

Quelles réponses des arbres face à la sécheresse?

Hervé Cochard



PIAF

INRAE

UCA
UNIVERSITÉ
Clermont
Auvergne



1) Le constat:

une crise
sanitaire globale

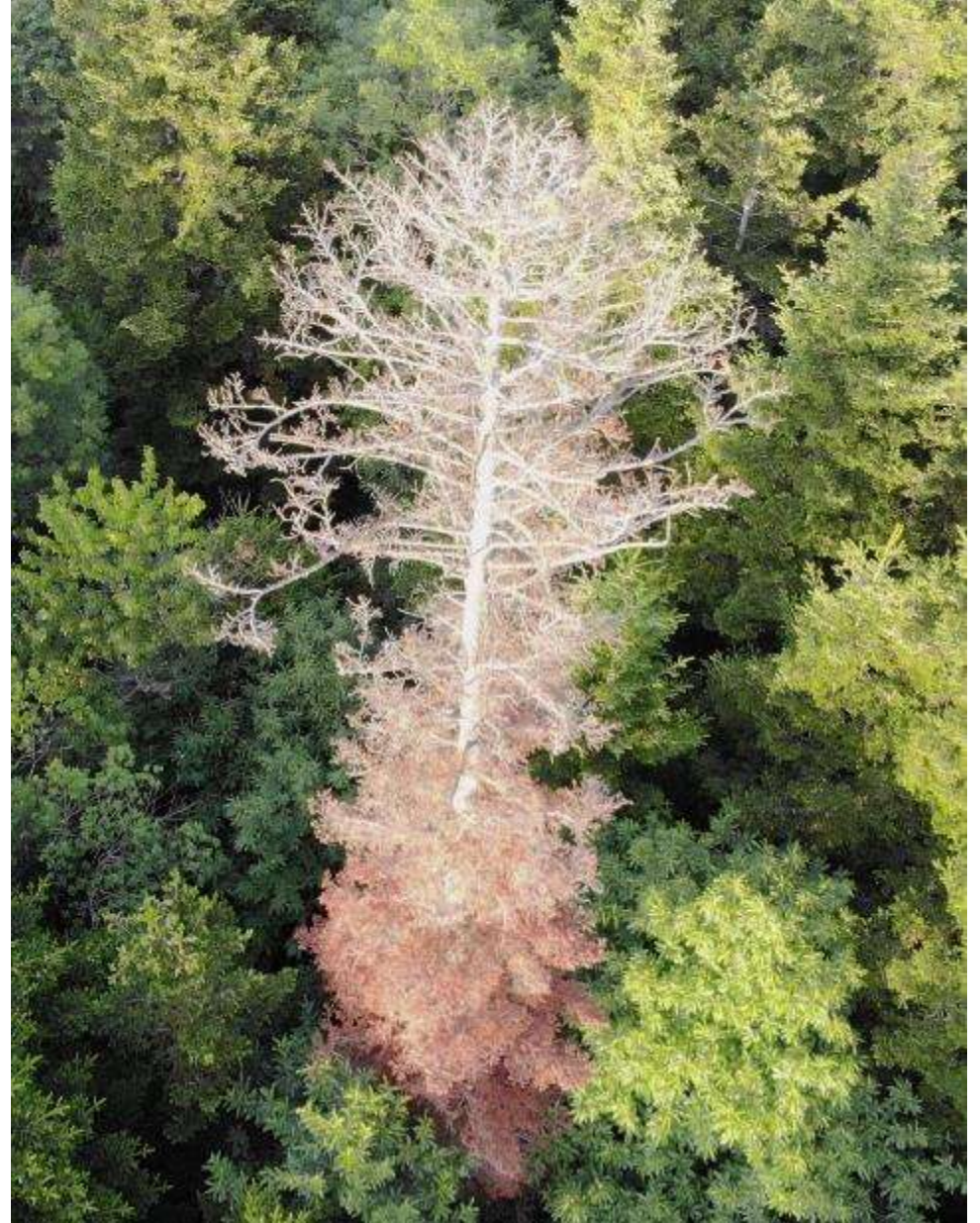


Des événements de mortalité récents en Auvergne

Pinède vers Brioude (2024)



Chênaie dans l'Allier (2023)



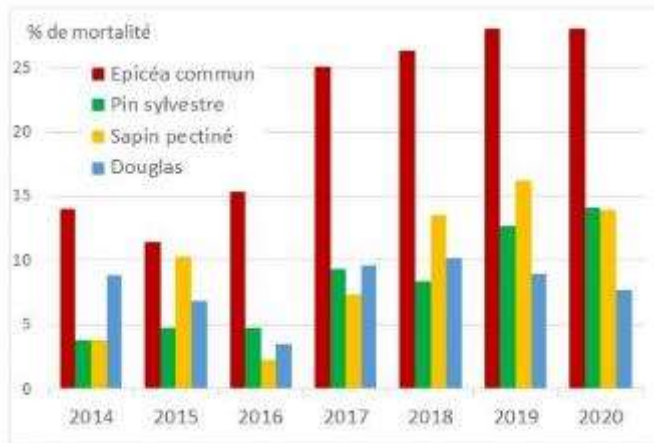
Sapin dans les gorges de Ceyrat (2020)

Un état sanitaire des forêts qui se dégrade en France

Taux de mortalité,
réseau veille
sanitaire



Les conifères : évolution du taux annuel de mortalité annuel sur la période 2014-2020

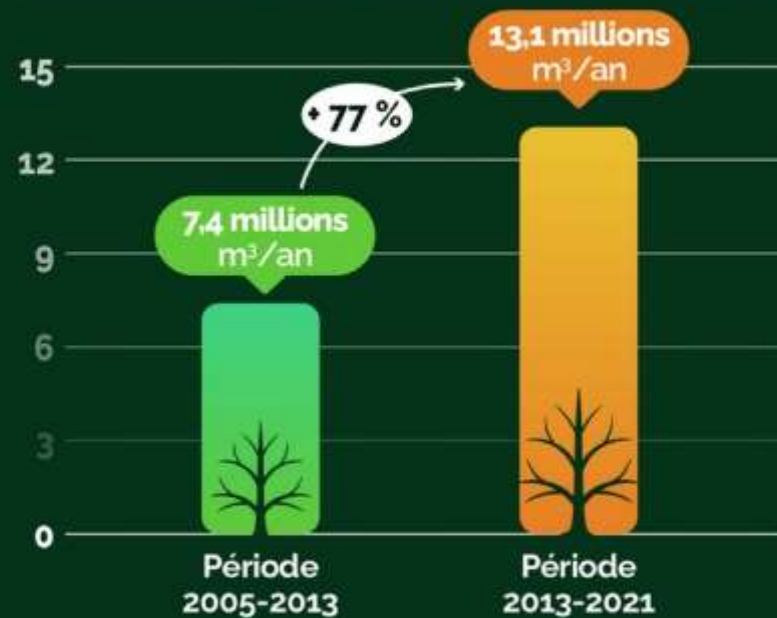


RÉPARTITION DE LA MORTALITÉ DES ARBRES
SUR LA PÉRIODE 2012 - 2020



Depuis 10 ans, de plus en plus d'arbres meurent et le rythme s'accélère

Évolution de la mortalité des arbres en millions de mètres cubes



Focus

Sur la période 2013 – 2021, cela représente une mortalité de 0,5 % du volume des arbres par an.

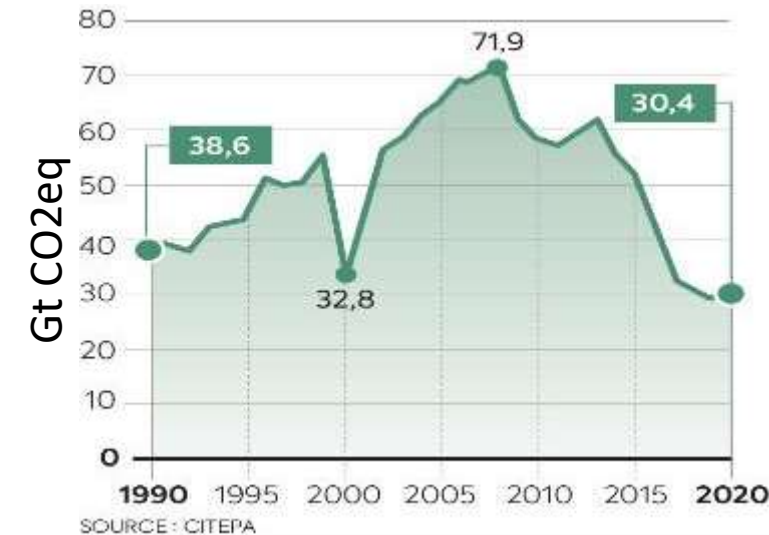
datagora

IGN

670 000
HECTARES

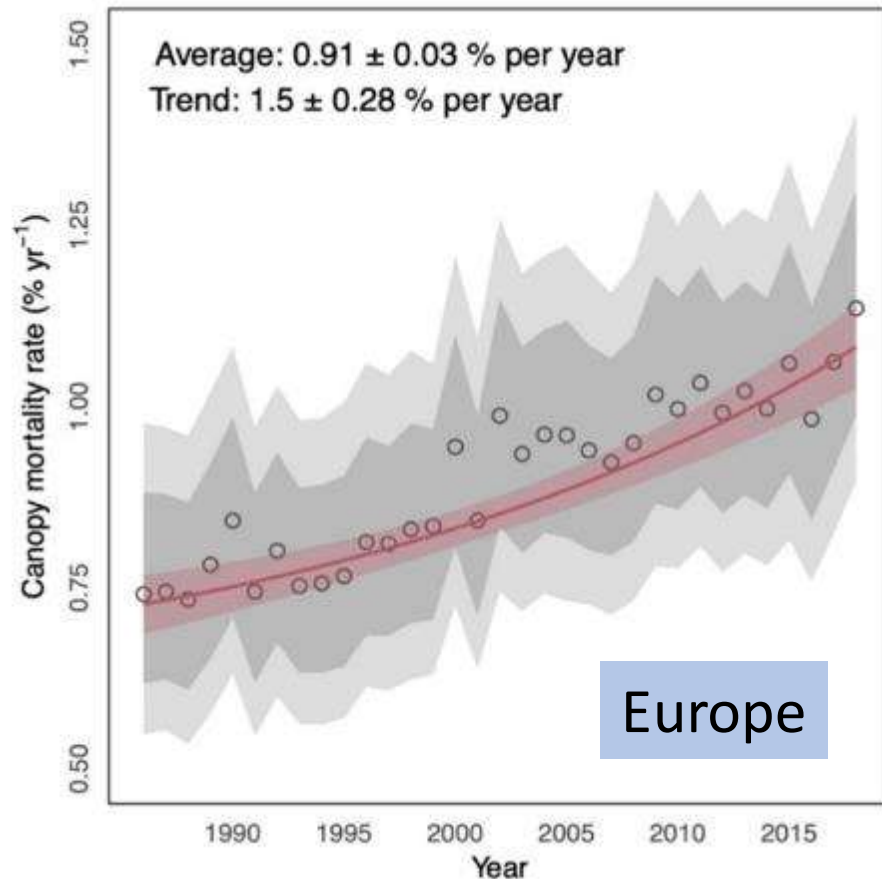
de forêts* sont actuellement
en train de DÉPÉRIR

Carbone absorbé par les forêts



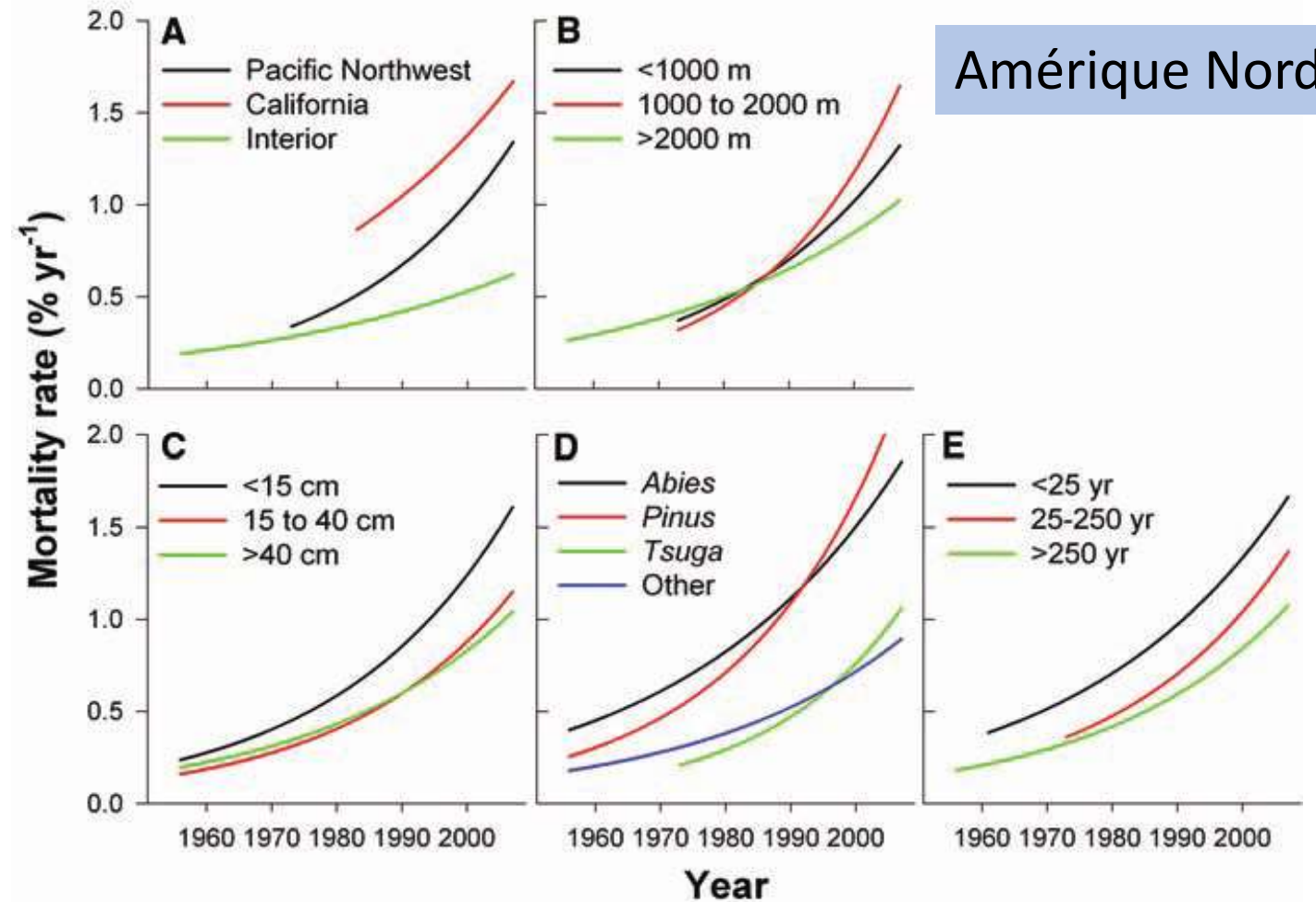
Un phénomène qui s'aggrave aussi à l'échelle des continents

Taux de mortalité des houppiers, %/an



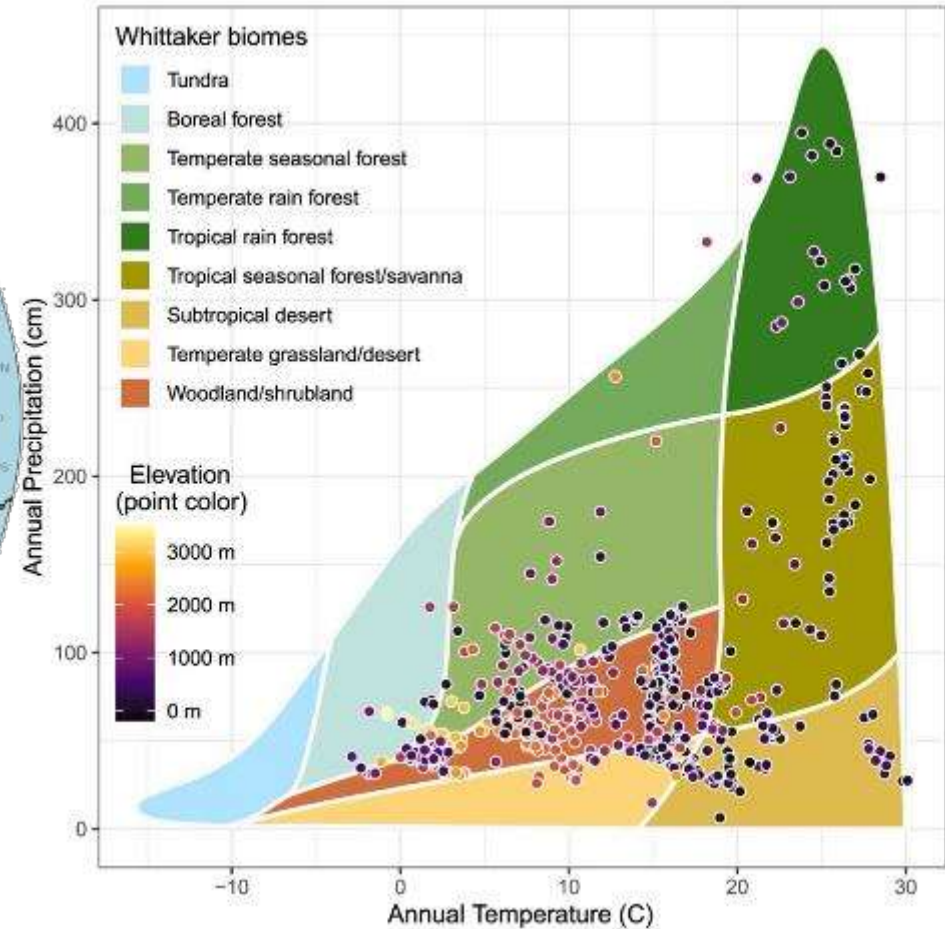
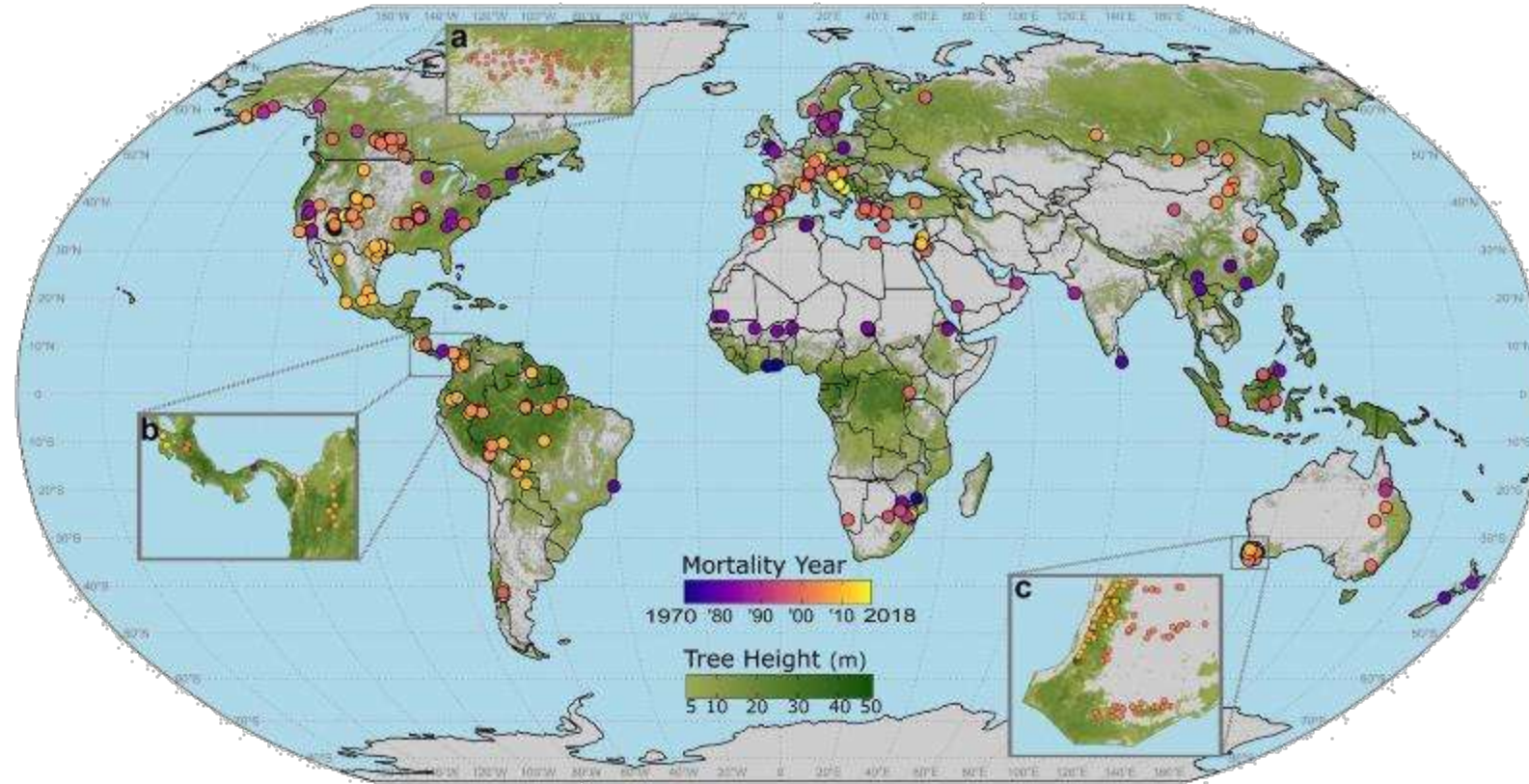
Senf et al 2020

Taux de mortalité des arbres, %/an



van Mantgem et al 2009

Risque de mortalité des arbres: Un phénomène global

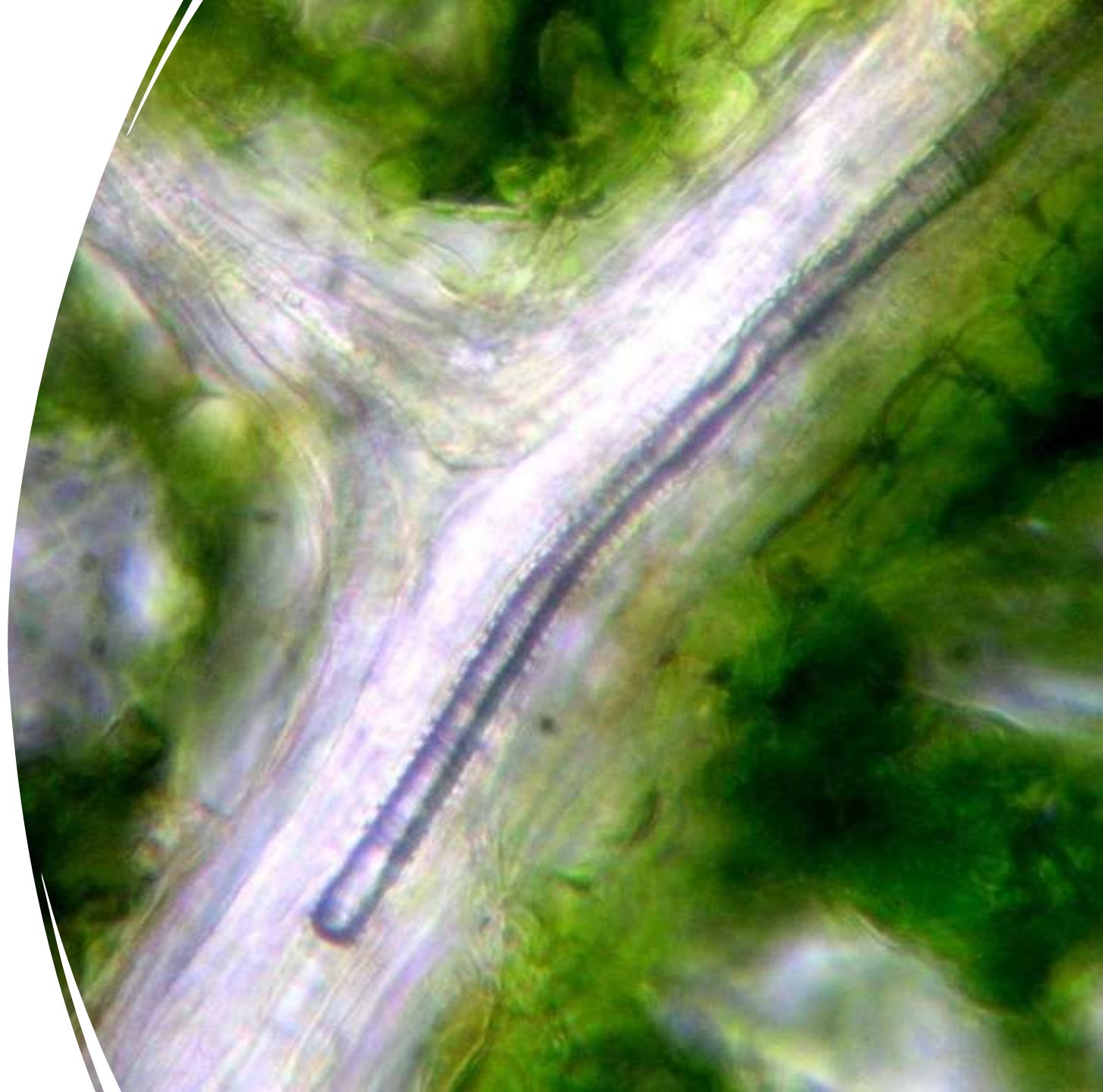


Hammond et al 2022

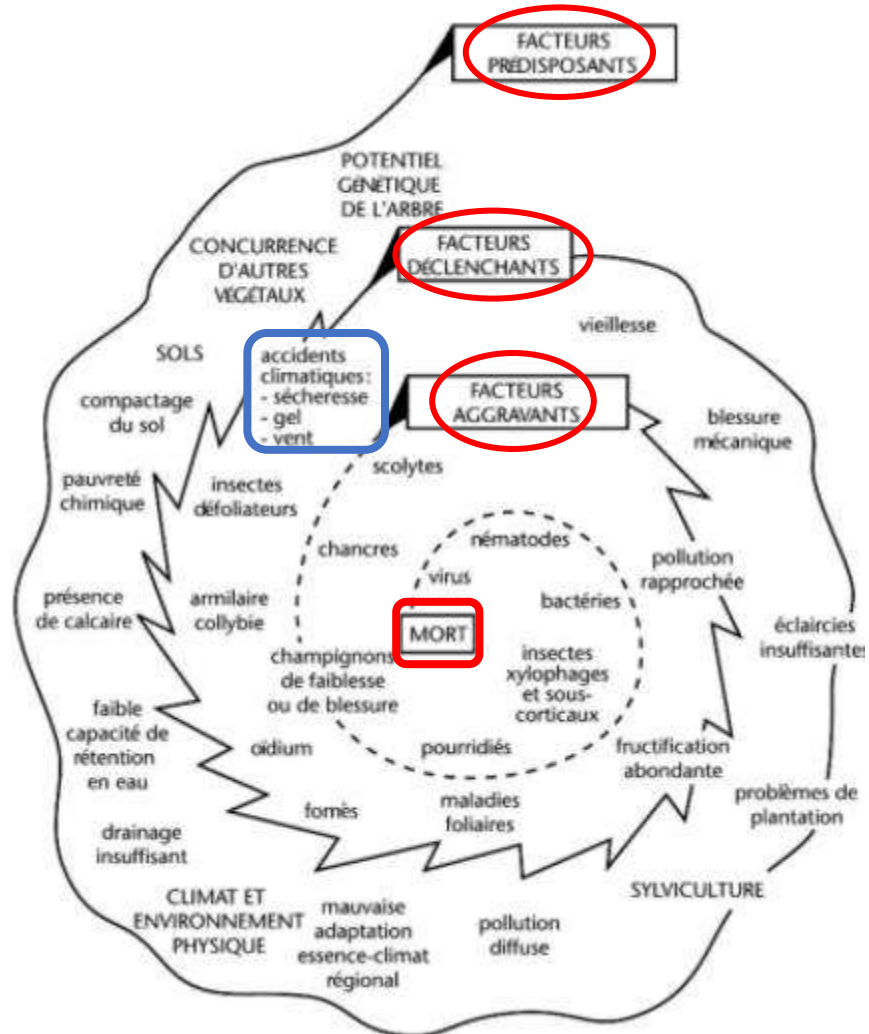
Tous les écosystèmes forestiers sont concernés par ces mortalités

2) Comprendre le phénomène en cours :

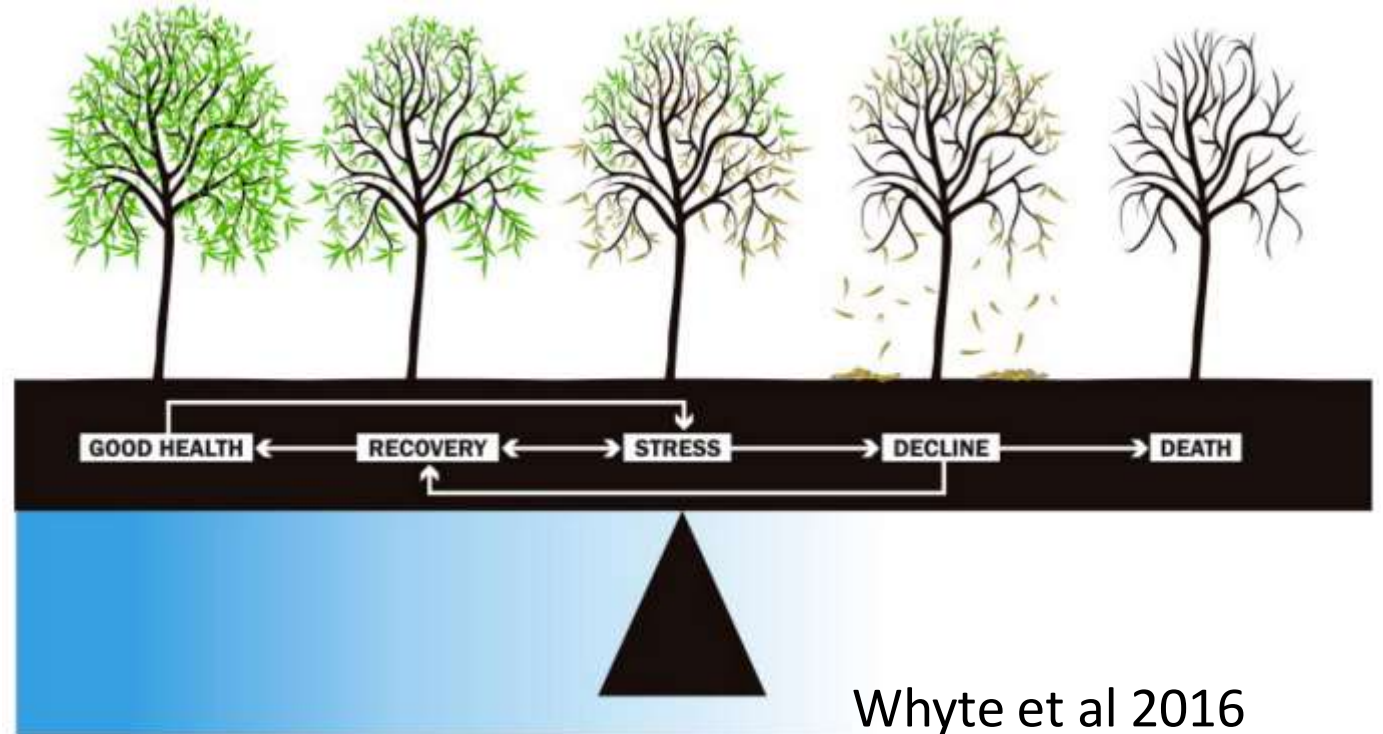
Les bases physiologiques
du dépérissement



Mortalité des arbres: un processus complexe

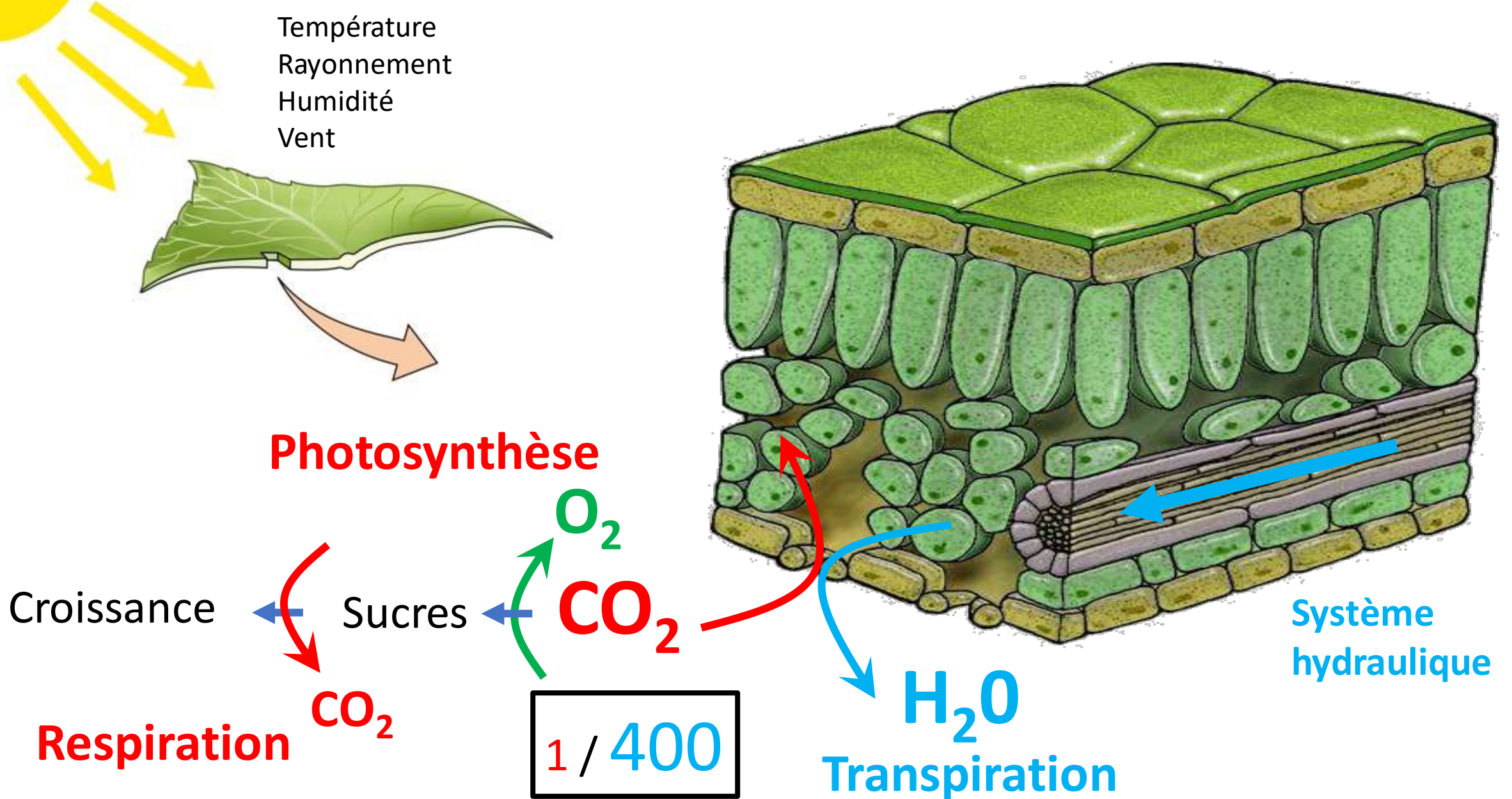


La spirale du déclin
Manion 1981

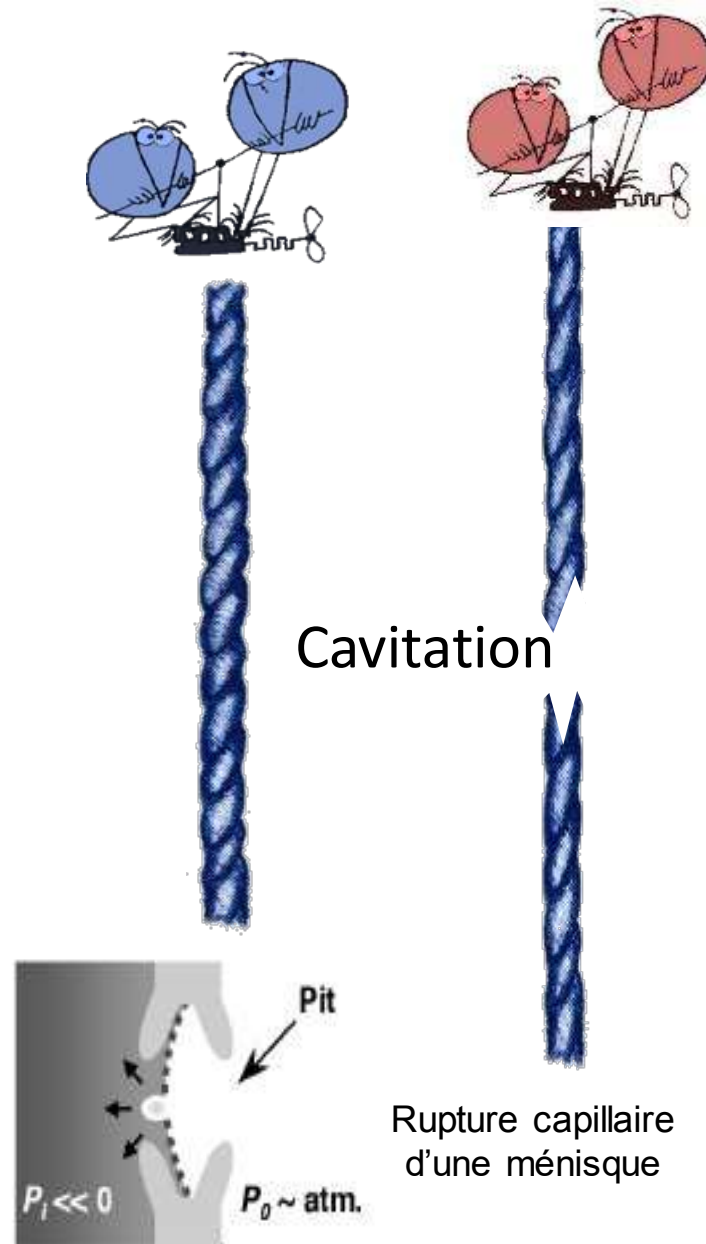


→ Une approche écophysiological du problème

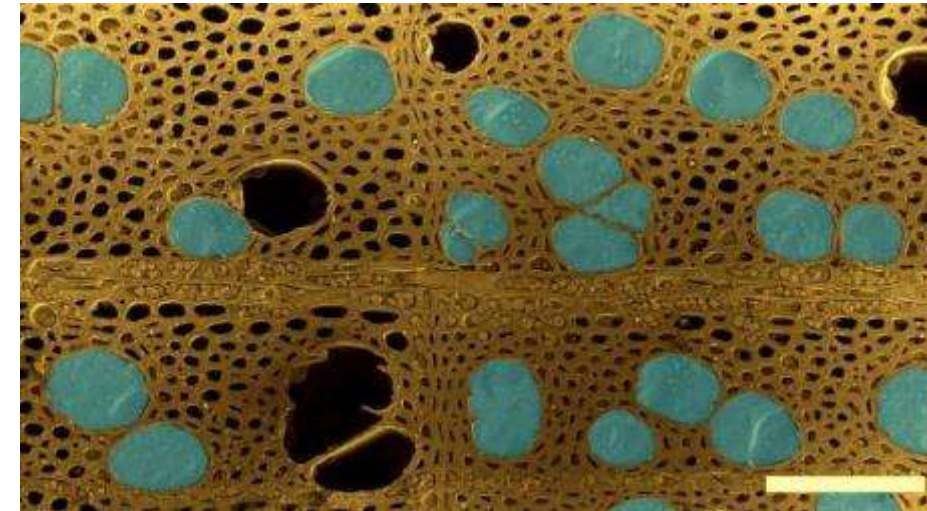
Des échanges gazeux foliaires sous l'influence du climat



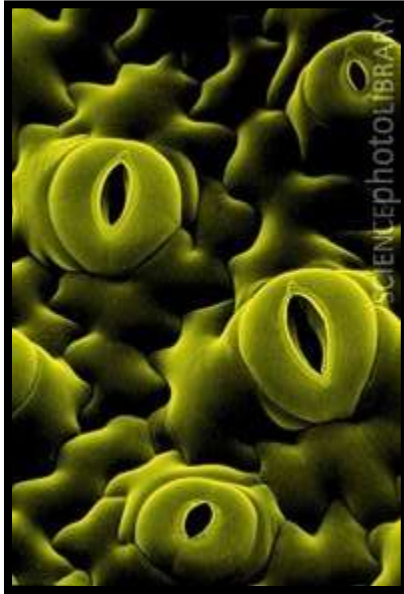
Un système hydraulique vulnérable aux sécheresses



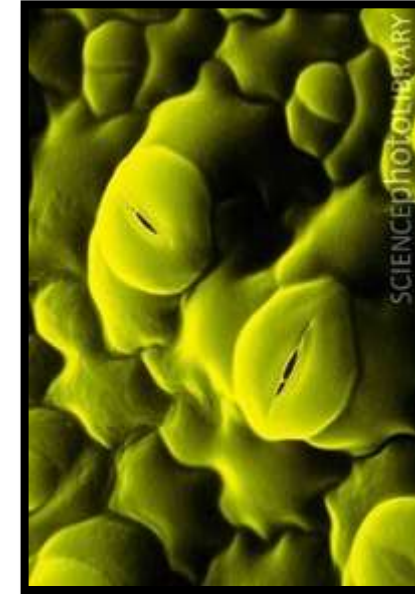
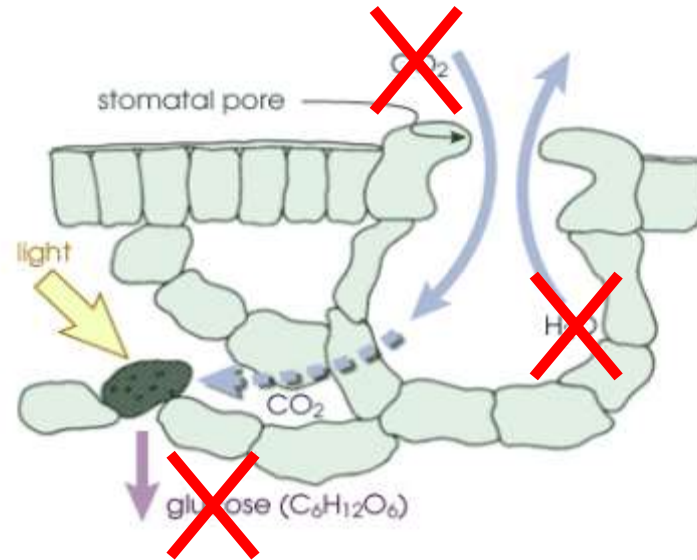
Embolie gazeuse Processus irréversible



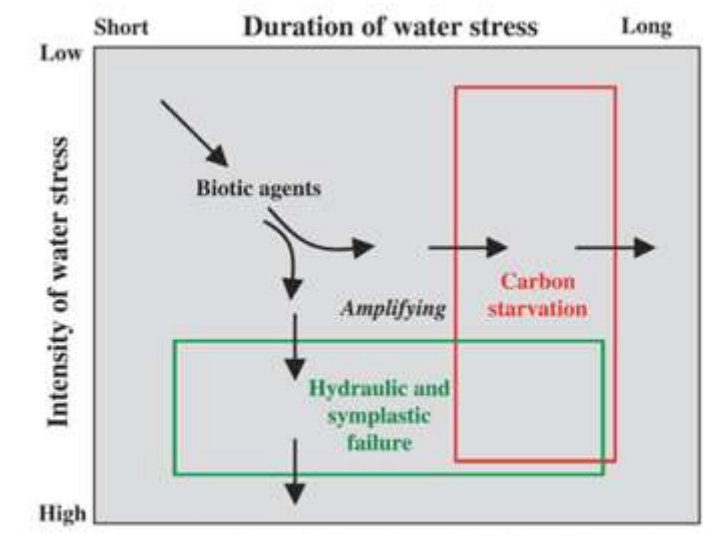
Deux processus physiologiques impliqués dans la mortalité des arbres lors d'une sécheresse



Rupture hydraulique
(cavitation/embolie)

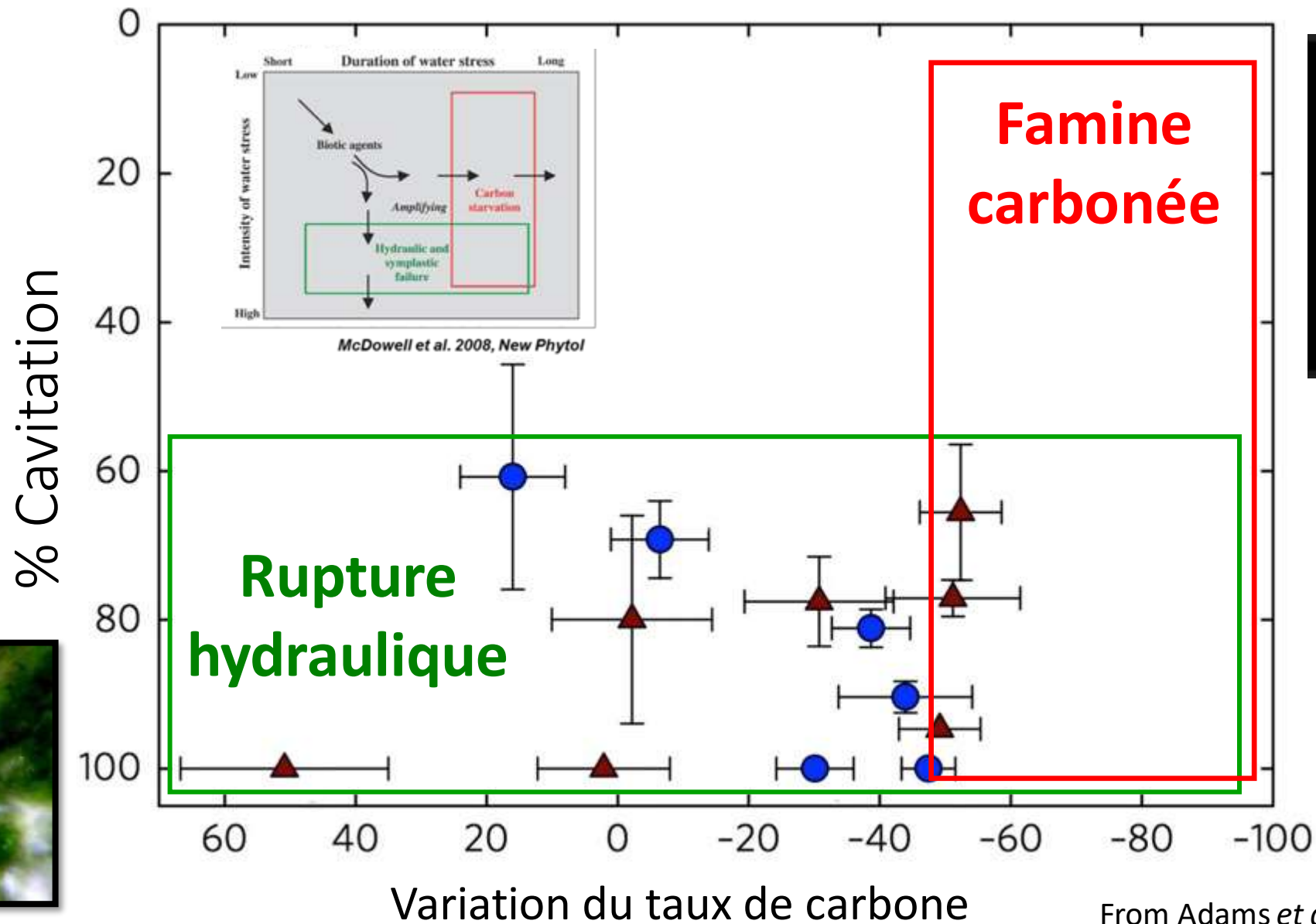


Famine carbonée



McDowell et al. 2008, New Phytol

Rupture hydraulique ou famine carbonée ?

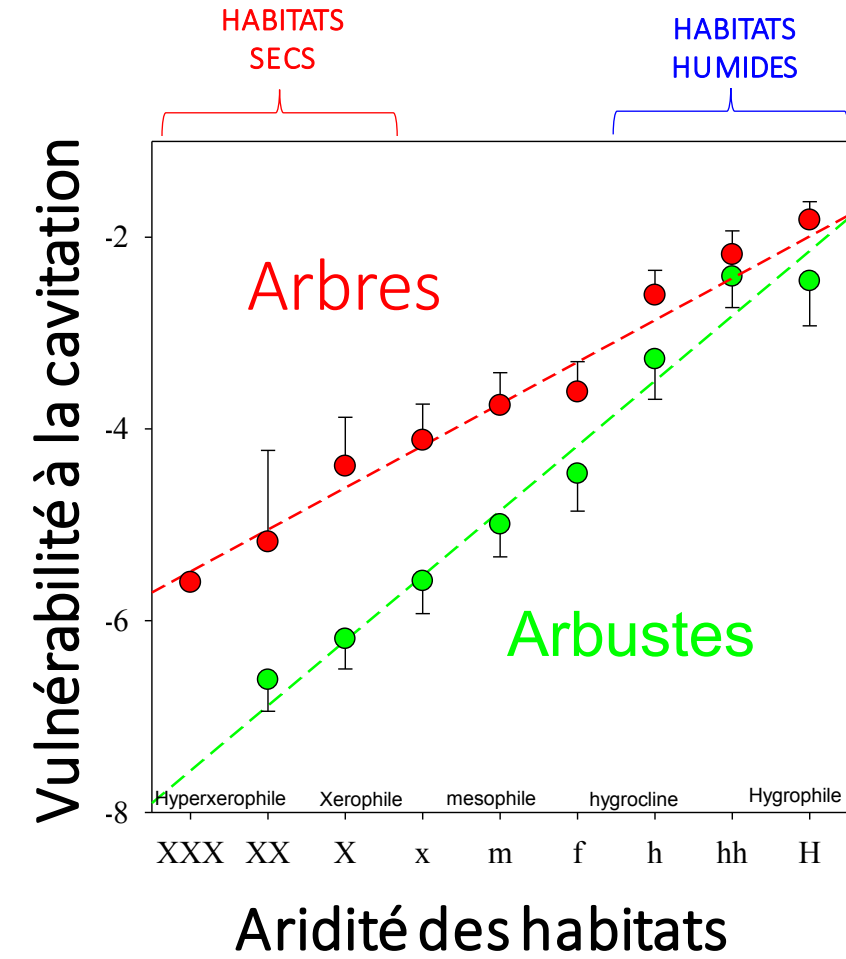


Spectre de vulnérabilité à la cavitation des espèces ligneuses

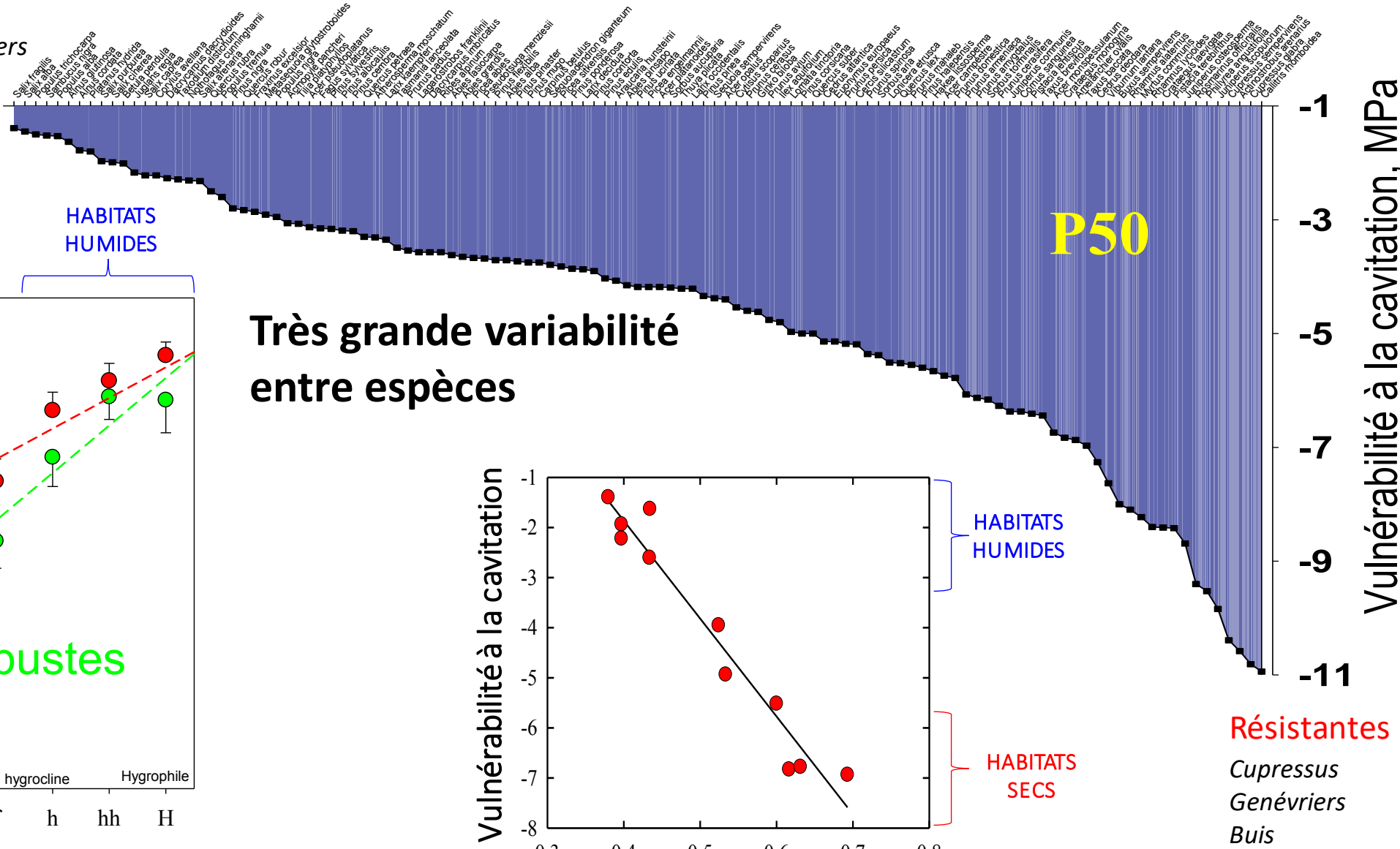
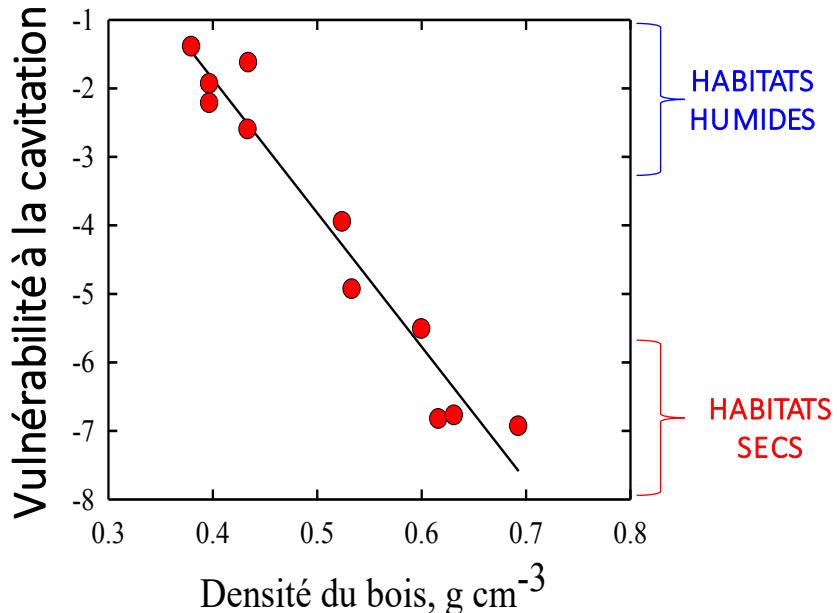
Aulnes
Saules
Peupliers

Vulnérables

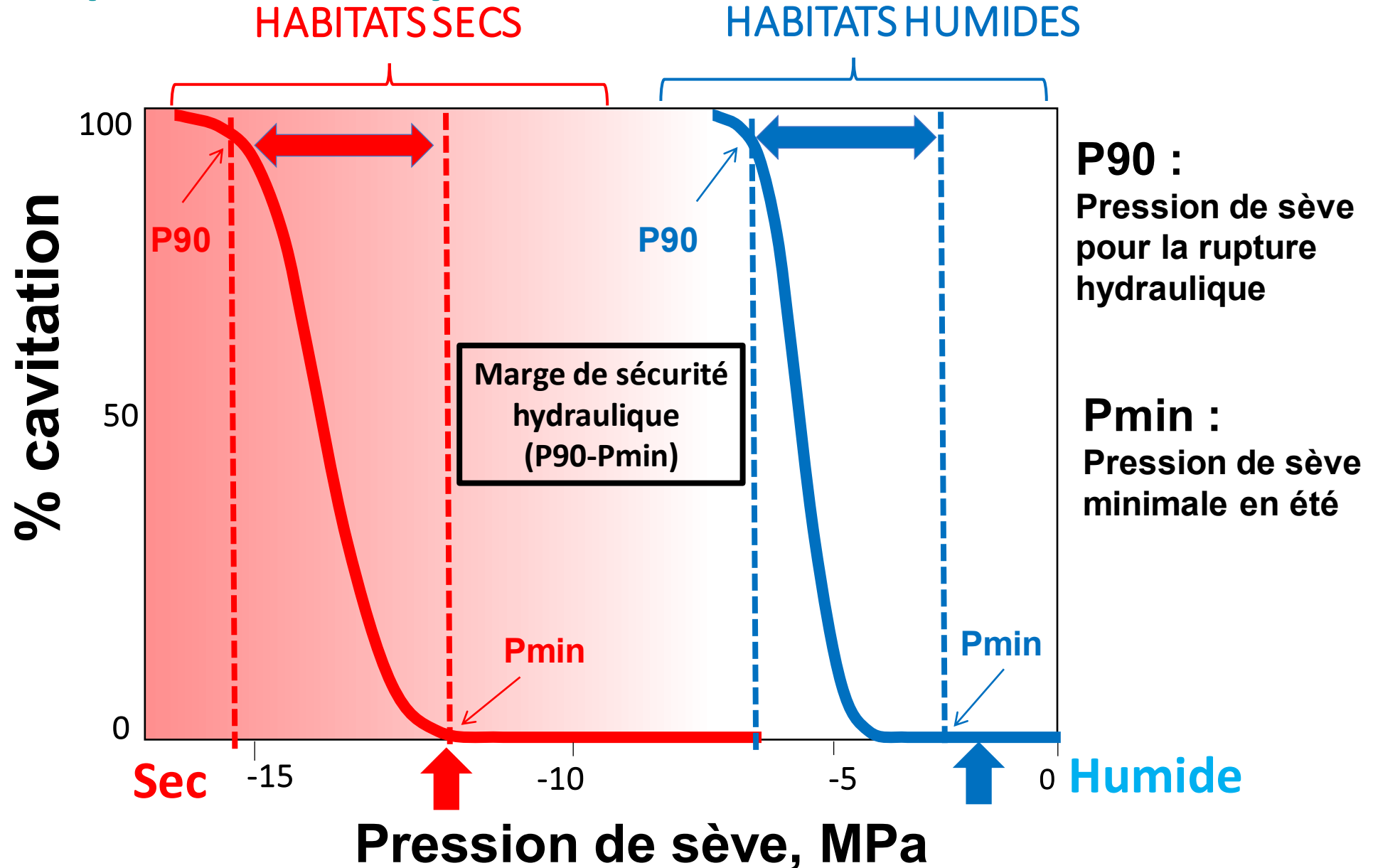
Liée à l'écologie
des espèces



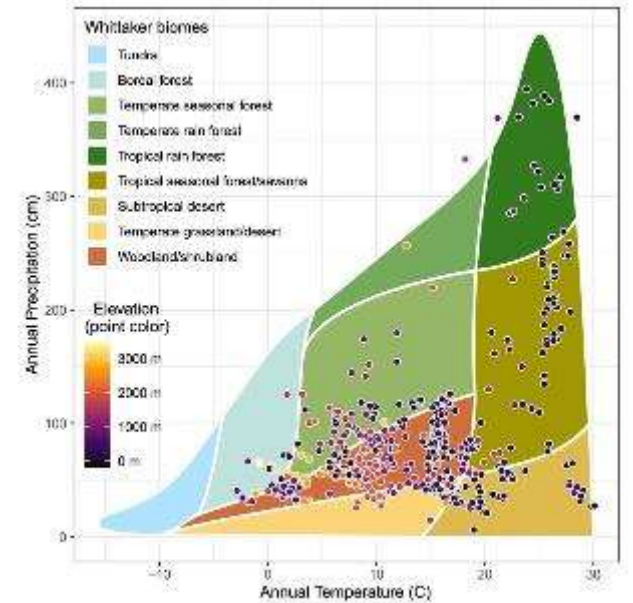
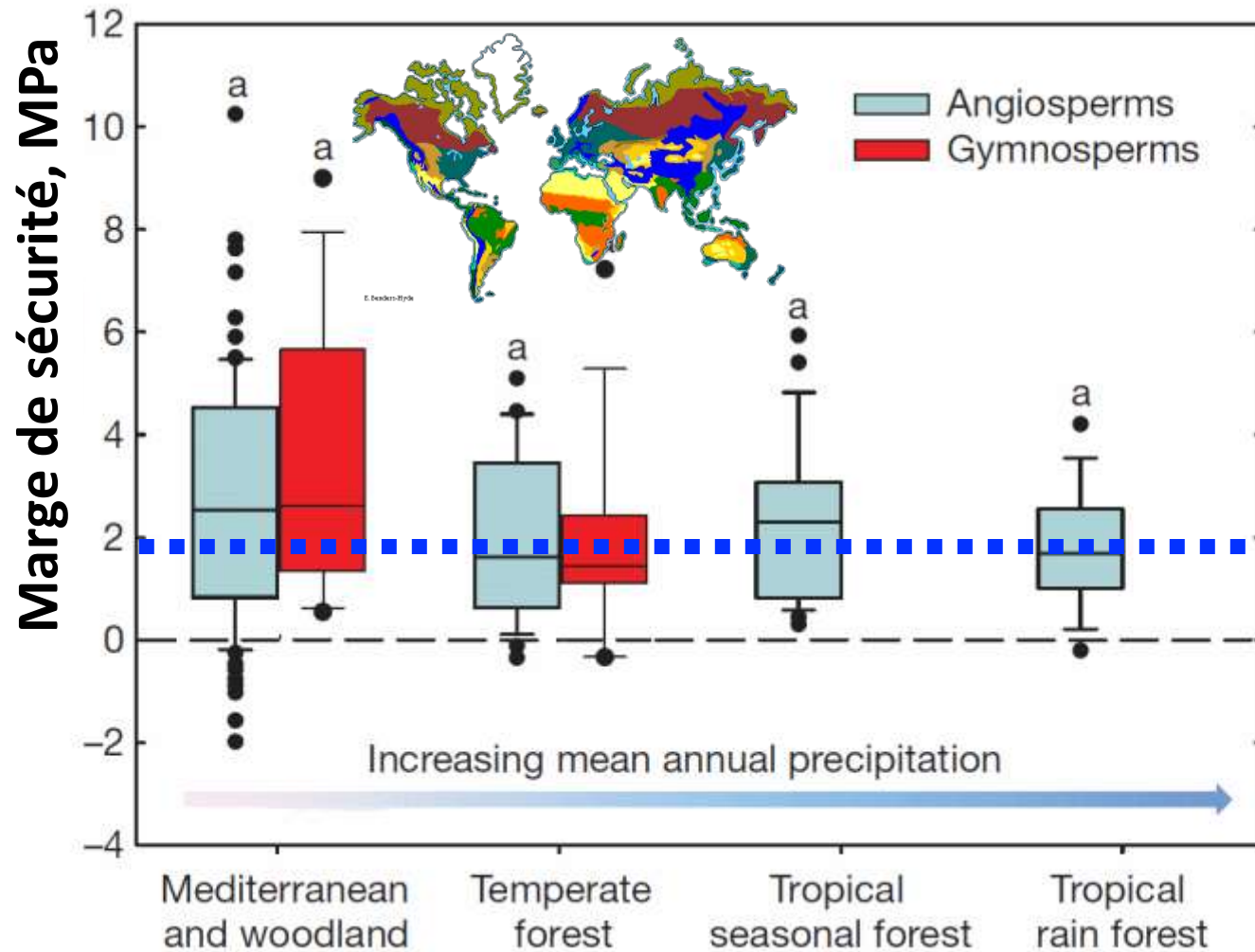
Très grande variabilité
entre espèces



Les espèces plus résistantes à la cavitation ne sont pas forcément moins exposées au risque de cavitation dans leur habitat naturel

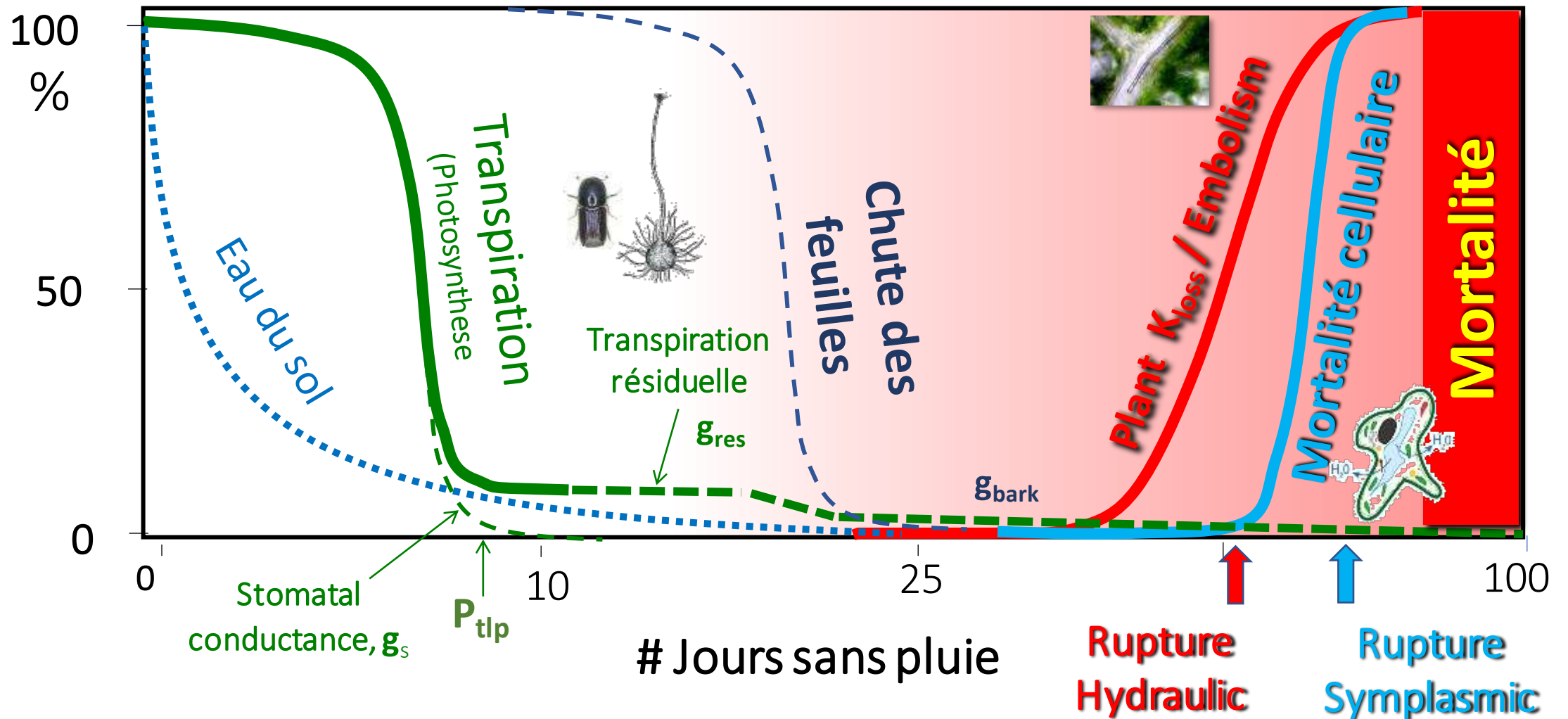


Les marges de sécurité hydrauliques sont globalement faibles pour tous les écosystèmes forestiers



Toutes les espèces
sont potentiellement
vulnérables !

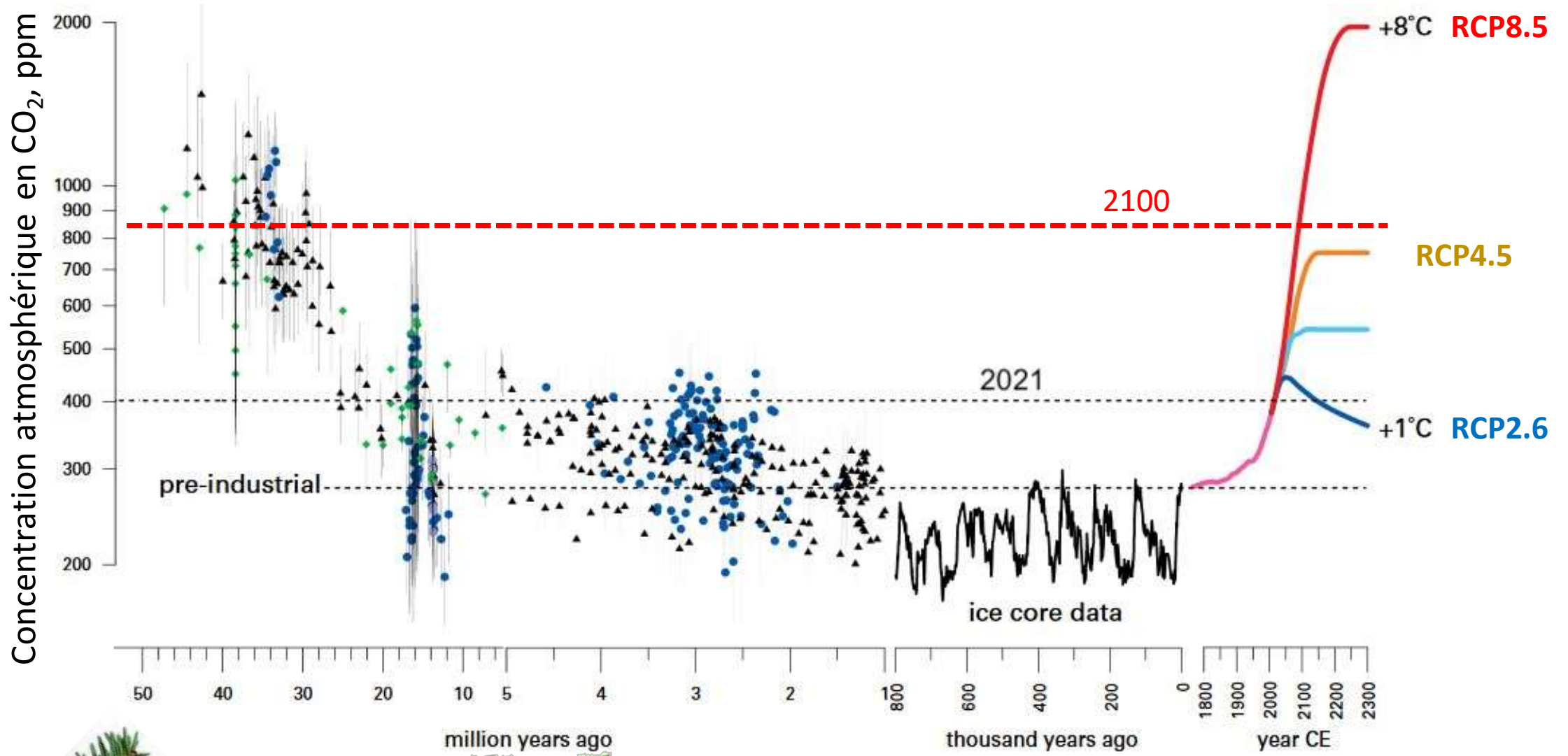
Réponse des arbres à une sécheresse extrême



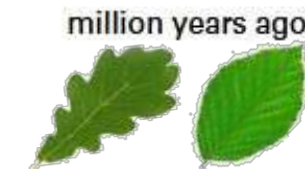
3) Quels impacts du changement climatique ?



Des conditions climatiques inédites sur terre depuis 30 Ma



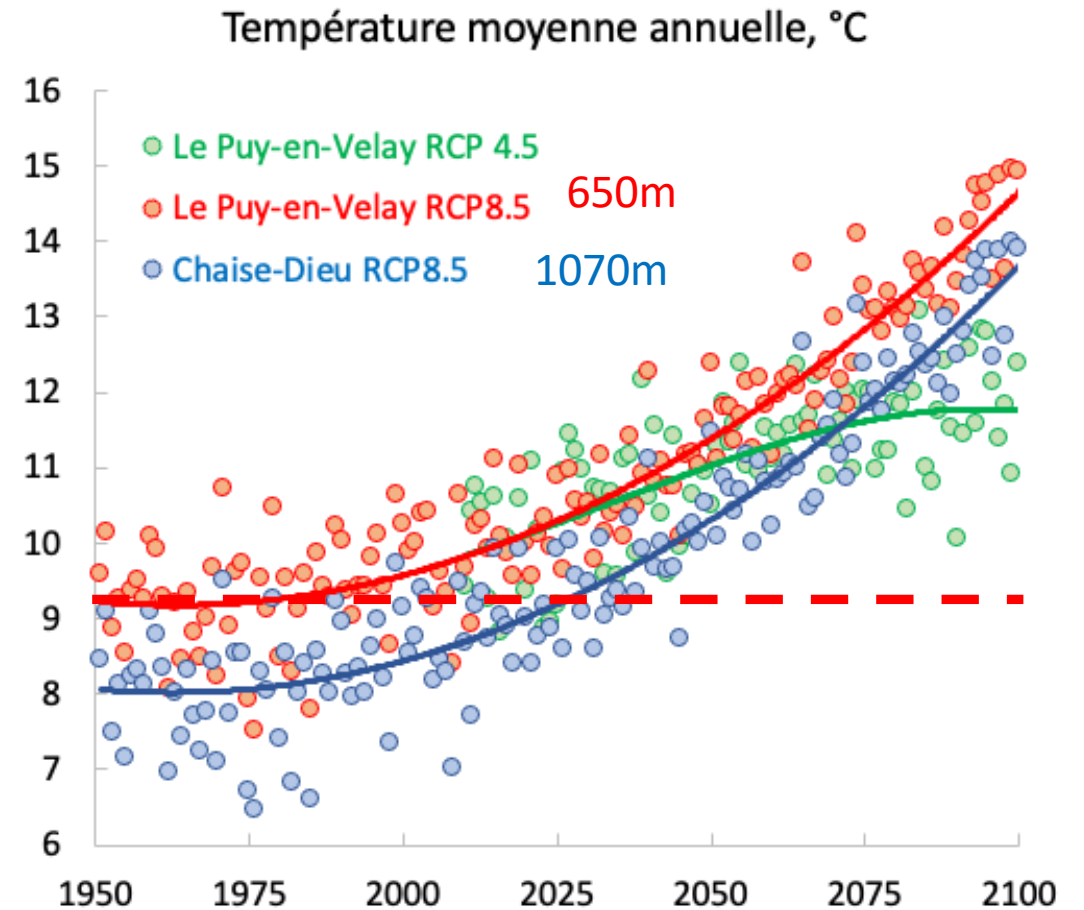
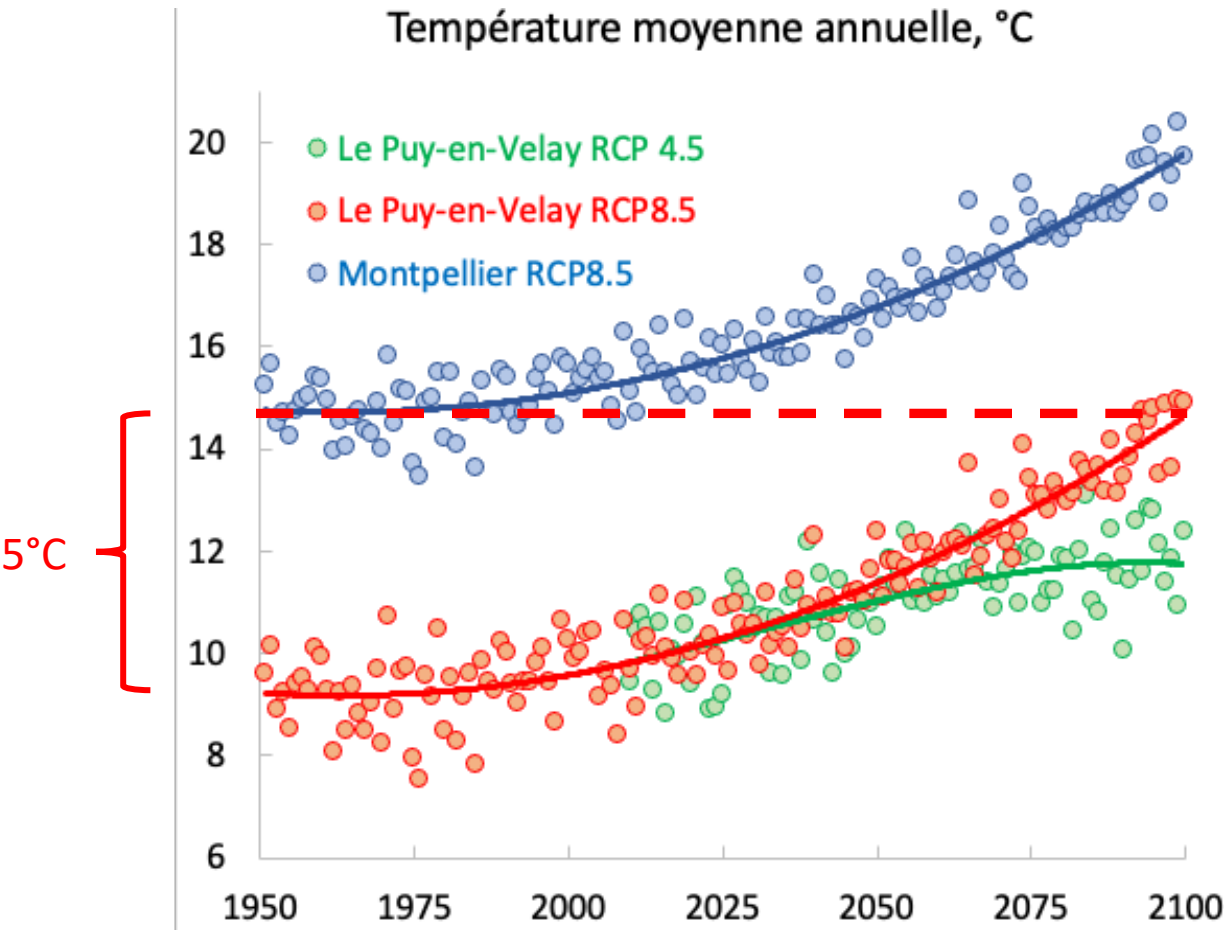
Sapin



Chêne

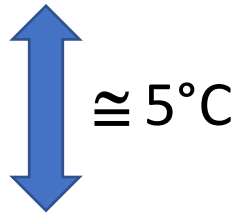
Hêtre

Le changement climatique en Haute-Loire

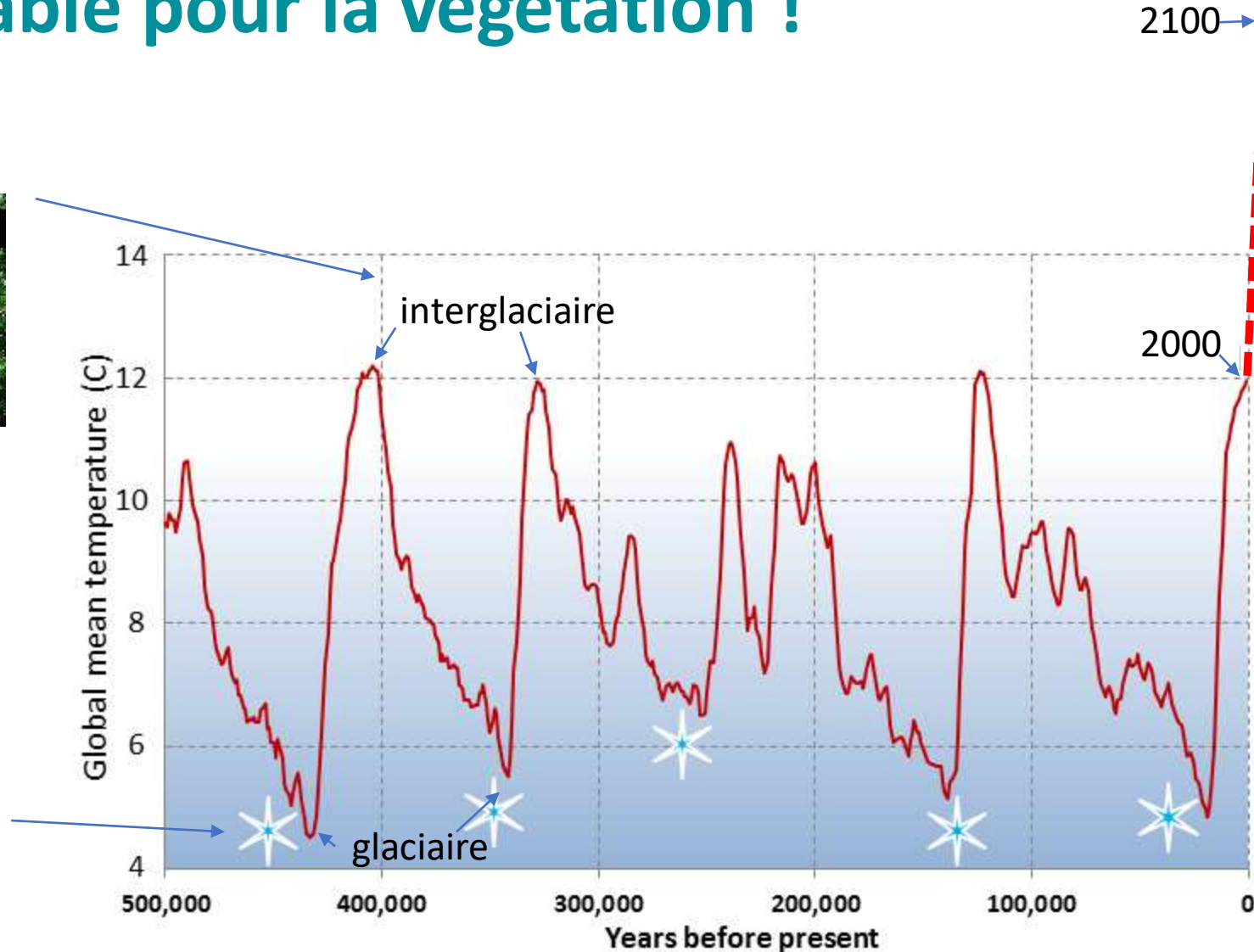


+ 5°C de température moyenne: une variation considérable pour la végétation !

Tempéré



Tundra



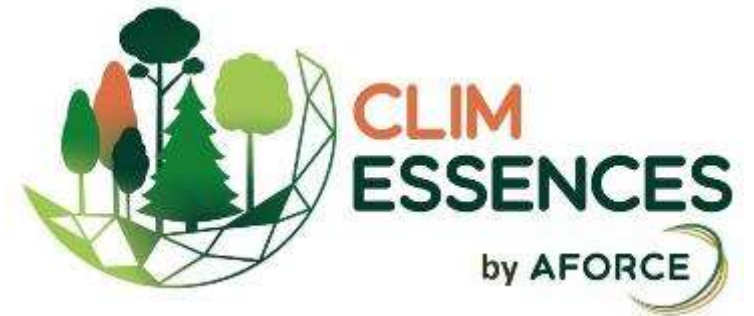
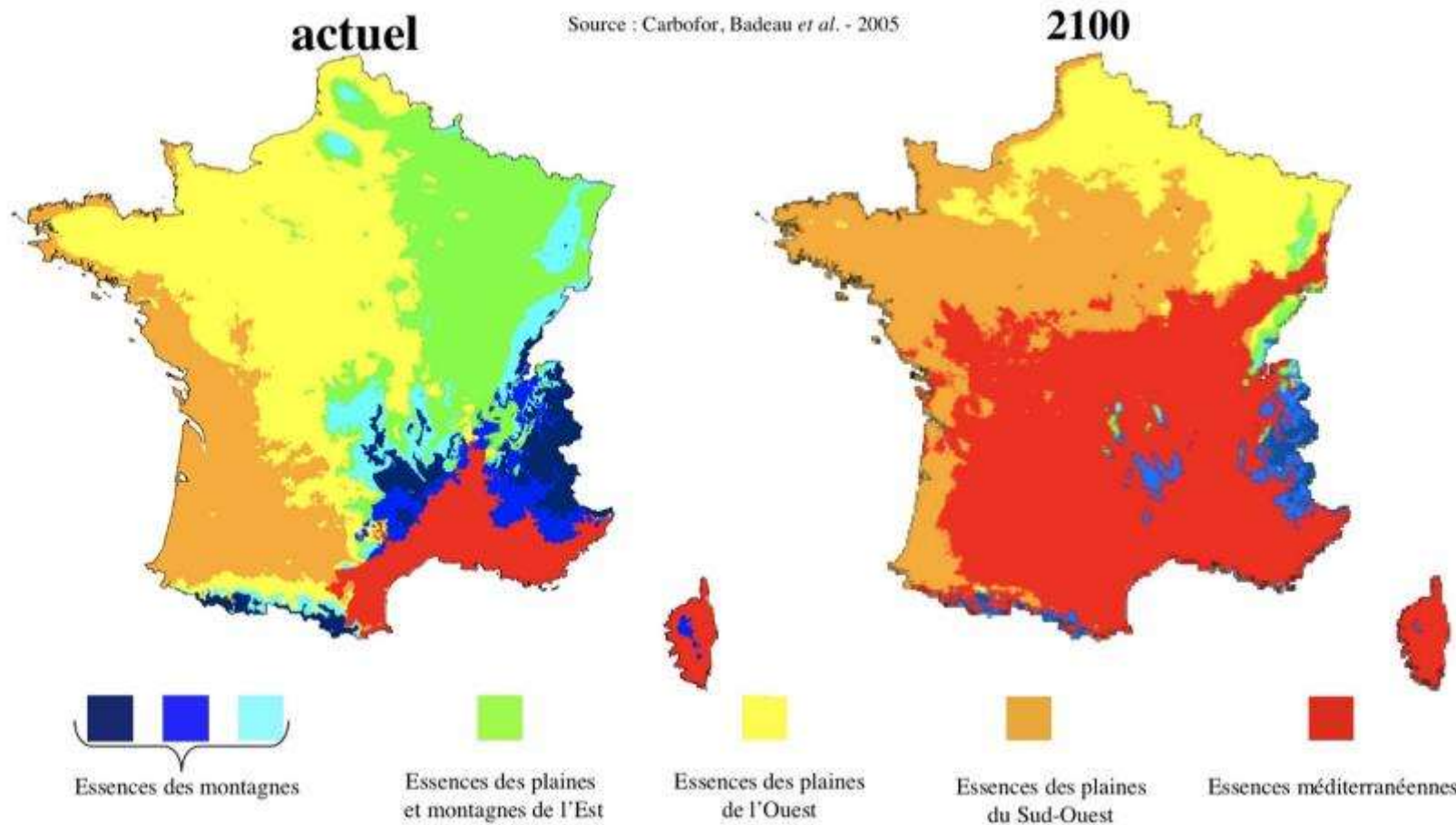
5°C $\approx$

Variation de température prévue pour les 100 prochaines années (RCP8.5)

5°C $\approx$

Variation de température observée depuis les 10 000 dernières années

Réponse au 1^{er} ordre : Modèles de “niches écologiques”

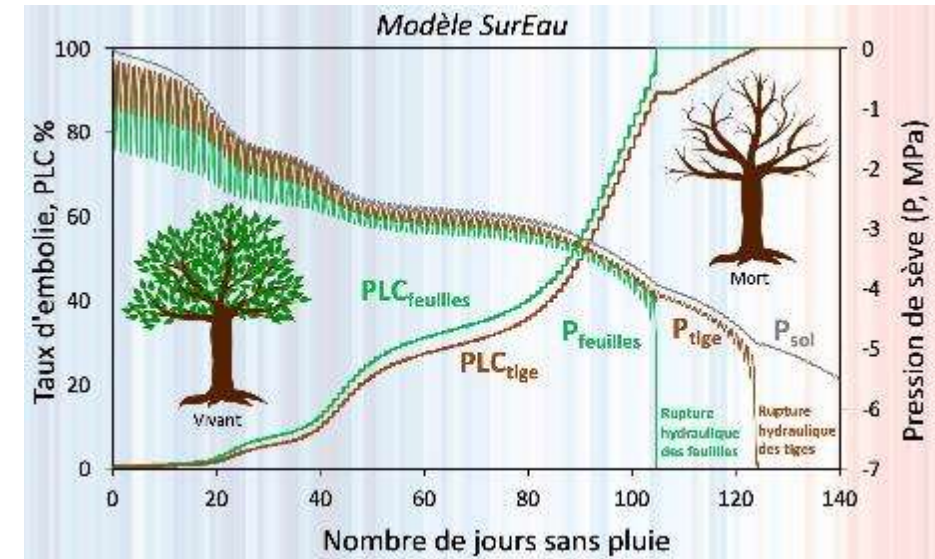
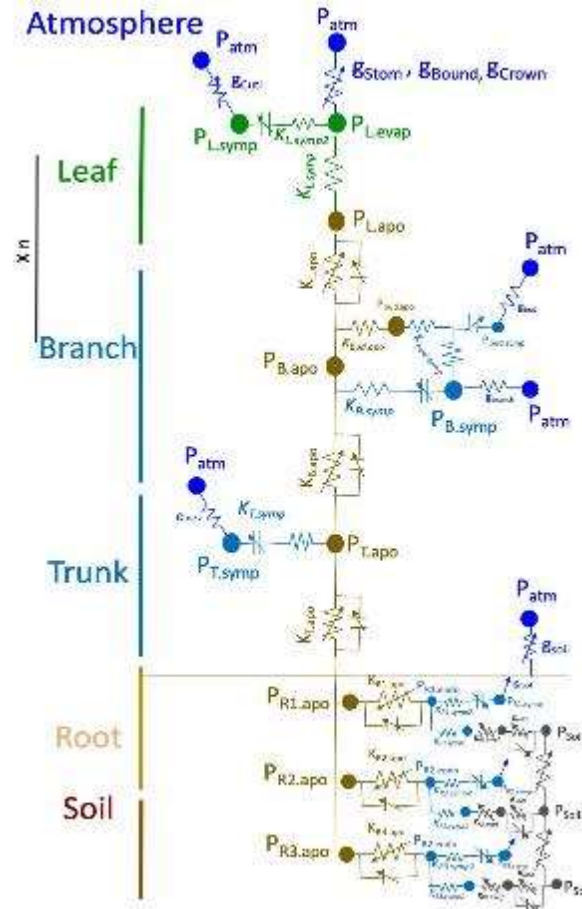
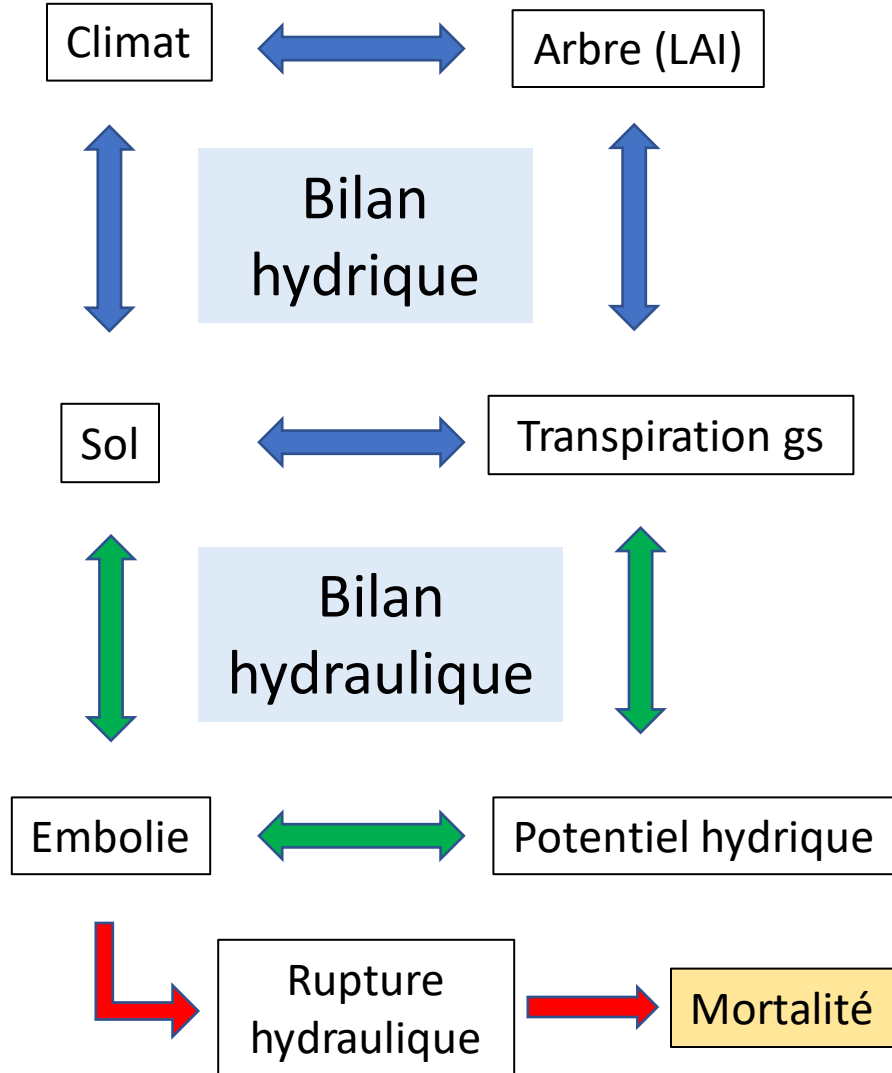


Ne prennent pas en compte :

- Les capacités d'acclimatation et d'adaptation
- Les capacités de migration
- Aires potentielles *versus* réalisées

➔ Vers des modèles de fonctionnement plus mécanistes à base de processus physiologiques

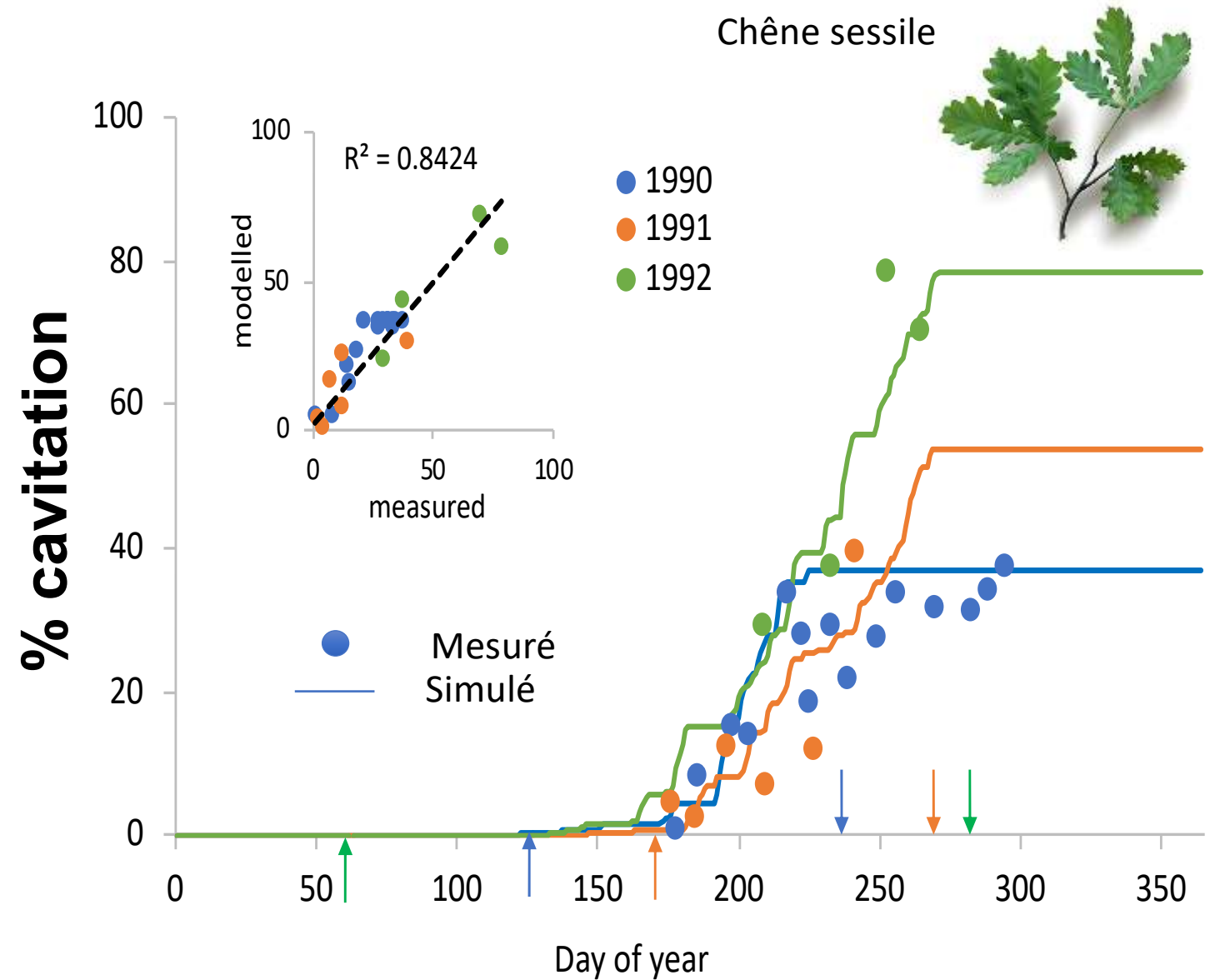
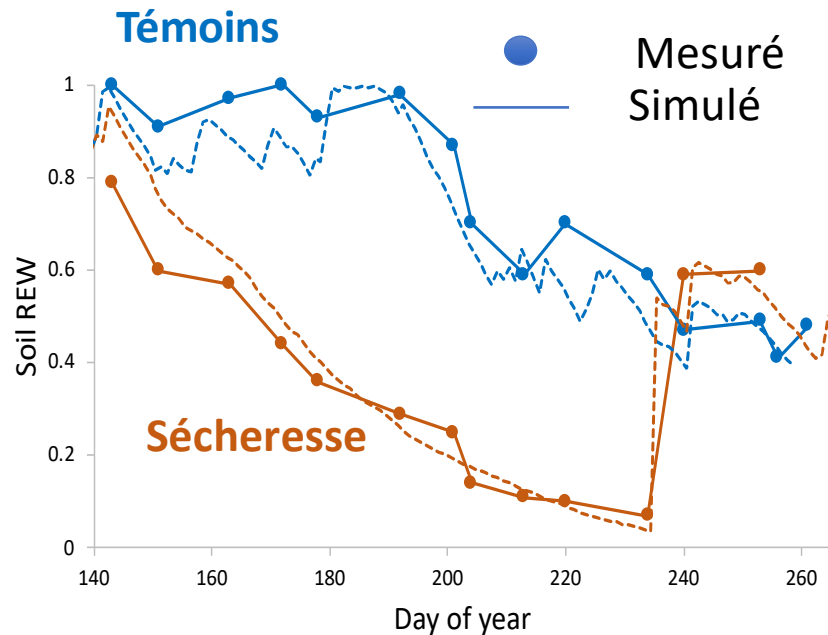
SurEau: modèle physiologique de fonctionnement hydrique et hydraulique de l'arbre



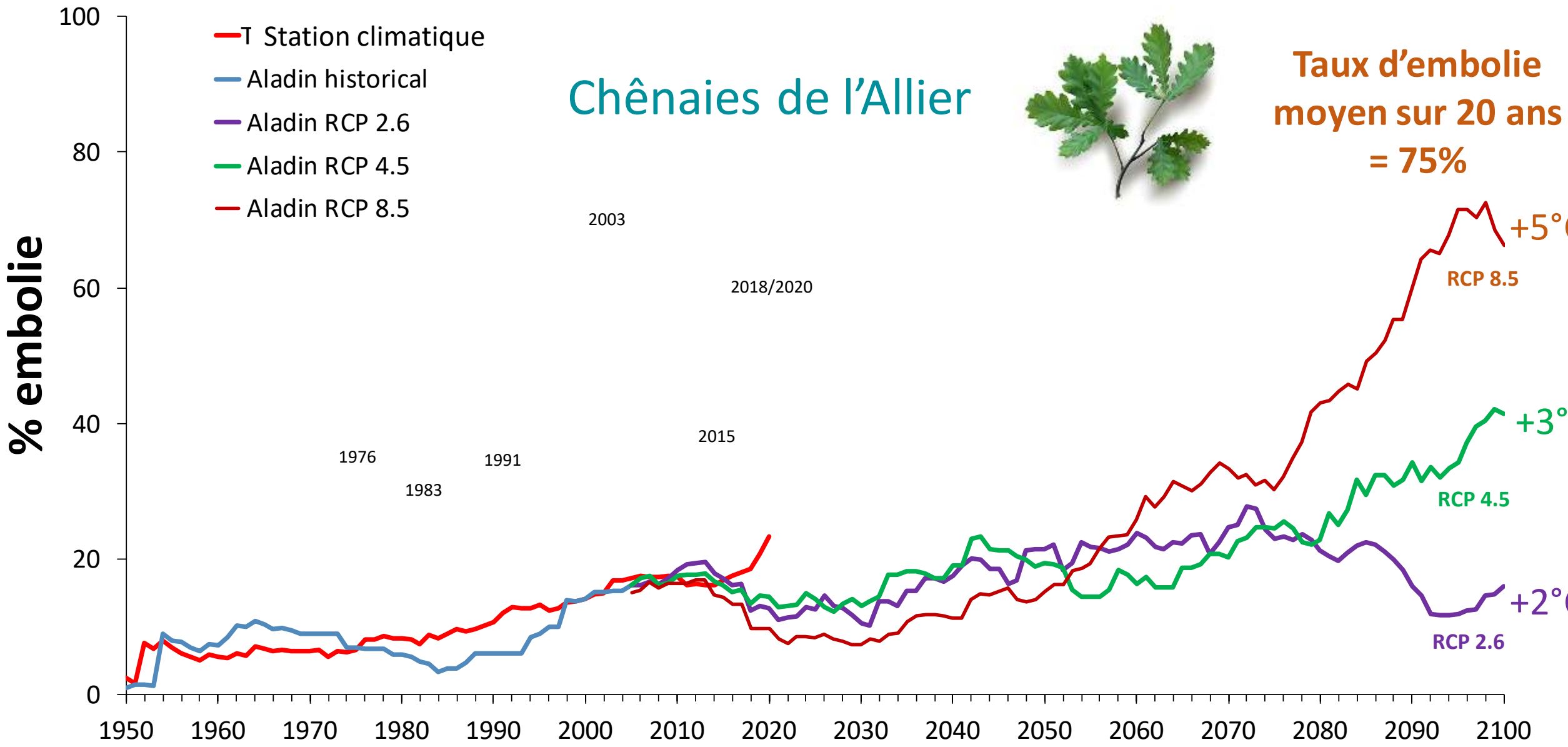
Validation expérimentale de la prédiction de la cavitation



INRAE Nancy



Prévision du risque de cavitation selon différents scénarios climatiques



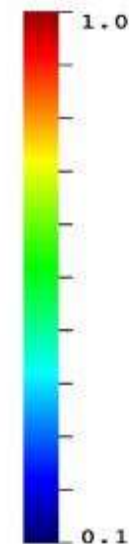
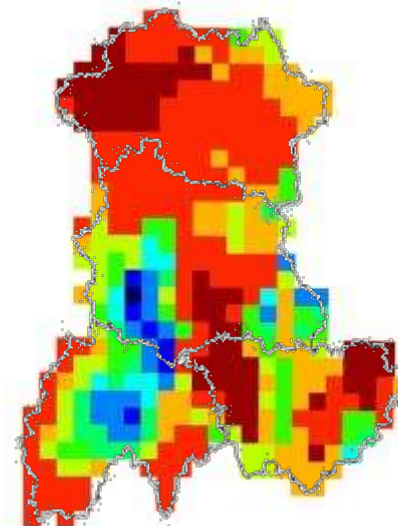
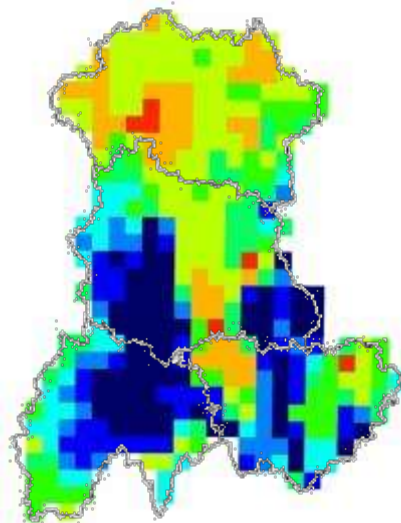
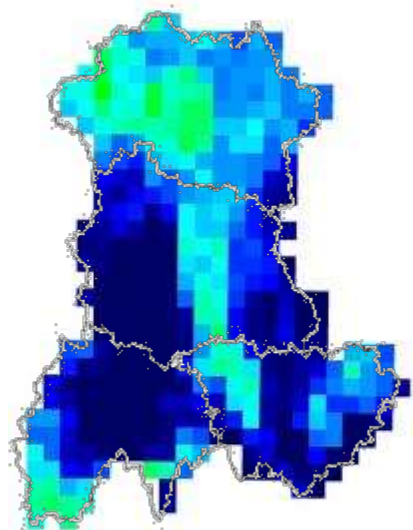
Prévision du risque de mortalité du Sapin en Auvergne

2000

2100 RCP2.6 +2°C

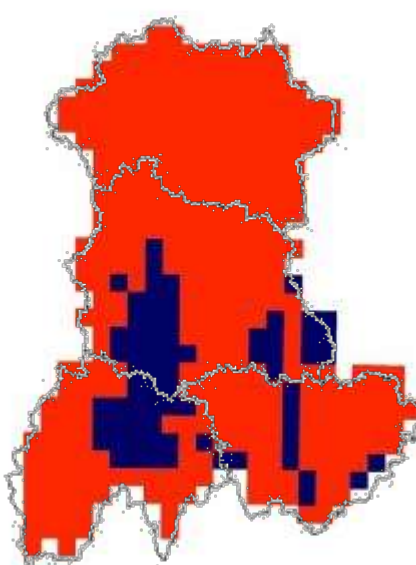
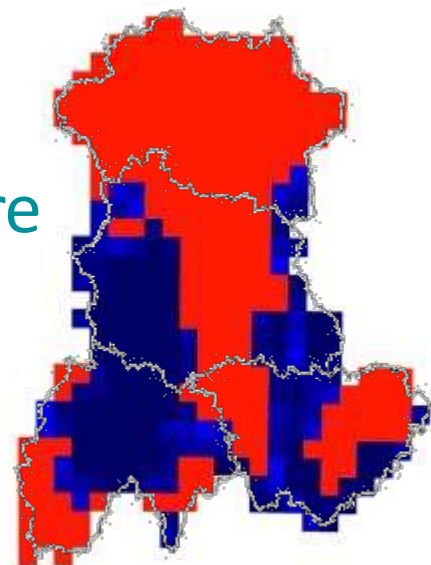
2100 RCP8.5 +5°C

Probabilité
Embolie > 50%



Aire compatible
avec la sylviculture
du Sapin

Zone compatible
Zone non compatible

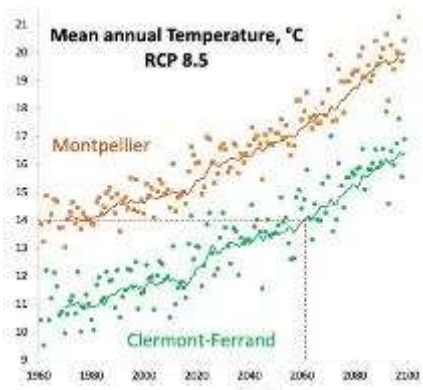


4) Quelles capacités de réponse des arbres au changement climatique ?

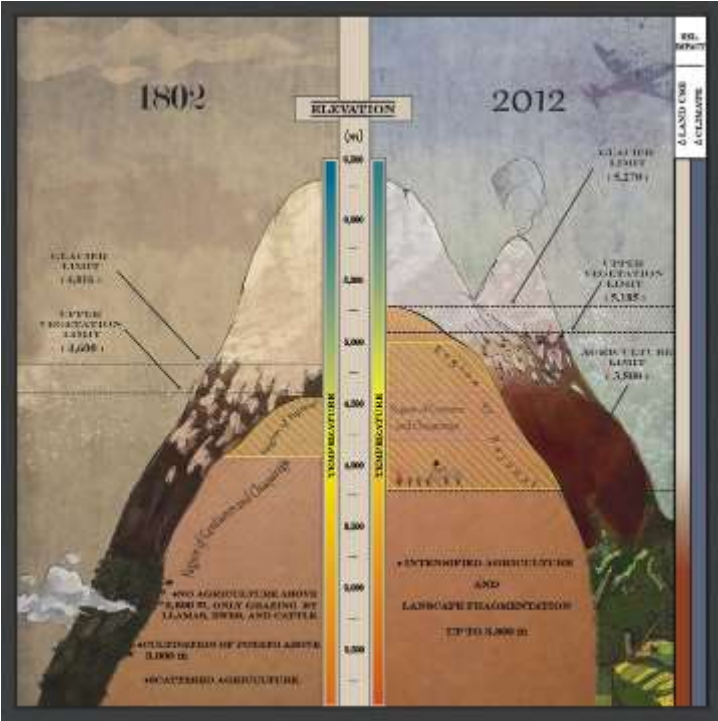
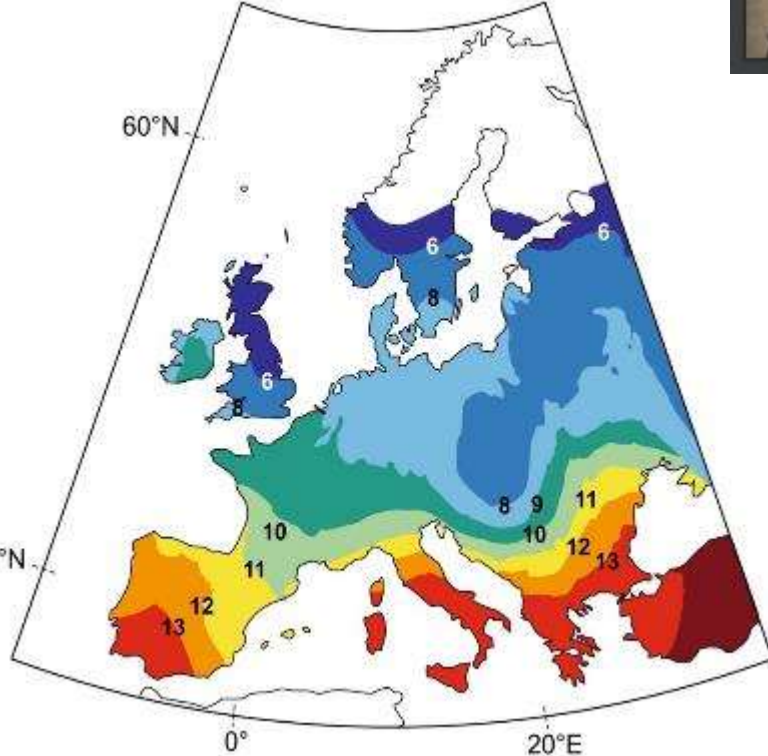
- Migration ?
- Adaptation ?
- Acclimatation ?



Migration naturelle



300 Km en 100 ans



Remontée de la végétation dans les Andes (von Humboldt) Morueta-Holmes et al 2015

Migration du Chêne sessile depuis la dernière glaciation Kremer & Hipp 2019

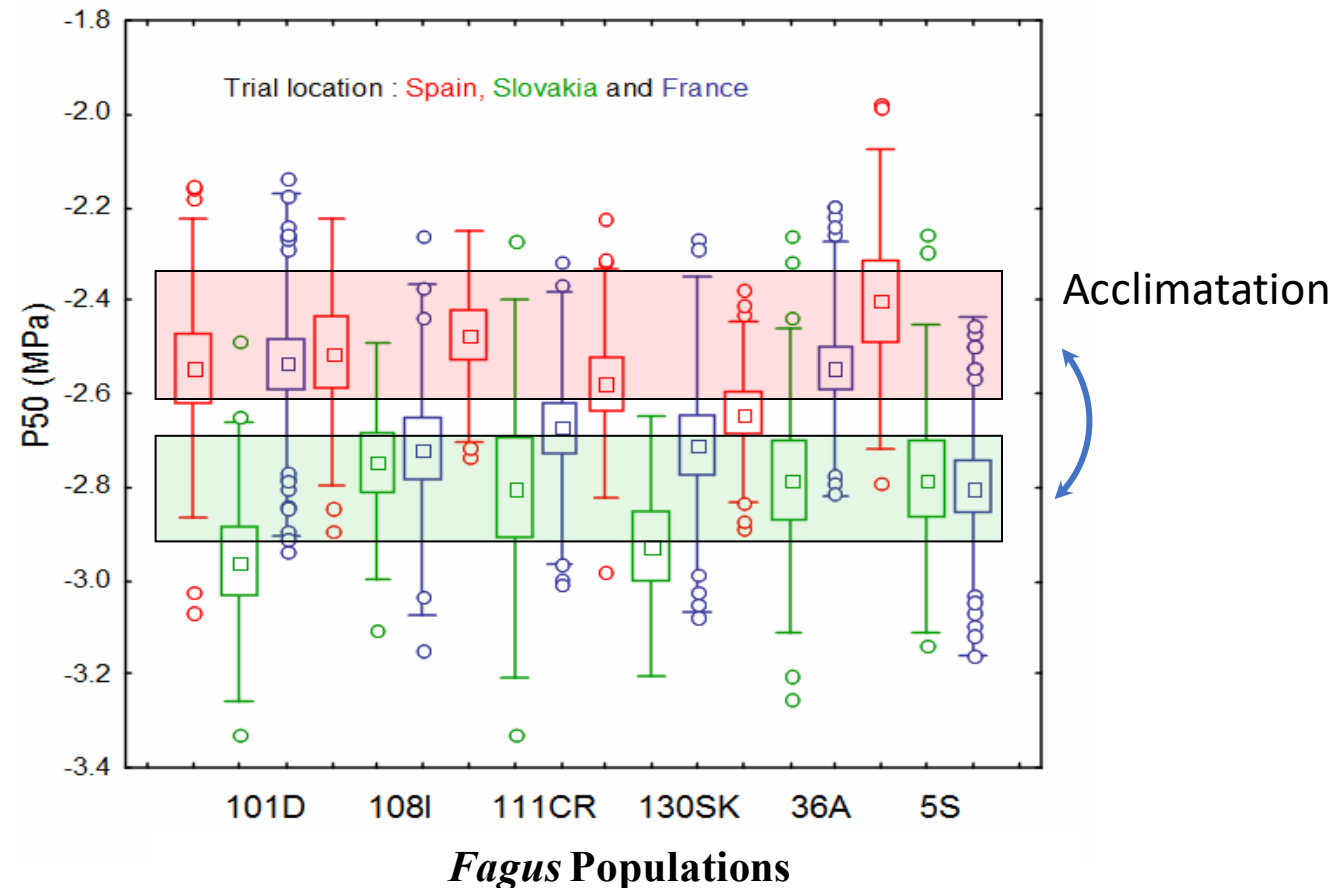
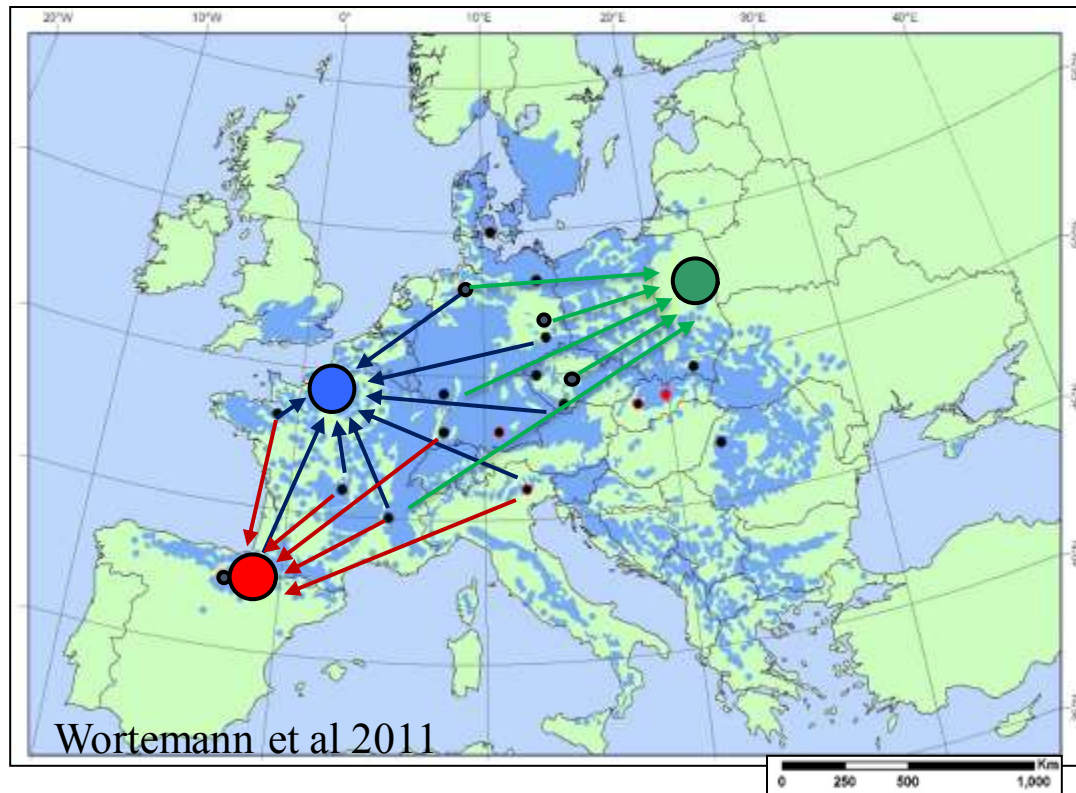
Vitesse m/an	Arbres	Niche climatique
Latitude	300	3000
Altitude	1-3	10

Le déplacement de la niche climatique des arbres est ~ 10 fois supérieur à leur capacité de migration naturelle

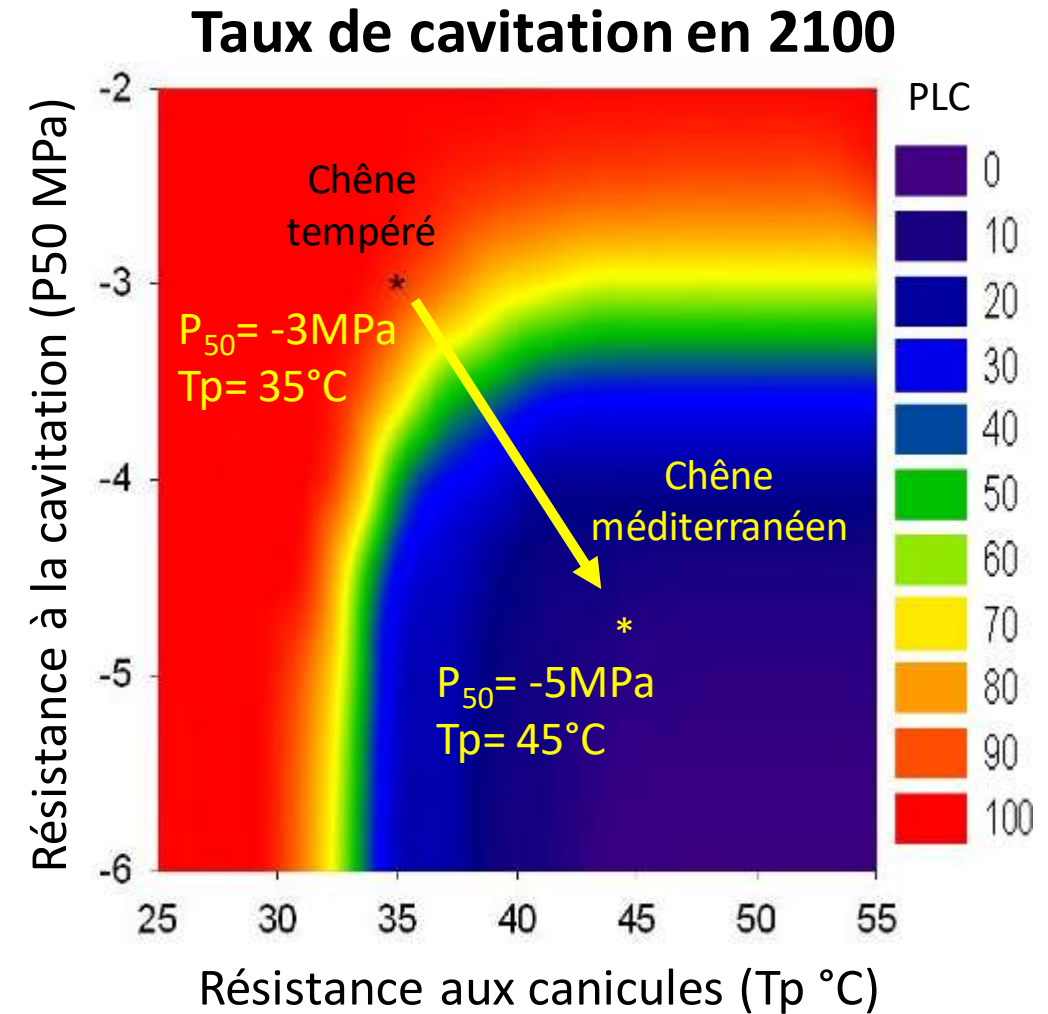
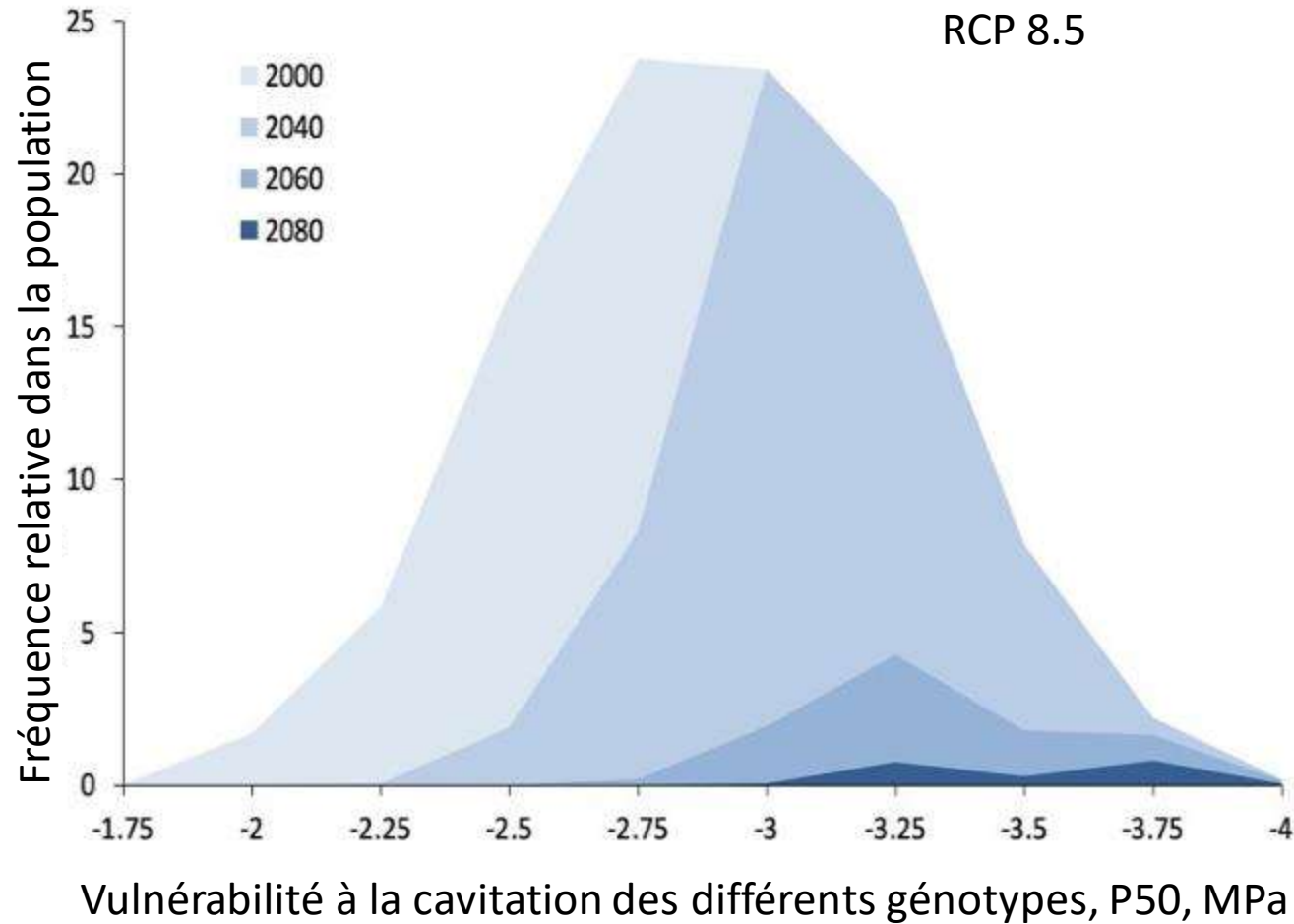
➔ Migration assistée

Adaptation/acclimatation : Peu de variabilité intra-spécifique des traits de résistance à la sécheresse des arbres

Mesures en plantations comparatives
Hêtre, Pin maritime, Pin noir, Douglas, Abies etc..



Peut-on miser sur la variabilité génétique naturelle ?



Erosion de la diversité génétique. Survie des génotypes les plus résistants
Comment les identifier ?



Pour résumer

- Dégradation globale de l'état sanitaire des forêts
- La rupture hydraulique du xylème est un processus clé de la survie aux sécheresses caniculaires. Les marges de sécurité hydrauliques des espèces sont faibles.
- Avec le réchauffement climatique les essences vont rapidement se retrouver en dehors de leur niche climatique.

→ Vers un risque accru de rupture hydraulique (mortalité)

- Les capacités de migration naturelle, d'adaptation (variabilité génétique) et d'acclimatation (plasticité phénotypique) semblent faibles au regard de l'ampleur du changement climatique

→ Vers un renouvellement des espèces

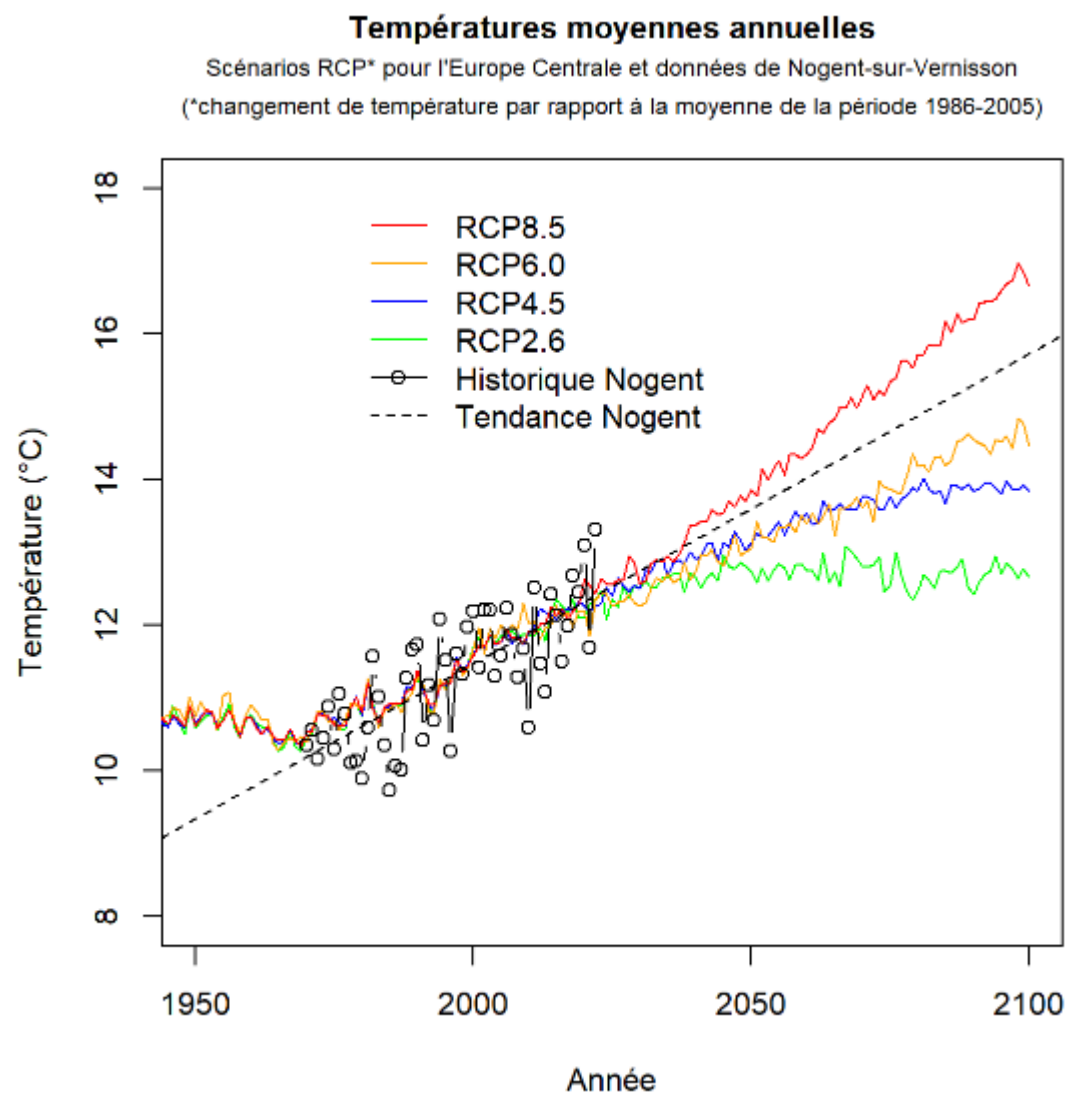
→ Vers un renouvellement des pratiques forestières

Changement climatique, microclimat, bilan hydrique et sylviculture

Philippe BALANDIER, UMR PIAF Clermont-Ferrand



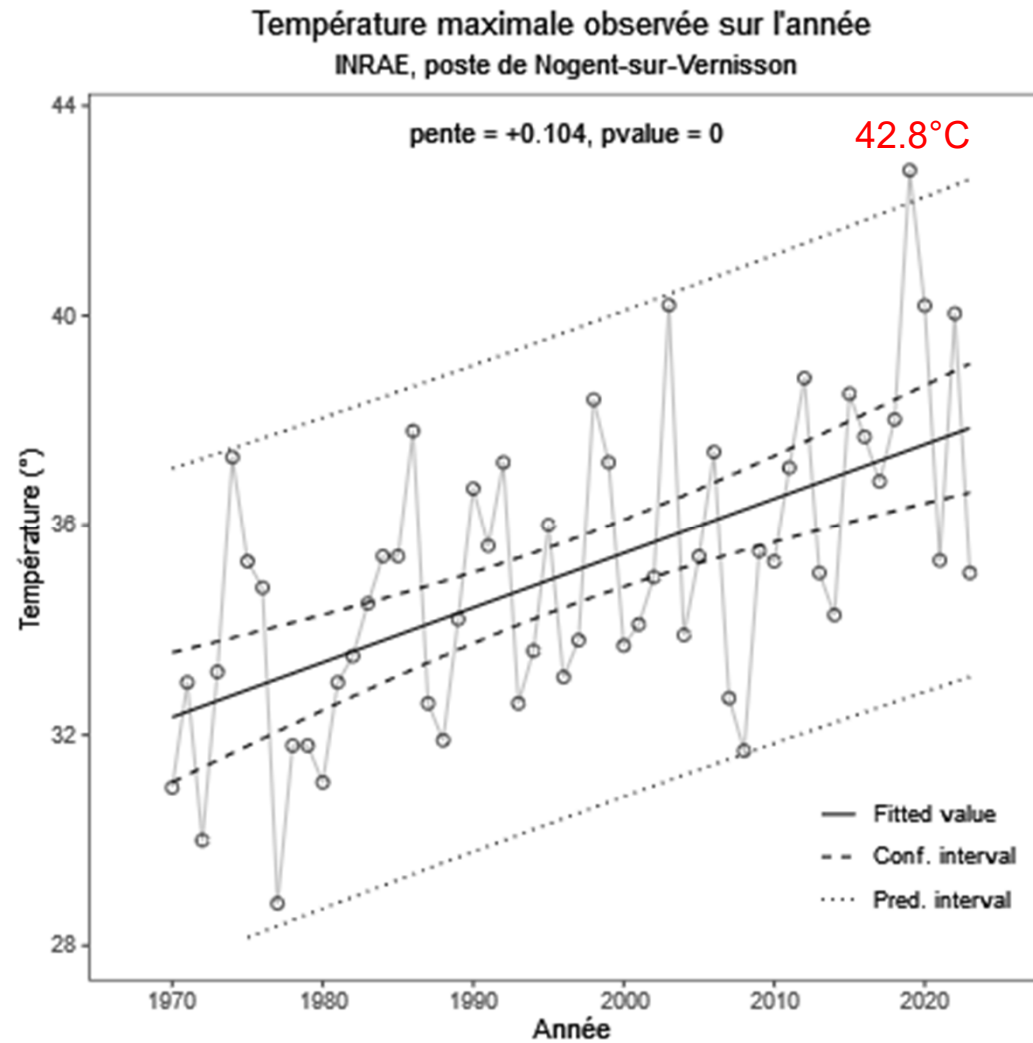
Evolution des températures moyennes annuelles (Loiret)



T. Pérot, 2023

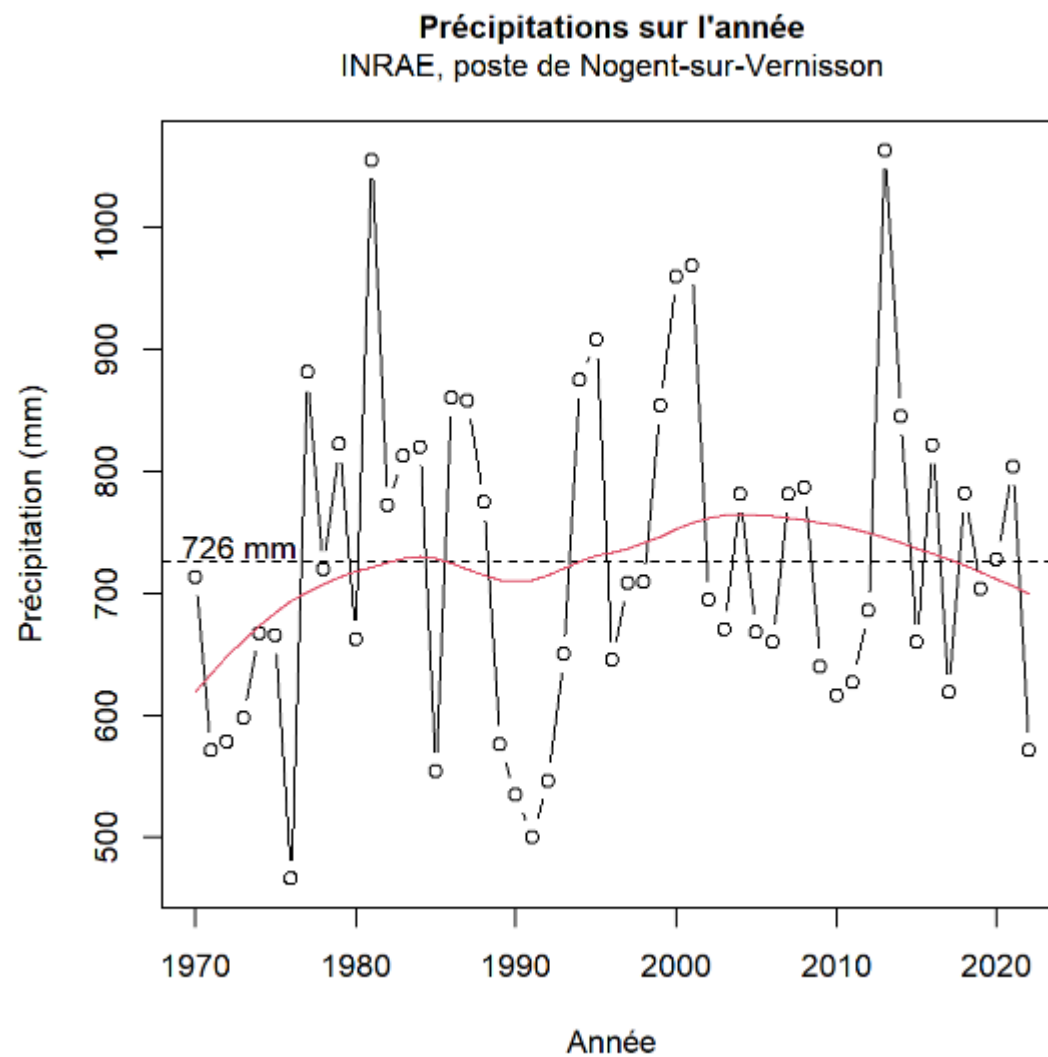
● Evolution des maximorums (Loiret)

La température maximale observée sur l'année augmente de 1°C tous les 10 ans



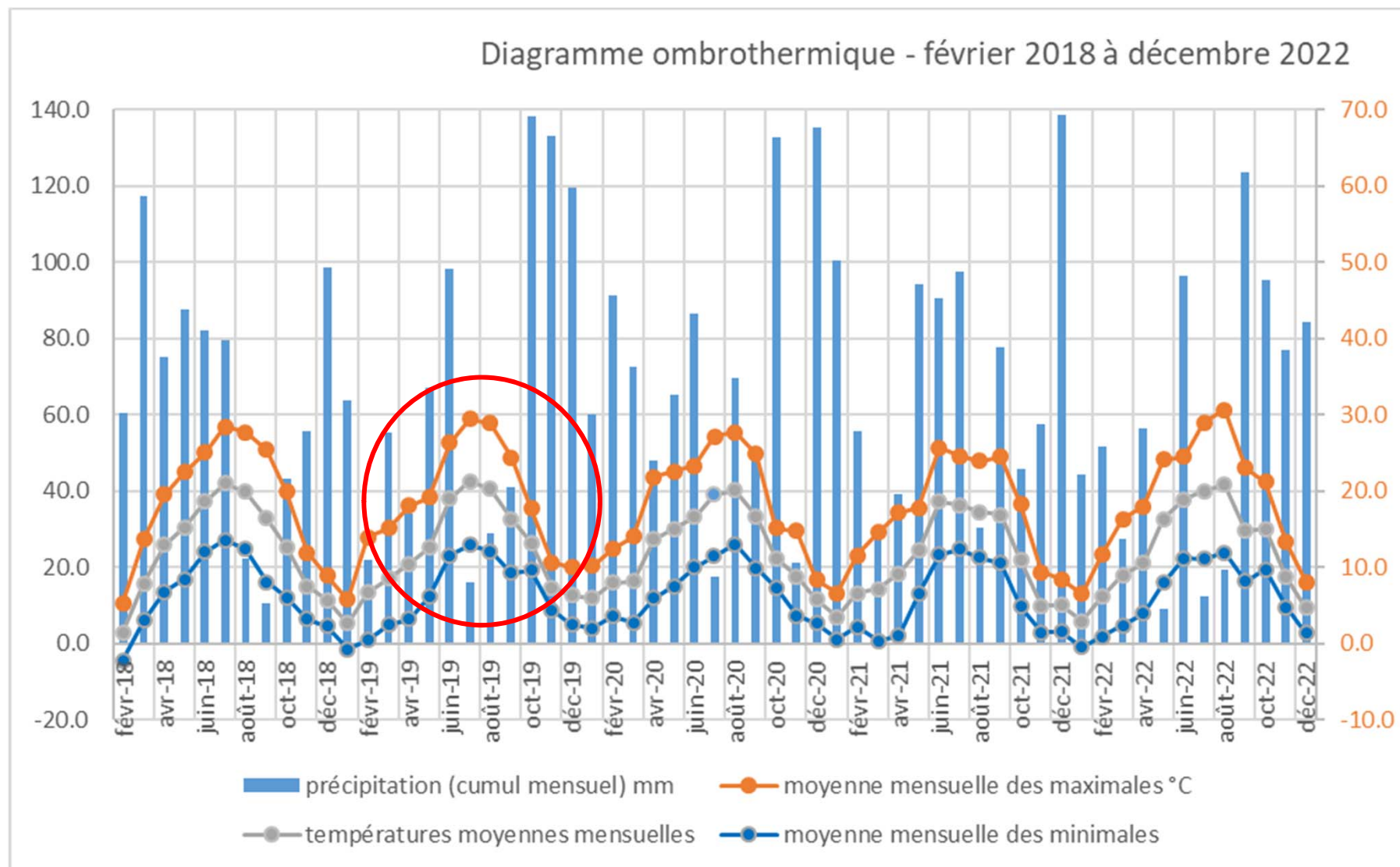
T. Pérot, 2024

● Evolution des précipitations annuelles (Loiret)

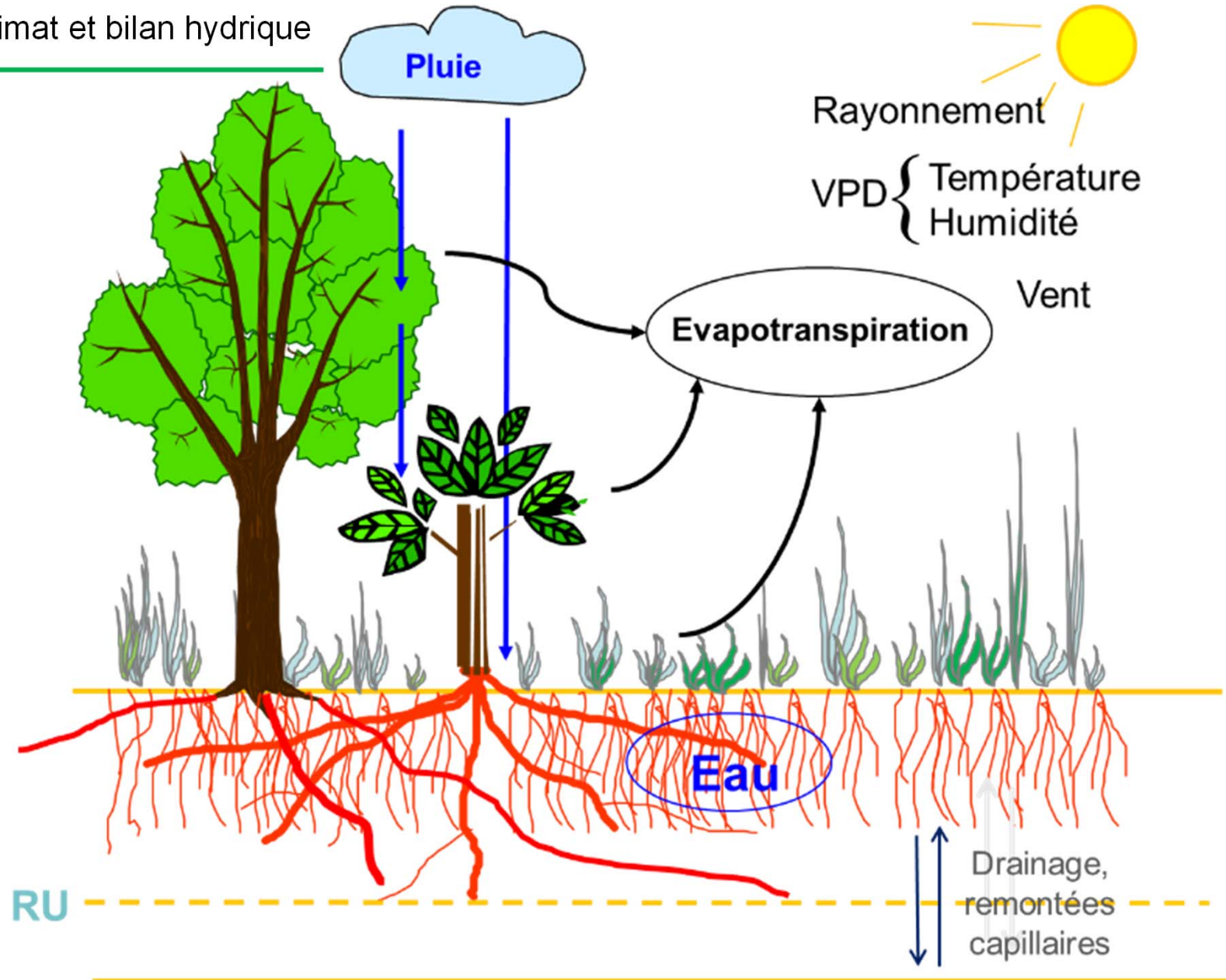


T. Pérot, 2023

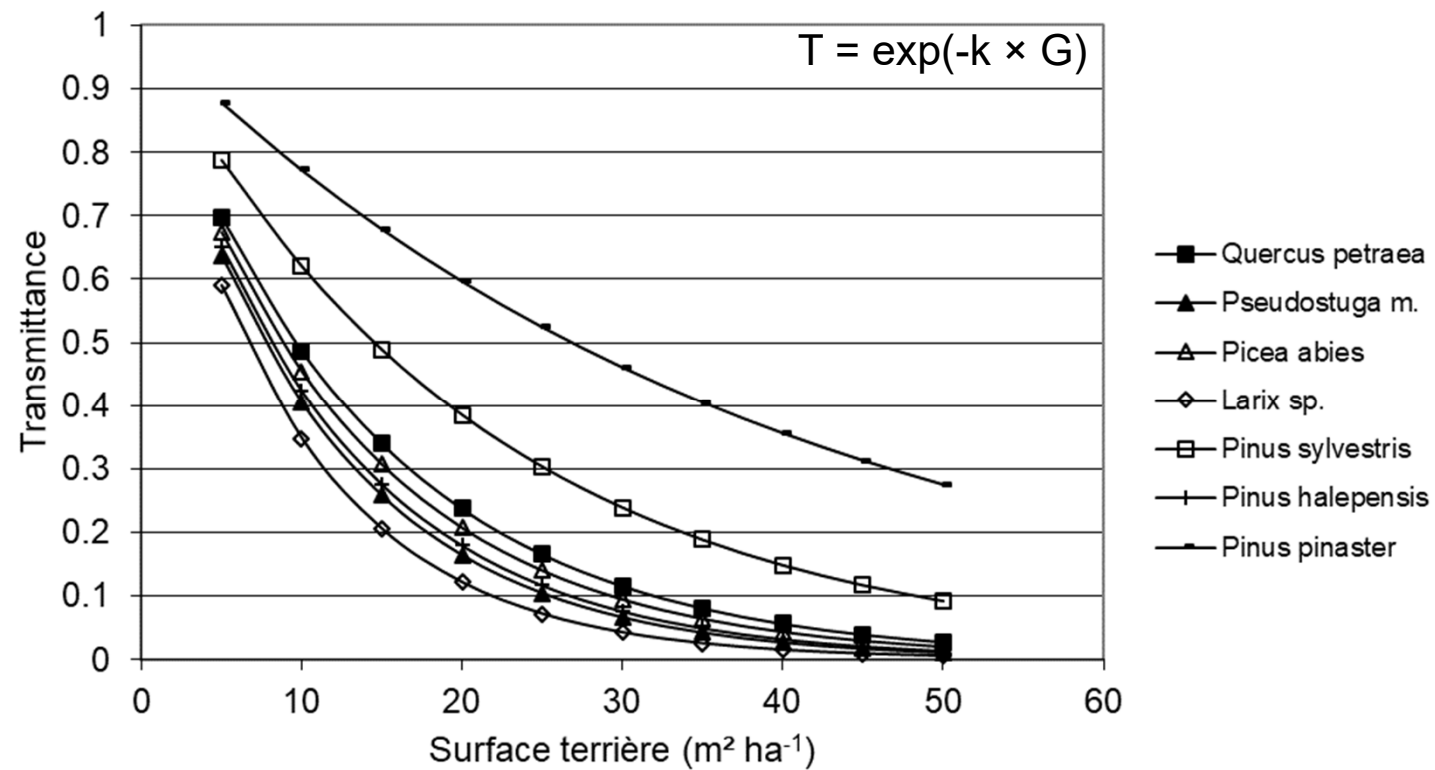
Vers un climat Méditerranéen (Vierzon)



● Microclimat et bilan hydrique



● Microclimat : lumière



Microclimat : température

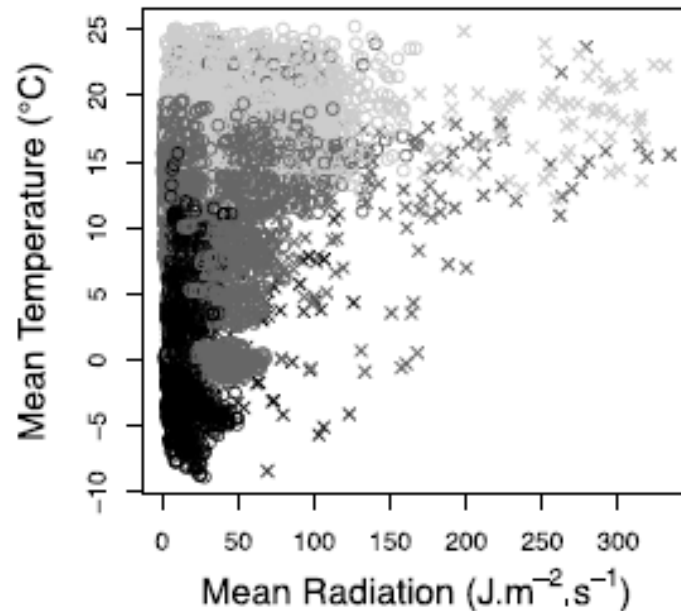
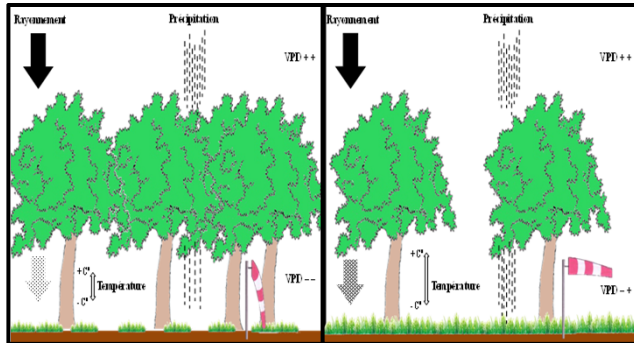


Fig. 3. Daily mean air temperature (°C) with respect to daily mean radiation (J.m⁻².s⁻¹) measured in mixed temperate oak-pine forest stand (understorey, o) and open field conditions (x) at 200 cm from May 2009 to March 2010. Black = winter (December, January, February), dark grey = intermediate months (May, September, October, November, March), light grey = summer (June, July, August).



La température dans le peuplement est proportionnelle à la lumière transmise mais selon une relation complexe

Microclimat : température



→ Mais avec parfois des effets inverses, la masse d'air restant plus chaude plus longtemps sous couvert

→ 42°C mesurés en juin 2019 sous le couvert de la forêt d'Orléans ...

→ 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



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^{a,*}, Xavier Gendré^b, Marc Saudreau^c, Vincent Seigner^d, Philippe Balandier^d

^a INRA, UMR AGIR, 24 Chemin de Borde Rouge, CS 52627, F-31326 Castanet Tolosan Cedex, France

^b IMT, UMR CNRS 5219, Université Paul Sabatier, Route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex, France

^c INRA, UMR PAF, 5 Chemin de Beaulieu, F-63039 Clermont-Ferrand Cedex 2, France

^d IRSTEA, Unité de Recherche sur les Ecosystèmes Forestiers (ERNO), Domaine des Barres, F-45290 Nogent-sur-Vernisson, France

ARTICLE INFO

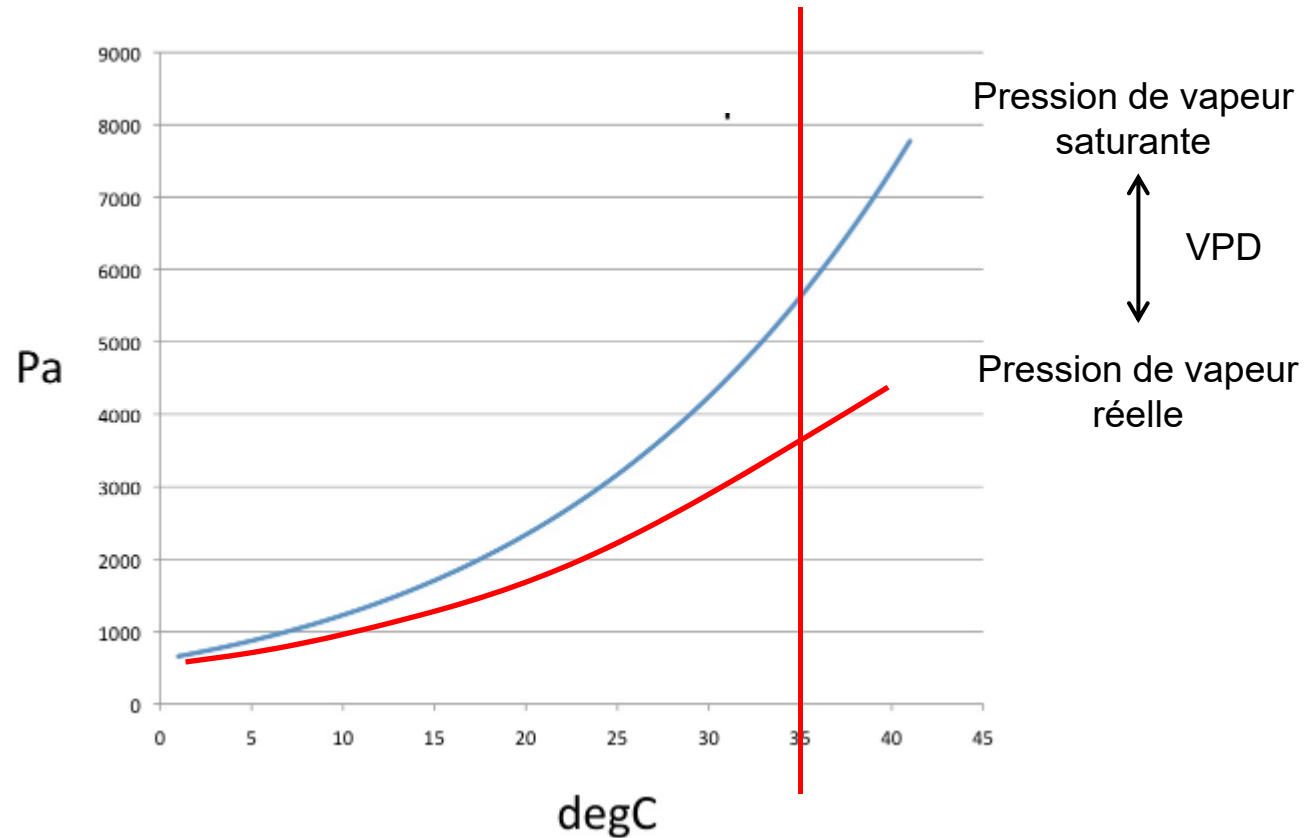
Article history:
Received 20 July 2016
Received in revised form
28 November 2016
Accepted 5 February 2017

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 understorey 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

● Microclimat : l'augmentation non linéaire du VPD



Pouvoir desséchant de l'air (VPD, déficit de pression en vapeur d'eau) en fonction de la température (°C)

● Les températures en question

→ 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)

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

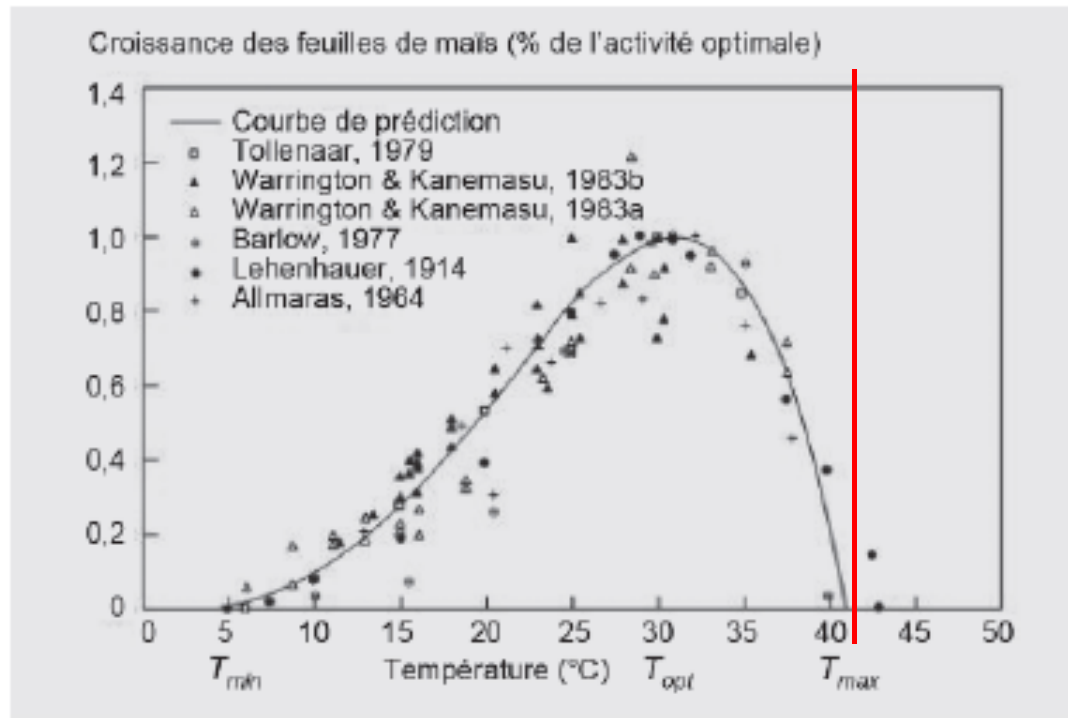
Handling Editor: Emily Lines

SECTIONS PDF TOOLS SHARE

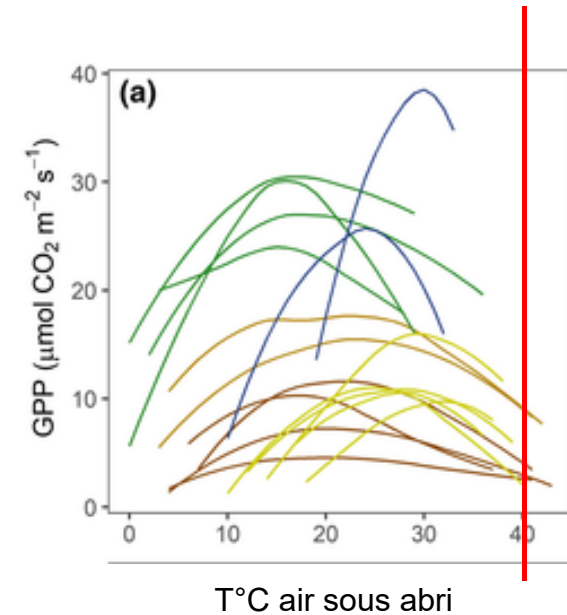
Abstract

La contrainte thermique sur les relations biochimiques

- 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



Production primaire pour différents
écosystèmes **australien**s

Bennet et al., Global Change Biology, 2021

Similar patterns of leaf temperatures and thermal acclimation to warming in temperate and tropical tree canopies

K Y Crous , A W Cheesman, K Middleby, E I E Rogers, A Wujeska-Klaue, A Y M Bouet, D S Ellsworth, M J Liddell, L A Cernusak, C V M Barton

Tree Physiology, Volume 43, Issue 8, August 2023, Pages 1383–1399, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad054>

Published: 26 April 2023 Article history ▼

 PDF  Split View  Cite  Permissions  Share ▼

Abstract

As the global climate warms, a key question is how increased leaf temperatures will affect tree physiology and the coupling between leaf and air temperatures in forests. To explore the impact of increasing temperatures on plant performance in open air, we warmed leaves in the canopy of two mature evergreen forests, a temperate *Eucalyptus* woodland and a tropical rainforest. The leaf heaters consistently maintained leaves at a target of 4 °C above

ambient leaf temperatures. Ambient leaf temperatures (T_{leaf}) were mostly coupled to air temperatures (T_{air}), but at times, leaves could be 8–10 °C warmer than ambient air temperatures, especially in full sun. At both sites, T_{leaf} was

warmer at higher air temperatures ($T_{\text{air}} > 25$ °C), but was cooler at lower T_{air} , contrary to the ‘leaf homeothermy hypothesis’. Warmed leaves showed significantly lower stomatal conductance ($-0.05 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ or -43% across species) and net photosynthesis ($-3.91 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ or -39%), with similar rates in leaf respiration rates at a common temperature (no acclimation).

Increased canopy leaf temperatures due to future warming could reduce carbon assimilation via reduced photosynthesis in these forests, potentially weakening the land carbon sink in tropical and temperate forests.

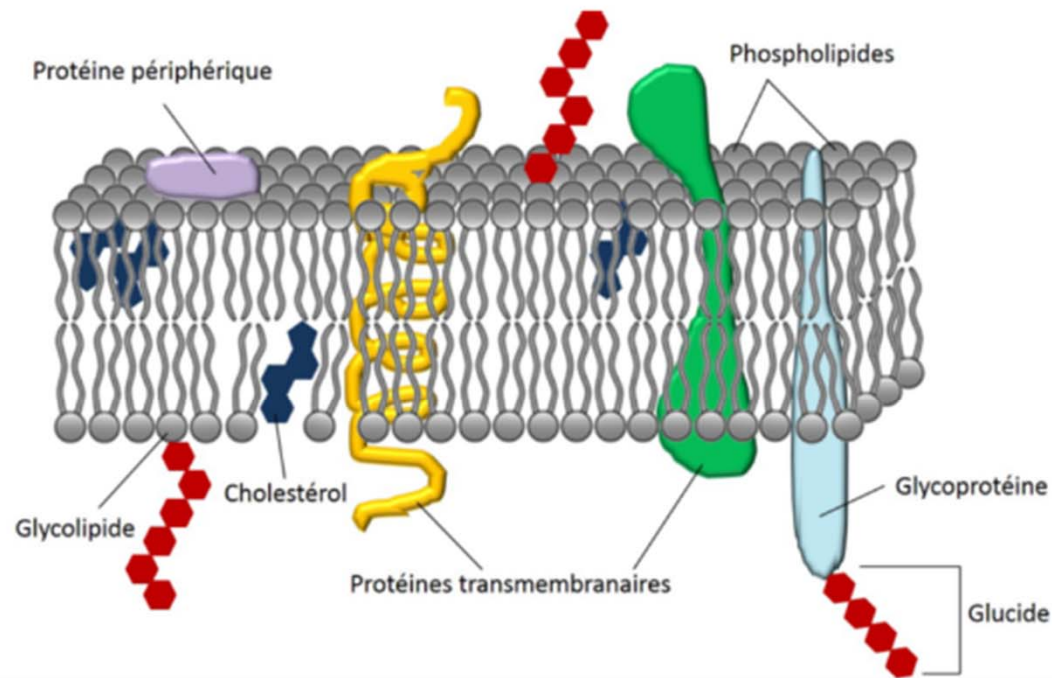
→ Une température de feuille 8 à 10°C au-dessus de celle de l’air

→ Une nette dégradation de la photosynthèse

● Température de l'air et Température d'organe

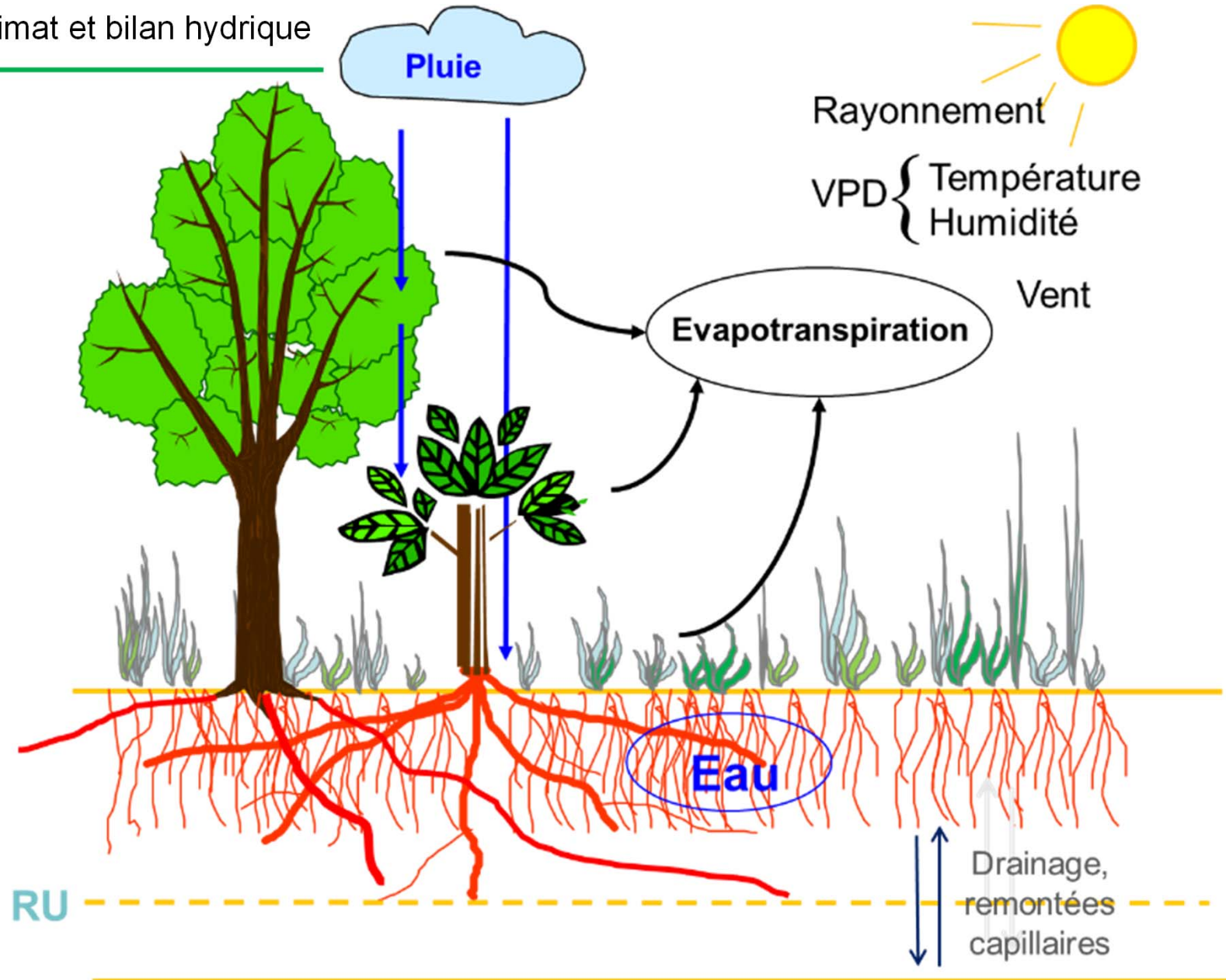
→ Au-delà d'environ 45°C, il y a déstabilisation des membranes, de la cuticule des feuilles

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



Claire François-Martin, 2016

● Microclimat et bilan hydrique



● Etude du bilan hydrique

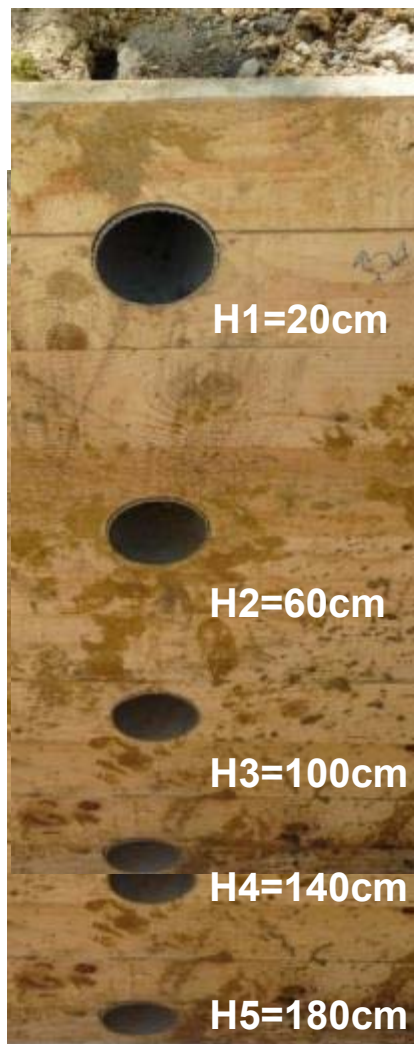
Exemple des chênaies
de l'Allier



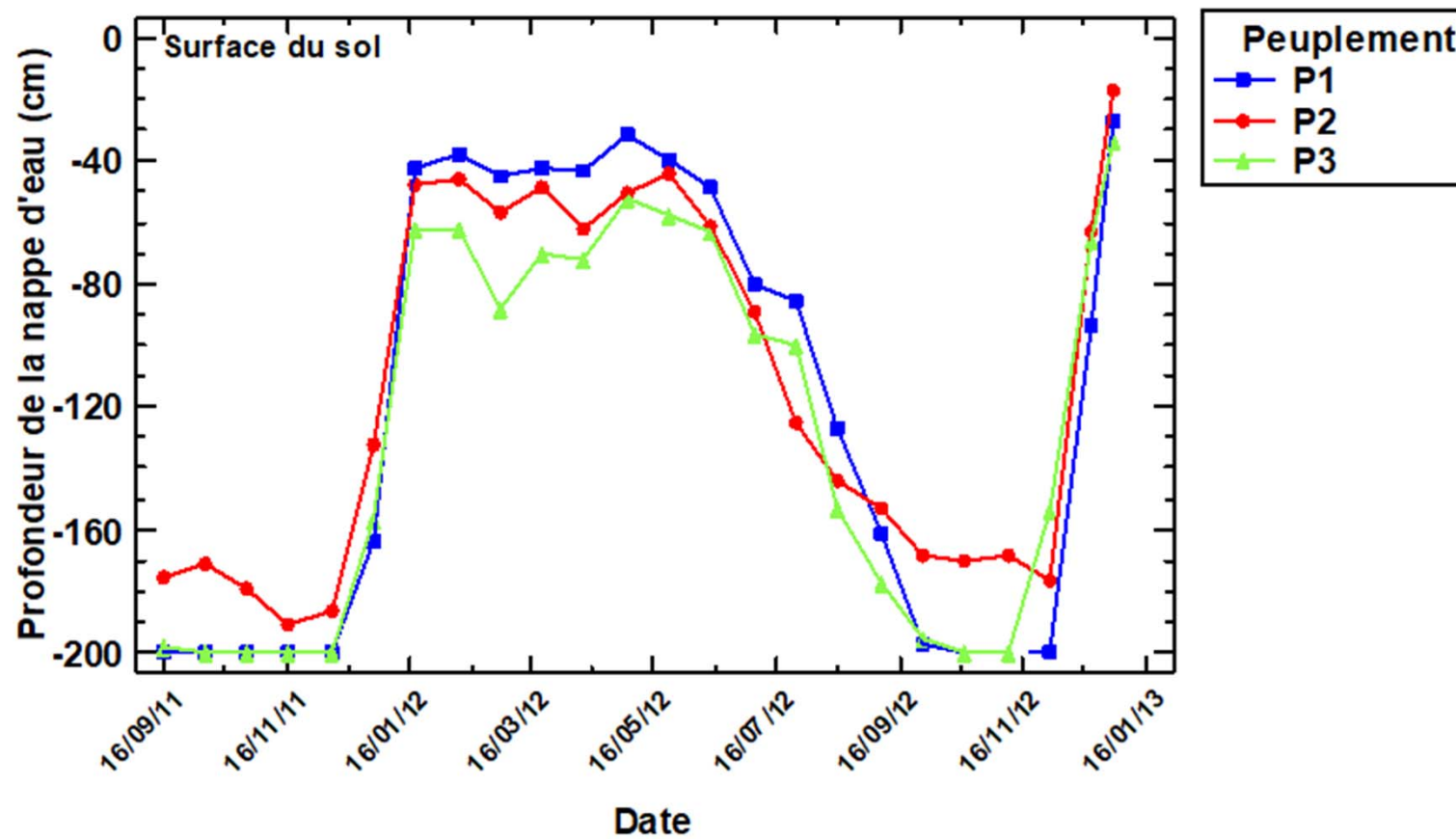
● Etude du bilan hydrique



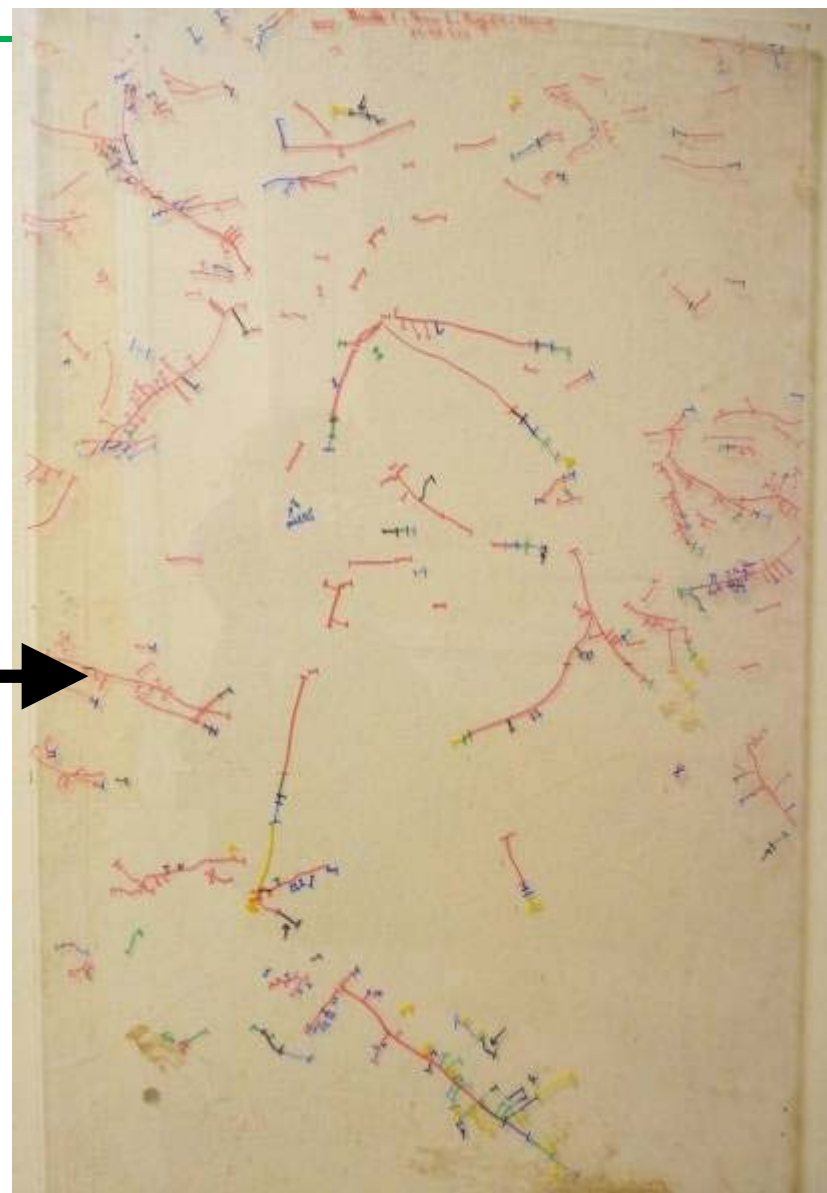
● Etude du bilan hydrique



● Régime hydrique

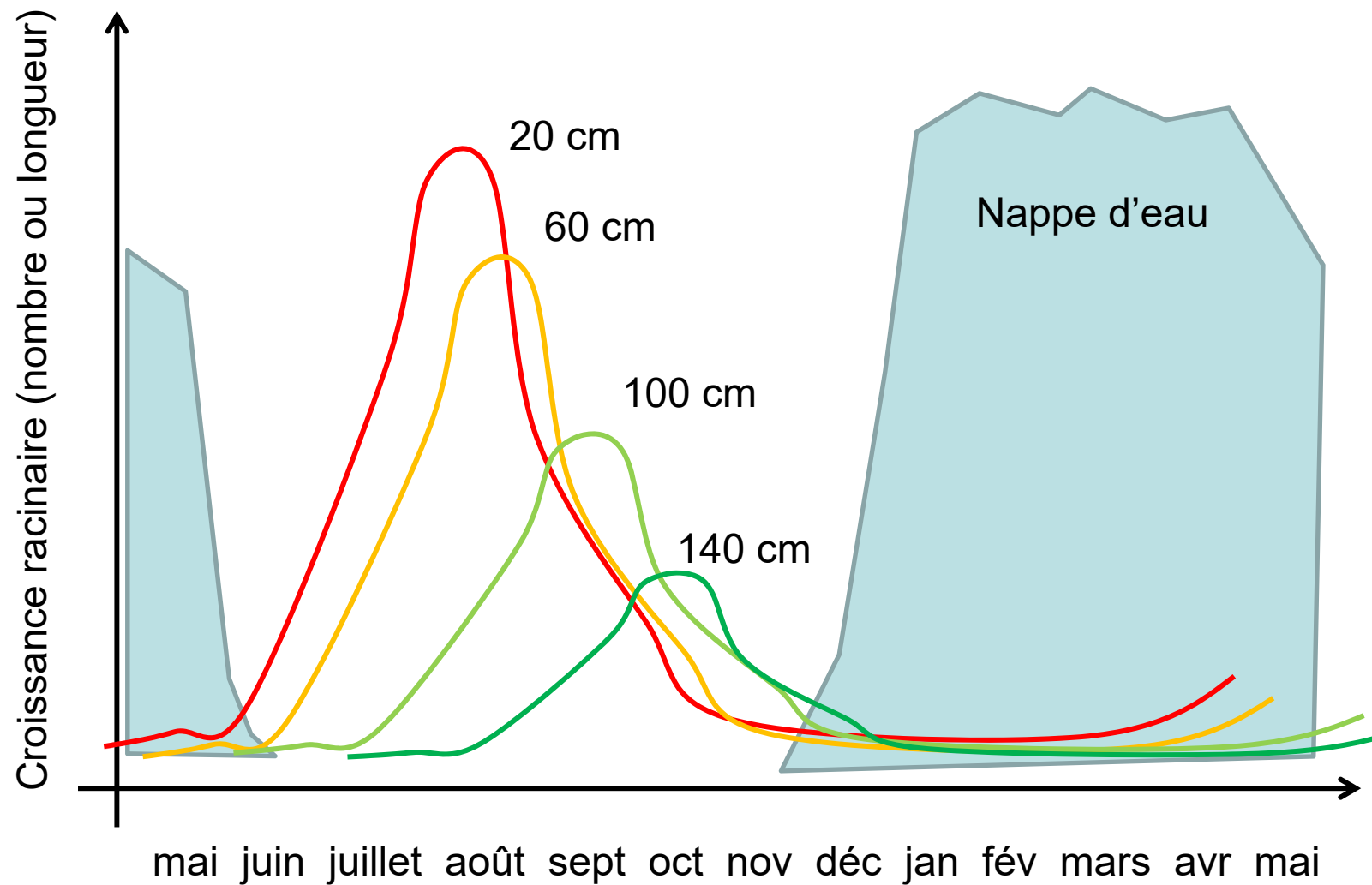


● Croissance racinaire



P. Balandier, AG Fransylva43, Le Puy, 14 juin 2024

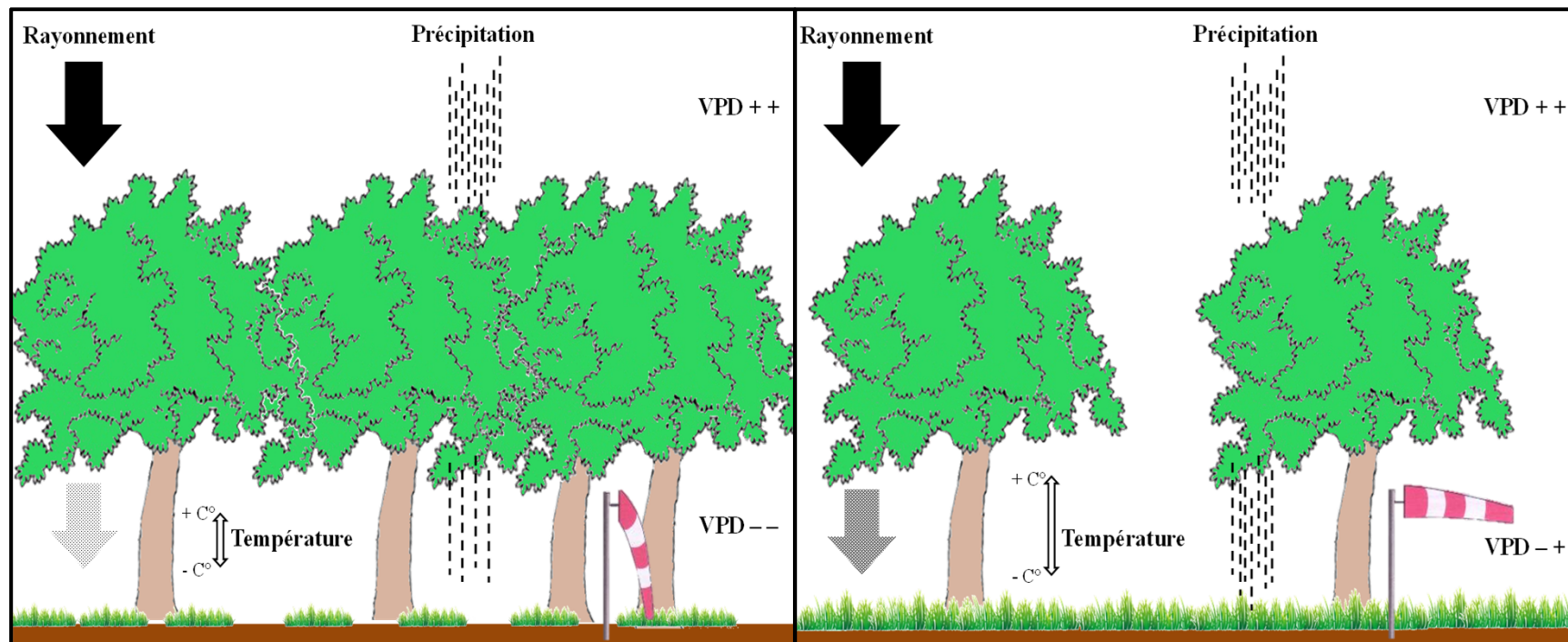
● Croissance racinaire



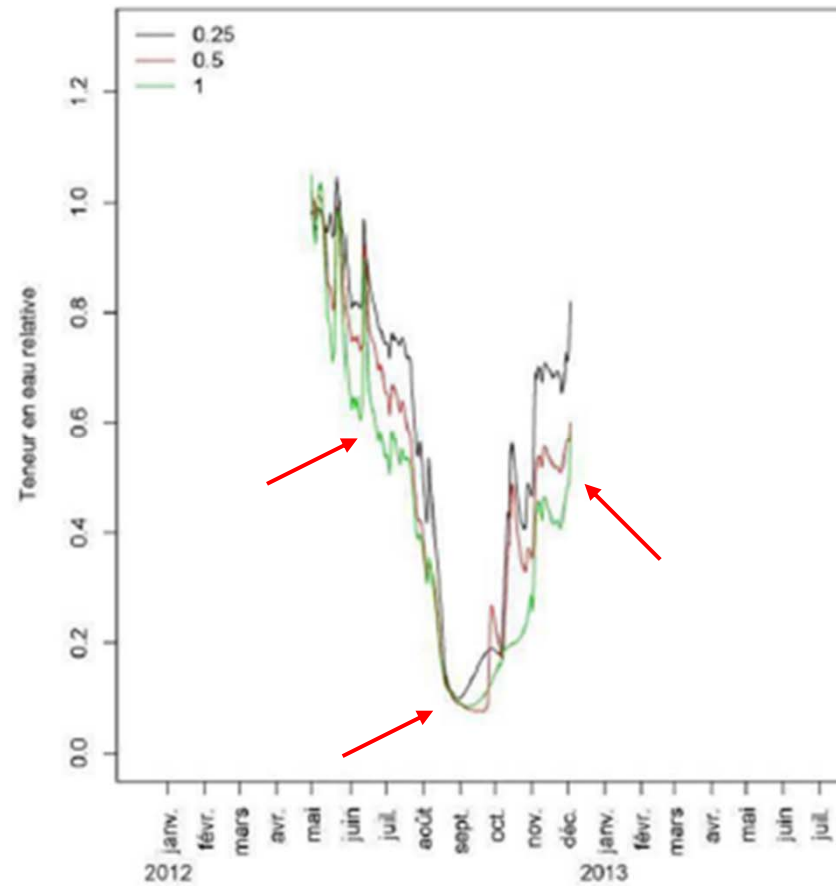
● Bilan hydrique

- Il n'y a pas de croissance racinaire sous l'eau
- Les racines sous l'eau finissent par dépérir
- L'arbre doit recoloniser chaque année l'ensemble du profil de sol pour s'approvisionner en eau
- Il y a une course poursuite entre la descente de la nappe d'eau et la croissance racinaire
- Oui, mais la nappe d'eau est aussi un extraordinaire réservoir (absent de 2018 à 2023)
- La RU : un réservoir à taille variable en fonction de la prospection des racines

● Diminuer la densité d'arbres sur pied



● Diminuer la densité d'arbres sur pied



Evolution de la teneur en eau du sol en fonction de la densité des arbres (RDI)
(Balandier et al., 2014, Tronçais parcelle 147)

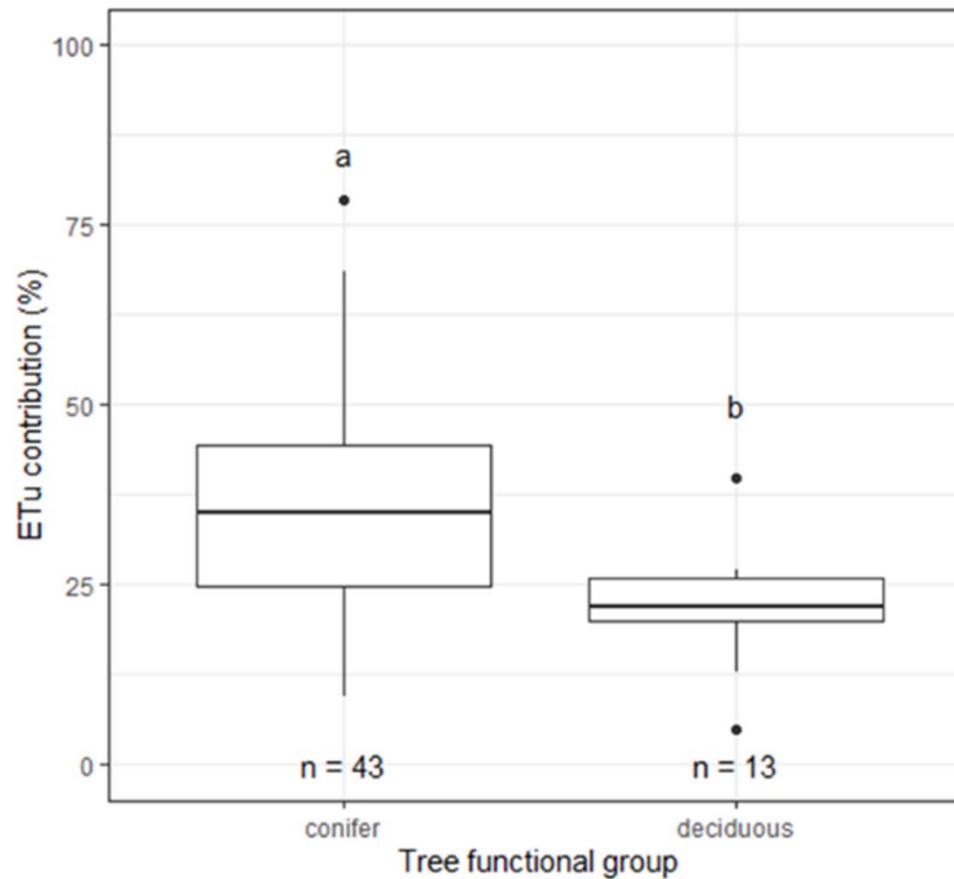
- Diminuer la densité d'arbres sur pied : le rôle du sous-bois



P. Balandier, AG Fransylva43, Le Puy, 14 juin 2024

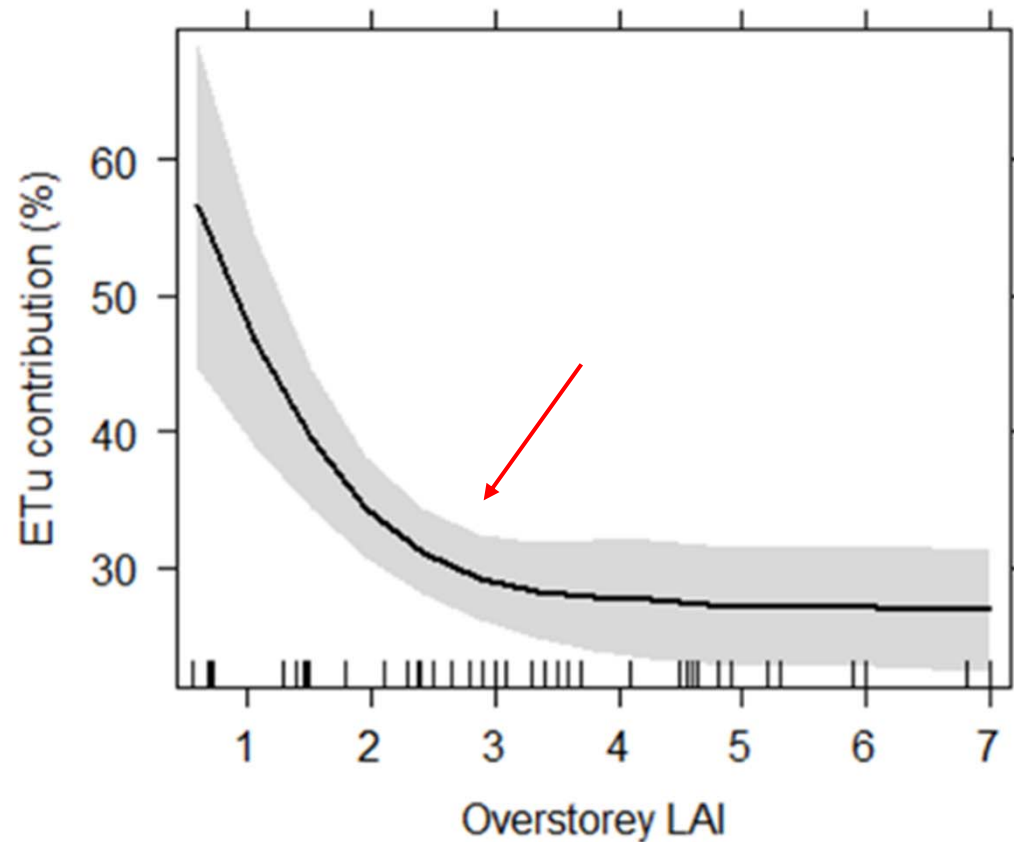
● Diminuer la densité d'arbres sur pied : le rôle du sous-bois

Environ 200
articles



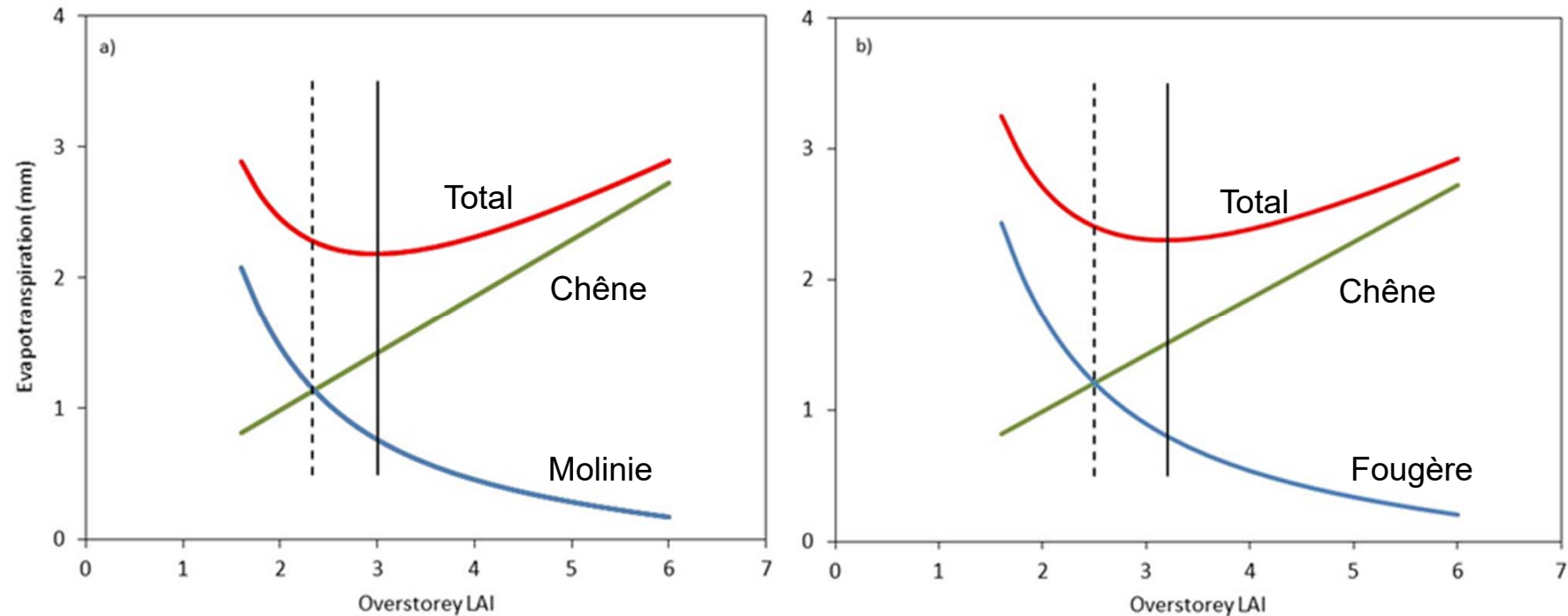
La contribution moyenne du sous-bois à l'évapotranspiration de l'écosystème est d'environ **25%**

- Diminuer la densité d'arbres sur pied : le rôle du sous-bois



Contribution du sous-bois à l'évapotranspiration de l'écosystème en fonction de l'indice foliaire des arbres (LAI)

● Diminuer la densité d'arbres sur pied : le rôle du sous-bois



Evapotranspiration (mm) des différentes strates du sous-bois en fonction de l'indice foliaire des chênes (LAI)

● Mélanger les peuplements

Le mélange d'espèces présente divers avantages :

- diversification des espèces, en particulier mieux adaptées au changement climatique
- résistance aux pathogènes, aux aléas, ...

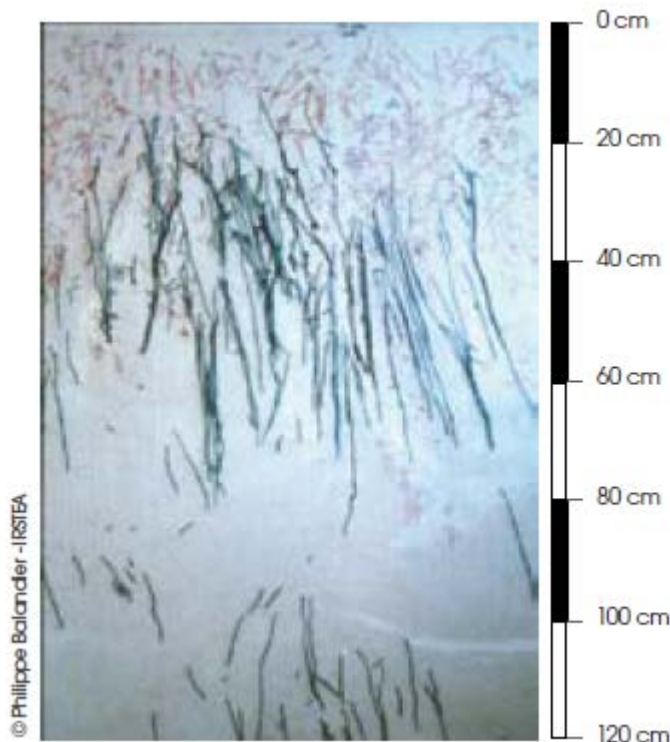
→ d'un point de vue hydrique : les résultats ne sont pas sans ambiguïté



(Bertin et al., 2016,
RMT Aforce)

● Mélanger les peuplements

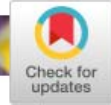
Basé sur le principe de complémentarité



- Ne s'observe que si le sol est suffisamment profond
- Si les espèces ont effectivement des enracinements différents
- Si la complémentarité de l'occupation de l'espace aérien par les houppiers n'augmente pas l'évapotranspiration

● Mélanger les peuplements

→ Le mélange n'est pas systématiquement relié positivement à la résistance à la sécheresse en forêt



Tansley insight

Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests

Charlotte Grossiord 

Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Zürcherstrasse 111, Birmensdorf 8903, Switzerland

	42	IV. Advancing tree diversity research in a climate change context	47
	42	V. Conclusions	47
mitigating drought		Acknowledgements	47
	44	References	47
ity on forest response to	44		

Summary

Droughts are a rising concern for terrestrial ecosystems, particularly for forests where drought-induced reductions in tree growth and survival are reported. Biodiversity has long been acknowledged as an important component modulating ecosystem functions, including mitigating their vulnerability to climate-related stresses. Yet the impact of tree diversity on forest vulnerability to drought is unclear. In this review, consistent mechanisms are identified by which tree diversity could reduce vulnerability to drought and emerging evidence is revealed that tree diversity is not systematically positively related to drought resistance in forests. A path is suggested to further increase our knowledge on this subject in the face of climate change, proposing standardization of methods to quantitatively establish diversity impacts on the drought resistance of forests.

● Mélanger les peuplements

Quand le mélange a un effet positif sur le bilan hydrique

Le peuplement aura in fine consommé plus d'eau plus longtemps

Ce qui peut être problématique dans les territoires où la protection de la ressource en eau est un enjeu

● Irrégulariser les peuplements

Stratification verticale de la canopée (et des autres strates)

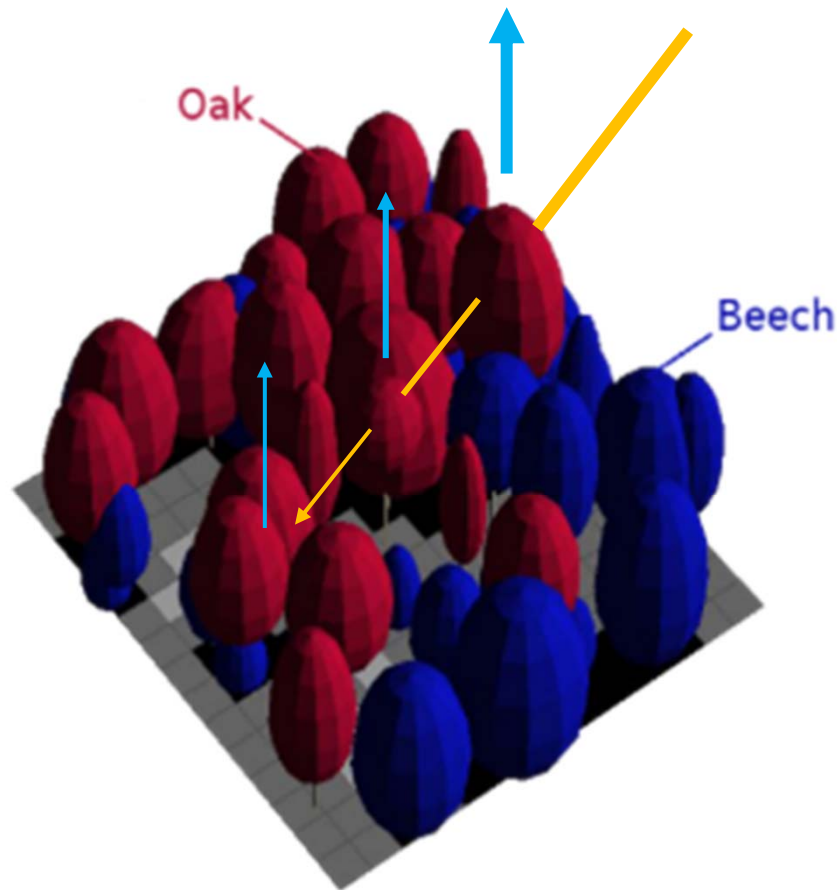
Dans l'espace aérien mais aussi le sol !



Photo 2 Transmission de lumière directe par « taches de lumière » jusqu'à la régénération.

Photo : Gauthier Ligoit, ULg

● Irrégulariser les peuplements



L'évapotranspiration dépend du rayonnement et du VPD.

Elle pourrait donc être réduite pour les strates inférieures du fait d'un microclimat plus tamponné.

Mais la consommation d'une strate compense celle d'une autre.

Certains travaux (simulations) laissent penser que la distribution de la surface foliaire au sein de l'espace pourrait n'avoir qu'un effet limité sur les flux d'eau (Baldocchi et al., 2002). **C'est le LAI total qui compte.**

Irrégulariser les peuplements



Forest Ecology and Management

Volume 554, 15 February 2024, 121667



The effect of forest structure on drought stress in beech forests (*Fagus sylvatica* L.)

Thomas Mathes ^a  , Dominik Seidel ^b, Hans-Joachim Klemmt ^c,
Dominik Thom ^d, Peter Annighöfer ^a

conditions. Our results show a relationship between crown closure and crown defoliation in beech, suggesting an increased vulnerability of beech to drought in more open canopies. However, the potential for silvicultural intervention to mitigate drought stress, as measured by BAI and $\delta^{13}\text{C}$ signal, appears limited. Neighboring trees and forest structure had little influence on average drought resistance. The $\delta^{13}\text{C}$ signal showed minimal responsiveness to variations in canopy openness, as well as to distinctions between single and multi-layered forests. However, increased structural complexity within stands

● Irrégulariser les peuplements



Forest Ecology and Management

Volume 559, 1 May 2024, 121816



Are uneven-aged forests in Central Europe less affected by natural disturbances than even-aged forests?

Johannes Mohr^a  , Dominik Thom^{a b}, Hubert Hasenauer^c,
Rupert Seidl^{a d}

forests on steep slopes $>20^\circ$ and elevations >1500 m asl. In conclusion, our results suggest that uneven-aged management may partly counteract increases in natural disturbances in Central European forests. However, we also caution that uneven-aged management is not a silver bullet solution for managing forest change, and highlight that adapted forest management approaches should be tailored to local needs and conditions.

● Irrégulariser les peuplements

Dans l'état actuel de nos connaissances, rien n'indique que la structure irrégulière donnerait un avantage en termes de bilan en eau

Des mesures et observations plus directes demeurent nécessaires

Une des difficultés est qu'il n'existe pas une structure irrégulière mais une multitude ...

● Expérimenter les sécheresses **caniculaires**



Des projets DSF – ONF - INRAE



Rôle de l'éclaircie sur le bilan hydrique / dégradation du microclimat

● Merci !



P. Balandier, AG Fransylva43, Le Puy, 14 juin 2024



Projet de recherche Arbo-Rate sur l'Arboretum Expérimental de Charvols

Ludovic MARTIN, Ingénieur de recherche



✿ **Une collaboration de 2 ans** entre la Communauté d'Agglomération du Puy-en-Velay, la Maison pour la Science, l'UCA et l'INRAe

Objectifs

- Mesurer la capacité d'essences forestières d'intérêt à supporter les événements climatiques extrêmes :
 - Mesures de données couplées à des suivis continus sur le terrain
 - Modélisations et simulations
- Identifier des essences d'avenir capables de survivre aux exigences climatiques futures



SIGNATURE DU PARTENARIAT LE 17 OCTOBRE 2023 À MALVIÈRES

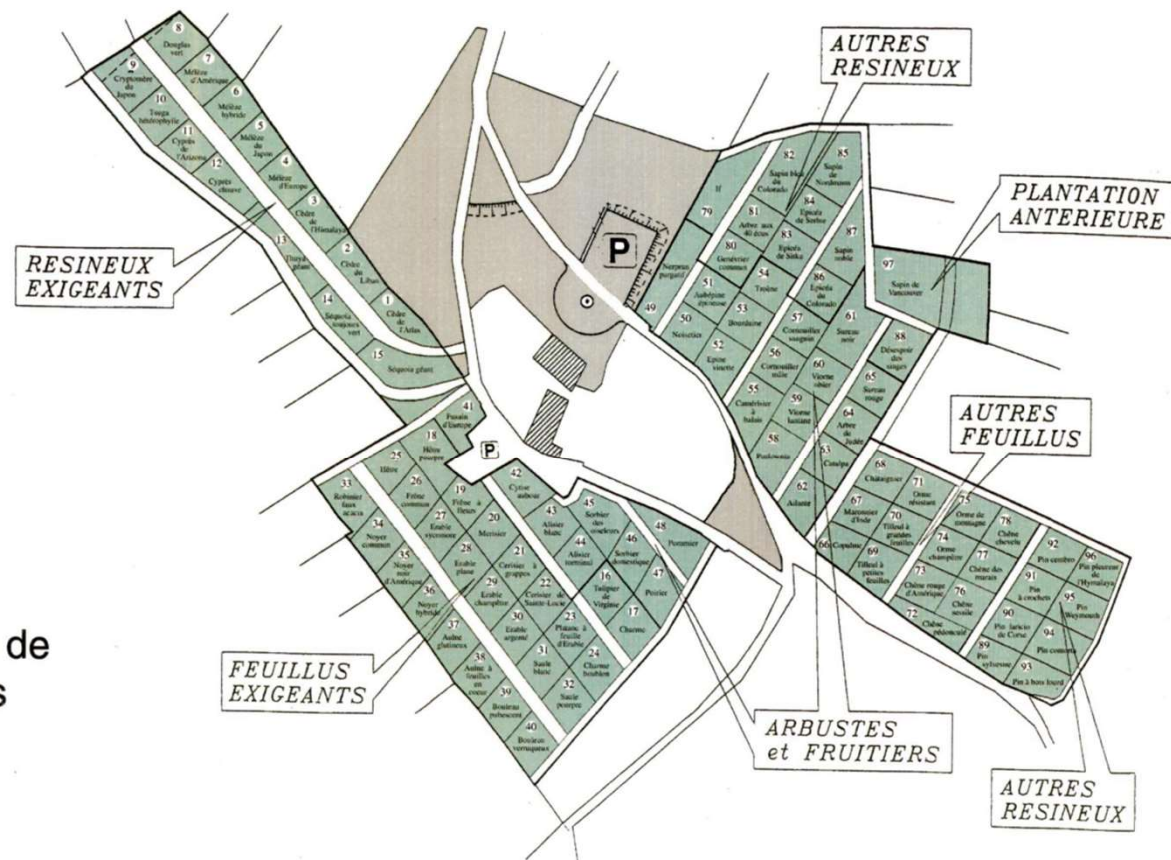


Présentation de l'arboretum forestier

- 3 ha, 900m d'altitude
- Plantation en 1993
- 97 essences dont 1/3 de conifères
- 25 individus plantés par espèce

Arboretum de
Charvols

Plan
de la
collection



Étude de 25 essences choisies par les différents acteurs du projet

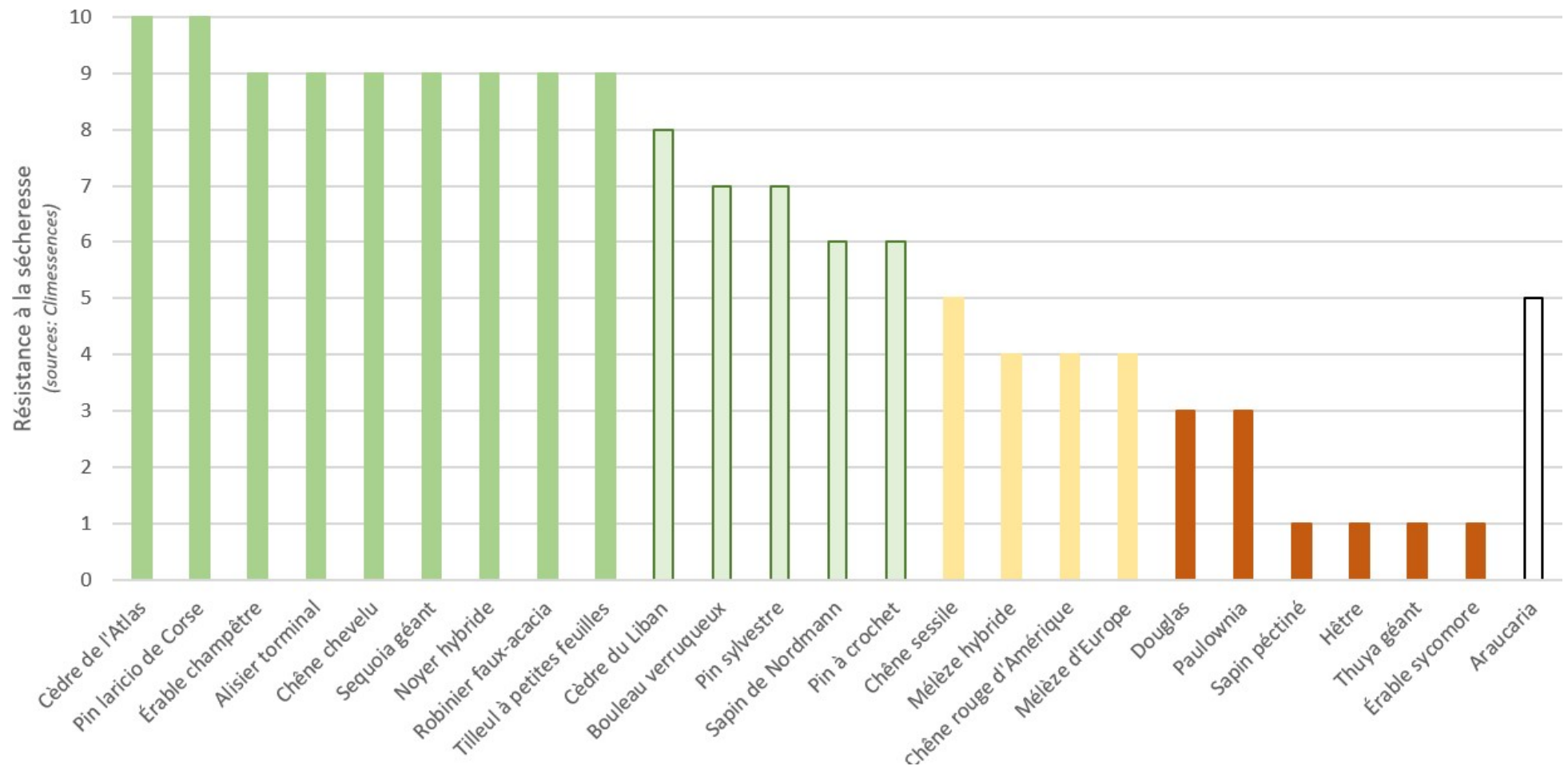
Choix des essences étudiées

- 12 feuillus et 13 résineux
- 20 essences les mieux notées dans le sondage, 4 rajoutées par les agents de l'Agglo Puy en Velay et de l'INRAe, et 1 se trouvant sur une placette près de l'Arboretum
- Essences actuellement plantées et essences potentielles de remplacement

Essences	% votes	Essences	% votes
Cèdre de l'Atlas	82%	Sapin de Nordmann	39%
Pin laricio de Corse	71%	Hêtre	39%
Douglas	64%	Érable sycomore	39%
Mélèze hybride	57%	Alisier torminal	32%
Chêne rouge d'Amérique	57%	Chêne chevelu	32%
Robinier faux-acacia	54%	Noyer hybride	32%
Chêne sessile	54%	Sequoia géant	25%
Mélèze d'Europe	50%	Érable champêtre	18%
Pin sylvestre	46%	Bouleau verruqueux	
Tilleul à petites feuilles	43%	Pin à crochet	
Cèdre du Liban	43%	Paulownia	
Thuya géant	43%	Sapin pectiné	
Araucaria			



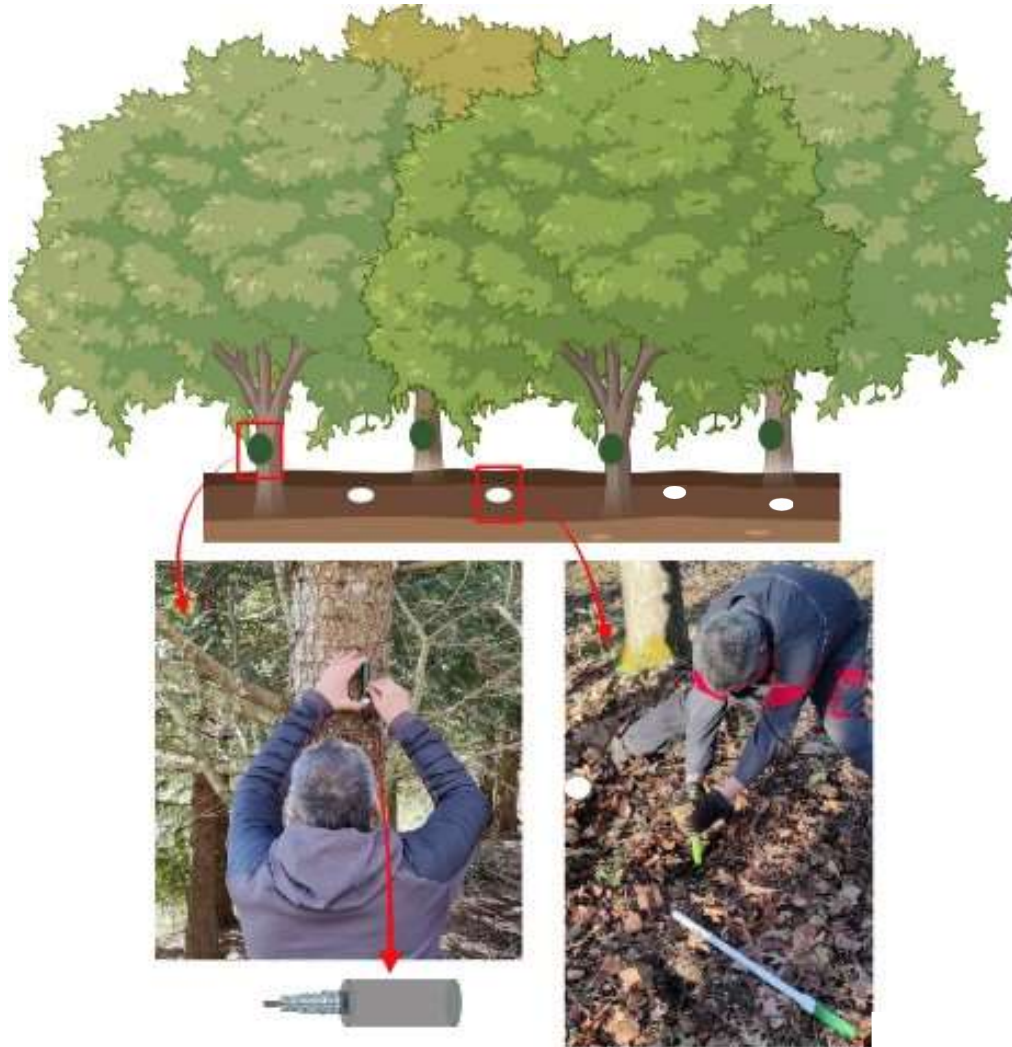
Étude de 25 essences couvrant un large spectre de résistance à la sécheresse et à la canicule



✦ Étude de 25 essences via des mesures continues

Suivi de croissance radiale

- 4 arbres équipés de dendromètres par placette
- Enregistrement des variations de diamètre des arbres permettant de suivre la durée et la vitesse de croissance ainsi que les réponses aux stress

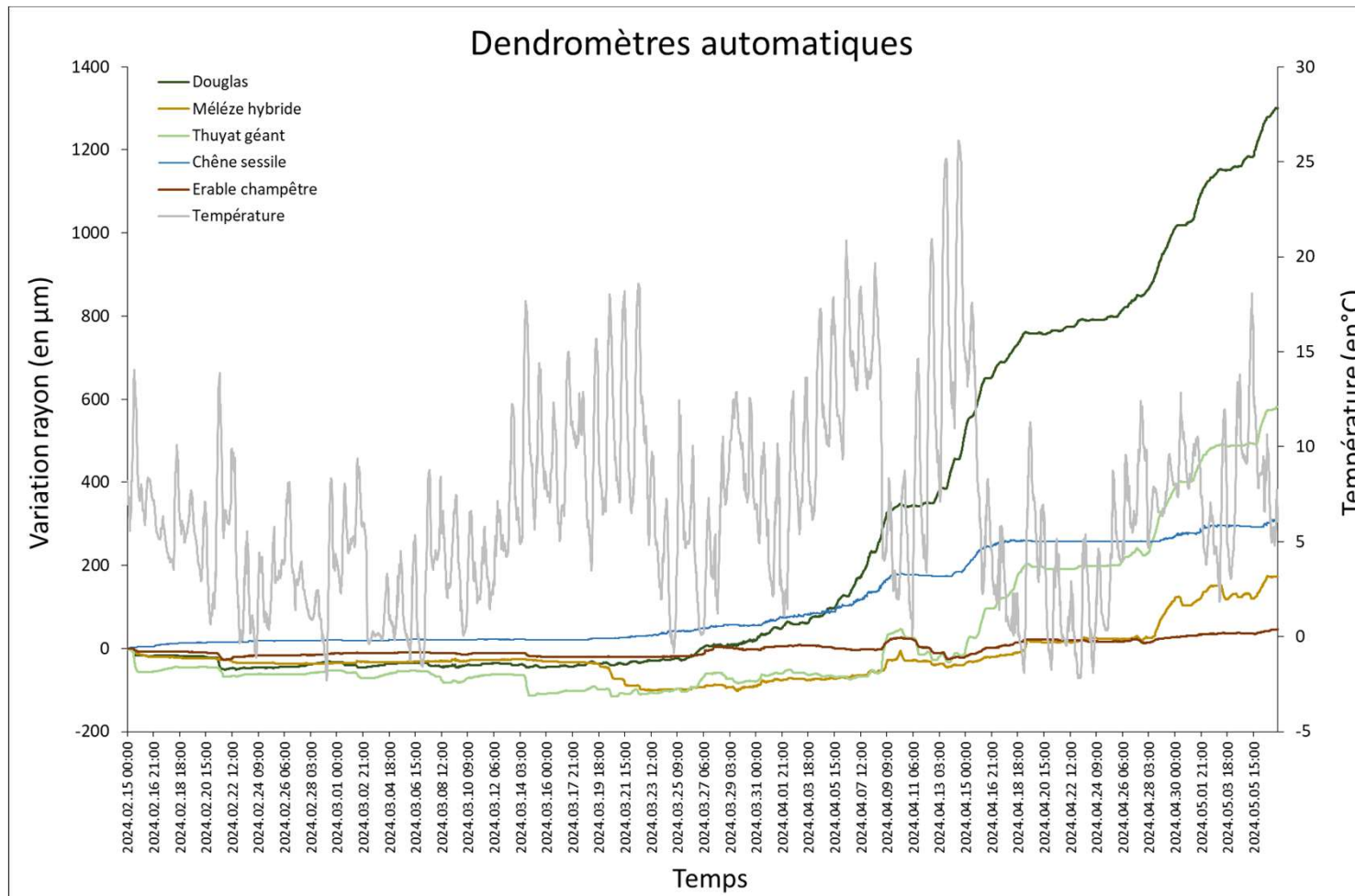


Suivi d'humidité et de température du sol

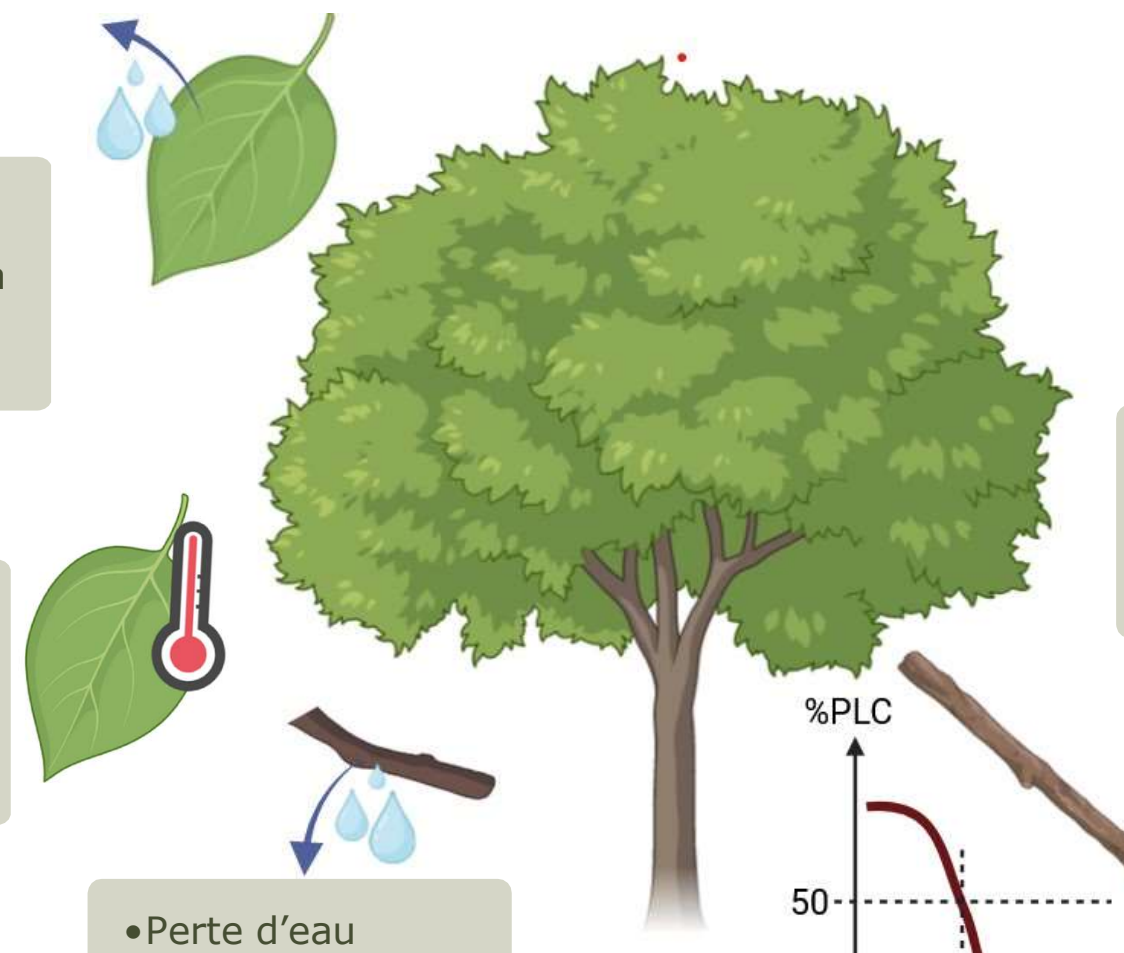
- 4 sondes par placette (2x15cm + 2x50cm)
- Suivi de température et d'humidité à la surface et à différentes profondeurs



Étude de 25 essences via des mesures continues



Étude de 25 essences via des mesures ponctuelles

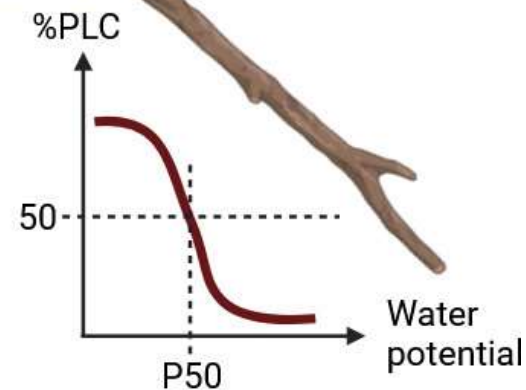


• Perte d'eau résiduelle à travers la cuticule des feuilles

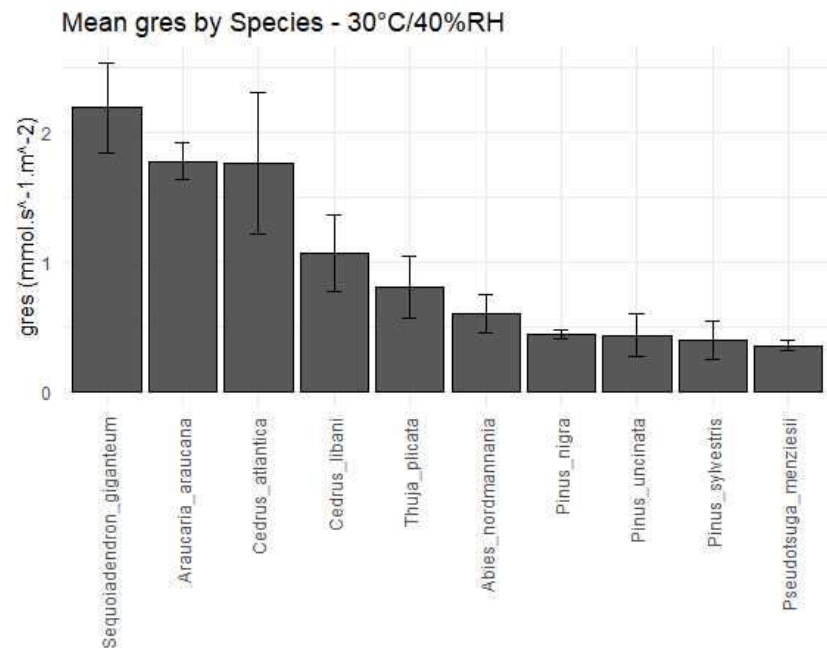
• Stabilité des cellules et des photosystèmes à la chaleur

• Perte d'eau résiduelle à travers l'écorce

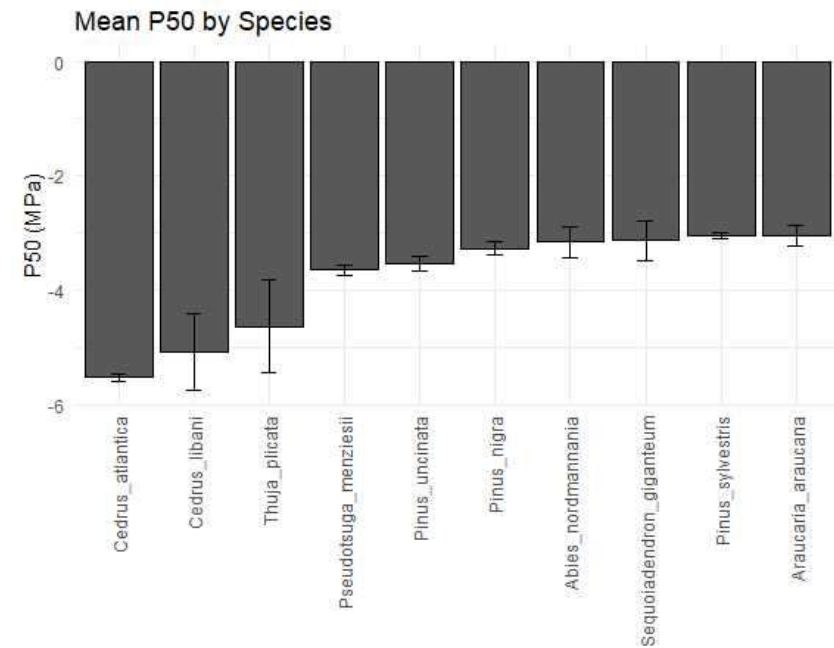
• Vulnérabilité des vaisseaux du xylème à l'embolie



Étude de 25 essences via des mesures de sureté hydraulique



Perte d'eau résiduelle



Vulnérabilité à l'embolie

