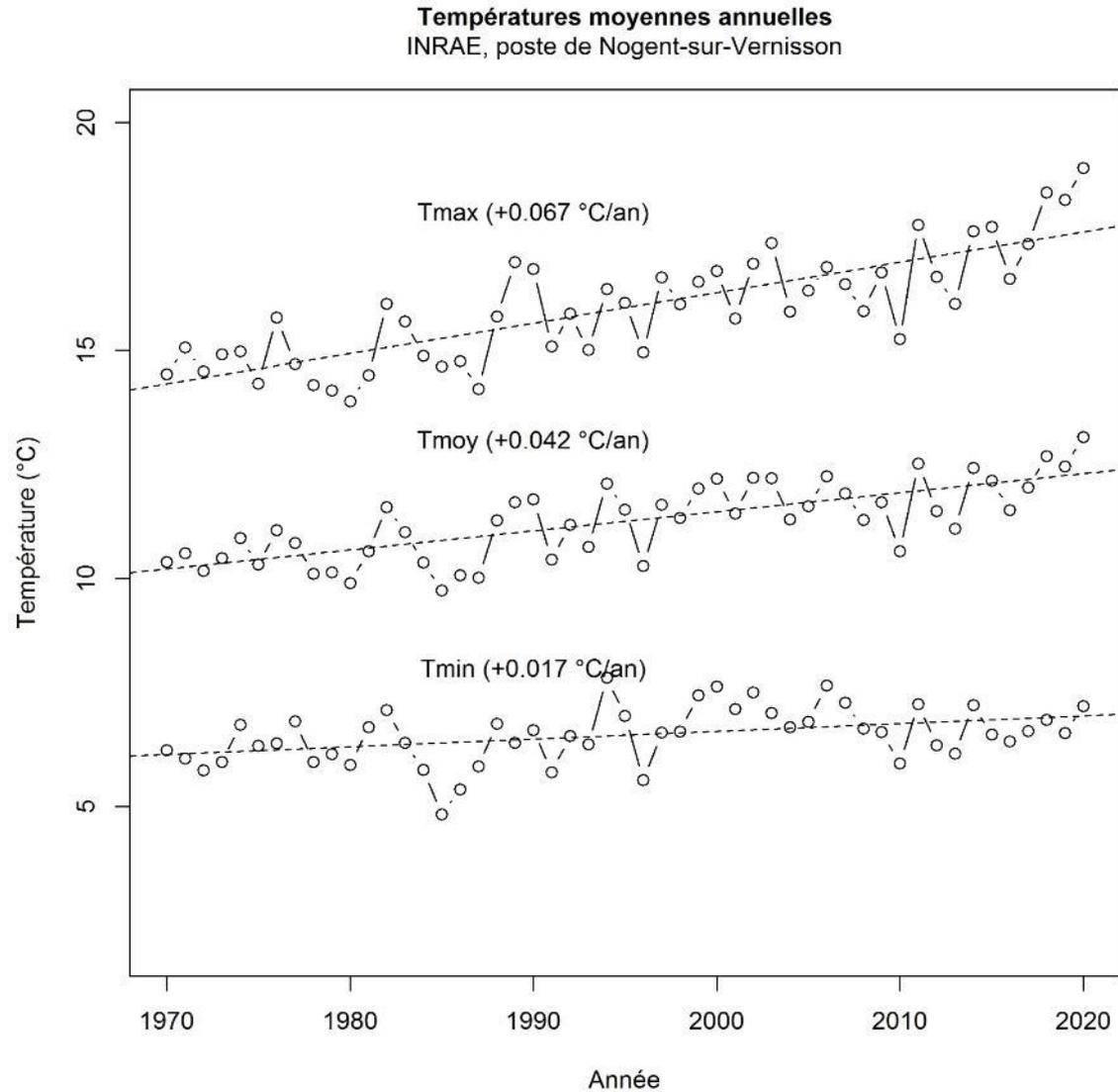


Alors qu'est-ce qui ne va pas ?

---

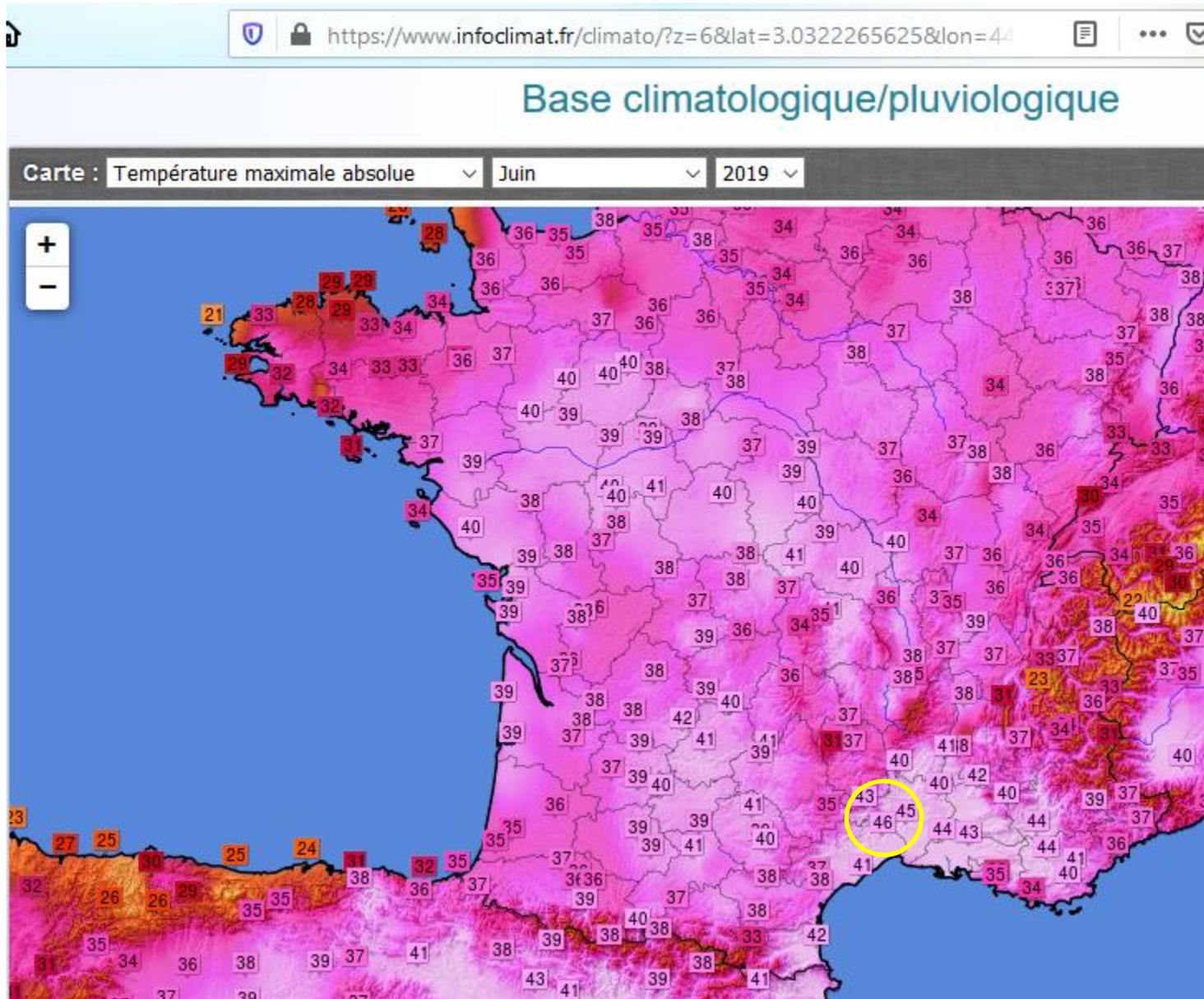


# Le climat en question





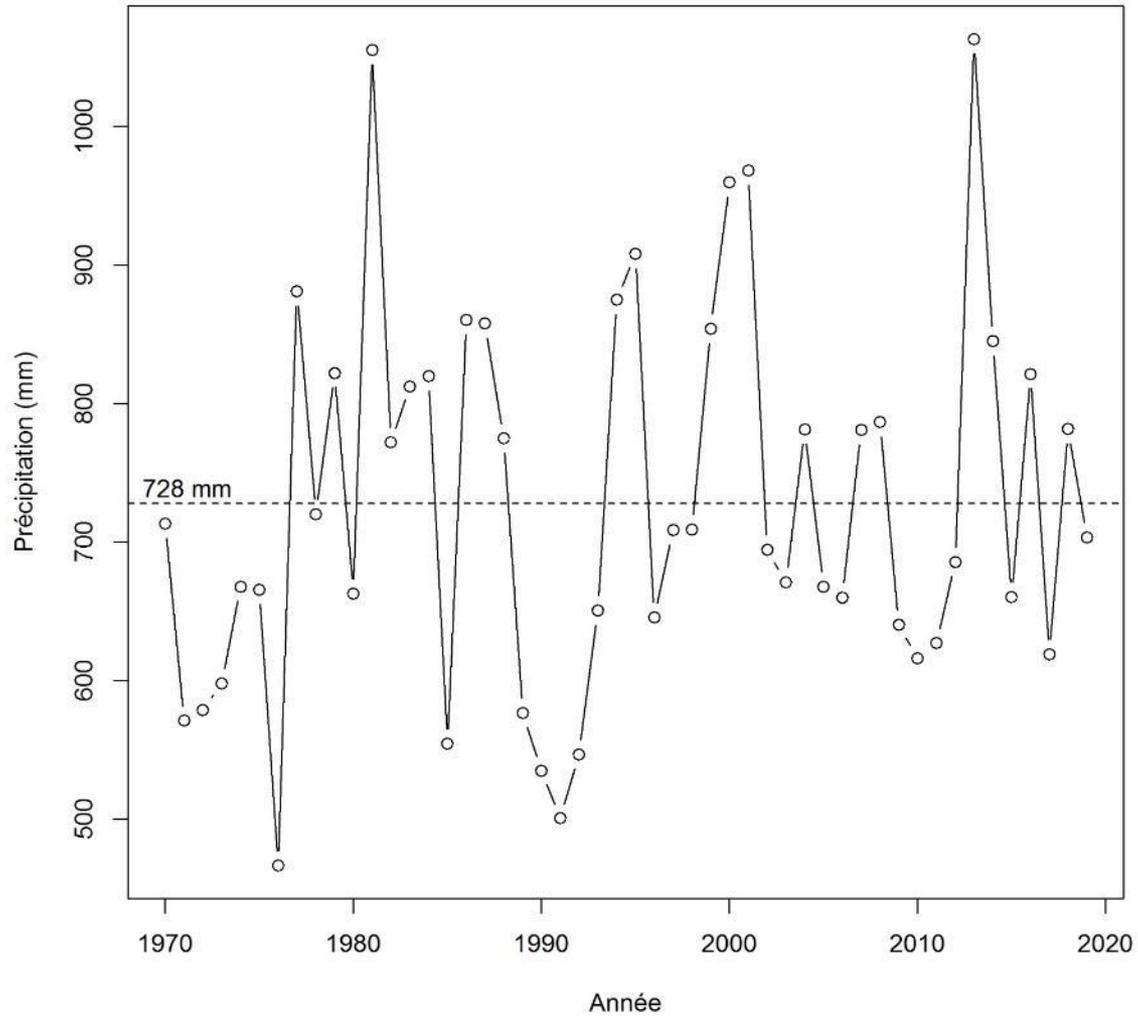
# Le climat en question





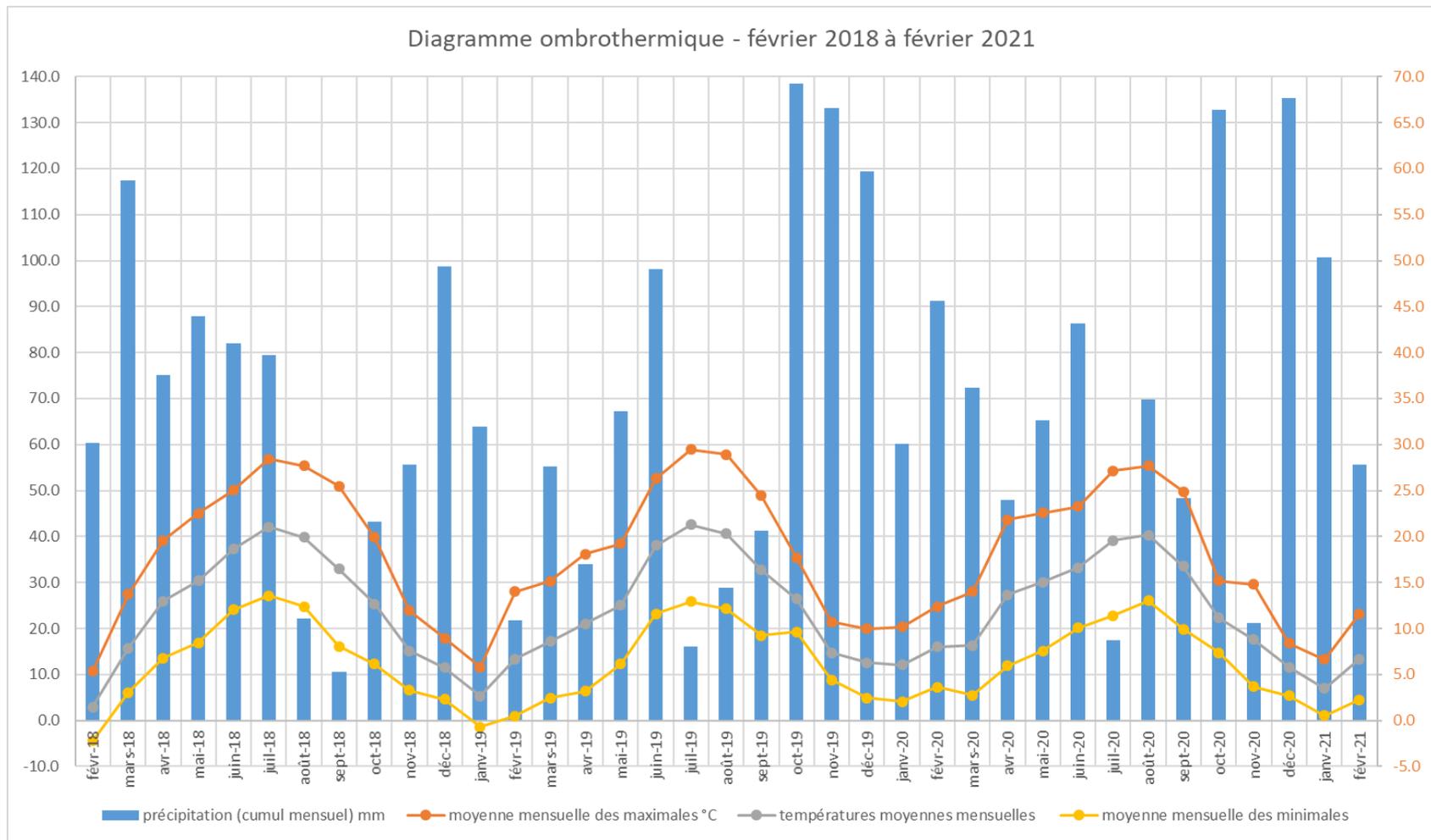
# Le climat en question

**Précipitations sur l'année**  
Irstea, poste de Nogent-sur-Vernisson



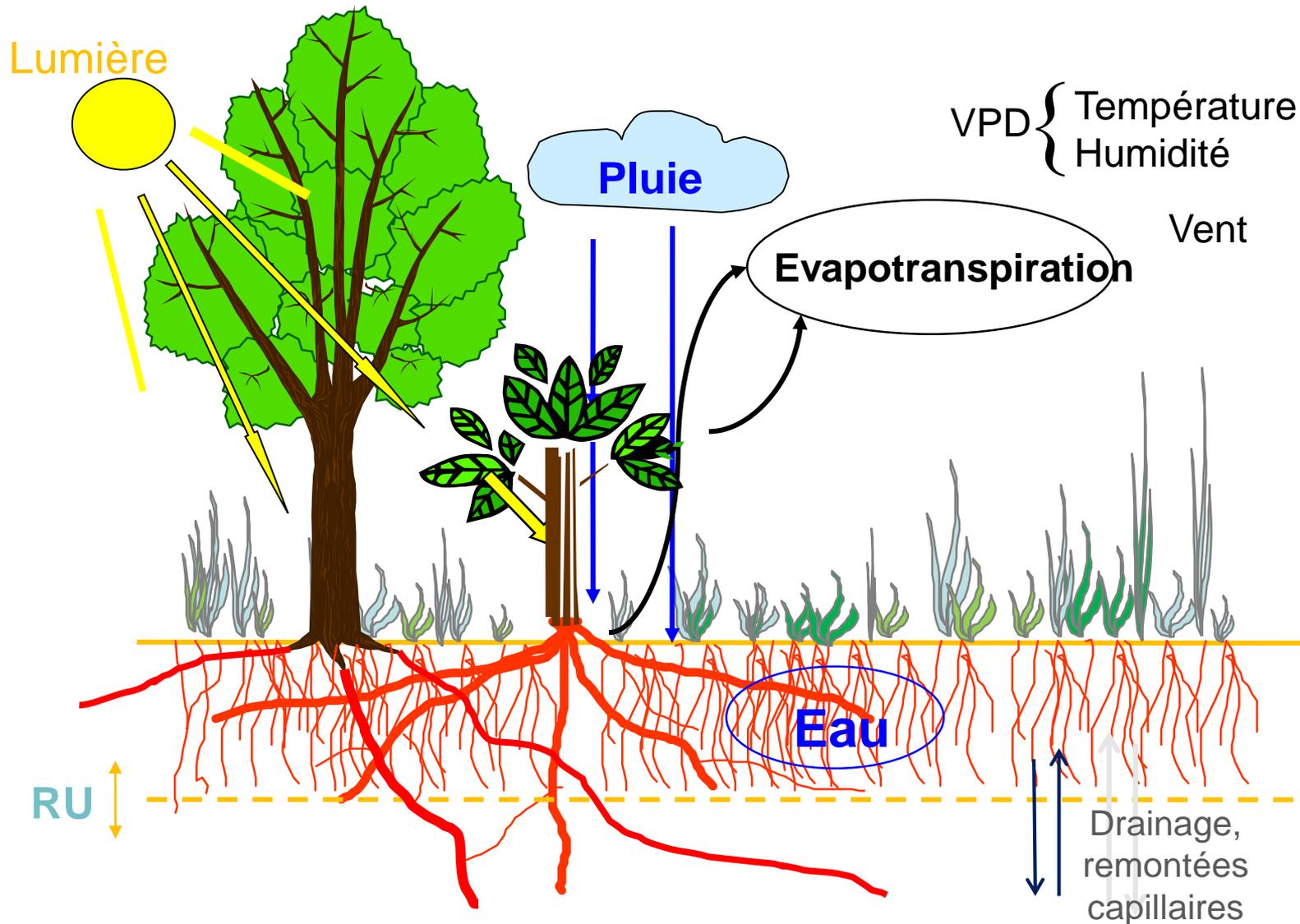
# Le climat en question

→ « Méditerranéisation » du climat



Forêt Domaniale de Vierzon

# Le bilan en eau



## Le bilan en eau : l'évapotranspiration

$$ET_0 = \frac{R_n \Delta + \frac{\rho C_p \delta_e}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

$ET_0$  : évapotranspiration de référence calculée par la relation de Penman [mm/s],

$R_n$  : rayonnement net [ $W/m^2$ ],

$\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [ $kPa/C^\circ$ ],

$\rho$  : densité de l'air à pression constante [ $kg/m^3$ ],

$c_p$  : capacité thermique de l'air humide [ $J/kg/C^\circ$ ],

$\delta_e$  : différence entre la pression de vapeur saturante  $e_s$  [ $kPa$ ] et la pression de vapeur effective dans l'air  $e_a$  [ $kPa$ ] ( $\delta_e = e_s - e_a$ ),

$r_a$  : résistance aérodynamique [ $s/m$ ] (descripteur météorologique traduisant le rôle des turbulences atmosphériques dans le processus d'évaporation),

$\lambda$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau [ $J/kg$ ],

$\gamma$  : constante psychrométrique [ $kPa/C^\circ$ ].

→ La demande climatique en eau augmente avec le rayonnement et les températures

## Le bilan en eau : l'évapotranspiration

→ Au cours des 30 dernières années, le VPD (Vapour Pressure Deficit) est devenue une contrainte pour 25 % de la surface de la Suisse (Trotsiuk et al., 2021)



The image shows a screenshot of a research article page from the Journal of Ecology. The page has a blue header with the journal title and the British Ecological Society logo. Below the header, there are icons for 'RESEARCH ARTICLE', 'Open Access', and a Creative Commons license. The main title of the article is 'Tree growth in Switzerland is increasingly constrained by rising evaporative demand'. The authors listed are Volodymyr Trotsiuk, Flurin Babst, Charlotte Grossiord, Arthur Gessler, David I. Forrester, Nina Buchmann, Marcus Schaub, and Werner Eugster. The publication date is 25 May 2021, and a DOI link is provided. There are also links for 'Services SFX pour INRAE', 'Handling Editor: Emily Lines', and navigation options like 'SECTIONS', 'PDF', 'TOOLS', and 'SHARE'. The word 'Abstract' is visible at the bottom of the page.

**Journal of Ecology** BRITISH ECOLOGICAL SOCIETY

RESEARCH ARTICLE |  Open Access |  

### Tree growth in Switzerland is increasingly constrained by rising evaporative demand

Volodymyr Trotsiuk ✉, Flurin Babst, Charlotte Grossiord, Arthur Gessler, David I. Forrester, Nina Buchmann, Marcus Schaub, Werner Eugster,

First published: 25 May 2021 | <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13712>

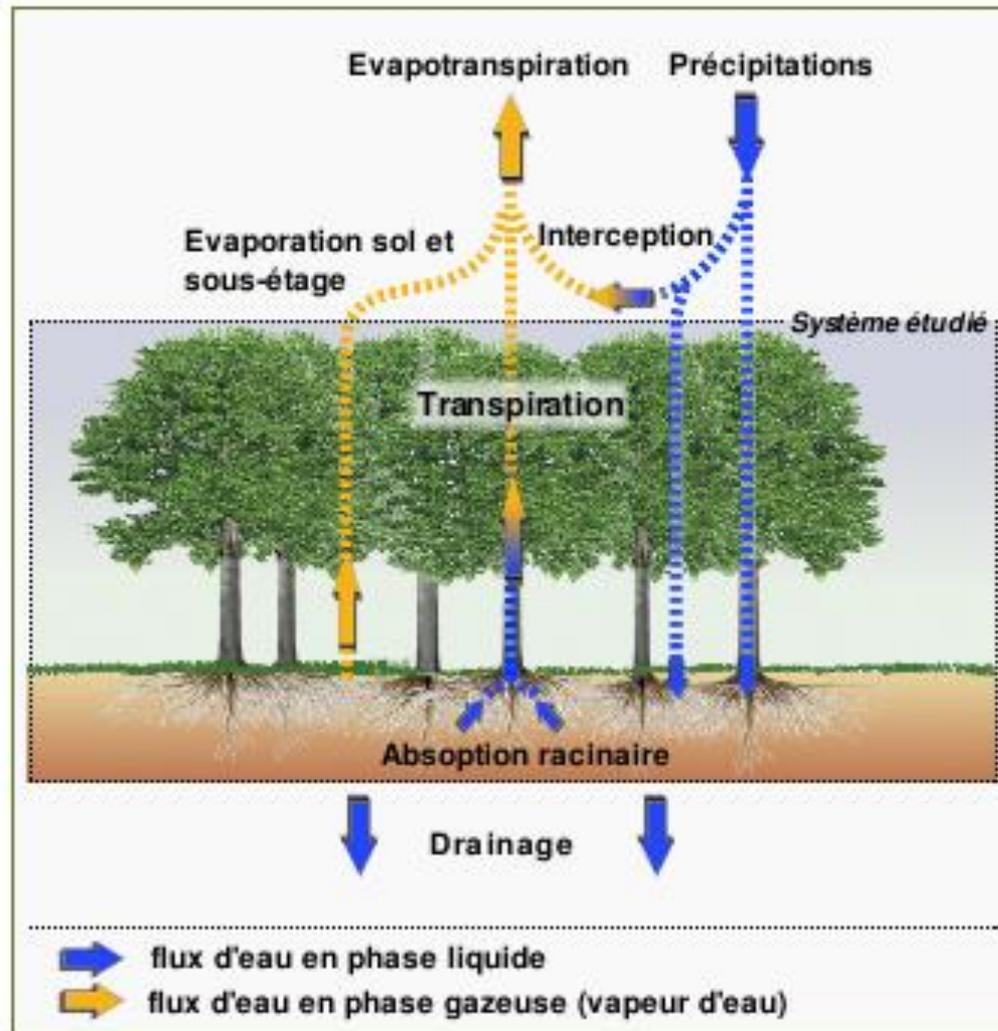
[Services SFX pour INRAE](#)

**Handling Editor:** Emily Lines

 SECTIONS  PDF  TOOLS  SHARE

Abstract

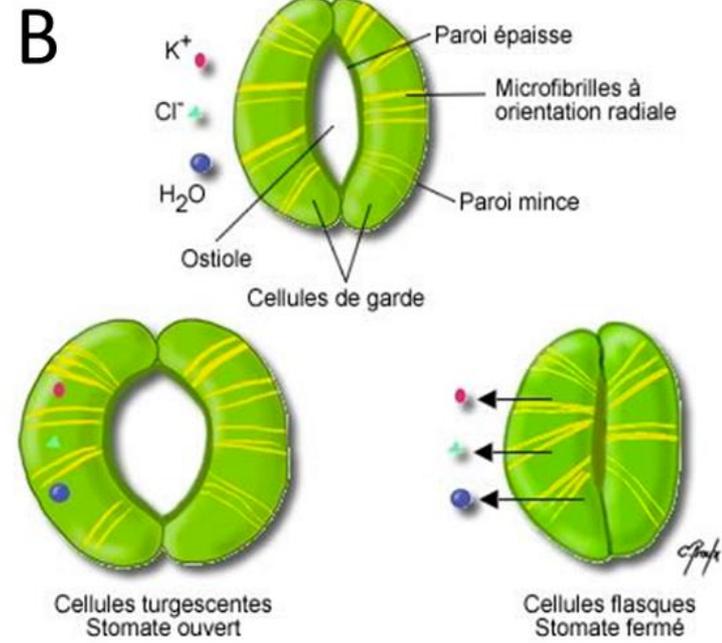
## Le bilan en eau : l'eau dans la plante



<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/bilan-hydrigue>

## Le bilan en eau : le contrôle de la transpiration

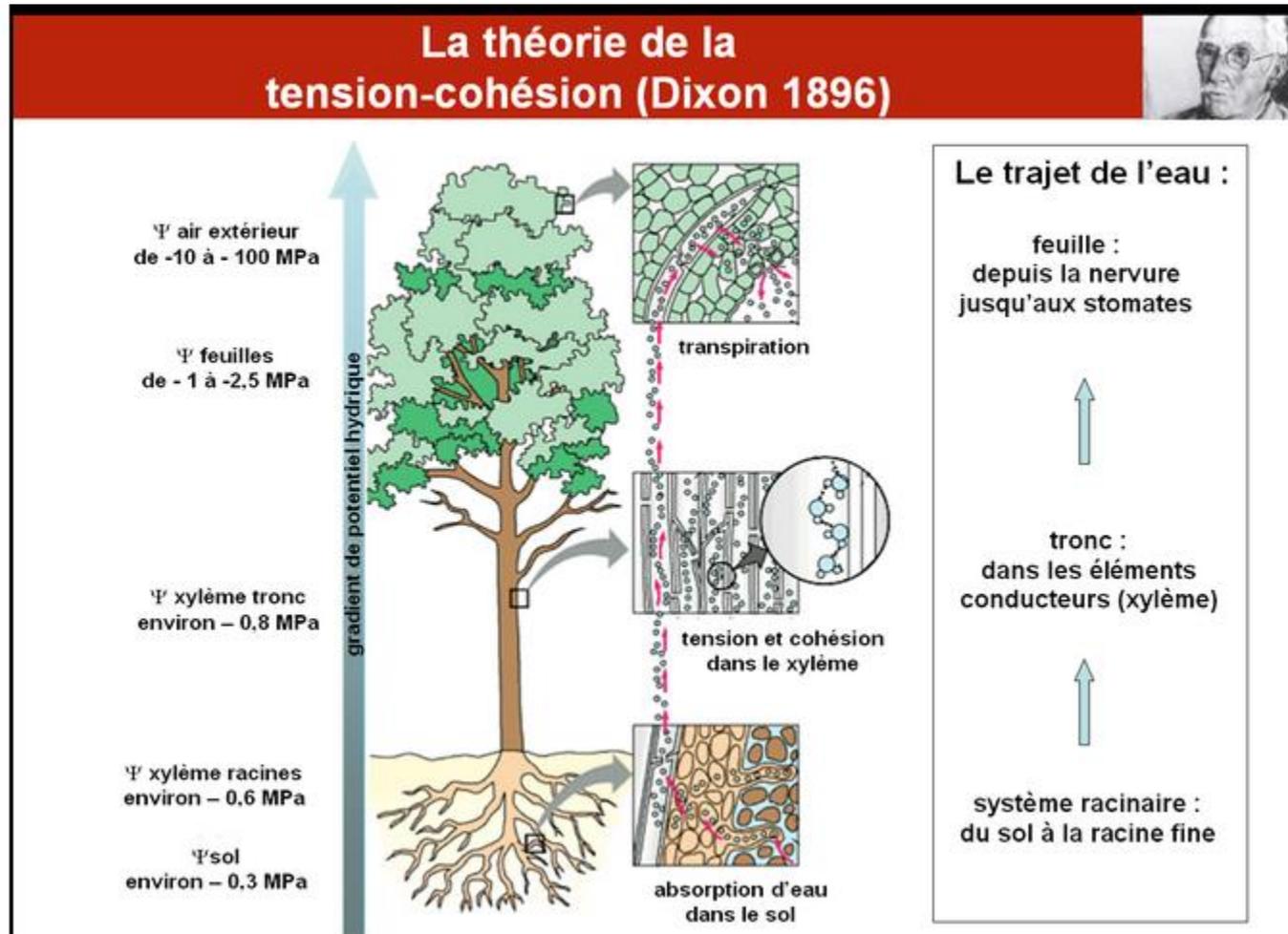
- Pour se refroidir, la plante transpire
- Mais si elle transpire trop elle perd de l'eau ...
- Régulation par les stomates



<https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/vie-fixee-plantes-contraintes/>

P. Balandier, Conférence LPC, 17 sept. 2021

# Le bilan en eau, le transport de l'eau dans la plante



Cochard et Granier, <https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/24-l-architecture-hydraulique-la-cavitation-et-l-embolie-des-plantes/58-l-architecture-hydraulique-la-cavitation-et-l-embolie-des-plantes>

## Le bilan en eau, la cavitation

---

- Si la différence de potentiel hydrique entre le sol et l'atmosphère est trop grande, il y a cavitation, formation d'une bulle d'air (embolie)
- Le vaisseau n'est plus fonctionnel
- L'eau ne circule plus



Cochard et Granier, <https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/24-l-architecture-hydraulique-la-cavitation-et-l-embolie-des-plantes/58-l-architecture-hydraulique-la-cavitation-et-l-embolie-des-plantes>

## Le bilan en eau, le dépérissement

---



## Le bilan en eau, le dépérissement

---



## Le bilan en eau, le dépérissement

---



P. Balandier, Conférence LPC, 17 sept. 2021

## Le bilan en eau, le dépérissement

---



Epicéas dans l'Allier (2020)



Epicéas dans la Marne (2020)

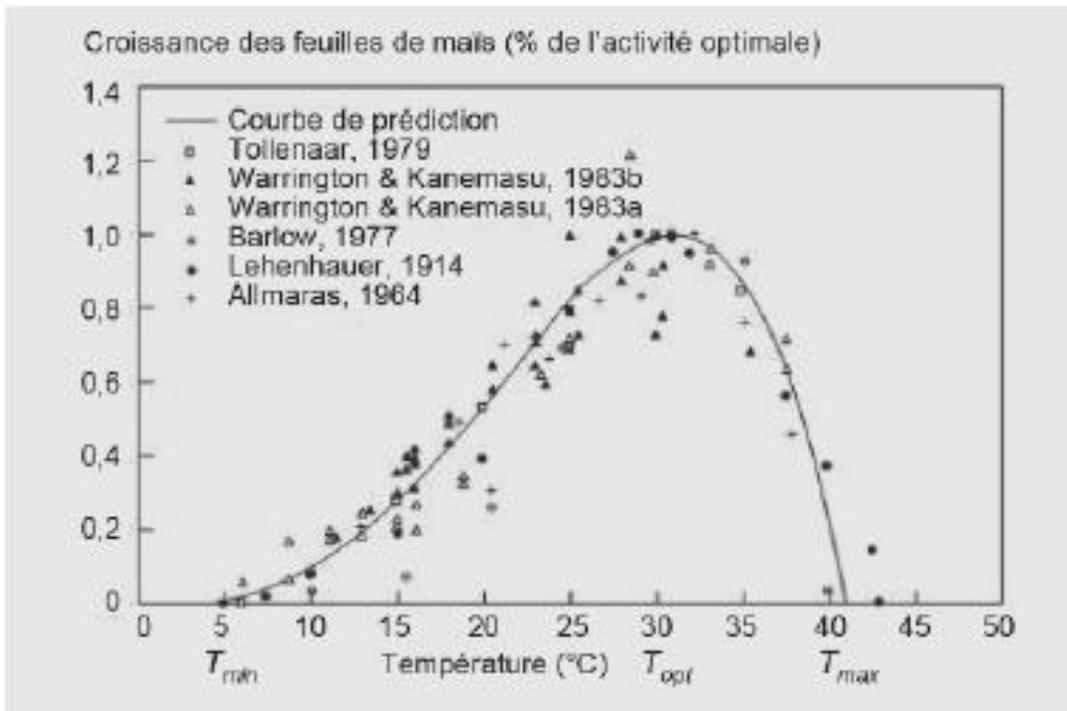


Sapin dans les gorges de Ceyrat (2020)

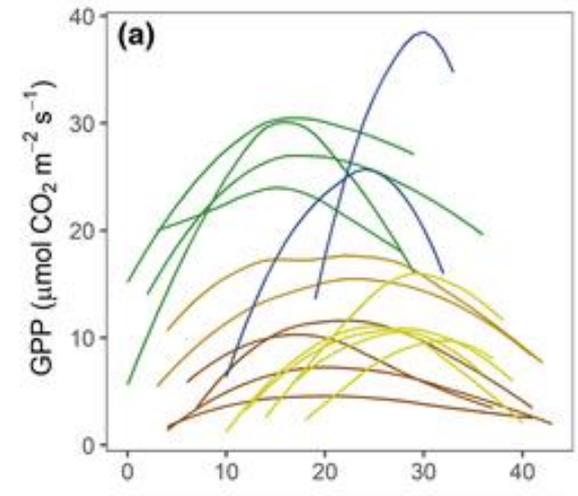
Hervé Cochard

## L'effet des températures

- Quand la plante ne transpire plus, elle chauffe
- Or, toutes les réactions biochimiques ont un optimum thermique
- La photosynthèse, la croissance sont affectées



Durand et al., 2013



Bennet et al., Global Change Biology, 2021

## L'effet combiné de la contrainte hydrique et des températures élevées

→ Les réserves de l'arbre (amidon, sucres solides) diminuent fortement

→ Le rendant plus susceptible à un autre stress : théorie du boxeur (exemple du scolyte)



<https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/sco>



# L'effet combiné de la contrainte hydrique et des températures élevées



Agricultural and Forest  
Meteorology

Volume 307, 15 September 2021, 108482



## Tree mortality of European beech and Norway spruce induced by 2018-2019 hot droughts in central Germany

Nora Obladen <sup>a</sup>, Pia Dechering <sup>a</sup>, Georgios Skiadarexis <sup>b</sup>, Willy Tegel <sup>a</sup>, Joachim Keßler <sup>c</sup>, Sebastian Höllner <sup>c</sup>, Sven Kaps <sup>d</sup>, Martin Hertel <sup>e</sup>, Choimaa Dulamsuren <sup>f</sup>, Thomas Seifert <sup>a, g</sup>, Mareike Hirsch <sup>a</sup>, Andrea Seim <sup>a, h</sup> ✉



Montage photo avant/après sécheresse sur une forêt de hêtres - DSF  
(Département de la Santé des Forêts)

related to drought during June to August, except at slightly higher elevations at the Fichtelberg site, where a summer temperature signal was observed. Trees at the Spessart and Hassberge sites showed an increased response to hydroclimatic conditions in April following the extreme drought in 1976 and from the 1990s onwards at the Fichtelberg site. Spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) outbreaks during the 2018 drought accelerated the high mortality rates in around 50% of the trees at the Spessart and Hassberge site. In 2018, around 7% of all beech trees died at the Hassberge site, the site with the highest clay content. Our results suggest that these widespread mortality events can be attributed to an increasing drought sensitivity and were accelerated by the consecutive recent drought years. Sustainable forest management practices for these ecologically and economically important tree species are required to mitigate the effects of global warming in the future.

## L'effet combiné de la contrainte hydrique et des températures élevées



Logo of the Department of Forest Health (DSF) and the date 'Janvier 2020' are visible in the top left and right corners of the document cover.

Departement  
de la santé des forêts

Janvier 2020

**L'état sanitaire du pin sylvestre des plaines du nord-ouest se dégrade face aux sécheresses successives**

Des mortalités de pin sylvestre sont actuellement signalées par le réseau des correspondants-observateurs du Département de la Santé des Forêts (DSF) en région Centre Val-de-Loire. Les autres pins (pin laricio et pin maritime) ne sont pas affectés par le phénomène.

**Quelle est la situation actuellement ?**

Si les premières mortalités d'arbres isolés ont été signalées dès 2016 sur des stations forestières compliquées en région Centre-Val de Loire (Brenne, Sologne), le phénomène a pris de l'ampleur entre l'automne 2018 et le printemps 2019 dans les peuplements des régions du nord-ouest les plus impactées par la sécheresse 2018. Les secteurs les plus concernés sont le sud et l'est de la région Centre Val-de-Loire, l'est de l'Île de France jusqu'au département du Nord.

En 2019, différentes tournées ont été effectuées sur le terrain pour qualifier ces mortalités inhabituelles sur l'essence.

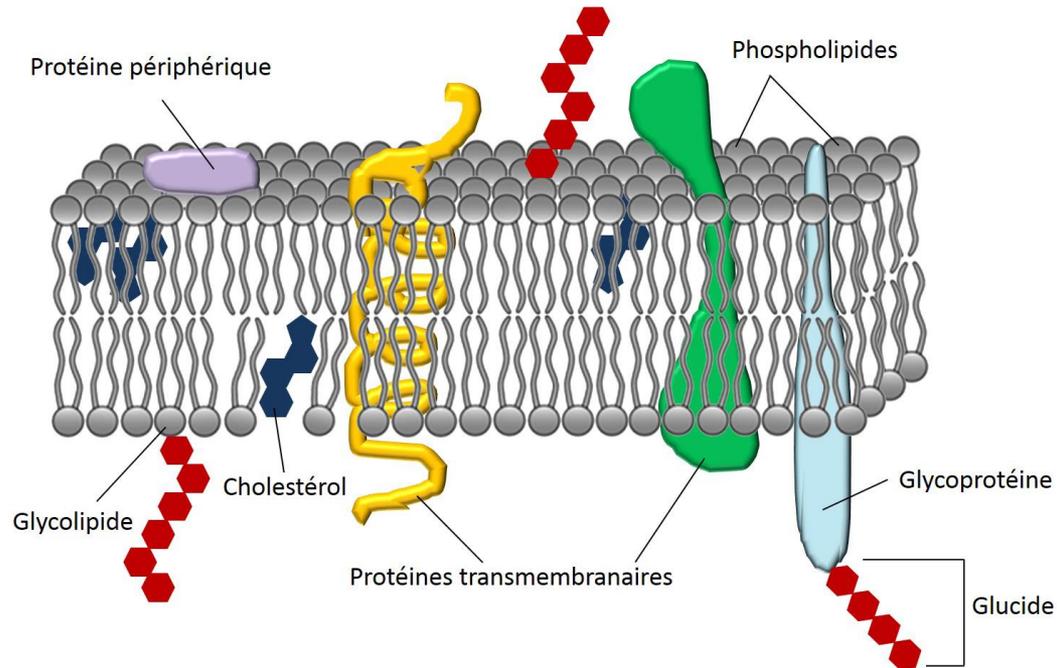


→ Pour le pin sylvestre, l'effet des températures caniculaires est sans doute la cause des dépérissements

## L'effet direct des températures

→ Au-delà d'environ 45°C, il y a déstabilisation des membranes, de la cuticule des feuilles

→ Cires, huiles de protection, des plantes de zone aride, mais pas dans nos forêts ...



Claire François-Martin, 2016

## ● Température et phénologie

---

→ Avance de la date de débourrement d'environ 3 jours par décade depuis 1985 (Meier et al., 2021)

→ Mais la probabilité de gel de printemps ne diminue pas fortement



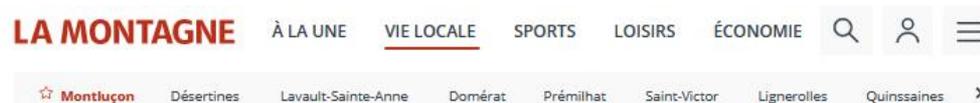
<http://ephytia.inra.fr/fr/C/18542/Forets-Froids-gelees>

# Les forêts peuvent-elles s'adapter à ces changements climatiques ?

→ Acclimatation (plasticité)

→ Adaptation

→ Migration



## Environnement

### Trois années de sécheresse ont laissé des marques sur les arbres de la forêt de Tronçais (Allier)

Publié le 18/04/2021 à 08h00



LIRE LE JOURNAL

#### LES + PARTAGÉS

1

**Faits divers** Spectaculaire collision entre un car Flixbus et un semi-remorque, sur l'A71, à Champs (Puy-de-Dôme)

2

**Faits divers** Incendie à l'entreprise Échalier de Clermont-Ferrand : le feu est désormais circonscrit

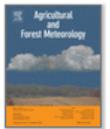
**Insolite** Après avoir manifesté contre le pass sanitaire

# Acclimatation

- Oui, dans une certaine mesure
- Par exemple, feuilles moins nombreuses et plus petites suivant les épisodes de sécheresse
- Mais inefficace contre les extrêmes



Agricultural and Forest  
Meteorology  
Volumes 308–309, 15 October 2021, 108472



## Consistently lower sap velocity and growth over nine years of rainfall exclusion in a Mediterranean mixed pine-oak forest

Myriam Moreno <sup>a, b</sup>, Guillaume Simioni <sup>a</sup>, Maxime Cailleret <sup>c</sup>, Julien Ruffault <sup>a</sup>, Eric Badel <sup>d</sup>, Simon Carrière <sup>e</sup>, Hendrik Davi <sup>a</sup>, Jordane Gavinet <sup>f</sup>, Roland Huc <sup>a</sup>, Jean-Marc Limousin <sup>f</sup>, Olivier Marloie <sup>a</sup>, Ludovic Martin <sup>d</sup>, Jesús Rodríguez-Calcerrada <sup>g</sup>, /ennetier <sup>c</sup>, Nicolas Martin-StPaul <sup>a</sup>

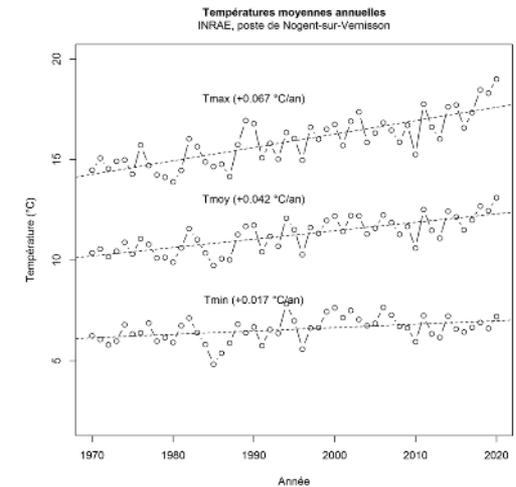
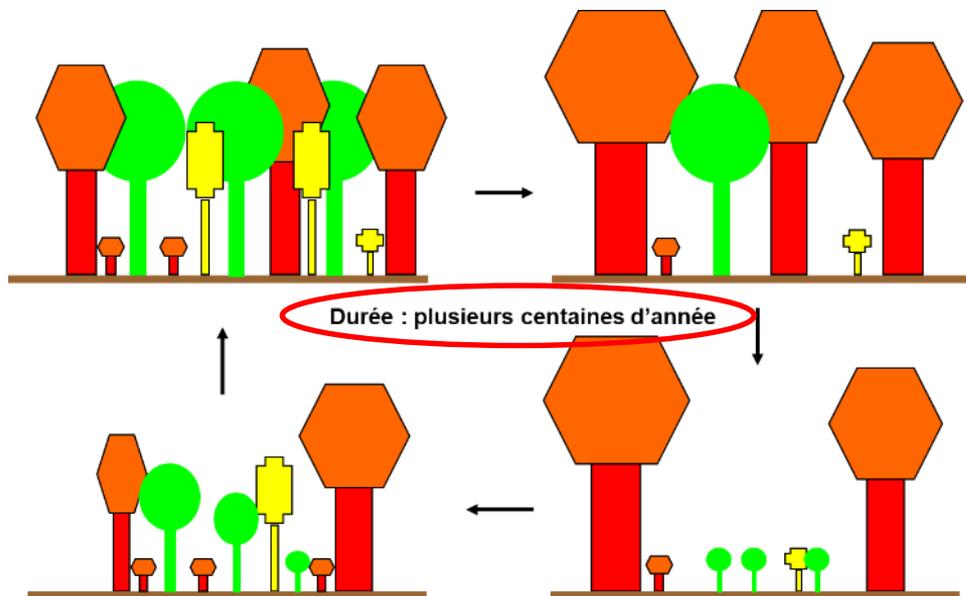
between treatments, nor to change in secondary growth. In contrast primary growth measurements indicate that *P.*

*halepensis* trees, and *Q. ilex* to a lesser extent, experienced reduction in total leaf areas in response to the rainfall exclusion. Globally, our results suggest that increase drought

# Adaptation

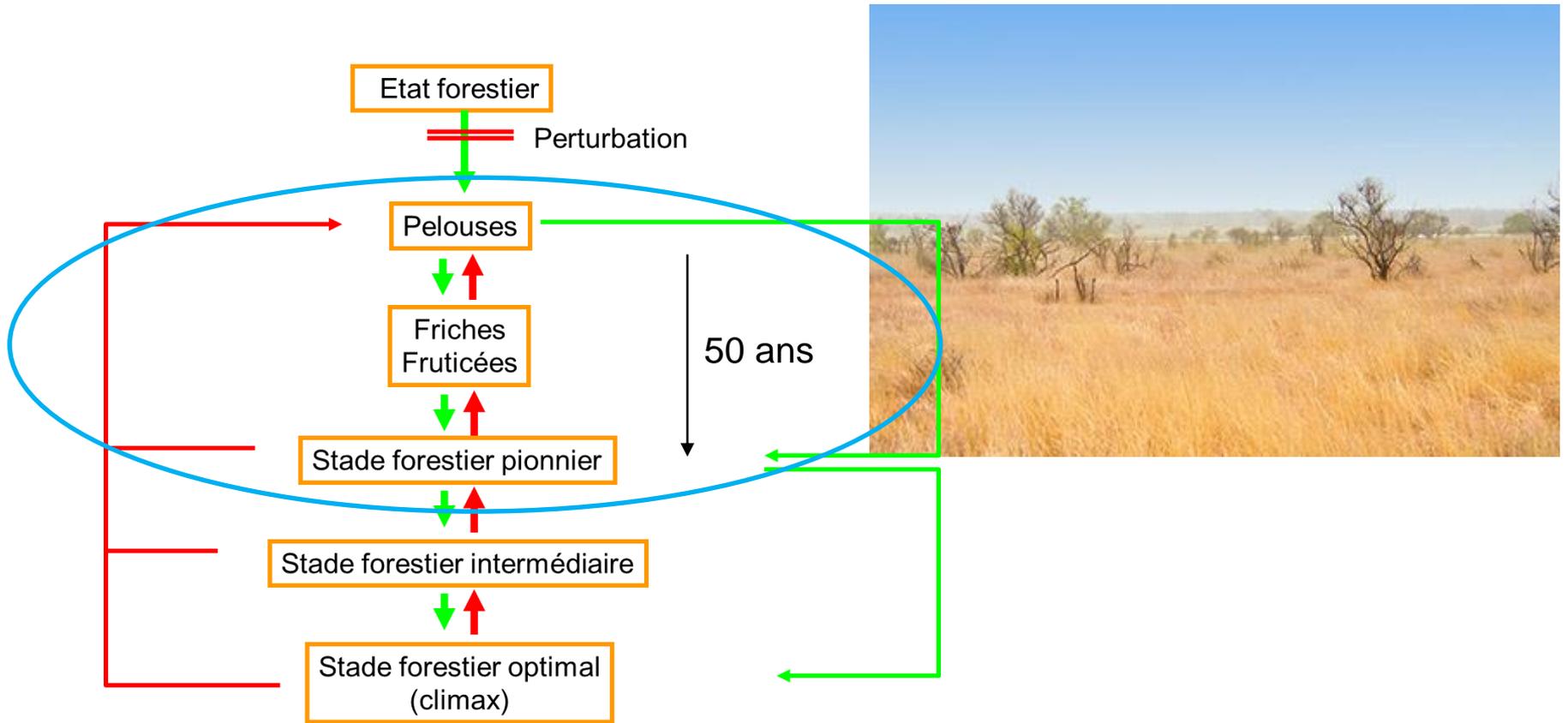
→ Dans une certaine mesure oui, les arbres sont particulièrement résistants et résilients à divers stress

→ Le problème essentiel réside dans l'évolution rapide des contraintes thermique et hydrique



Sélection naturelle d'individus mieux adaptés au nouvel environnement (génotype) ?

# Adaptation



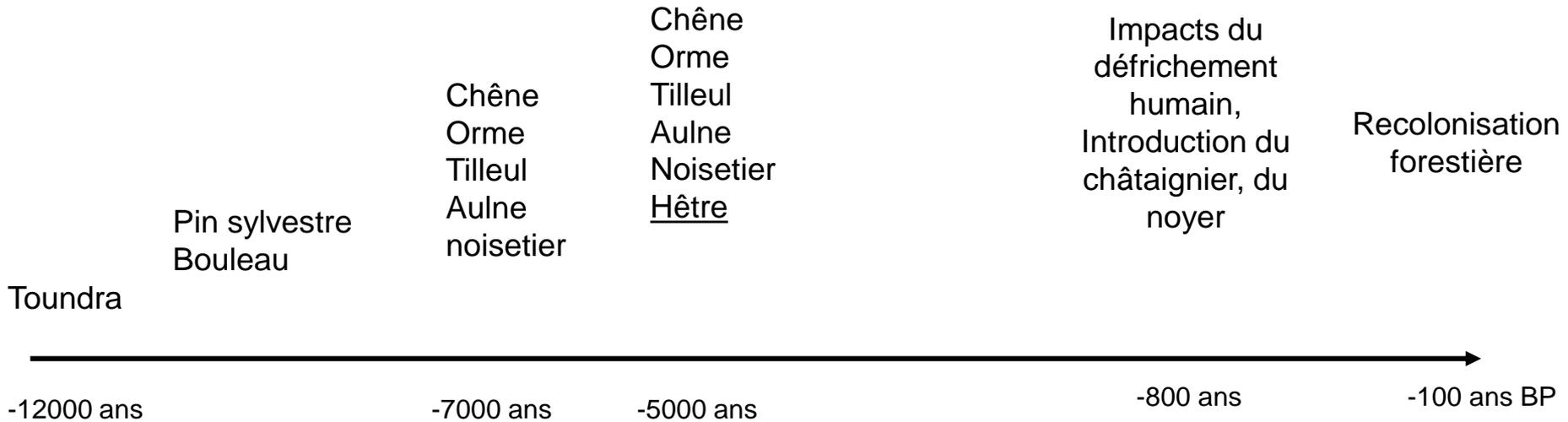
Notre nouvel environnement risque assez de ressembler à de la savane



# Migration

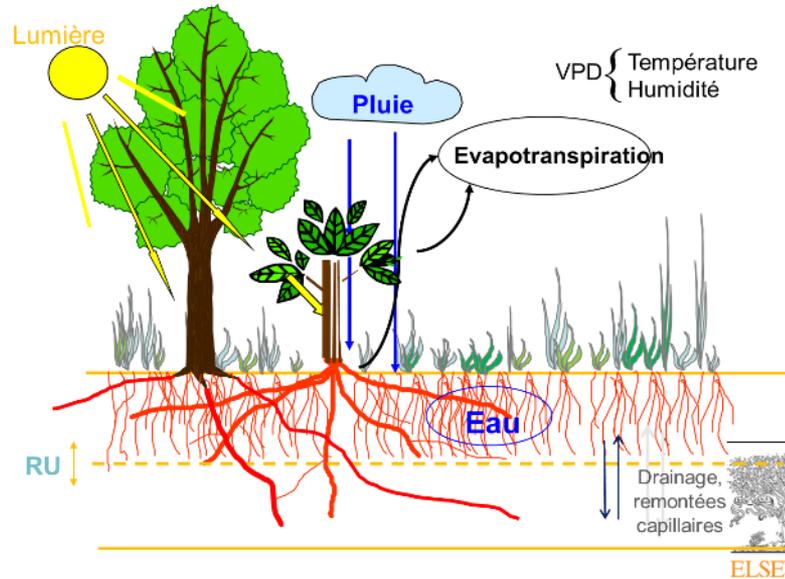
---

## L'évolution de la forêt française après la dernière glaciation



Demesure et Musch, dossier de l'environnement n° 21

# Adaptation et migration : microclimat tamponné dans le sous-bois



→ Tmax ↓ et Tmin ↑

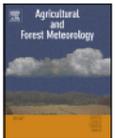
→ De 0,5°C à quelques degrés en fonction de la densité des arbres et de la saison

Agricultural and Forest Meteorology 237 (2017) 71–79

Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural and Forest Meteorology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/agrformet](http://www.elsevier.com/locate/agrformet)



ELSEVIER

→ Mais avec des effets seuils : 42°C mesurés en juin 2019 sous le couvert de la forêt d'Orléans ...

Impact of tree canopy on thermal and radiative microclimates in a mixed temperate forest: A new statistical method to analyse hourly temporal dynamics

Noémie Gaudio<sup>a,\*</sup>, Xavier Gendre<sup>b</sup>, Marc Saudreau<sup>c</sup>, Vincent Seigner<sup>d</sup>, Philippe Balandier<sup>d</sup>

<sup>a</sup> INRA, UMR AGIR, 24 Chemin de Borde Rouge, CS 52627, F-31326 Castanet Tolosan Cedex, France

<sup>b</sup> IMT, UMR CNRS 5219, Université Paul-Sabatier, Route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex, France

<sup>c</sup> INRA, UMR PIAF, 5 Chemin de Beaulieu, F-63039 Clermont-Ferrand Cedex 2, France

<sup>d</sup> IRSTEA, Unité de Recherche sur les Ecosystèmes Forestiers (EFNO), Domaine des Barres, F-45290 Nogent-sur-Vernisson, France



## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 20 July 2016  
Received in revised form  
28 November 2016  
Accepted 5 February 2017

### Keywords:

## ABSTRACT

Forest shelter buffers microclimate, decreasing daily ranges of solar radiation and temperature, yielding higher minimum and lower maximum temperatures than those of open field. The most common way to analyse sets of these data is to compare mean, maximum and minimum values of climate parameters of open field and understory conditions at daily, monthly or seasonal scales; however, this approach loses information about temporal dynamics. This study developed a statistical method to analyse hourly dynamics of temperature (T) and radiation (Rad) together and quantify effects of canopy openness and

## Adaptation et migration : la dette climatique

→ Thermophilisation de la flore mais pas aussi rapide que l'augmentation des températures



### ARTICLE

Received 4 Sep 2015 | Accepted 19 Jul 2016 | Published 26 Aug 2016

DOI: [10.1038/ncomms12643](https://doi.org/10.1038/ncomms12643)

OPEN

## Ecological constraints increase the climatic debt in forests

Romain Bertrand<sup>1</sup>, Gabriela Riofrío-Dillon<sup>2</sup>, Jonathan Lenoir<sup>3</sup>, Jacques Drapier<sup>4</sup>, Patrice de Ruffray<sup>5</sup>, Jean-Claude Gégout<sup>2</sup> & Michel Loreau<sup>1</sup>

Biodiversity changes are lagging behind current climate warming. The underlying determinants of this climatic debt are unknown and yet critical to understand the impacts of climate change on the present biota and improve forecasts of biodiversity changes. Here we assess determinants of climatic debt accumulated in French forest herbaceous plant communities between 1987 and 2008 (that is, a 1.05°C mean difference between the observed and bioindicated temperatures). We show that warmer baseline conditions predispose plant communities to larger climatic debts, and that climate warming exacerbates this response. Forest plant communities, however, are absorbing part of the temperature increase mainly through the species' ability to tolerate changing climate. As climate warming is expected to accelerate during the twenty-first century, plant migration and tolerance to climatic stresses probably will be insufficient to absorb this impact posing threats to the sustainability of forest plant communities.

# Interactions écologiques, compétition, facilitation

→ Le climat n'est qu'une des contraintes que subissent les forêts

## Water limitation and browsing pressure may lead to loss of regeneration in uneven-aged spruce-fir-beech forests in the French Alps

Mithila Unkule\* · Christian Piedallu · Philippe Balandier · Benoît Courbaud\*

Received: date / Accepted: date

### Abstract

**Key message:** Water deficit reduces density and height growth of saplings of *Picea abies* (L.) H. Karst (Norway spruce), *Abies alba* Mill. (silver fir) and *Fagus sylvatica* L. (common beech) in mixed uneven aged forests in the French Alps and Jura mountains. Ungulate browsing is an additional pressure on fir that could jeopardise the renewal of this species in the future.

Mithila Unkule\*

Annals of Forest Science, in press

**Context:** Global changes such as temperature, climatic water balance, and ungulate browsing pressure play an important role in determining forest structures, regeneration, and thus future forest composition.

**Aims:** The objective of this study was to quantify sapling densities and growths, and to identify dominant environmental variables influencing densities and annual height increments of saplings of spruce, fir and beech in mixed uneven aged forests in the French Alps and Jura mountains.



Dessin, Thérèse Danieau

→ Dans de nombreuses régions, de fortes inquiétudes sur le renouvellement des forêts par manque de jeunes individus

## ● Interactions écologiques, compétition, facilitation

---

→ La migration assistée (introduction volontaire de nouvelles espèces) pourrait être une solution

→ Chênes méditerranéens, Pins divers, Cèdres, ...

→ Mais qui n'est pas sans risque de déstabilisation de l'écosystème

→ Car on ne prend souvent en compte que le climat et pas les interactions biotiques



## Abstract

Objectives: Evaluate the capacity of temperate forest resources to both provide climate change mitigation and to sustain the downstream timber sector explicitly considering the cascade of biophysical and economic drivers (in particular, climate change impacts and subsequent adaptation actions) and their uncertainty. Methodology: A recursive bio-economic model of French forest resources, management, and timber markets has been coupled for this study with spatial statistical models of forest response to climate change long-term scenarios and land-use change. Main Results: (a) Climate change impacts on tree mortality are greater than those on tree growth variations; (b) Due to increasing competition with agriculture, climate change may reverse current trends in forest area expansion; (c) Due to rising average tree sizes, volume growth strongly declines over time and may eventually cease within the next century; (d) Future climate change impacts already have strong consequences on today's forest investment profitability; (e) The relative importance of forest substitution over forest sequestration increases as the timeframe increases; (f) While the forest sector has the potential to counterbalance a significant share of the national carbon emissions, this potential is threatened by climate change and the need to adapt to it. Profit-driven forest management does increase mitigation; (g) Uncertainty derived from using different climatic models over the same IPCC storyline has the same order of magnitude as the uncertainty derived from using the same climatic model under different storylines.

DOI:10.1561/112.00000522

Delacote et al., Journal of Forest Economics, 2021

→ Le changement climatique a déjà des conséquences économiques



Merci !

---

