



Ecophysiologie de l'Arbre (en Ville) et Changements Climatiques

Thierry Améglio

► To cite this version:

Thierry Améglio. Ecophysiologie de l'Arbre (en Ville) et Changements Climatiques. LE DÉPÉRISSEMENT DE L'ARBRE URBAIN AU COEUR DES PRÉOCCUPATIONS!, Qualiarbre : Colloque National sur l'Arbre d'Ornement, Jun 2025, Niort, France. hal-05148777

HAL Id: hal-05148777

<https://hal.inrae.fr/hal-05148777v1>

Submitted on 7 Jul 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Ecophysiology de l'Arbre (en Ville) et Changements Climatiques

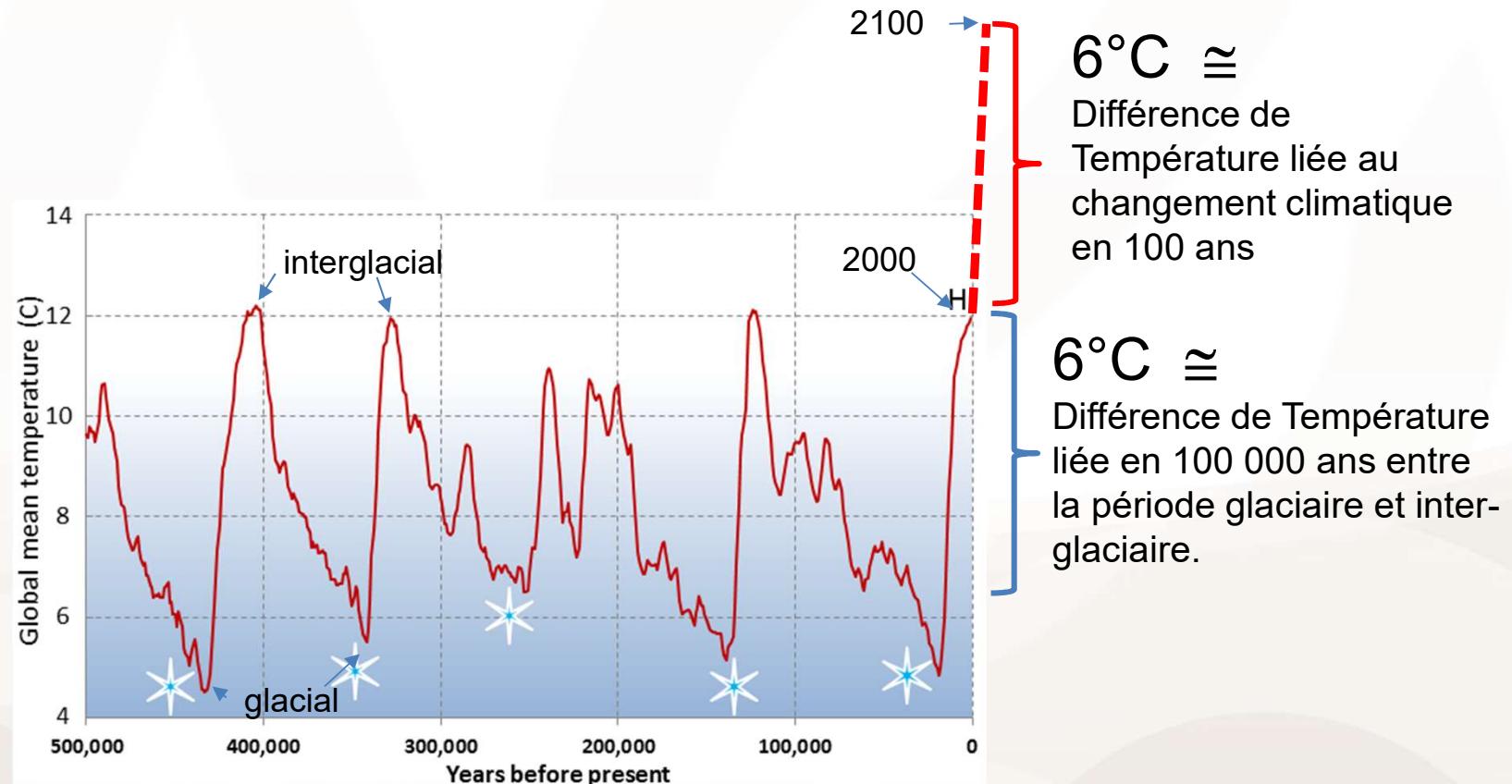
Thierry Améglio
Directeur de Recherche - INRAE- UMR PIAF

Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant



Focus sur les changements climatiques : les modèles globaux actuels prédisent une augmentation de 2 à 6°C des températures d'ici 2100

+ 6°C de température moyenne: une variation considérable !

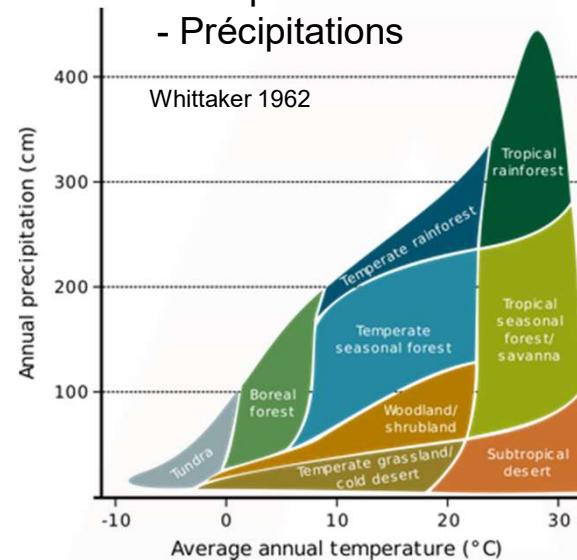


Quel Impact sur la végétation ?

+ 6°C de température moyenne: une variation considérable !

Climat: principal variable expliquant la distribution de la végétation

- Températures
- Précipitations



Migration naturelle

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

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

Changement de Niche écologique

10 000-15 000 ans
- 6 °C



2000
0 °C



100 ans
2100
+ 6 °C



Tundra

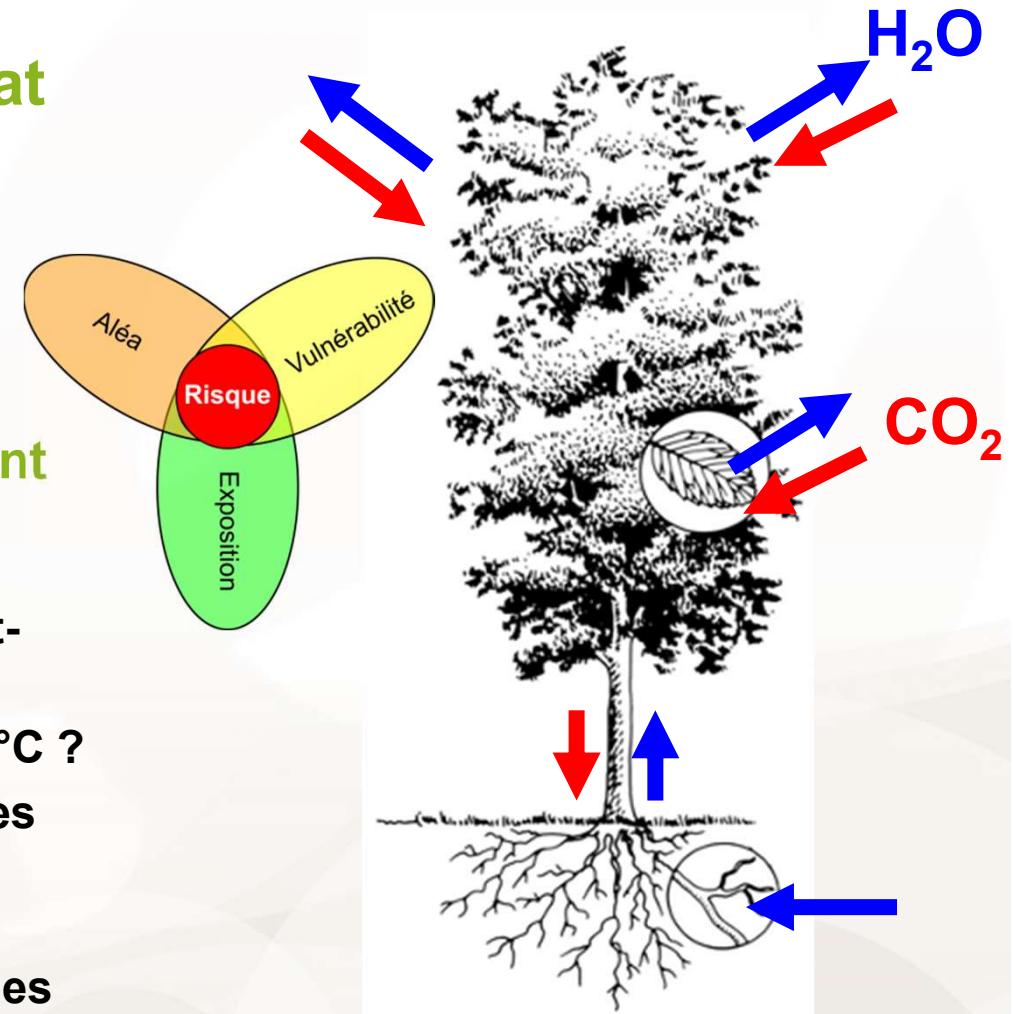
Tempéré

Méditerranéen
3
UNIVERSITÉ
Clermont Auvergne

Ecophysiology de l'Arbre

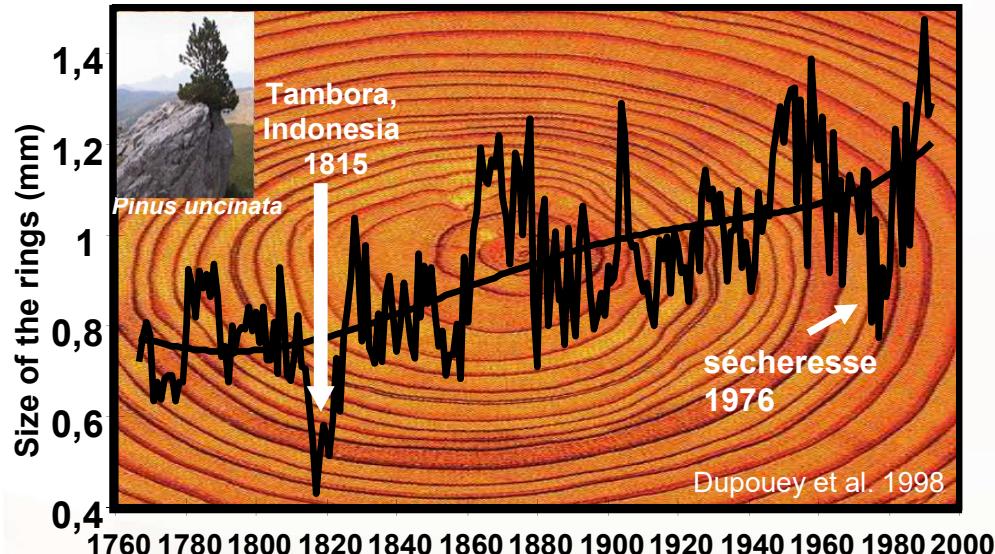
Etude des facteurs du climat sur la croissance et le développement de l'arbre :

- pour prédire les **risques** (thermique et hydrique...)
 - pour simuler le développement de l'arbre dans le futur.
-
- Comment la photosynthèse répond-t-elle à l'augmentation du CO₂ ?
 - Quel est l'impact de la hausse des T°C ?
 - Quels sont les risques de gel dans les climats futurs ?
 - Quelles sont les conséquences de sécheresse et canicule sur la survie des arbres ?



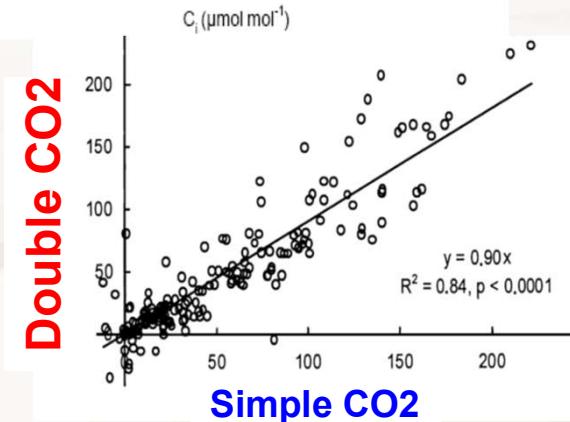
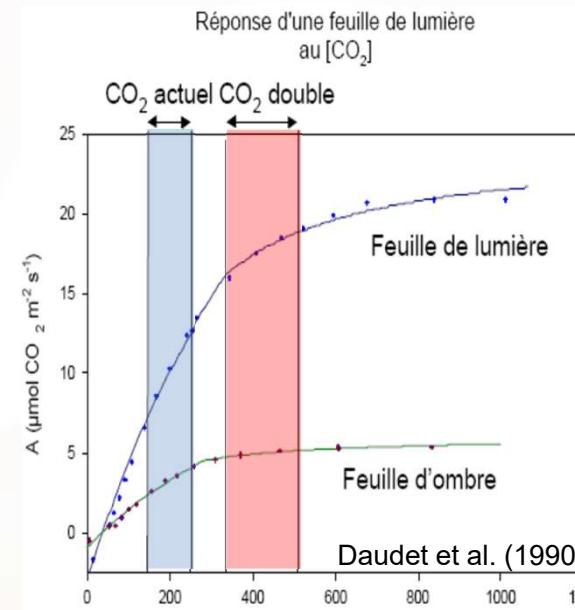
Physiologie de l'arbre : Croissance (effet “fertilisant” du CO₂)

Des effets positifs... → Augmentation du potentiel de production primaire



Croissance en Diamètre : un intégrateur des conditions climatiques (Dendrochronologie)

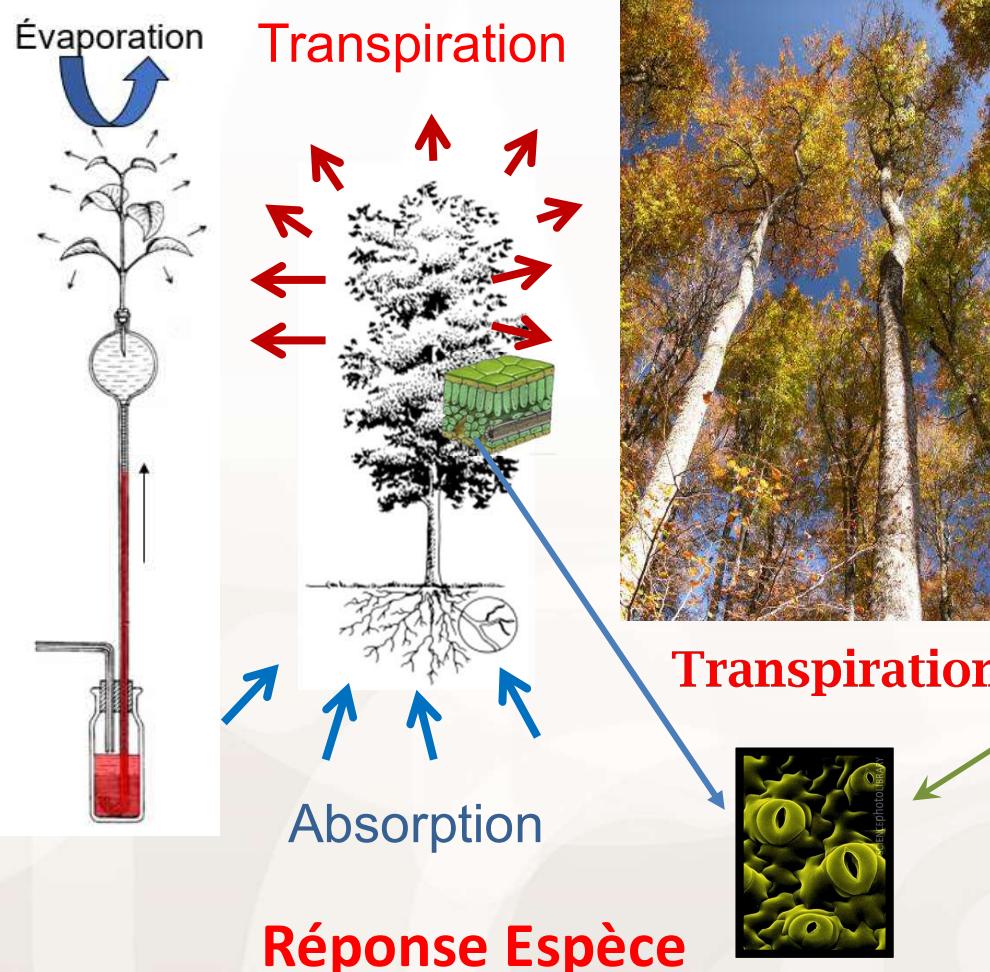
Mais aussi sur la transpiration
ETR double CO₂ = 0.9* ETR simple CO₂
(en absence de contrainte hydrique)



Fonctionnement hydrique des Arbres et Ascension de la sève

- ✓ Perte en eau par **transpiration (Tr)**

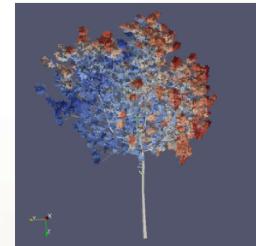
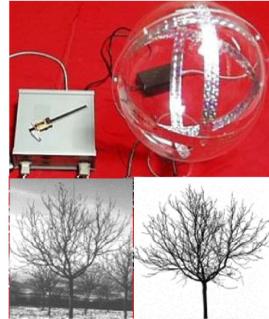
Des 10^{aînes} litres d'eau sont évaporés chaque jour d'été par un arbre en bonne santé (en fonction de sa surface foliaire).



- **totalemen**t **passif** (liée à évaporation de l'eau dans les feuilles selon la demande climatique).
- **absorber les minéraux.**
- **capter le CO₂** de l'air (**Photosynthèse**) et produire le **O₂**, à faire des **sucres** (molécule organique ...).
- **Dissiper la chaleur** (Processus endothermique : qui consomme de la chaleur et permet de réguler la température de l'arbre)... **lutte contre les ICU**

Température et Transpiration : des modèles de Fonctionnement de l'arbre et des flux hydriques

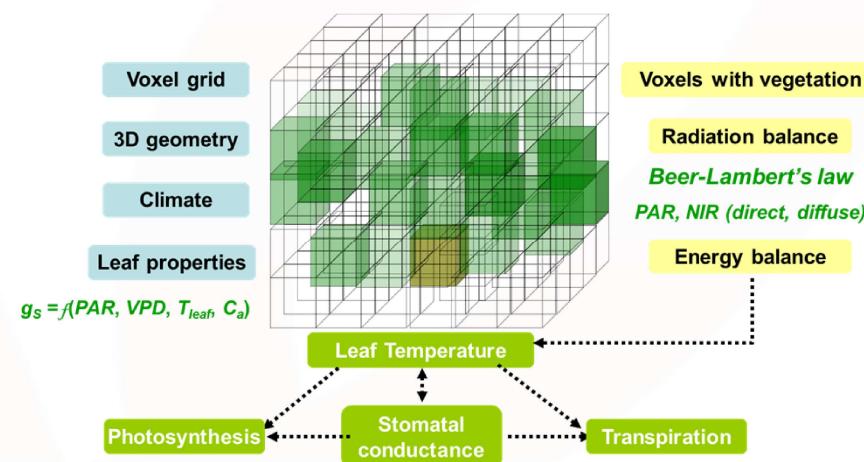
ANR CoolTrees (2017-2021)



Acquisition de l'architecture 3D d'arbres réels

Sinoquet & Rivet . (1997) Bournez *et al.* (2016)

ANR TIR4sTREEt en cours (2023-2026)



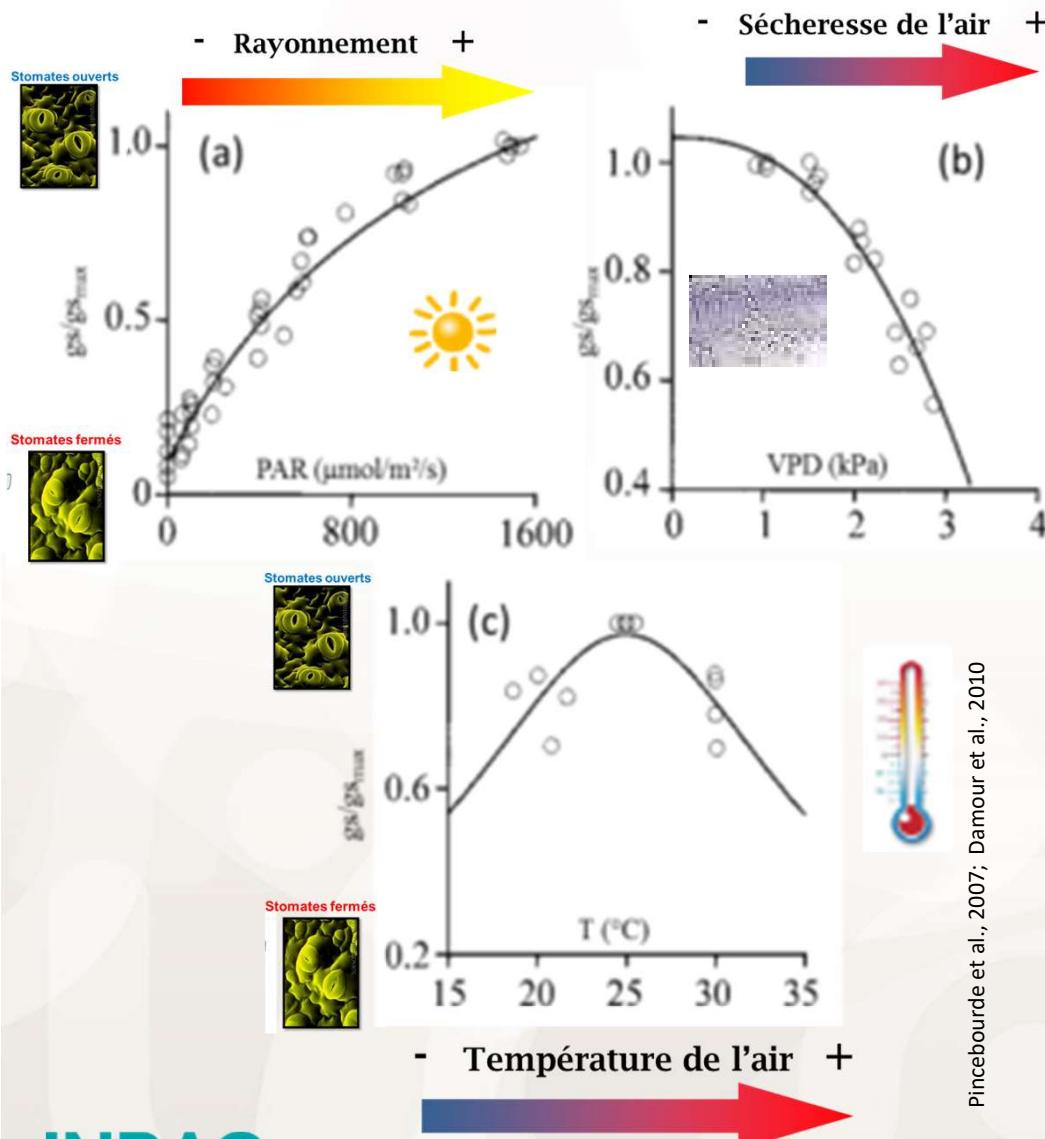
Modélisation 3D du Rayonnement Absorbé, de la Transpiration et Photosynthèse : modèle RATP

Sinoquet *et al.* (2001)

Validation par mesures de flux de sève au niveau du tronc



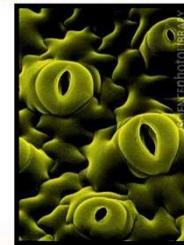
Microclimat et Transpiration



Réponse Stomatique

(Conductance Stomatique, gs)

Stomates ouverts



Stomates fermés



Fonction de la
Demande
climatique

La TRANSIRATION : effet de RAFRAICHISSEMENT

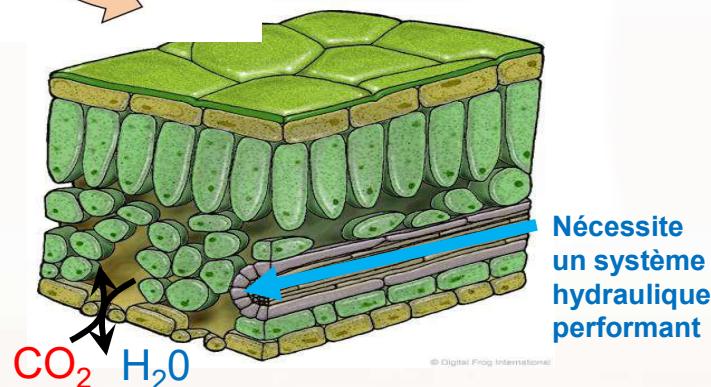


Transpiration = évaporation de l'eau dans les feuilles (passage de l'état liquide à l'état gazeux). Processus endothermique (qui consomme de la chaleur) \Rightarrow permet de réguler la température de l'arbre

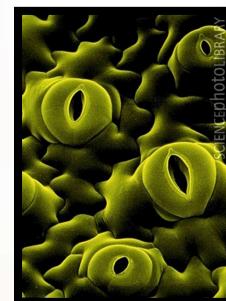
1g d'eau évaporée consomme 600 calories !

=

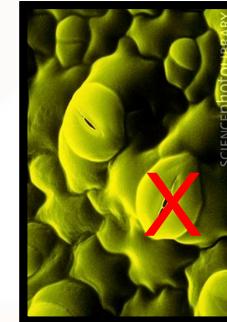
la même quantité d'énergie qu'il faut pour éléver 1g d'eau de 600 °C



Stomates ouverts



Stomates fermés

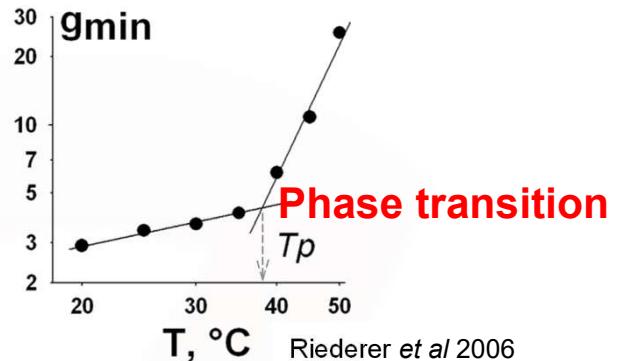
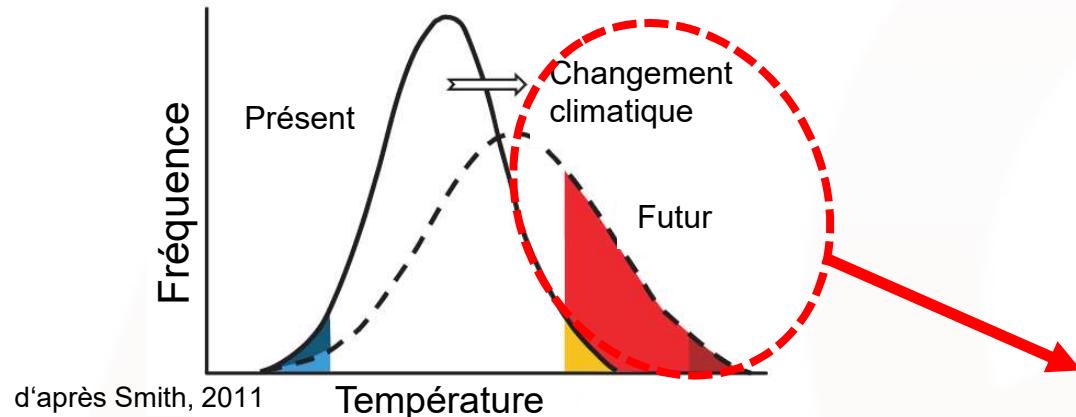


Sécheresse du sol : Fermeture stomatique \Rightarrow Diminution de la transpiration ↗

- Economise l'eau du sol
- Mais diminue l'entrée de CO_2 : diminue la production de **sucres** (photosynthèse).
- **Stoppe la régulation thermique!** (les feuilles grillent au soleil)

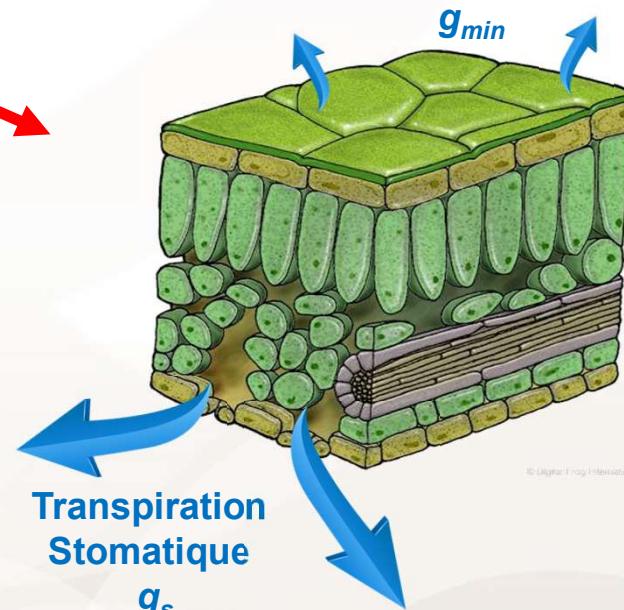
Physiologie de l'Arbre et risques thermiques

Quel est l'impact de la hausse des T°C ?

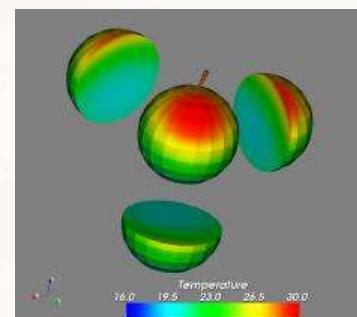


Très Forte dépendance à T°C >35°C

Transpiration résiduelle cuticulaire



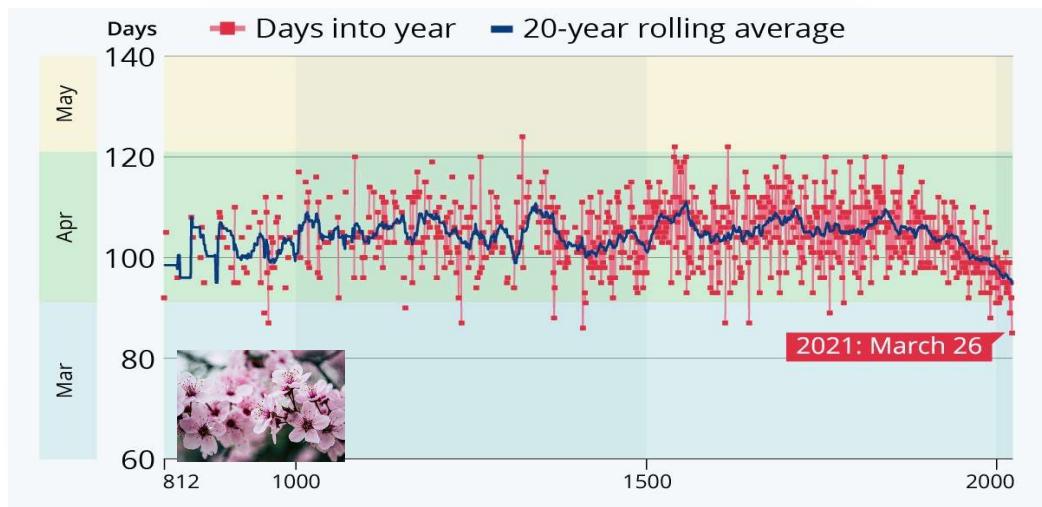
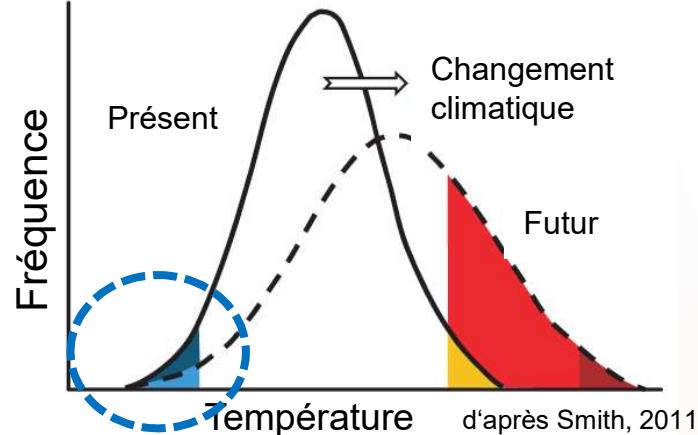
Dépendant de la T°C
mais aussi de la densité stomatique
(variable selon les espèces)



Modélisation 3D des températures d'organes :
d'après Marc Saudreau (UMR PIAF)

Physiologie de l'Arbre et risques thermiques

Quels sont les risques de gel dans les climats futurs ?



Source: Yasuyuki Aono/Osaka Prefecture University



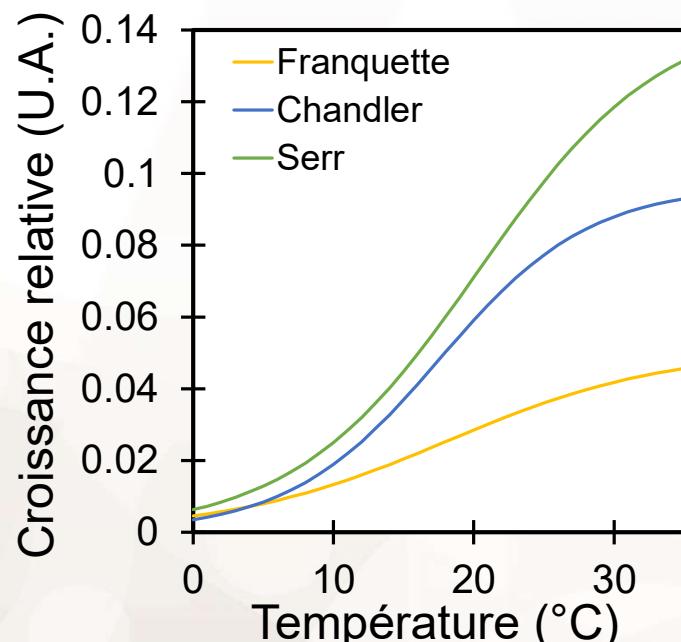
Perturbation phénologique

T°C ↗ : actuellement

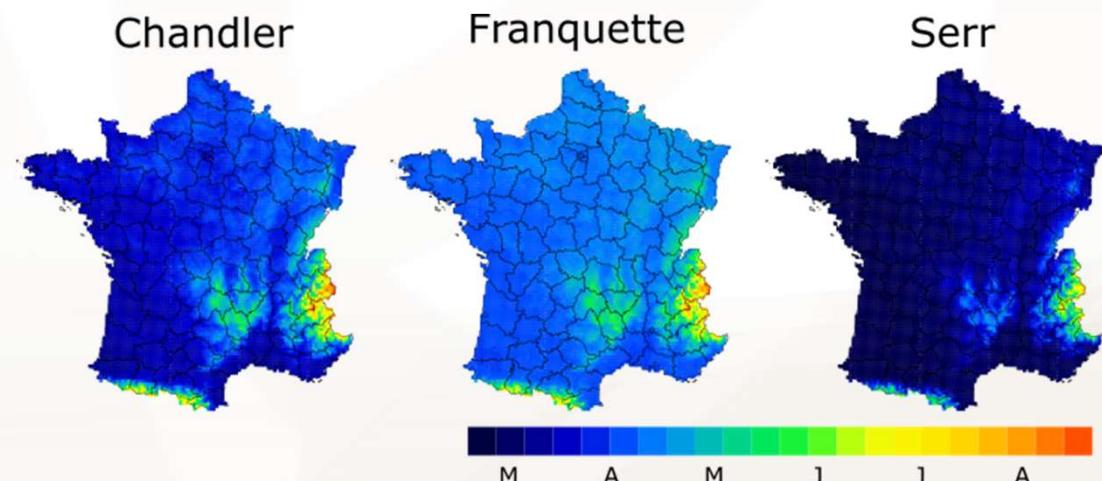
- Favorise la précocité
- Risque de **gel** printemps ↗
- Augmentation des problèmes phytosanitaires
- Augmentation des risques en Montagne (manteau neigeux)

Physiologie de l'Arbre et risques thermiques

Ecodormance et Reprise de croissance (besoin de chaleur : T°C Forcing)



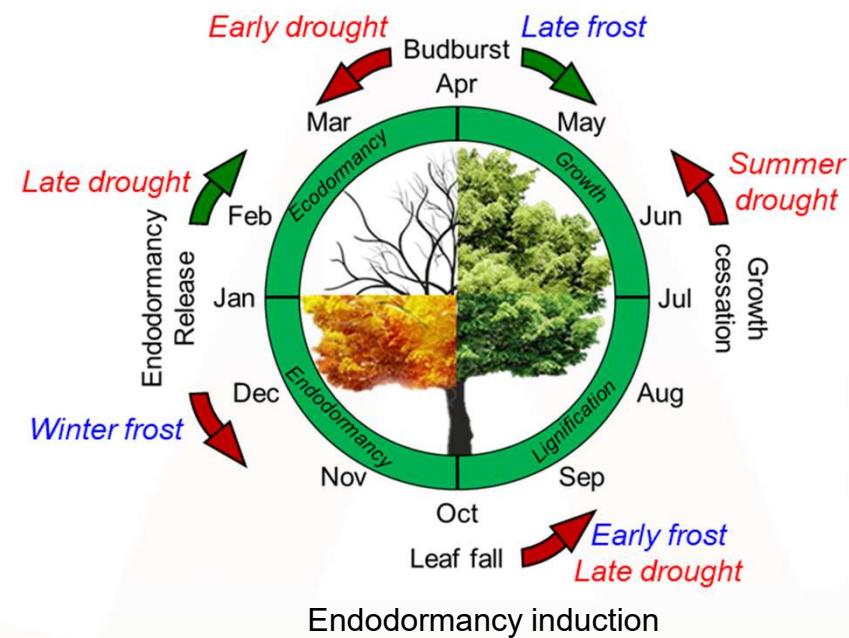
Charrier et al., 2011



Charrier, 2023

Phénologie et changement climatique

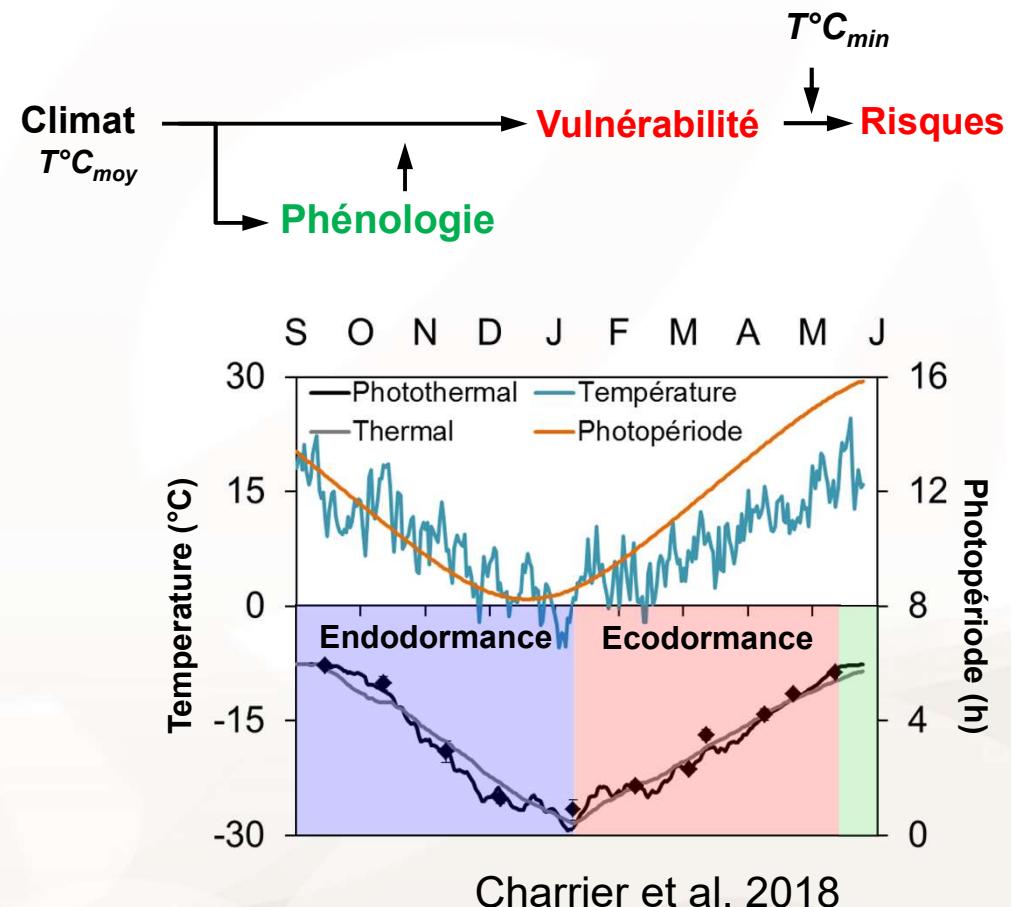
La saisonnalité : alternance de phases de dormance et de croissance



Acclimatation au gel et endodormance
(évitement du gel, besoin de froid : Chilling $T^{\circ}\text{C}$)

Déacclimatation au gel et ecodormance
(besoin de chaleur : Forcing $T^{\circ}\text{C}$)

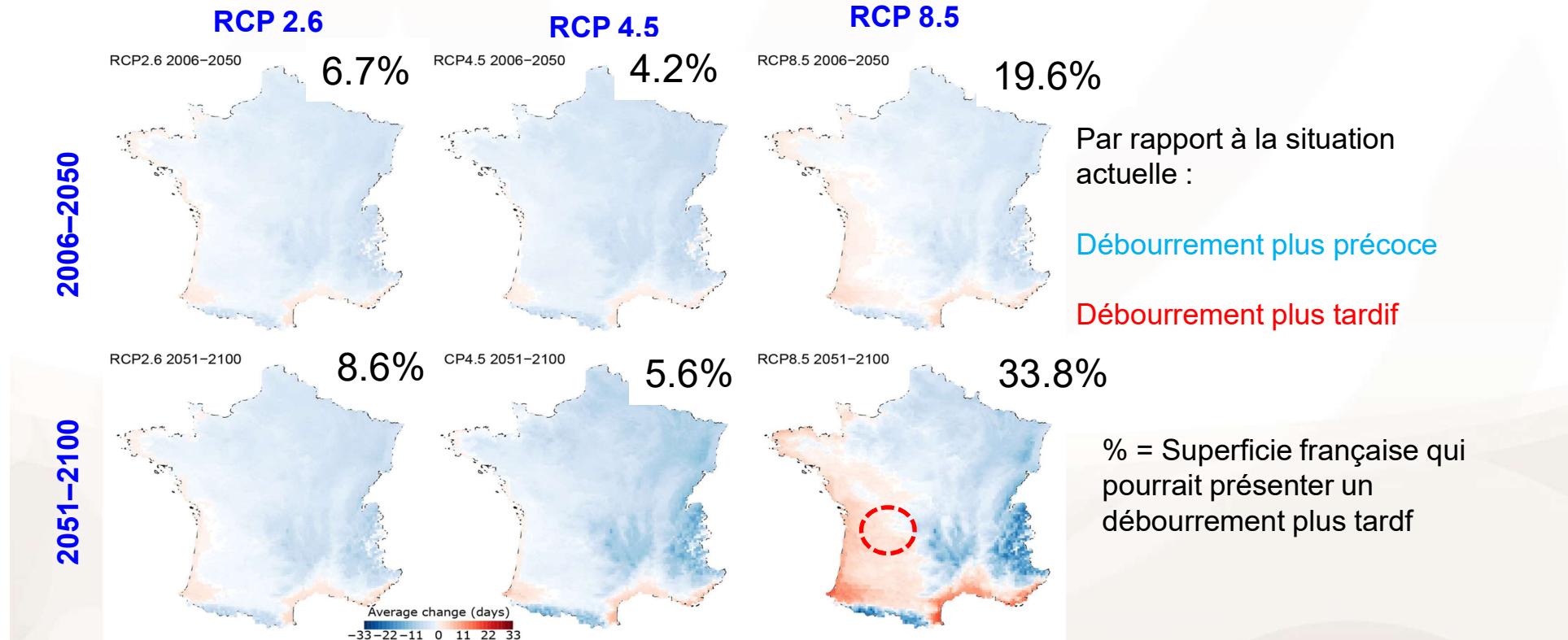
Effect des stress sur les stages phénologiques



Charrier et al. 2018

Phénologie et changement climatique : le cas du Noyer

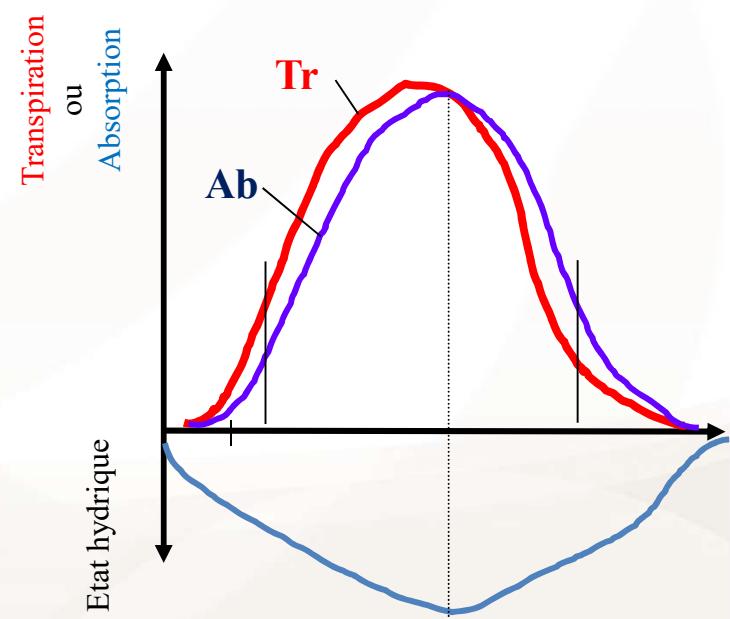
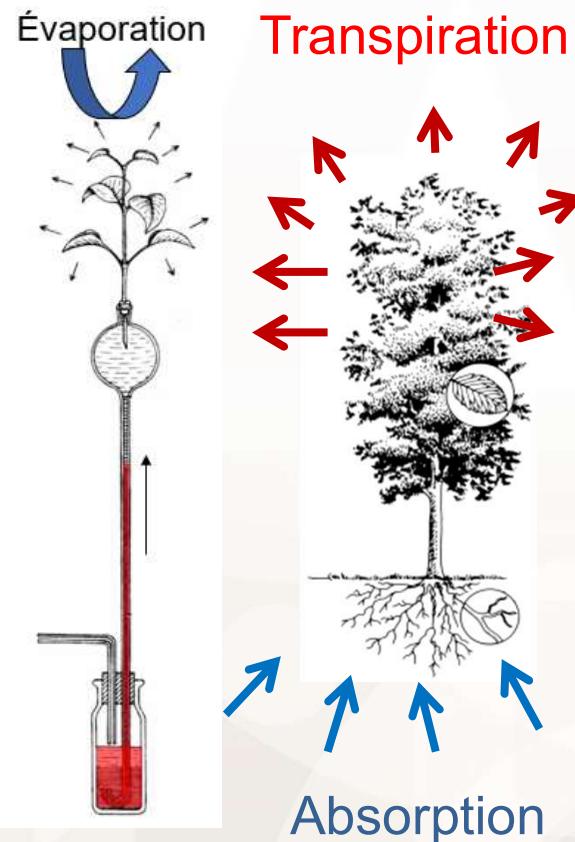
Simulation de la date de Débourrement



Noix du Périgord : Risque d'insuffisance de satisfaction des besoins de froid

Besoin en Eau des Arbres et Ascension de la sève

- ✓ En absence de sécheresse du sol, la **transpiration (Tr)** et l'**absorption (Ab)** sont le plus souvent égales à quelques %



Sans sécheresse :

- phase de **dessèchement** : le matin
- phase de **réhydratation** : l'après-midi et la nuit.

► Les **micro-variations de diamètre** du tronc et des branches sont des très bons indicateurs de ces phases. Elles sont corrélées aux variations d'**état hydrique** ($\Delta\Psi$).



Gérer la Santé des Arbres

Il existe des outils connectés (IoT) pour suivre la vitalité des arbres en temps réel !

Les Echos

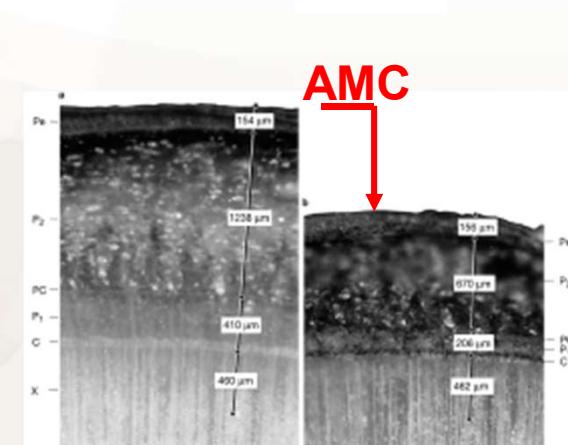
01/04/2019

CROISSANCE Verte

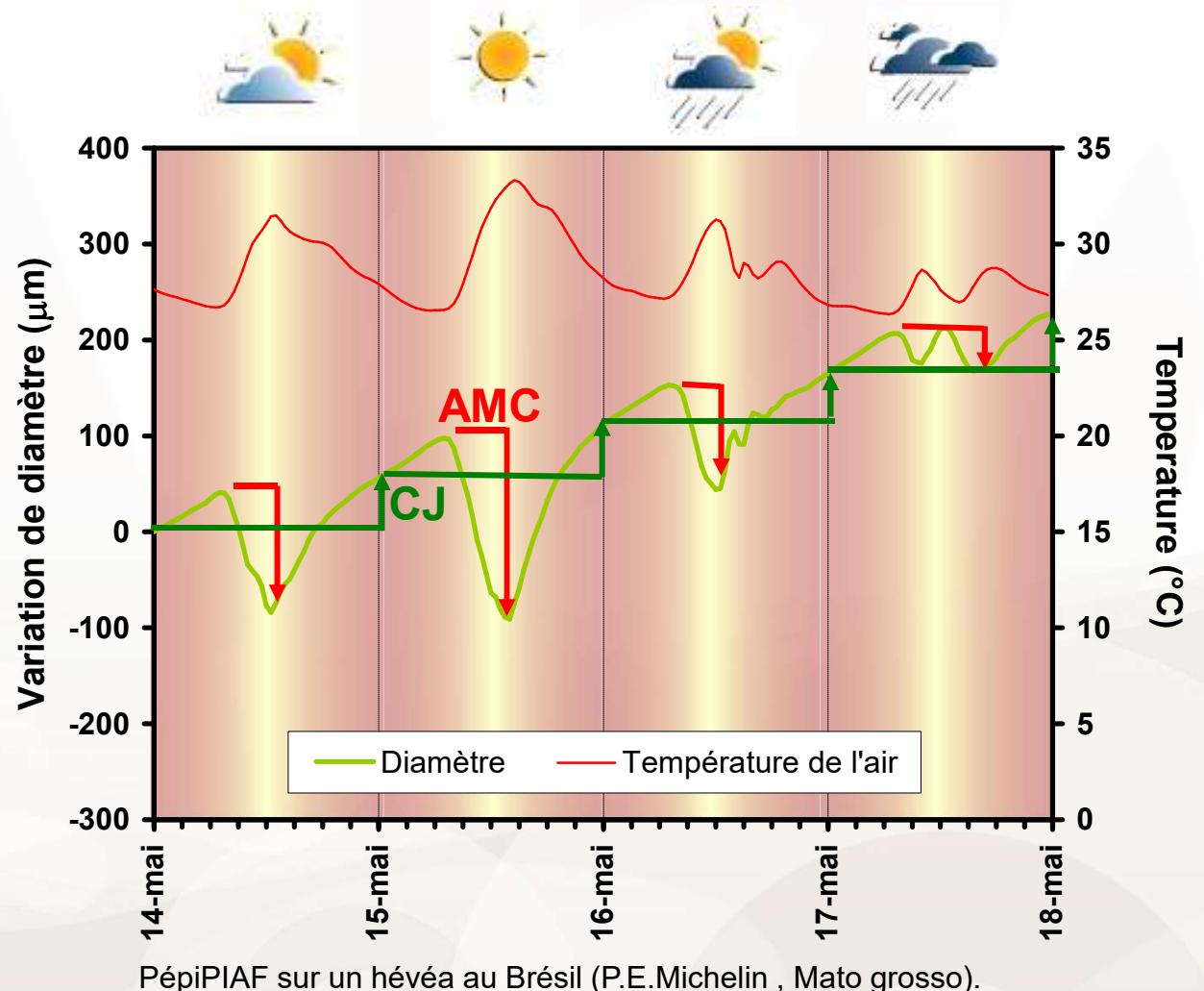
Des arbres sous surveillance électronique

Croissance journalière est liée à la capacité de l'arbre à photosynthétiser : **CJ**

- L'amplitude maximale de contraction est liée à l'état hydrique: **AMC**
- Et à la demande climatique
- $\text{AMC} = f(\text{soleil})$



Zweifel et al. 2000



INRAE

Dépérissement de l'Arbre Urbain – Qualiarbre[©] - Niort - 26 & 27 Juin 2025

UCA

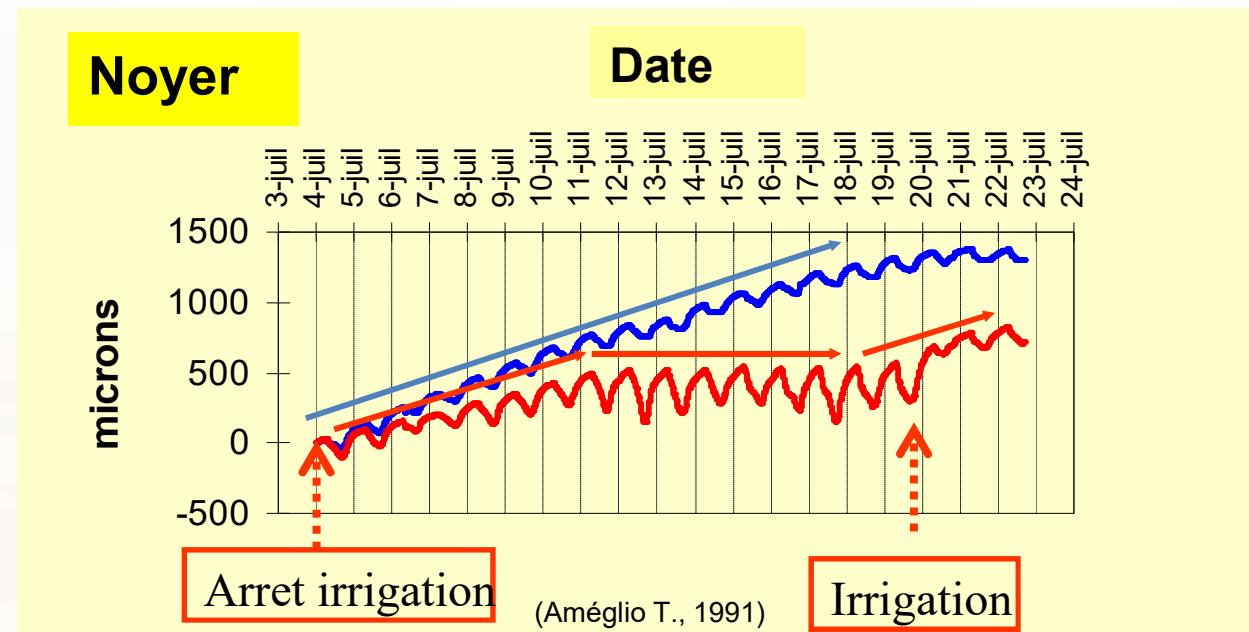
UNIVERSITÉ
Clermont Auvergne

Mesures continues de la croissance radiale

la surveillance électronique et continue de la croissance et des besoins en eau

Micro-dendromètre PépiPIAF
et e-PépiPIAF (LoRa et/ou Sigfox).

Version moderne et connectée du brevet INRA « Pélusta »
J.G Huguet 1985 pour les besoins en eau des arbres en verger



La croissance radiale s'arrête très précocement en présence d'une sécheresse du sol et les réserves hydriques de l'arbre sont mises à contribution.

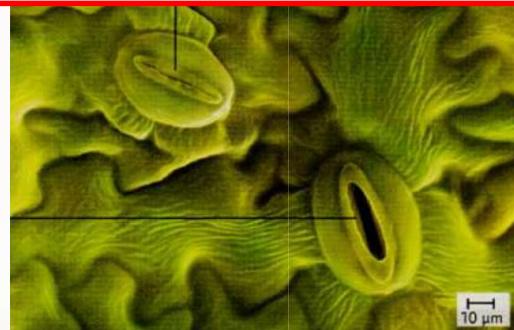


Les mécanismes de résistance à la sécheresse

Eviter la sécheresse

Réduire les pertes en eau

- ✓ Fermer les stomates



- ✓ Réduire la surface foliaire

Augmenter les entrées d'eau

- ✓ Racines plus profondes
- ✓ Accroître la densité racinaire



Tolérer la sécheresse

- ✓ Protection moléculaire (**antioxydants**)
- ✓ **Accumulation de sucres**

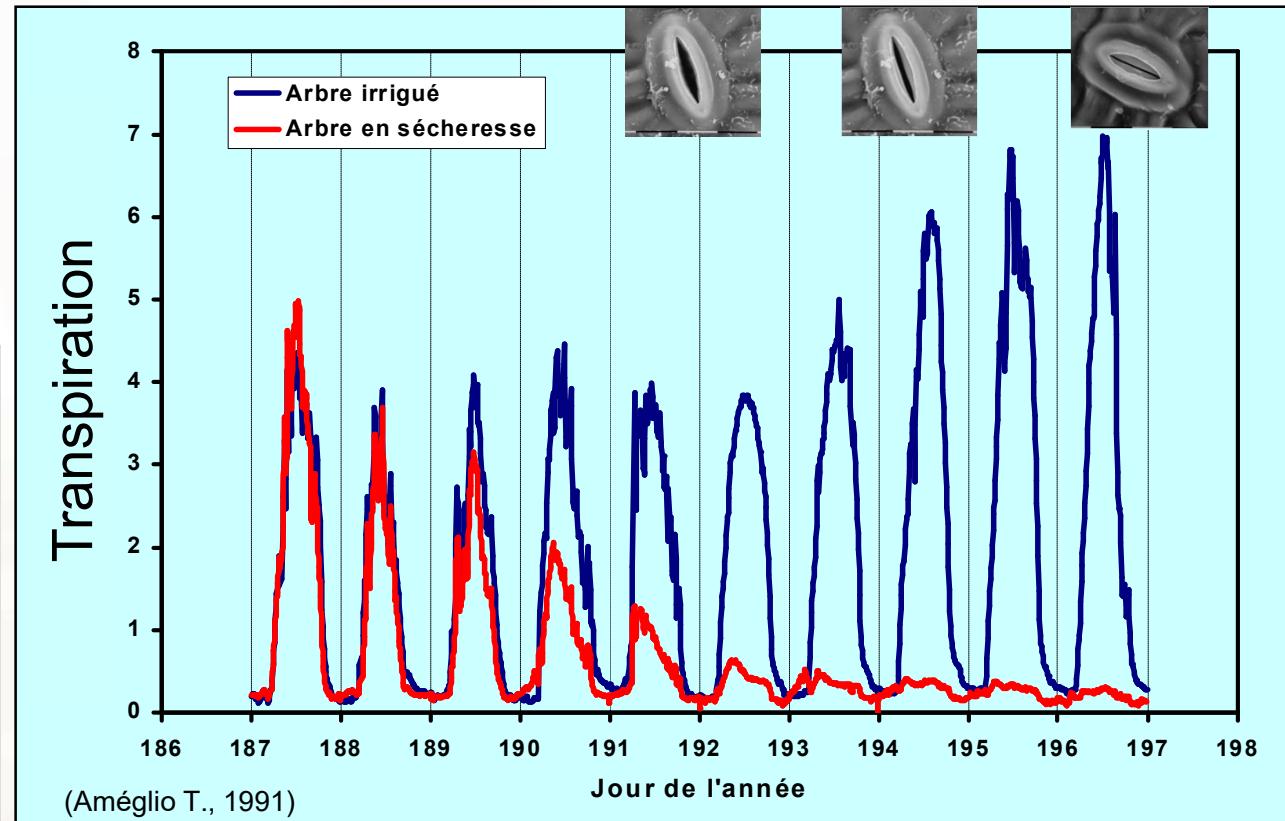
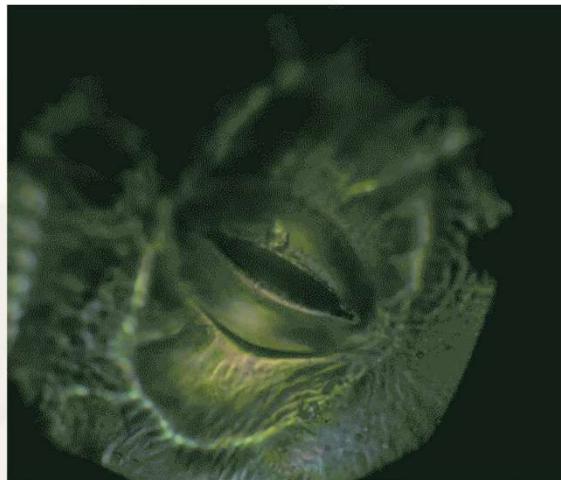


- ✓ Xylème résistant à l'embolie
- ✓ Utiliser les **réserves en eau**



Comment éviter la sécheresse?

Fermer les stomates pour réduire la transpiration.

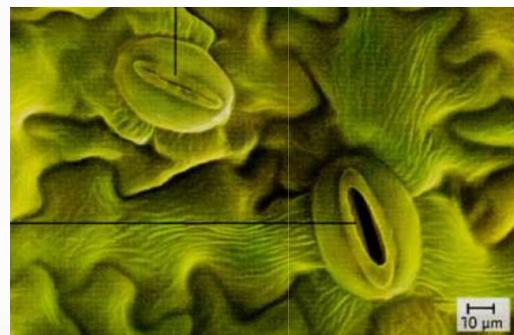


Les mécanismes de résistance à la sécheresse

Eviter la sécheresse

Réduire les pertes en eau

- ✓ Fermer les stomates



- ✓ Réduire la surface foliaire

Augmenter les entrées d'eau

- ✓ Racines plus profondes
- ✓ Accroître la densité racinaire



Tolérer la sécheresse

- ✓ Protection moléculaire (**antioxydants**)
- ✓ **Accumulation de sucres**

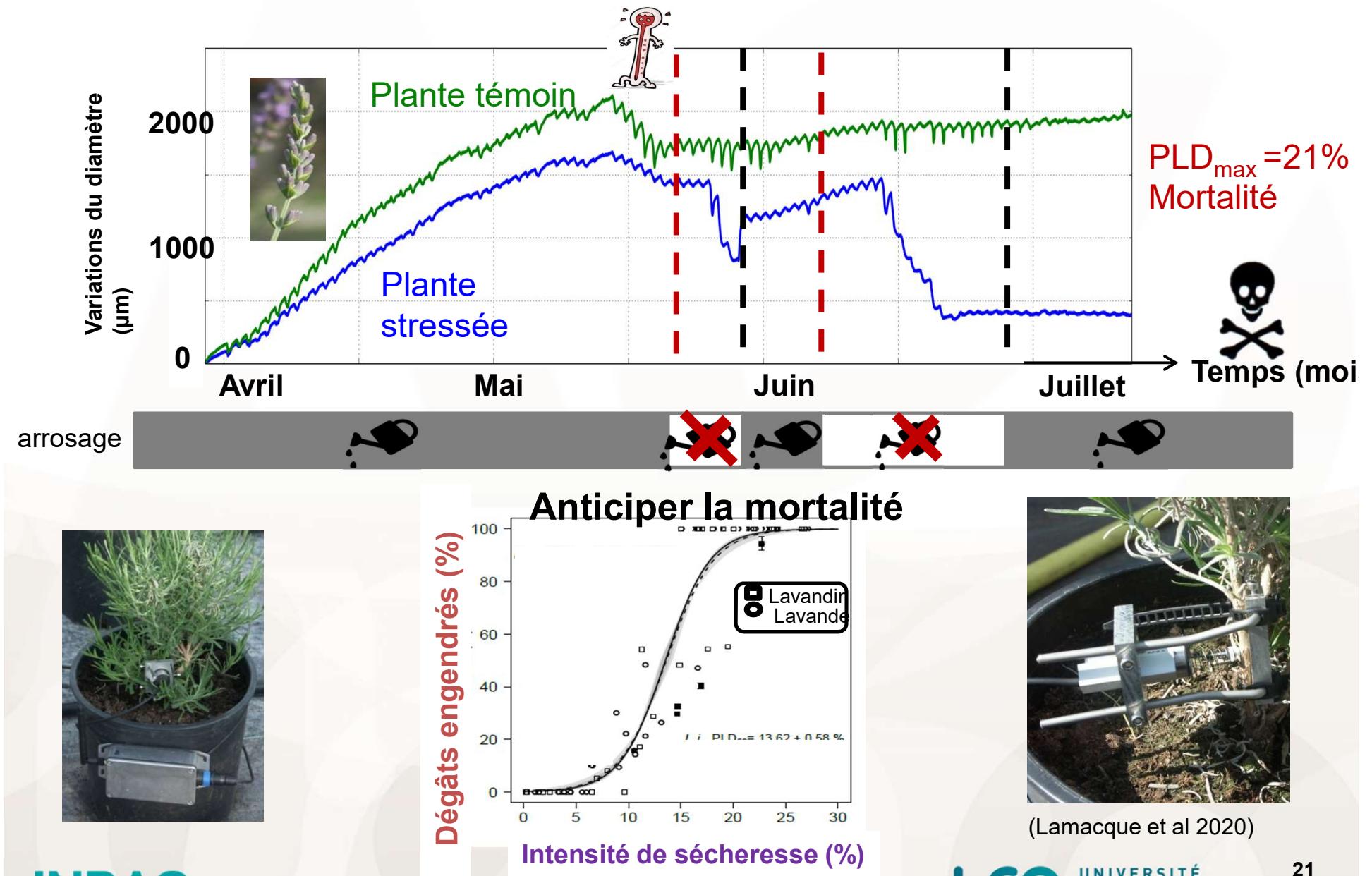


- ✓ Xylème résistant à l'embolie

- ✓ Utiliser les **réserves en eau**



Utilisation des micro-dendromètres pour comprendre les capacités hydrauliques des arbres

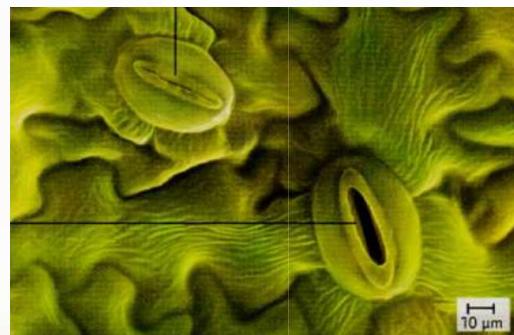


Les mécanismes de résistance à la sécheresse

Eviter la sécheresse

Réduire les pertes en eau

- ✓ Fermer les stomates



- ✓ Réduire la surface foliaire

Augmenter les entrées d'eau

- ✓ Racines plus profondes
- ✓ Accroître la densité racinaire



Tolérer la sécheresse

- ✓ Protection moléculaire (**antioxydants**)
- ✓ **Accumulation de sucres**

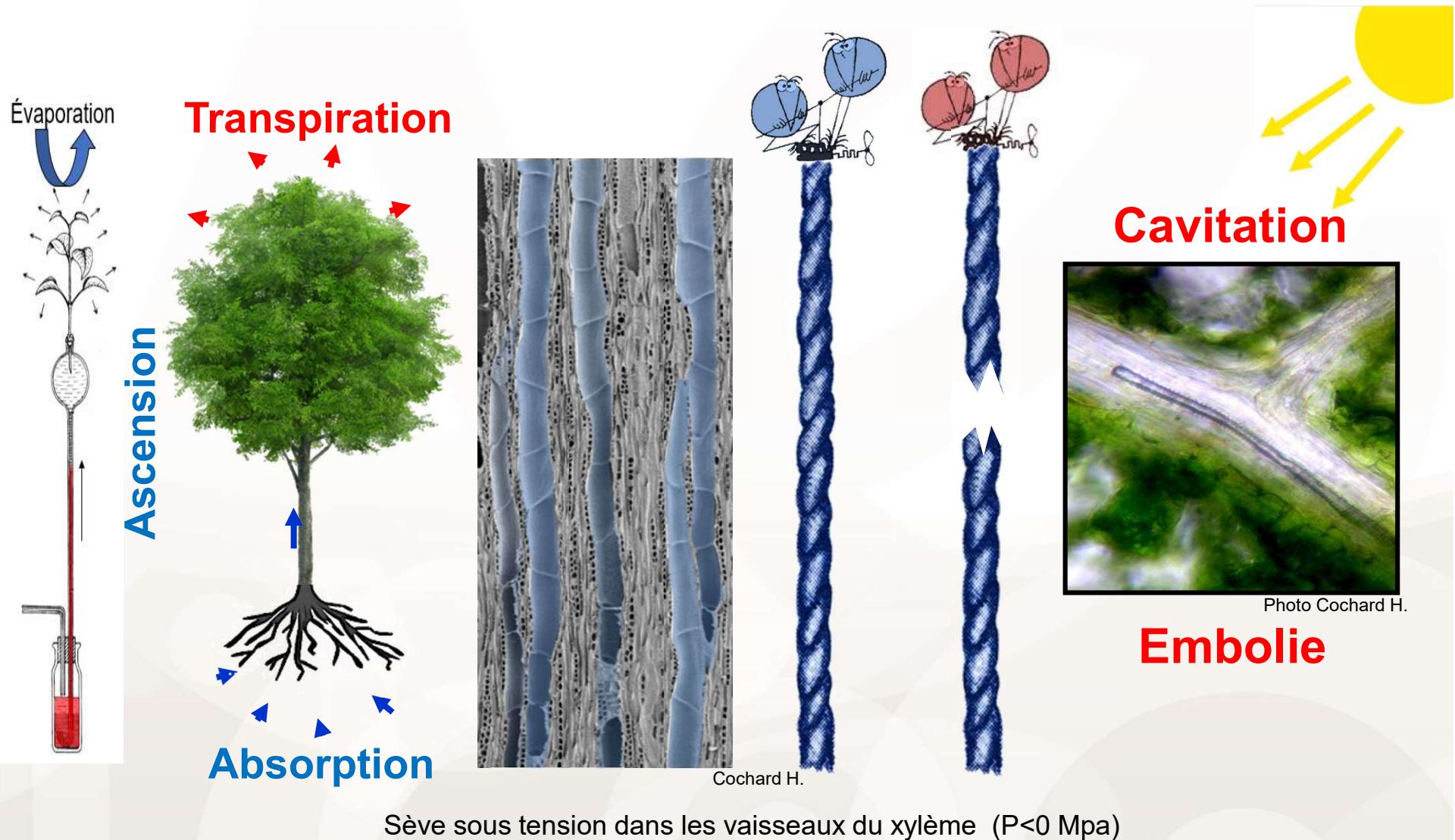


- ✓ **Xylème résistant à l'embolie**

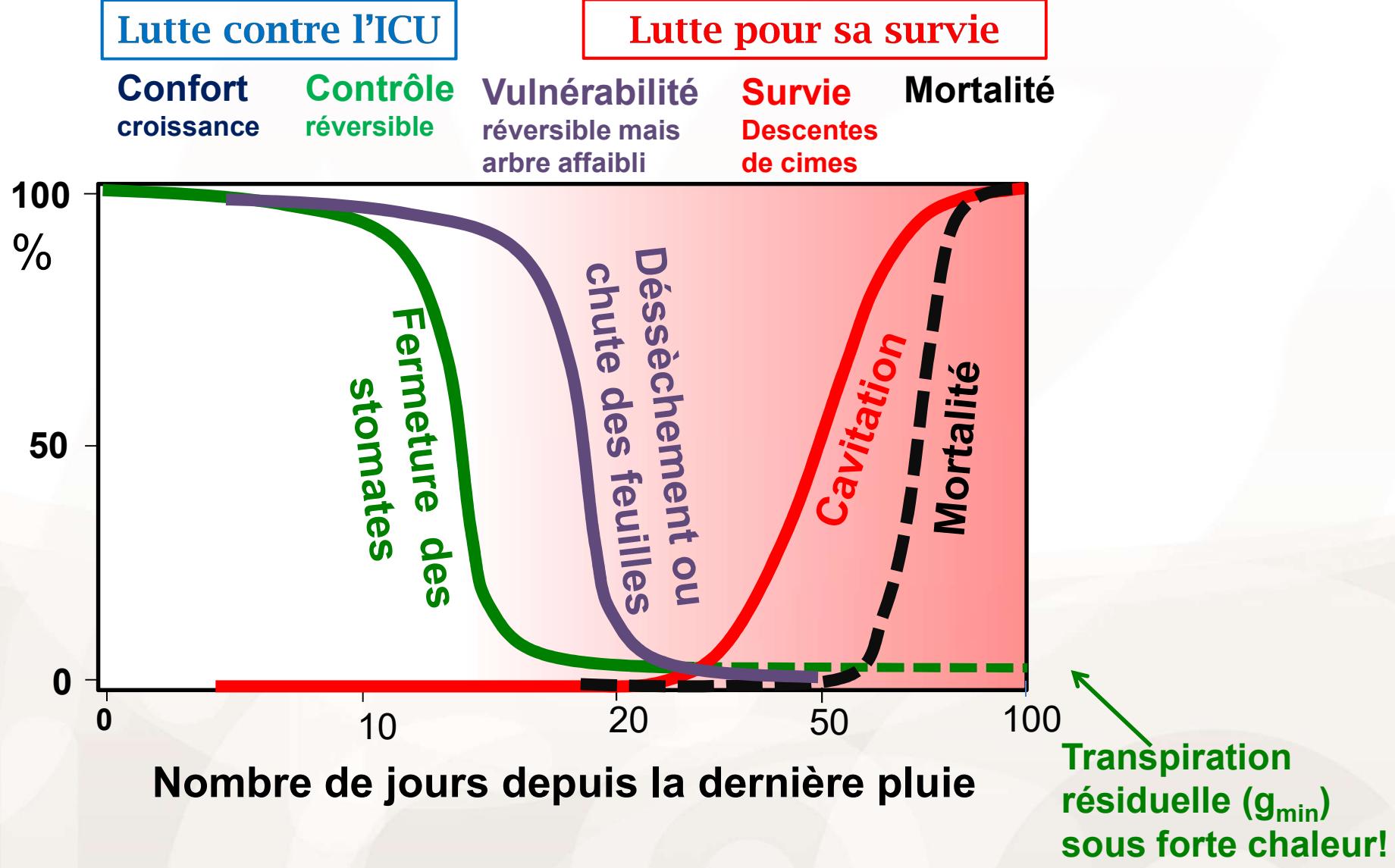
- ✓ Utiliser les **réserves en eau**



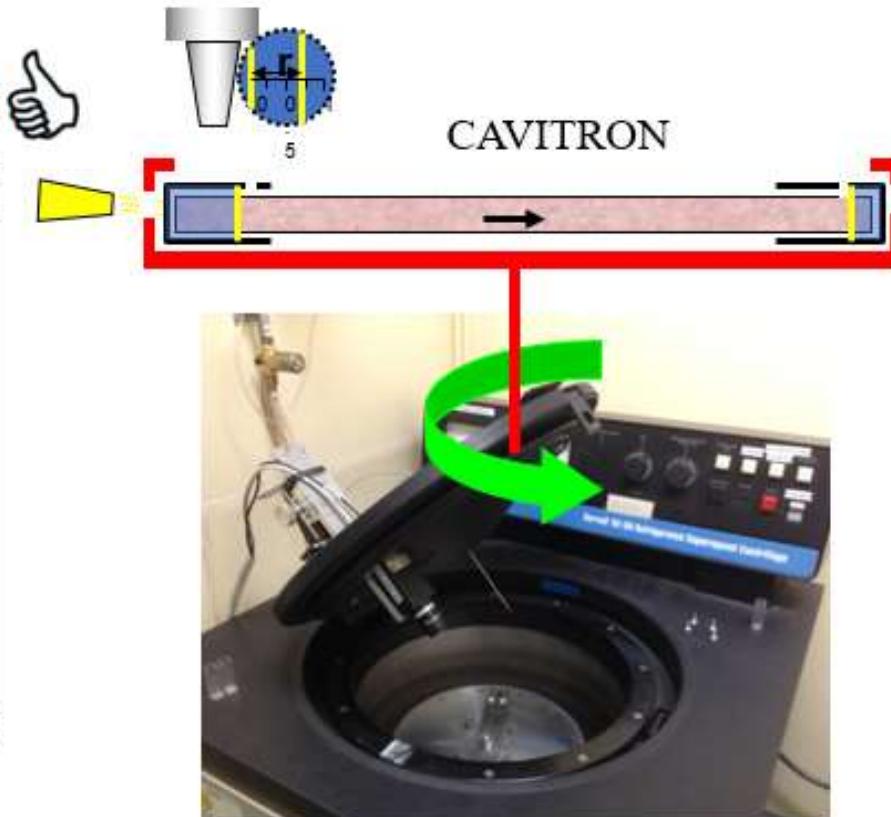
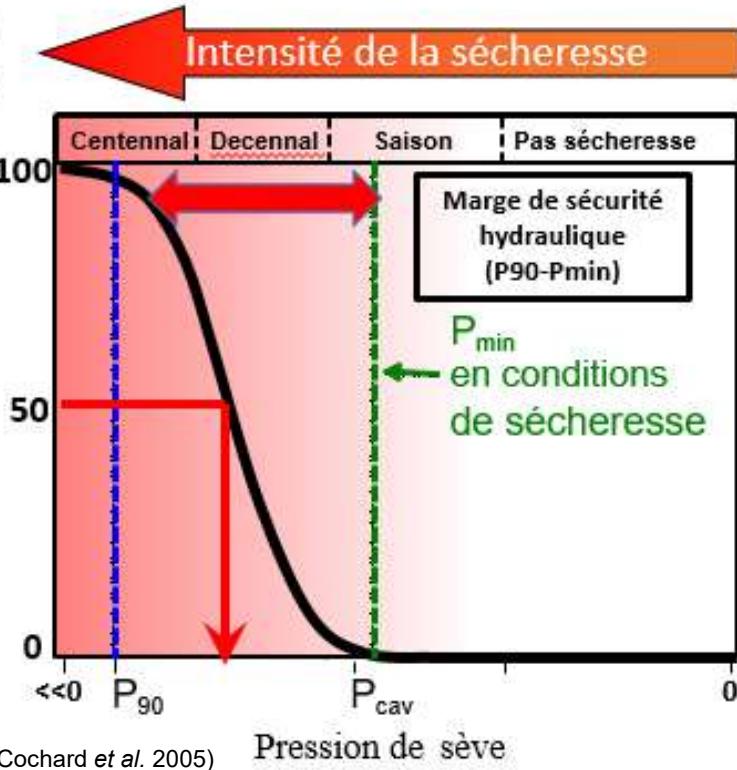
Un système vulnérable aux sécheresses



En résumé : la réponse des arbres à la sécheresse



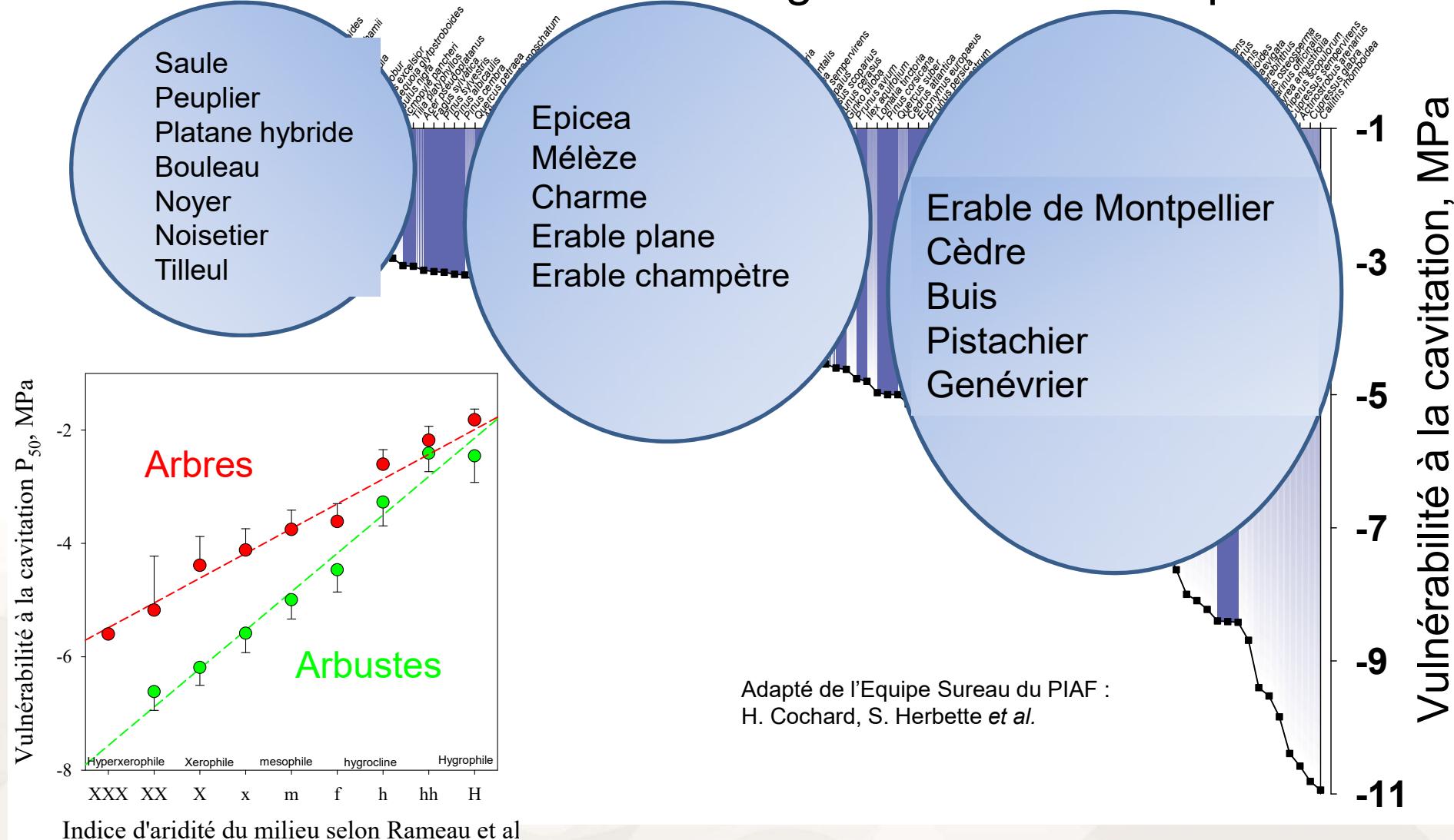
Vulnérabilité à la cavitation et embolie des arbres



Développement de méthodes de phénotypage de la vulnérabilité à la cavitation et à l'embolie

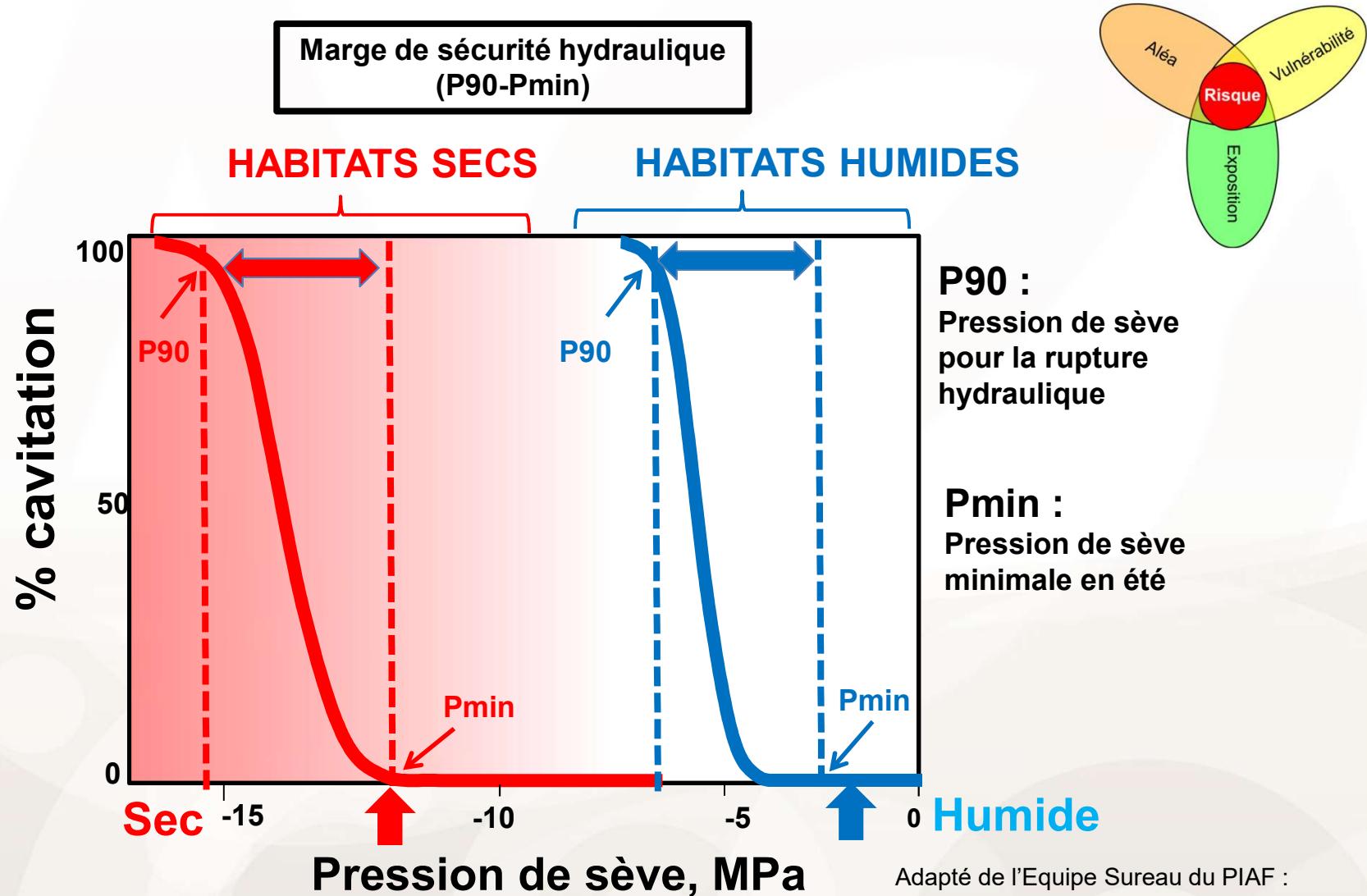
Définir des Marges de sécurité hydraulique selon les espèces

La vulnérabilité à la cavitation des ligneux : un trait adaptatif

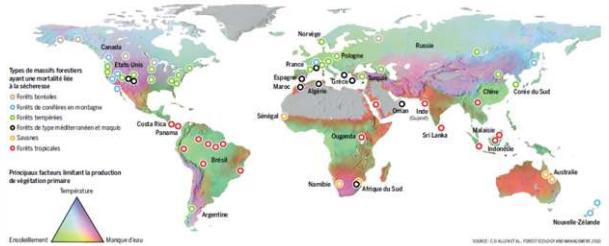
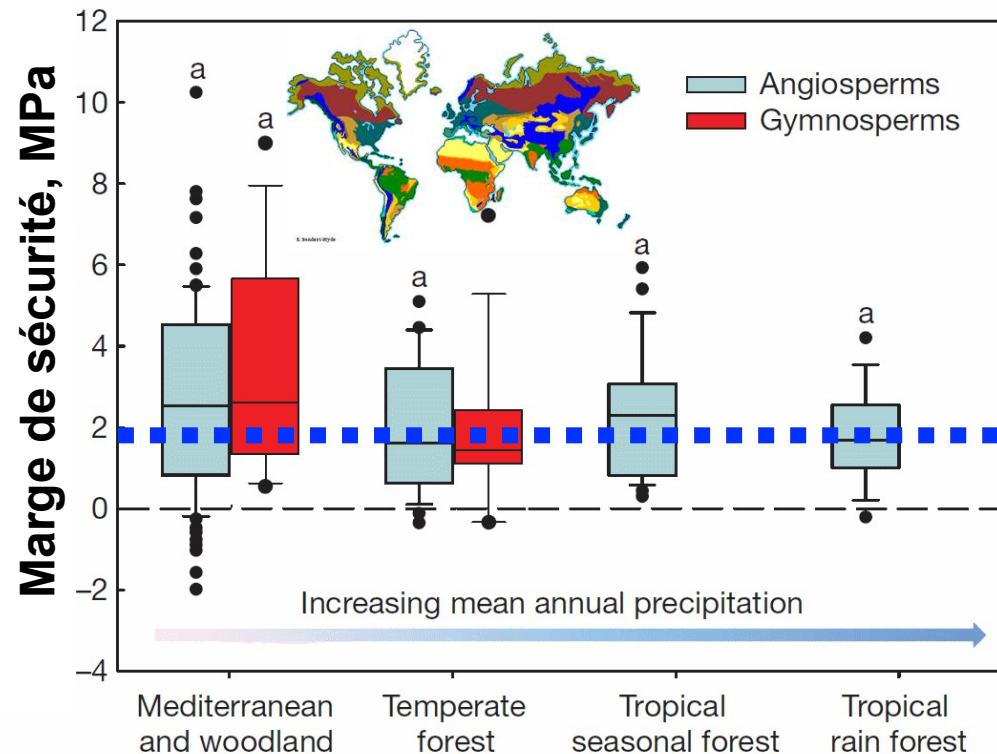


- La résistance à la **cavitation** varie fortement entre espèces.
- La vulnérabilité à la cavitation des ligneux est un **trait adaptatif**

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



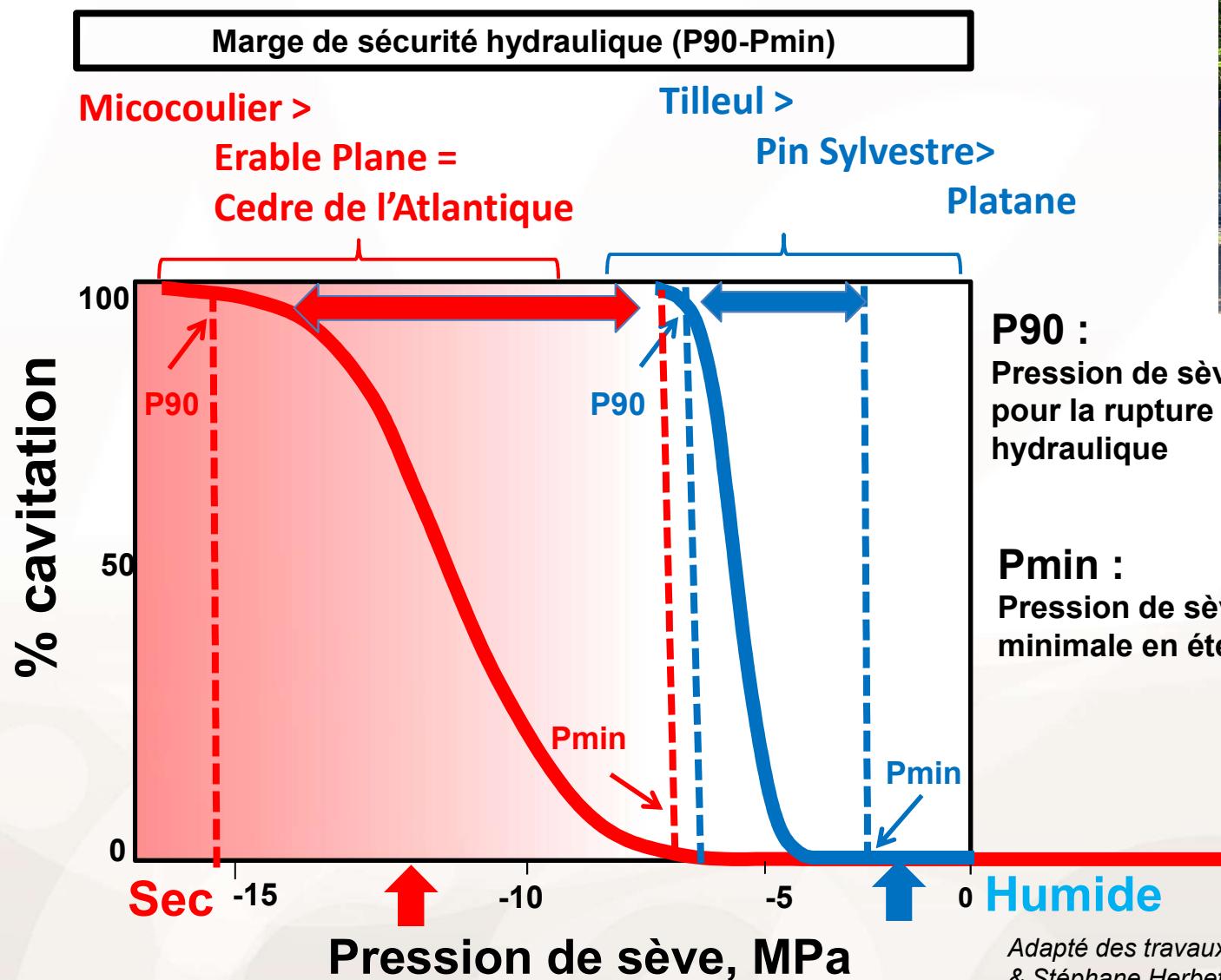
Les marges de sécurité hydrauliques sont globalement faibles pour tous les écosystèmes forestiers



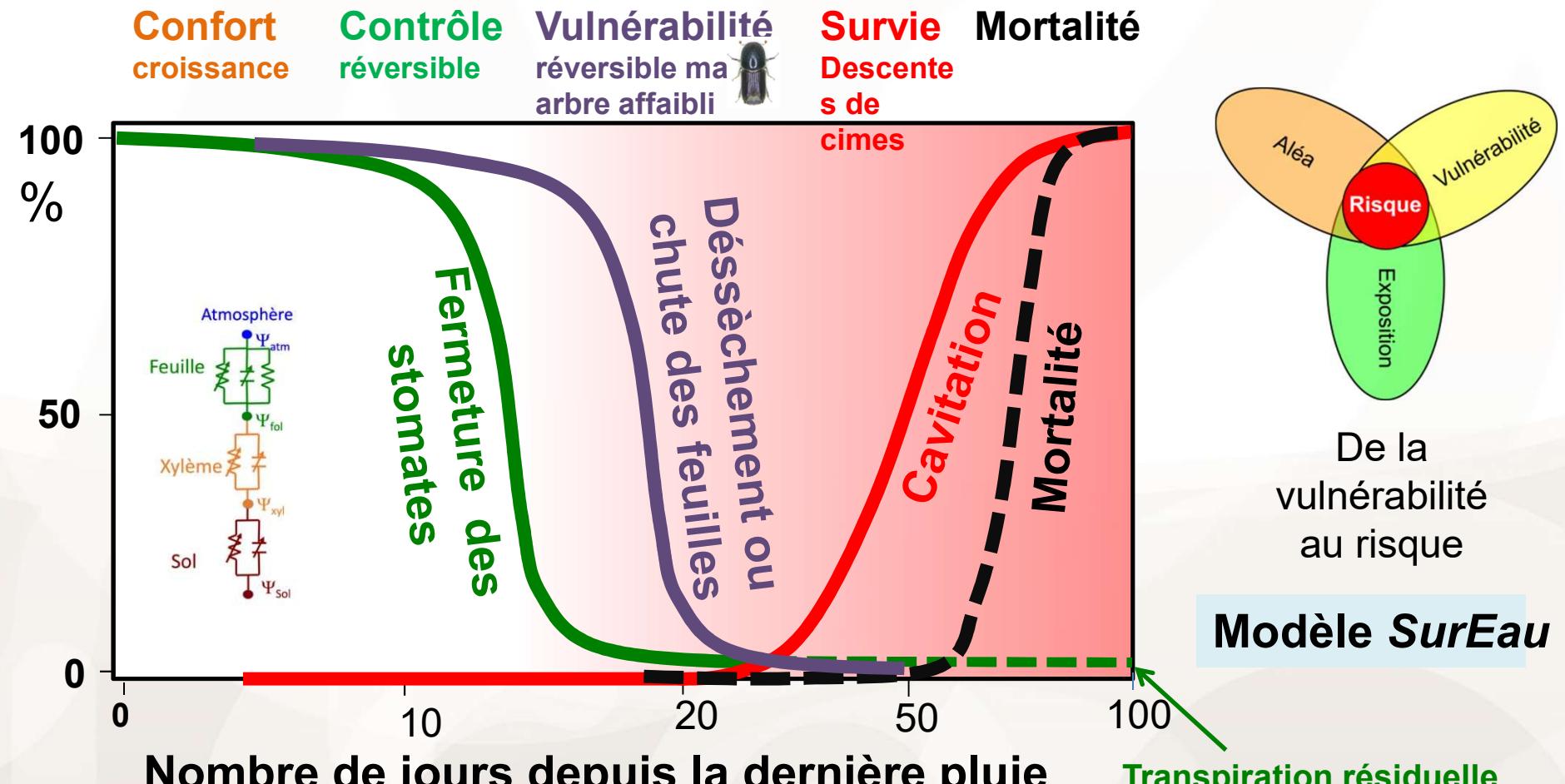
d'après Choat *et al*, Nature 2012

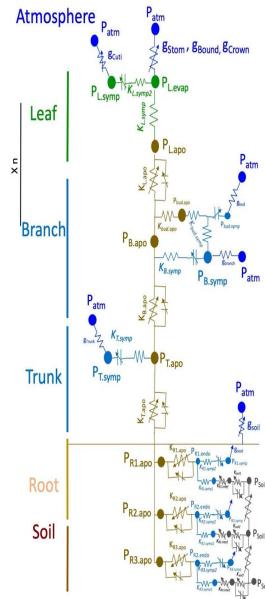
Toutes les espèces
sont potentiellement
vulnérables !

Migration assistée, une
solution possible... !



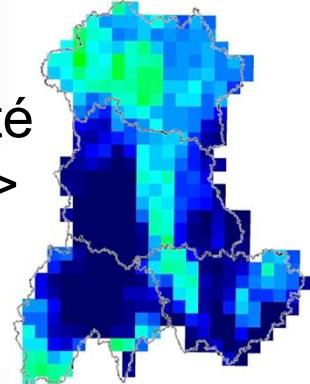
Modèle mécaniste de la réponse des arbres à la sécheresse





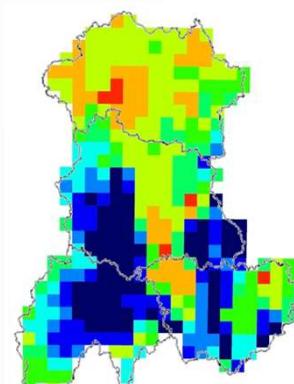
SurEau: Modéliser le temps pour atteindre la rupture hydraulique appliquée au Sapin d'Auvergne.

2000

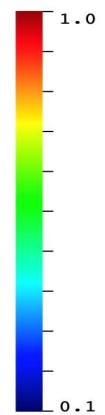
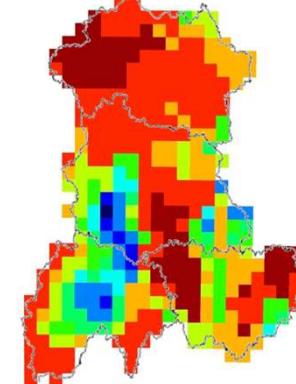


Probabilité
Embolie >
50%

2100 RCP 2.6



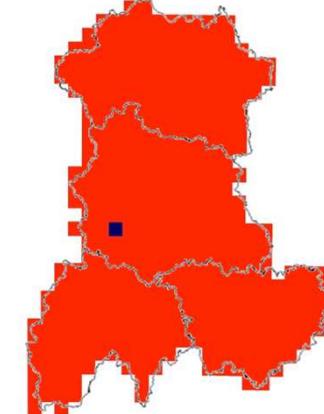
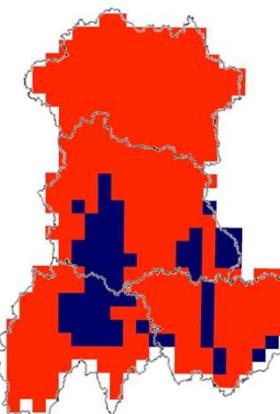
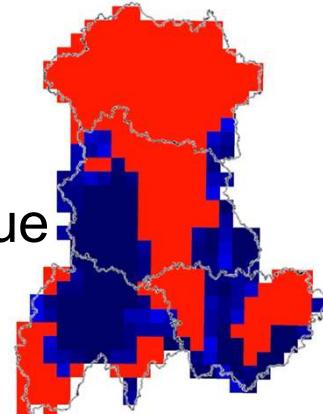
2100 RCP 8.5



Cochard *et al* 2020,
BioArxiv, PCI
Cochard *et al* 2021, AFS

Niche
écophysiollogique

Zone compatible
Zone non
compatible

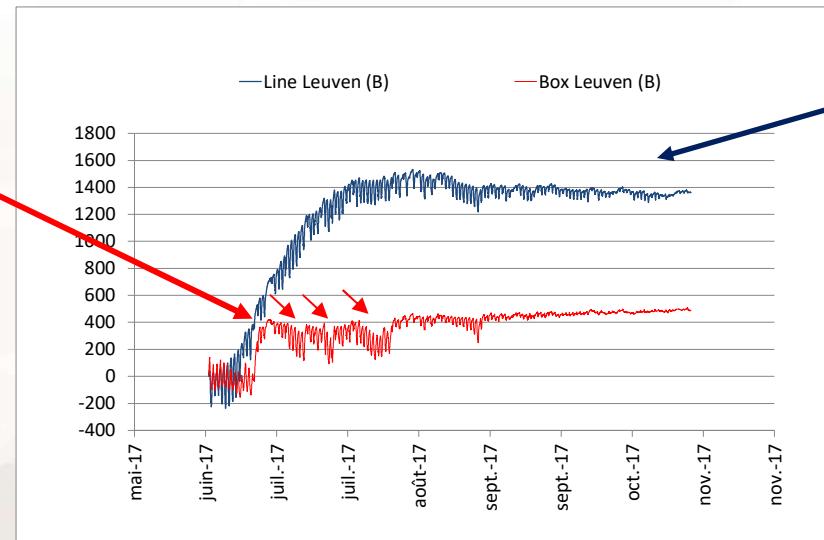


Gérer la Santé des Arbres en ville



Nécessité de **gérer la santé des arbres** pour qu'ils puissent exercer correctement le service de lutte contre les ICU!

- *Choix d'espèces adaptées*, (cf. résistantes à la sécheresse et au gel - vulnérabilité à l'embolie – LAD... Migration assistée...).
- **Conditions de plantation**
fosses scellées vs. linéaire,
qualité des sols,
mélange terre/pierre,
mulching,...



Gérer la Santé des Arbres en ville



Nécessité de **gérer la santé des arbres** pour qu'ils puissent exercer correctement le service de lutte contre les ICU!

- **Choix d'espèces adaptées**, (cf. résistantes à la sécheresse - vulnérabilité à l'embolie).
- **Conditions de plantation** (fosses scellées vs. linéaire), ...
- **Choix d'infrastructures adaptées** (Projet Garibaldi Lyon : preuve du concept)

GRANDLYON
la métropole



PROJET VILLE PERMÉABLE

Comment réussir la gestion des eaux pluviales dans nos aménagements ?



Transformation des trémies (tunnel sous intersection) en bassin de stockage des eaux de pluies (trottoirs et pistes cyclables)!

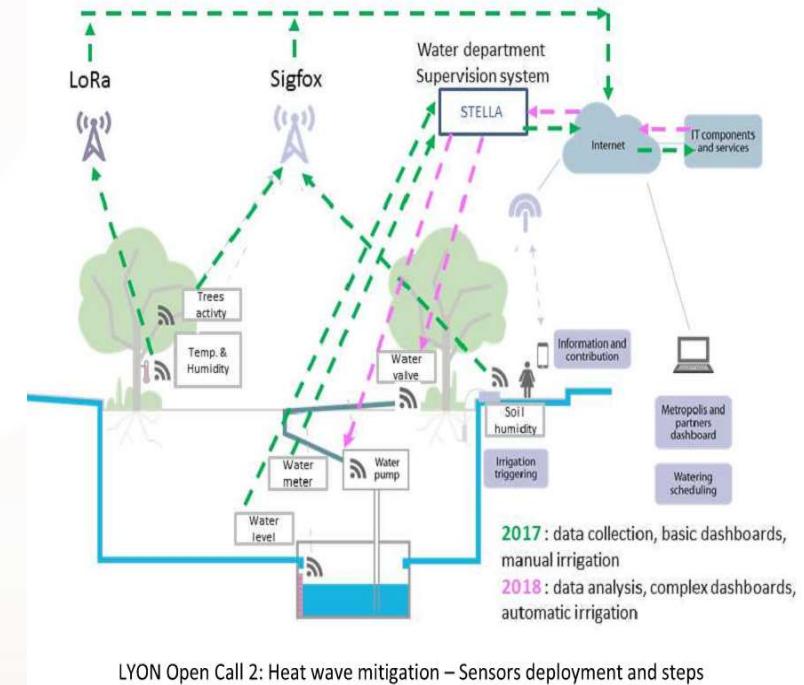
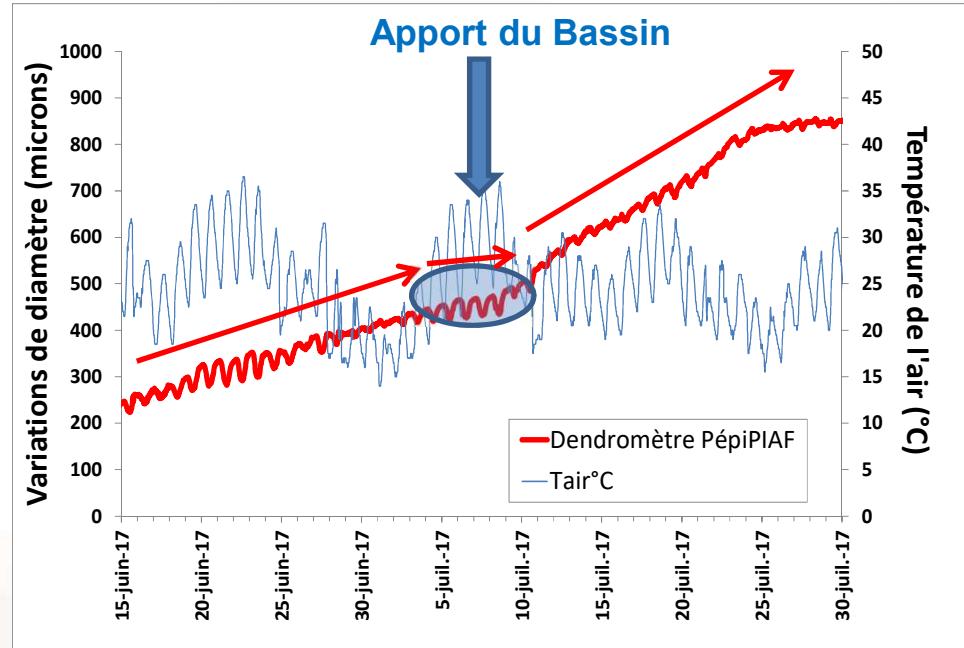
INRAE

Dépérissement de l'Arbre Urbain – Qualiarbre[©] - Niort - 26 & 27 Juin 2025

UCA UNIVERSITÉ
Clermont Auvergne

Infrastructure verte pour atténuer les îlots de Chaleur Urbains

Projet Garibaldi GRANDLYON
la métropole



Appart d'eau en période de forte température de l'air \Rightarrow diminution des contraintes hydriques et reprise de la **croissance** et de la **Transpiration** \Rightarrow

Optimisation du service de rafraîchissement de la ville par la **végétation**.

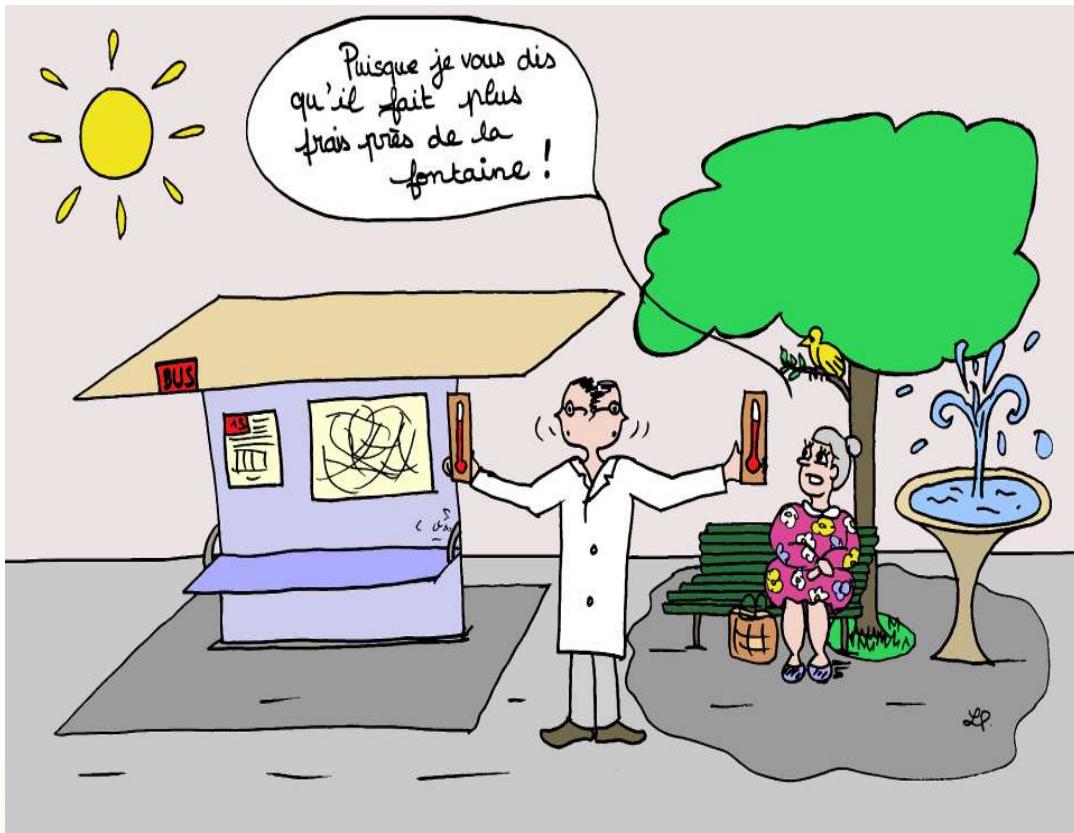
Ecophysiologie permet une meilleure connaissance du rôle et des limites des arbres ... en ville aussi.

- Des Méthodes et Outils sont maintenant disponibles :
 - Pour mieux choisir les espèces, les diversifier.
 - Mesures *in situ* / construire des base de données sur la physiologie arbres... urbains compris!
 - Dvlp de méthodes de Phénotypage (**Cavitron/Drought Box, Freeze Box, Croissance**).
 - Dvlp **capteurs/monitoring** (Microdendromètres/PepiPIAF, ...)
 - Dvlp de méthodes de caractérisation de la **géométrie des structures urbaines (Lidar) : bâti et végétation** (hauteur, LAI, LAD) ...
 - Dvlp de modèles **phénologiques** (date de débourrement, besoin de froid, besoin de chaud, risque de gel), de **résistance au gel** (modèle osmohydrique) de la réponse des arbres à la **sécheresse** (sureau)
 - Pour mieux les gérer les arbres y compris en ville en particulier pour lutter contre **ICU**.
 - Dvlp **capteurs/monitoring** (temps réel, IoT,...)
 - Pour adapter les **infrastructures**.
 - Modélisation Phénologique et risques écophysioligiques
 - Modélisation numérique (RATP, Laser T,...).
 - Dvlp **capteurs/monitoring** de la vitalité des arbres (sans fil, temps réel, IoT,...)

Pour conclure ...

- Beaucoup de travaux restent à engager...
 - Pour valider nos « traits » écophysiologiques et nos modèles numériques :
 - Pour mieux appréhender la **diversité des structures urbaines**.
 - Pour mieux appréhender la **diversité fonctionnelle des espèces urbaines**.
- Pas forcément un problème de financement (financement possible par l'ANR sur des programmes très compétitifs : Taux de réussite 10-15%). Autres financements possibles par les métropoles.
- Pas un problème de partenariat
 - bonne image de l'arbre chez les citoyens
 - bonne volonté des villes (zone atelier pour l'expérimentation).
 - programmes interdisciplinaires (Gestionnaires, Urbanistes, SHS, ...)
 - relais à la recherche publique avec des Instituts récents :  **Plante&Cité**
Ingénierie de la nature *en ville*
Center for landscape and urban horticulture
- Principal problème :
 - **le temps long de la recherche vs. urgence climatique et le temps court du politique, ... qui conduit à l'inaction.**





Qualiarbre®

Merci pour votre attention

thierry.ameglio@inrae.fr

<https://piaf.clermont.hub.inrae.fr/>

Merci aux collègues de l'UMR PIAF :
Eric Badel, Guillaume Charrier, Hervé
Cochard, Stéphane Herbette et Marc
Saudreau pour leurs illustrations



Eric Badel



Guillaume Charrier



Hervé Cochard



Stéphane Herbette



Marc Saudreau