



# 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

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

**Thierry Améglio**

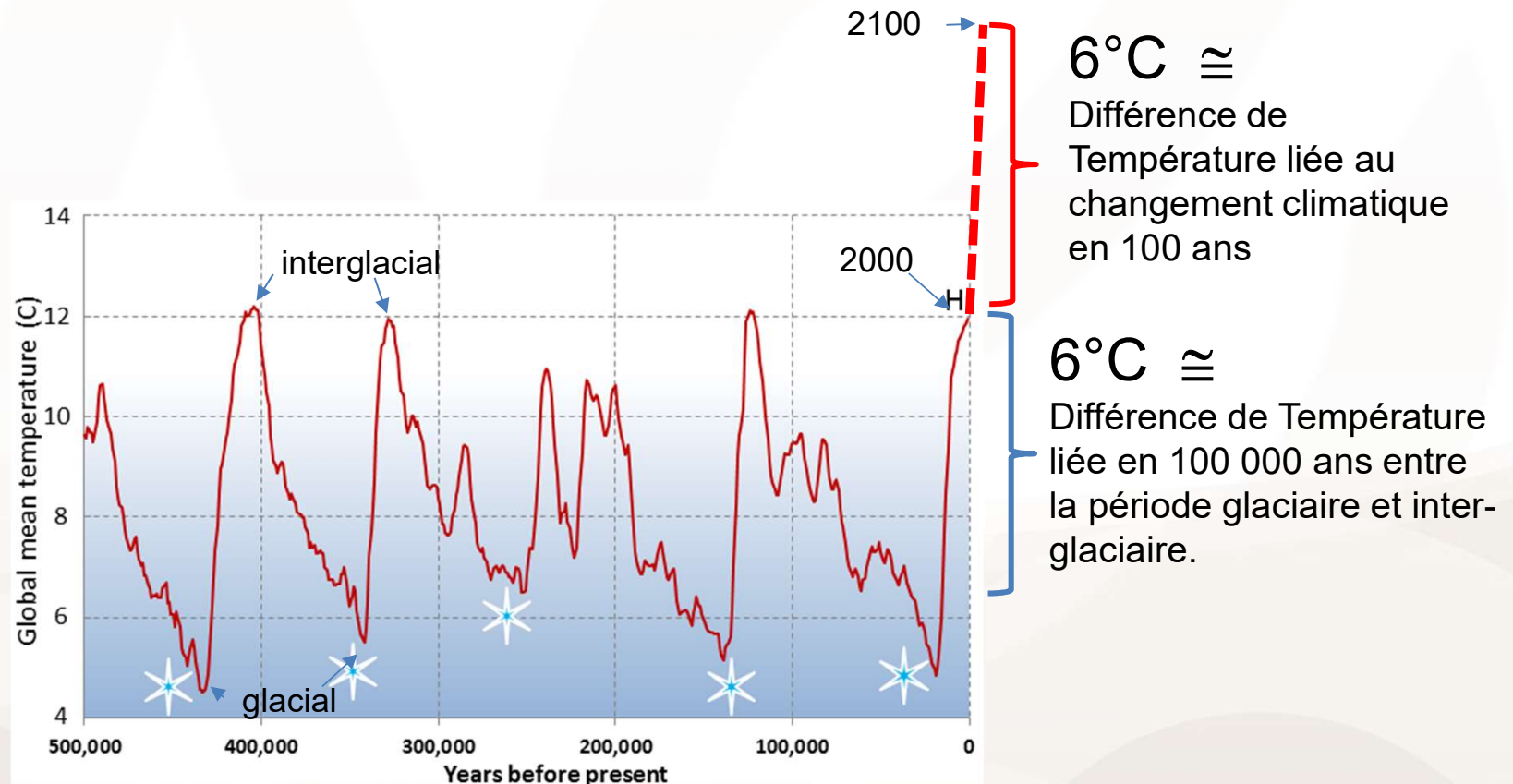
Directeur de Recherche – INRAE– UMR PIAF

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 !**

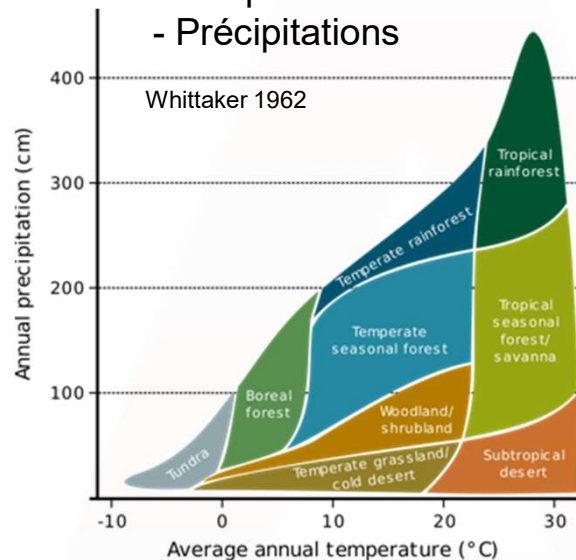


Quel Impact sur la végétation ?

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

**Climat:** principal variable expliquant la distribution de la végétation

- Températures
- Précipitations

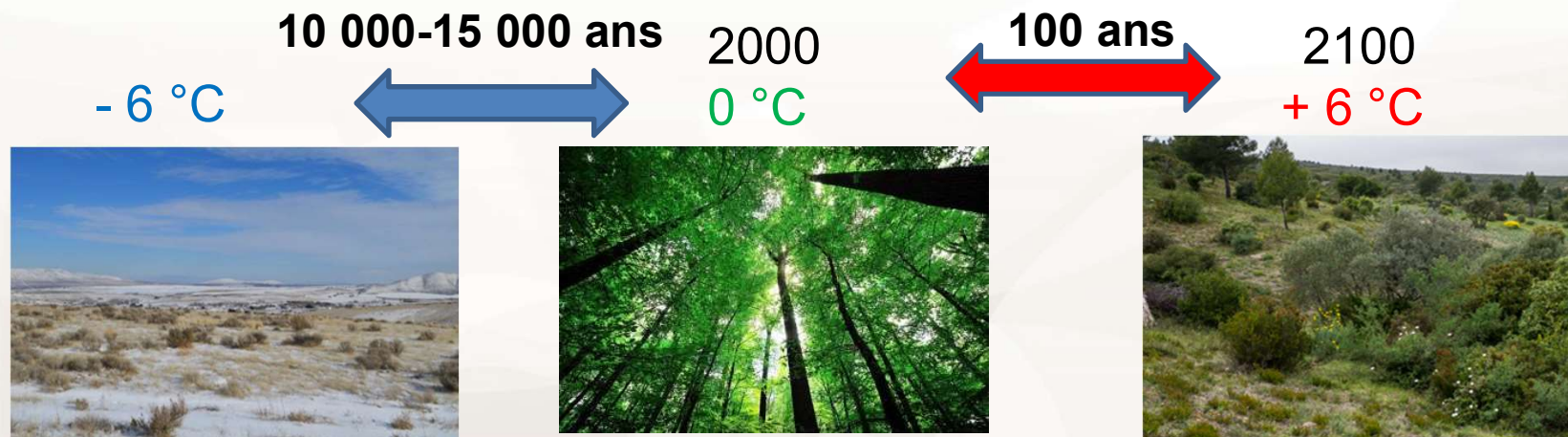


Migration naturelle

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**



*Tundra*



*Tempéré*

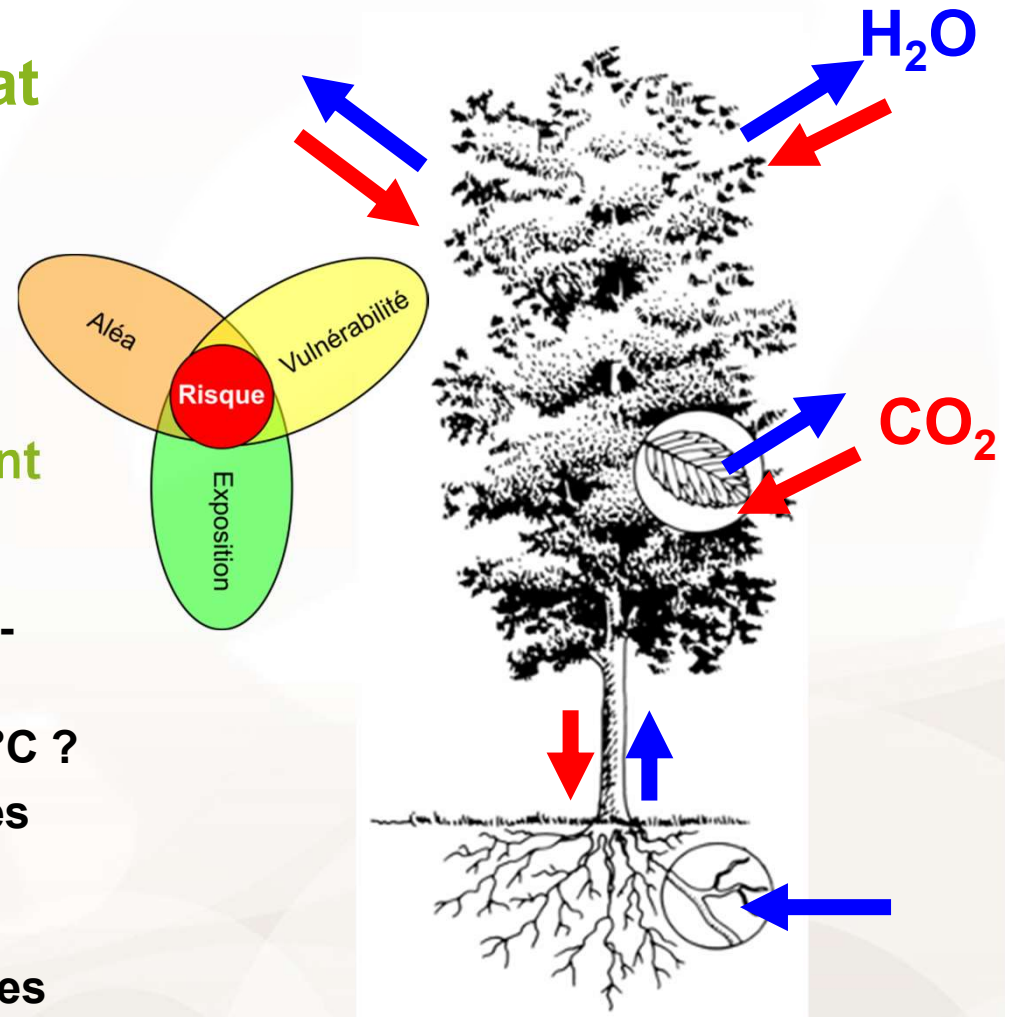


*Méditerranéen*

# Ecophysiologie de l'Arbre

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

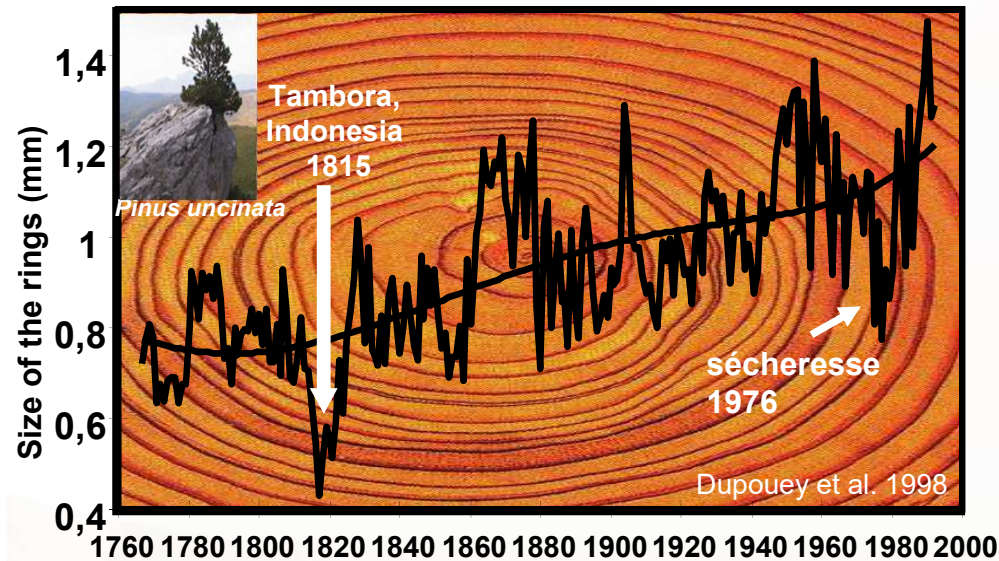
- pour prédire les **risques** (thermique et hydrique...)
  - pour simuler le développement de l'arbre dans le futur.
- 
- Comment la photosynthèse répond-elle à l'augmentation du CO<sub>2</sub> ?
  - Quel est l'impact de la hausse des T°C ?
  - Quels sont les risques de gel dans les climats futurs ?
  - Quelles sont les conséquences de sécheresse et canicule sur la survie des arbres ?





# Physiologie de l'arbre : Croissance (effet "fertilisant" du CO<sub>2</sub>)

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

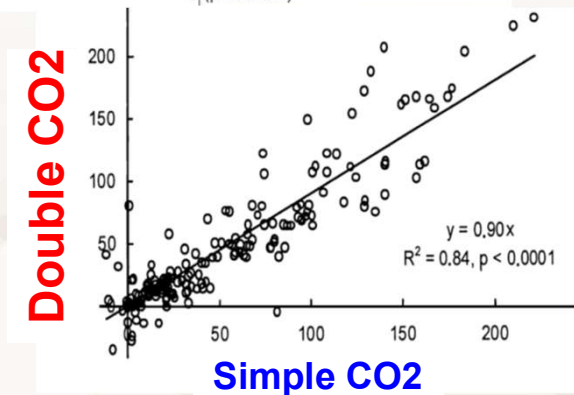
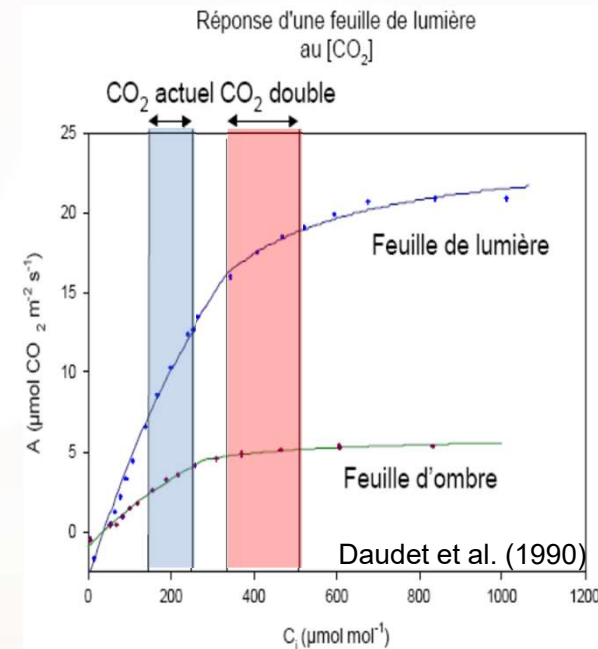


Croissance en Diamètre : un intégrateur des conditions climatiques (Dendrochronologie)

Mais aussi sur la transpiration

$$\text{ETR double CO}_2 = 0.9 \times \text{ETR simple CO}_2$$

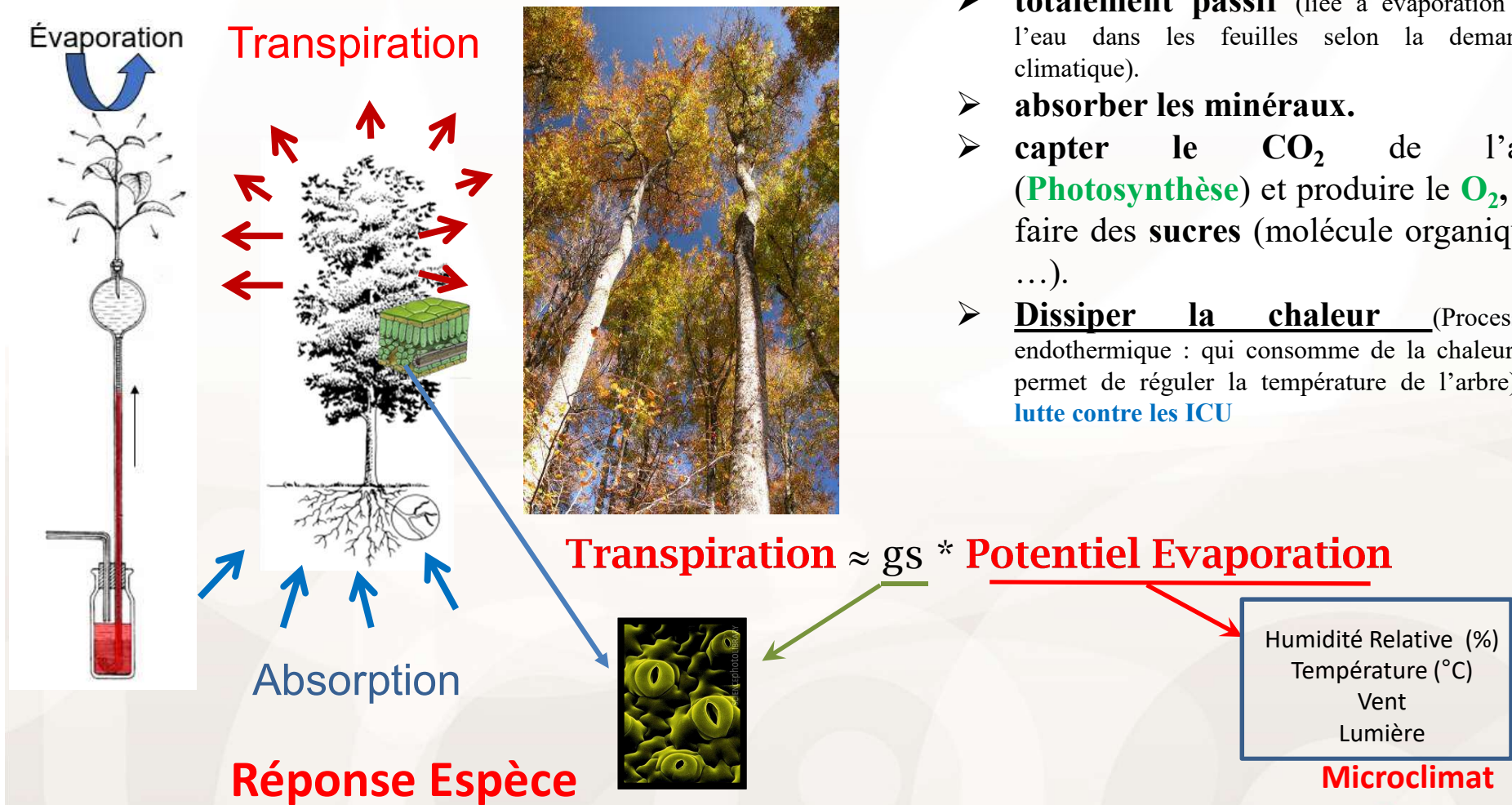
(en absence de contrainte hydrique)



# Fonctionnement hydrique des Arbres et Ascension de la sève

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

Des 10<sup>aines</sup> litres d'eau sont évaporés chaque jour d'été par un arbre en bonne santé  
(en fonction de sa surface foliaire).



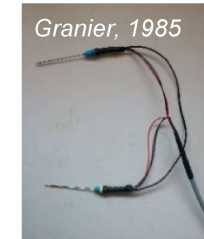
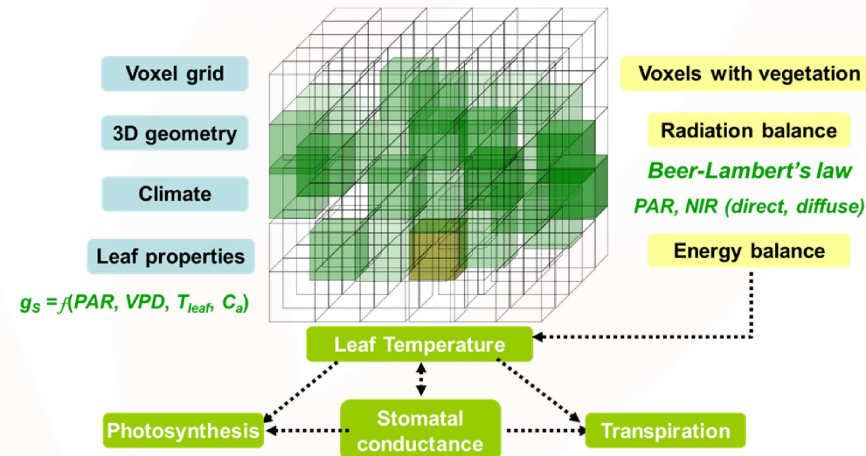
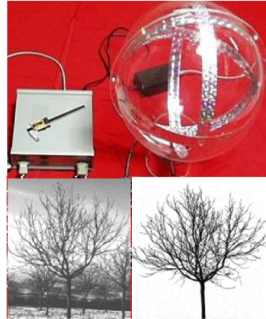
- **totallement passif** (liée à évaporation de l'eau dans les feuilles selon la demande climatique).
- **absorber les minéraux.**
- **capter le CO<sub>2</sub>** de l'air (**Photosynthèse**) et produire le **O<sub>2</sub>**, à faire des **sucres** (molécule organique ...).
- **Dissiper la chaleur** (Processus 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)



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

Sinoquet *et al.* (2001)

## Acquisition de l'architecture 3D d'arbres réels

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

## Validation par mesures de flux de sève au niveau du tronc

## ANR TIR4sTREEt en cours (2023-2026)



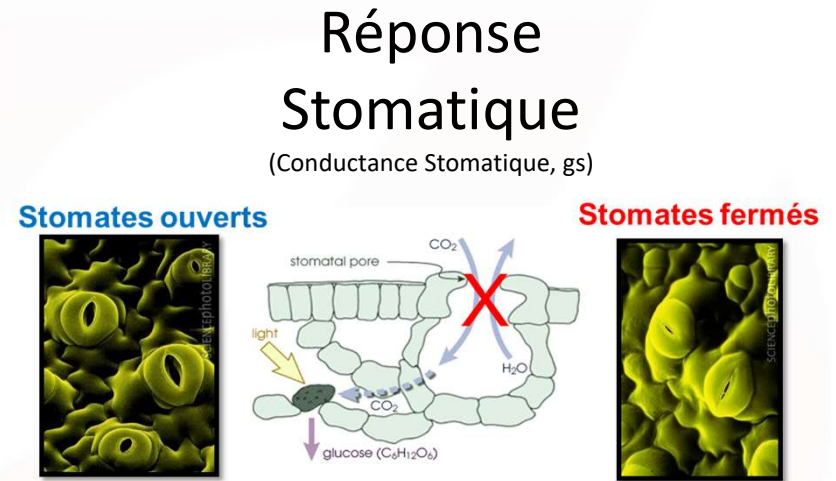
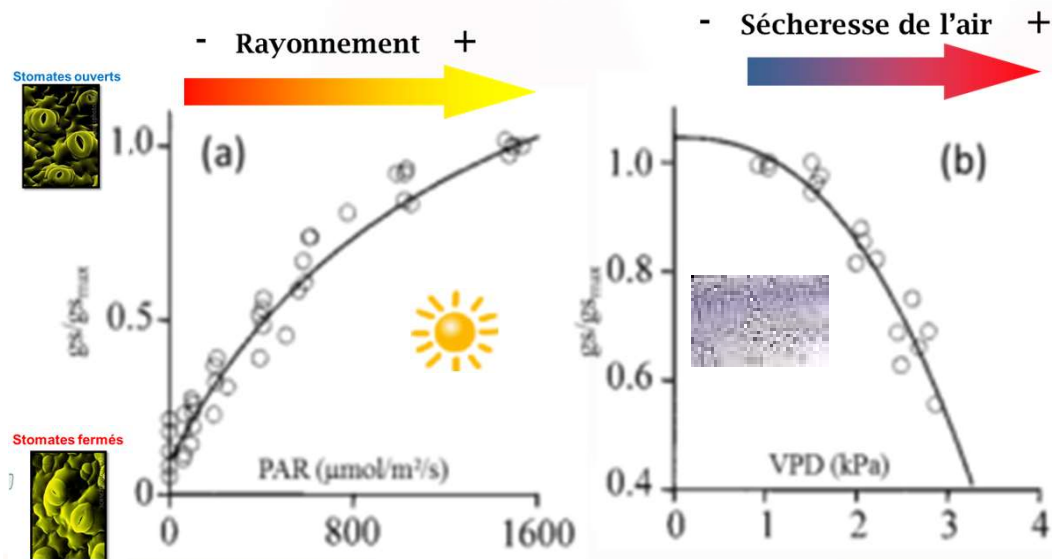
Dépérissement de l'Arbre Urbain – Qualiarbre® - Niort - 26 & 27 Juin 2025



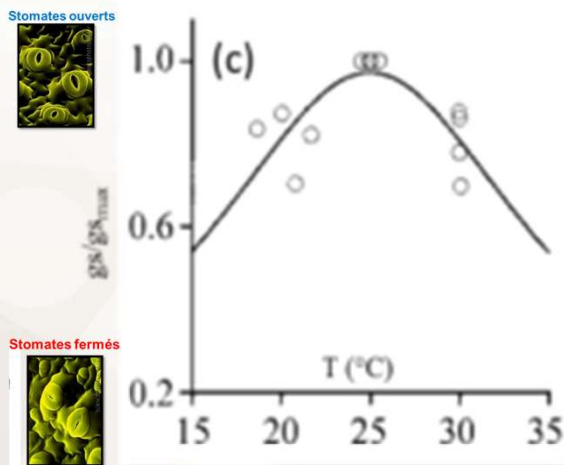
UNIVERSITÉ  
Clermont Auvergne



# Microclimat et Transpiration



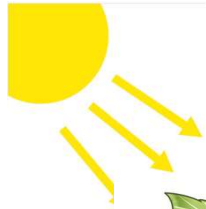
Fonction de la  
Demande  
climatique



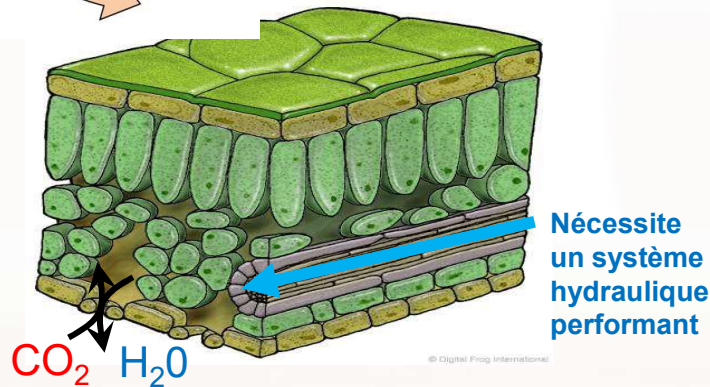
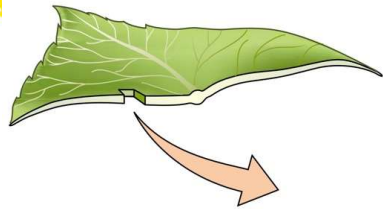
- Température de l'air +

Pincebourde et al., 2007; Damour et al., 2010

# La TRANSPIRATION : effet de RA Fraichissement



**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

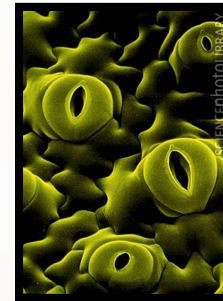


1g d'eau évaporée consomme 600 calories !

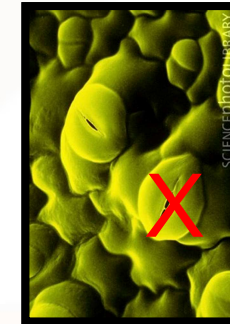
=

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

**Stomates ouverts**



**Stomates fermés**

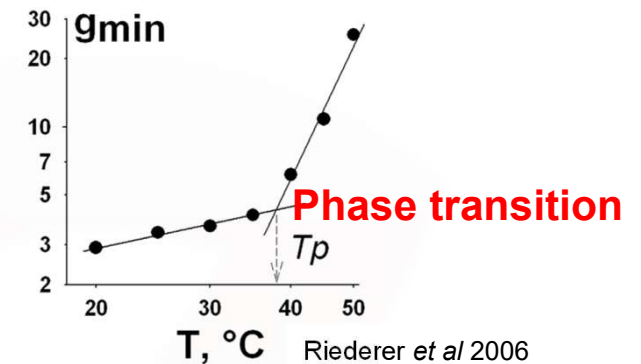
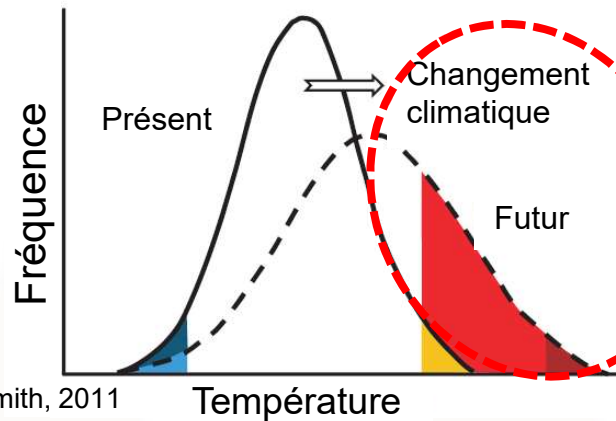


**Sécheresse du sol : Fermeture stomatique  $\Rightarrow$  Diminution de la transpiration  $\searrow$**

- Economise l'eau du sol
- Mais diminue l'entrée de  $\text{CO}_2$  : diminue la production de **sucres** (photosynthèse).
- **Stoppe la régulation thermique!** (les feuilles grillent au soleil)

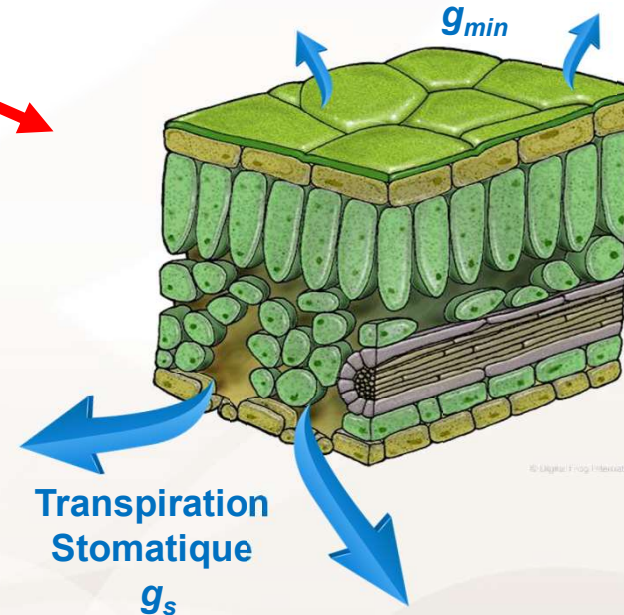
# Physiologie de l'Arbre et risques thermiques

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



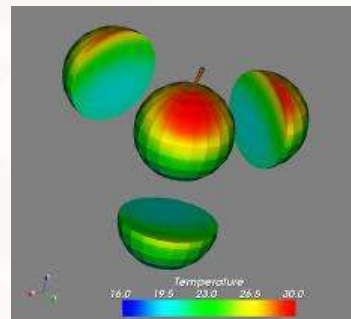
**Très Forte dépendance à T°C >35°C**

Transpiration résiduelle cuticulaire



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

Températures d'organe peu transpirant : dommages  
(**brûlure**, maladie,...)

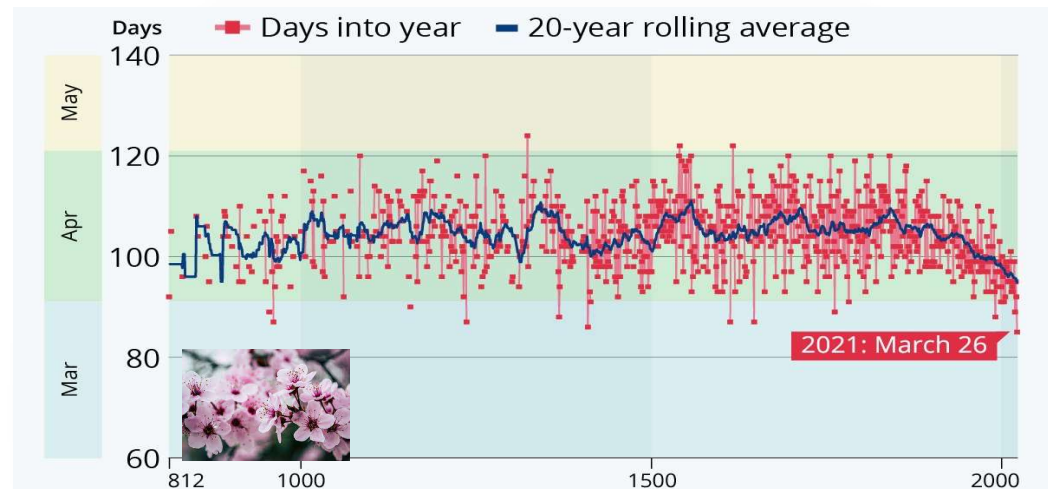
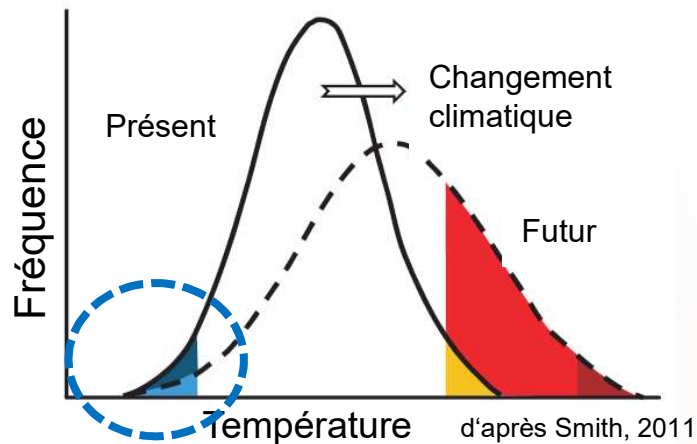


Modélisation 3D des températures d'organes :  
d'après Marc Saudreau (UMR PIAF)



# Physiologie de l'Arbre et risques thermiques

Quels sont les risques de gel dans les climats futurs ?



Source: Yasuyuki Aono/Osaka Prefecture University



Viticulture en Dordogne : "La pire catastrophe depuis 1991"

À LA UNE / BERGERAC / Publié le 19-05-2017 à 18h41. 30s à jour à 11h38 par Grégory Marlet.

## Perturbation phénologique

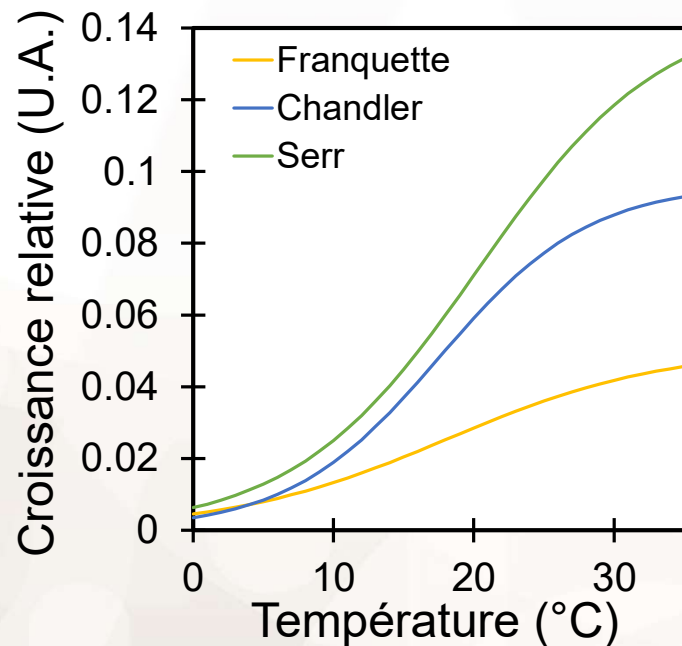
**T°C ↗ : actuellement**

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

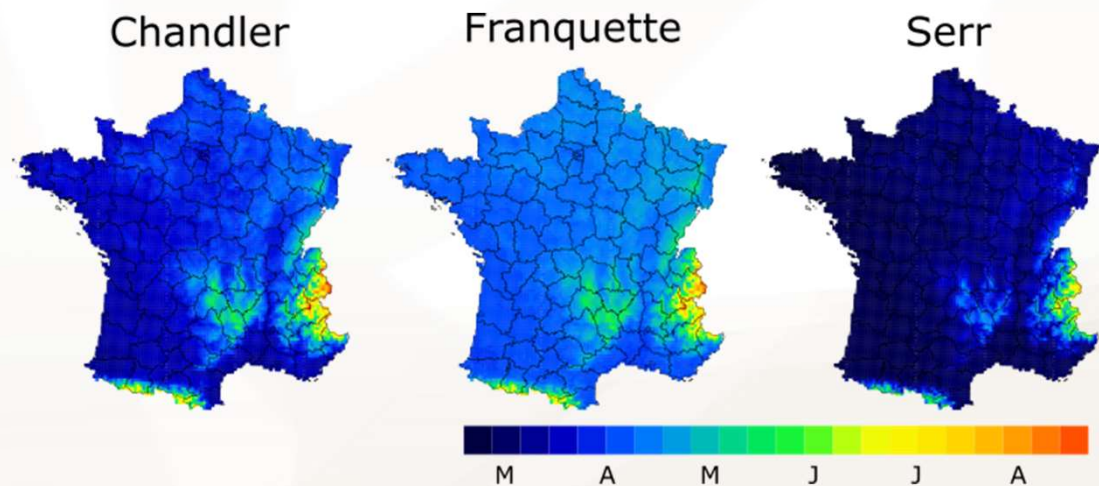


## Physiologie de l'Arbre et risques thermiques

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



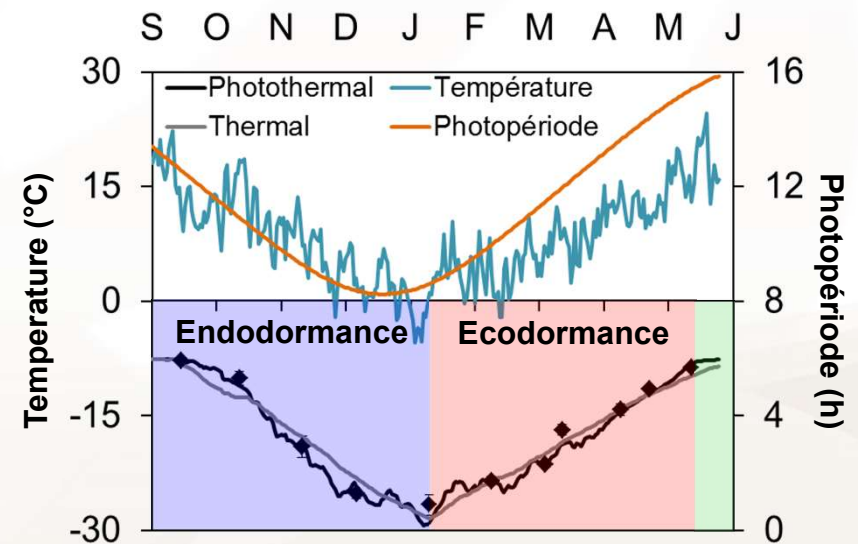
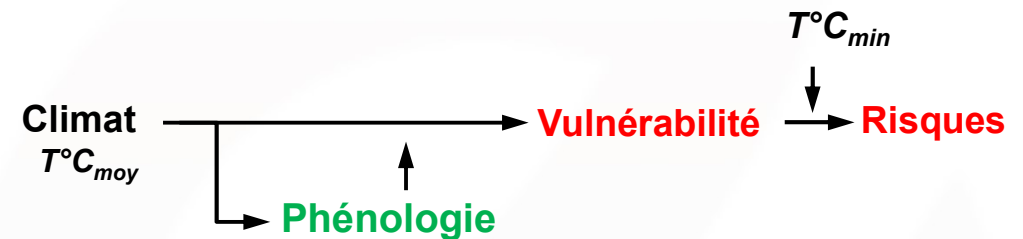
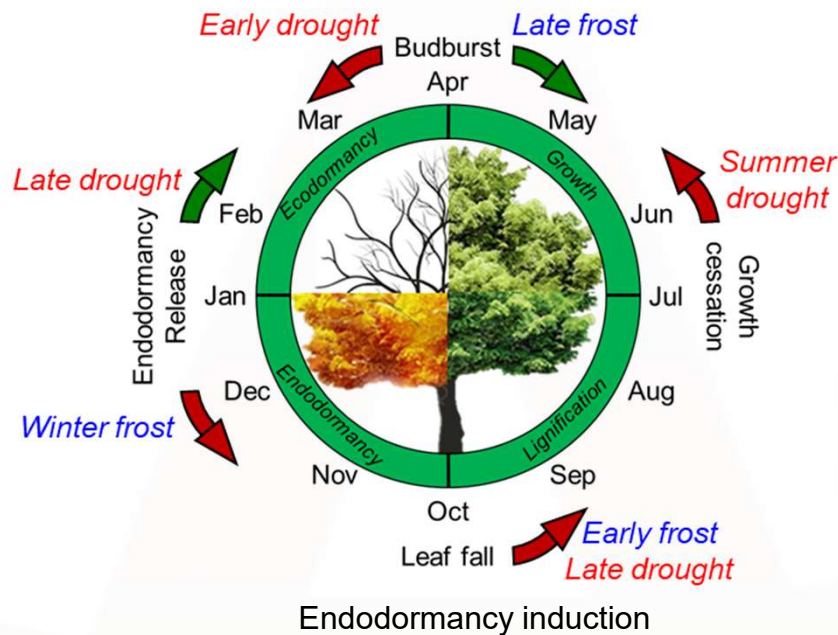
Charrier *et al.*, 2011



Charrier, 2023

# Phénologie et changement climatique

Cycle annuel : alternance de phases de dormance et de croissance



Charrier et al. 2018

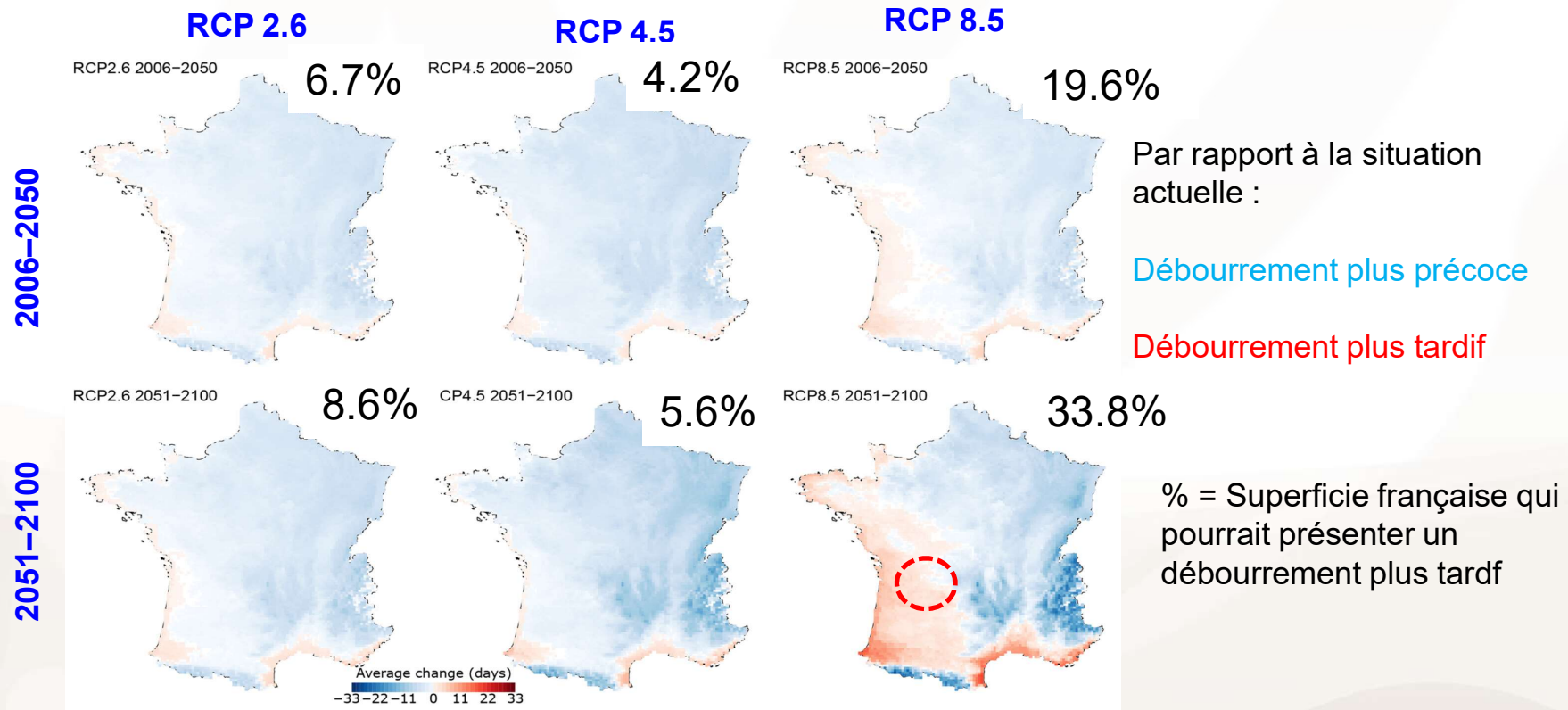
**Acclimatation au gel et endodormance**  
(**évitemment du gel**, **besoin de froid** : Chilling T°C)

**Déacclimatation au gel et ecodormance**  
(**besoin de chaleur** : Forcing T°C)

Effect des stress sur les **stages phénologiques**

# Phénologie et changement climatique : le cas du Noyer

## Simulation de la date de Débourrement

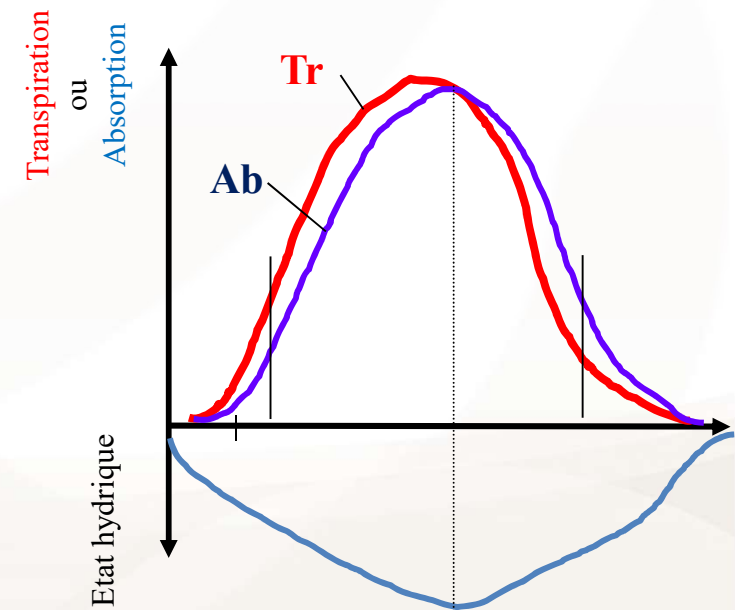
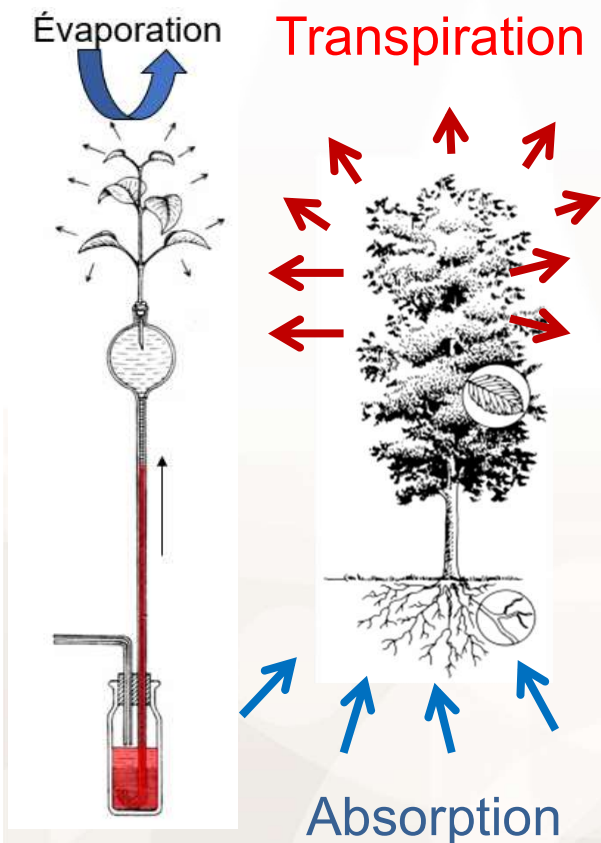


**Noix du Périgord : Risque d'insuffisance de satisfaction des besoins de froid**



# 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 !

LesEchos

CROISSANCE VERTE

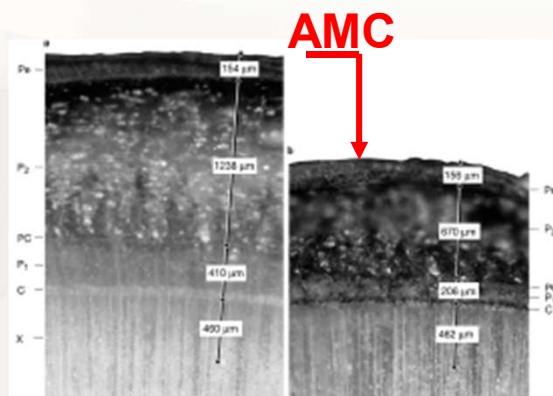
Des arbres sous surveillance électronique

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

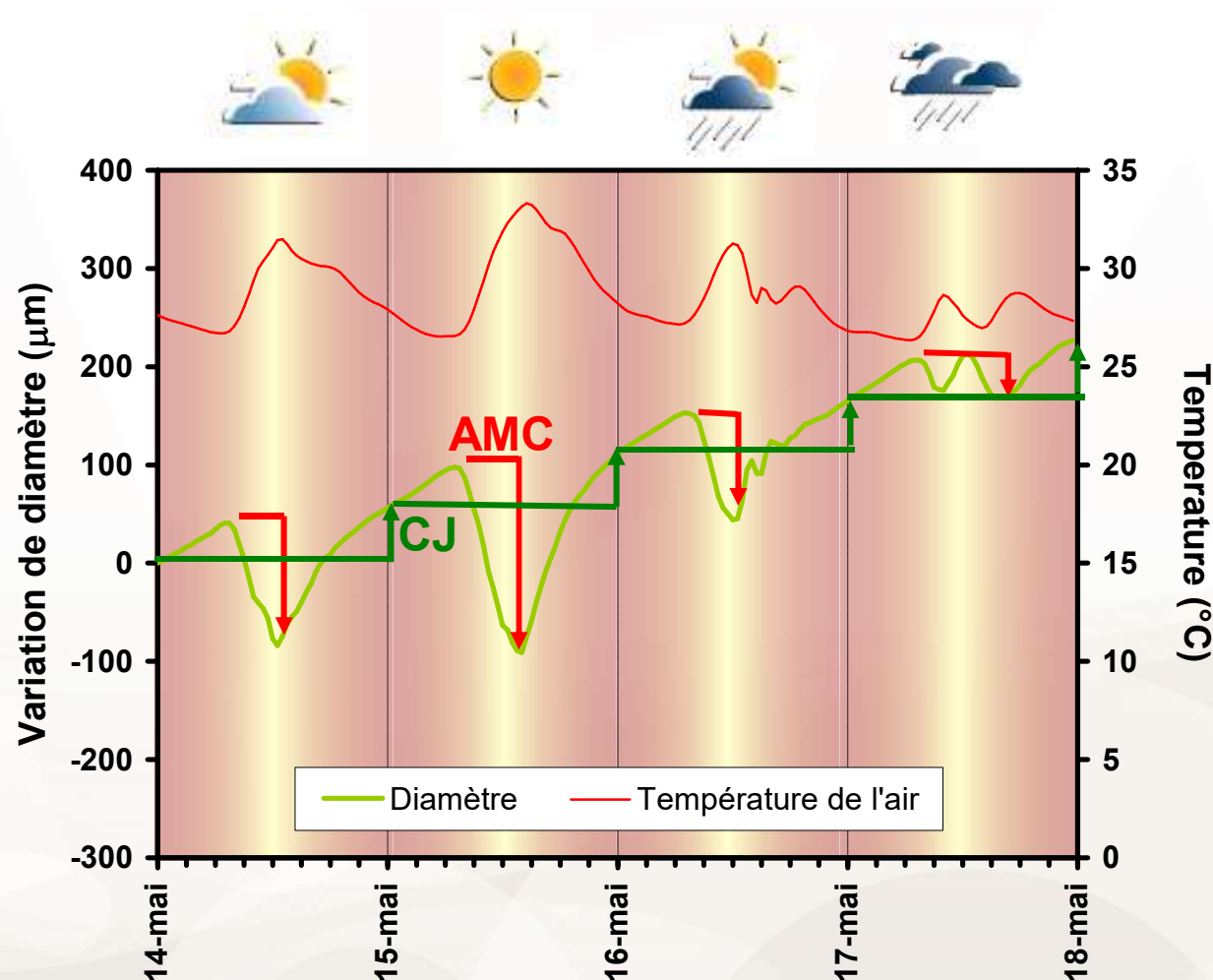
- L'amplitude maximale de contraction est liée à l'état hydrique: **AMC**

- Et à la demande climatique

- **AMC = f(☀)**



Zweifel et al. 2000



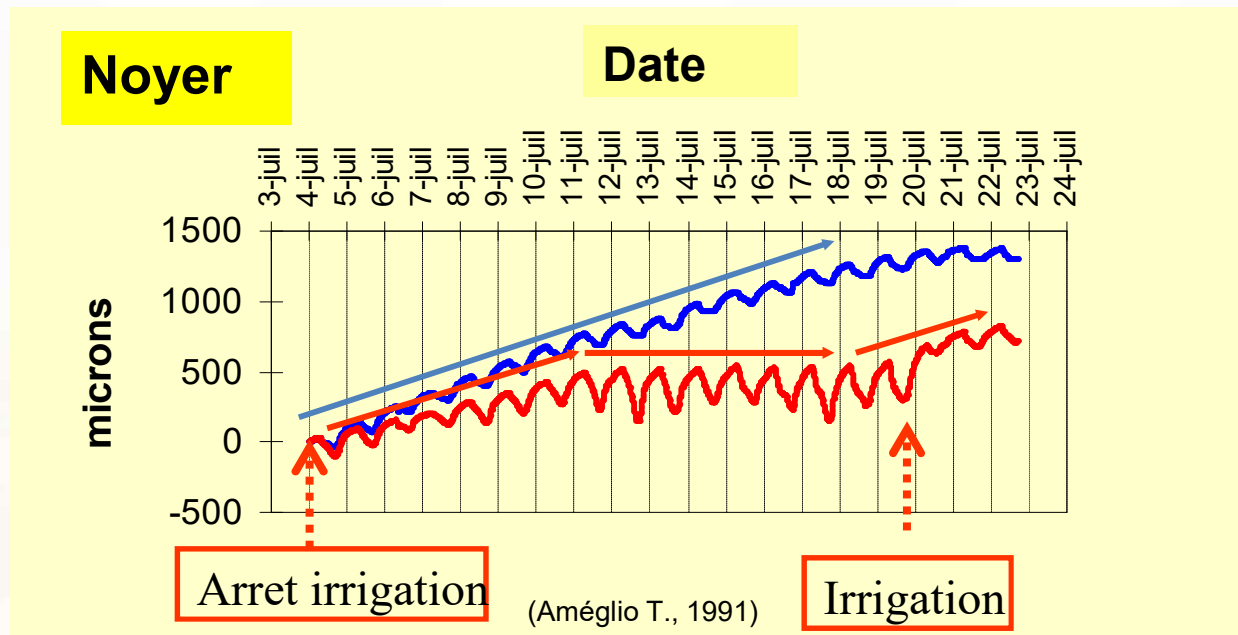
PépiPIAF sur un hêvea au Brésil (P.E.Michelin , Mato grosso).

# 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 « Pépista »  
J.G Huguet 1985 pour les besoins  
en eau des arbres en verger



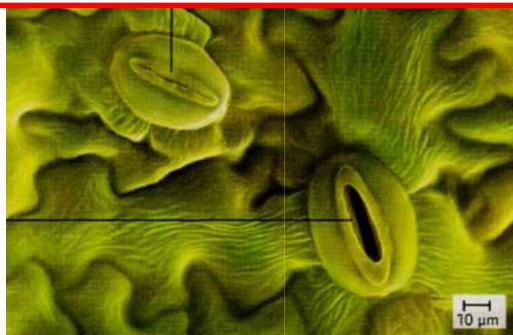
La croissance radiale **s'arrête** très précocement en présence d'une **sécheresse du sol** et les réserves hydriques de l'arbre sont mises à contribution.

# 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

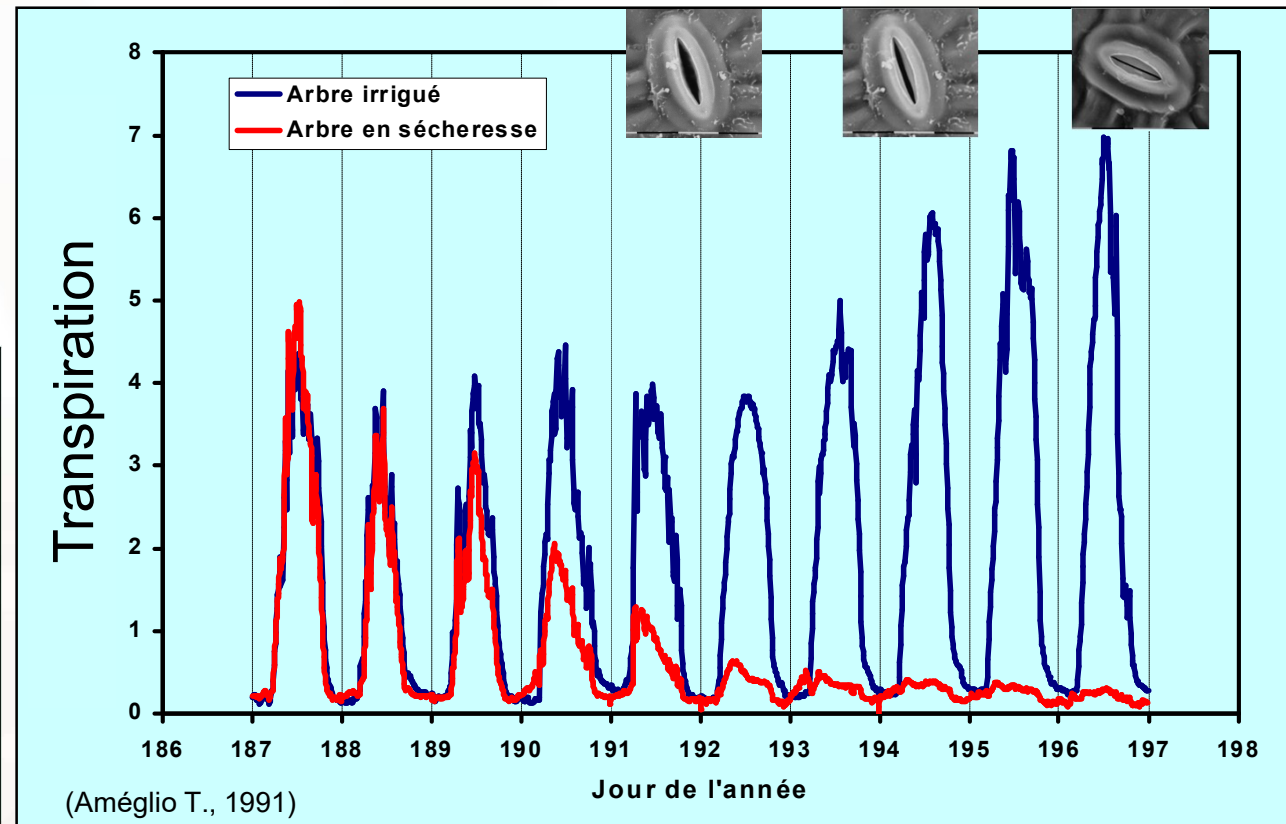
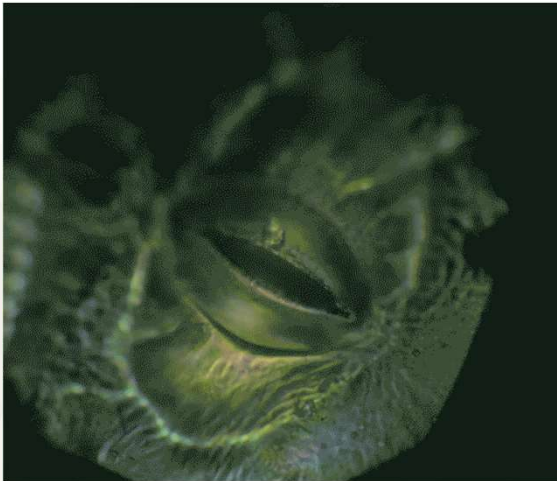


- ✓ Xylème **résistant à l'embolie**
- ✓ Utiliser les **réserves en eau**



## Comment éviter la sécheresse?

Fermer les stomates pour réduire la transpiration.



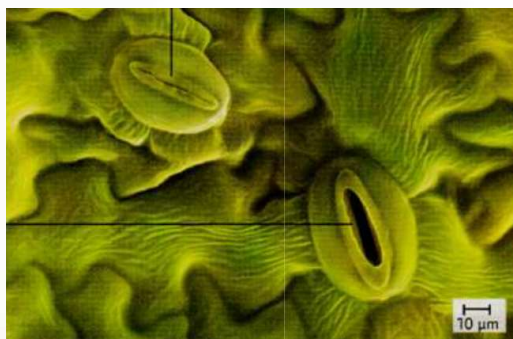


# Les mécanismes de résistance à la sécheresse

## 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

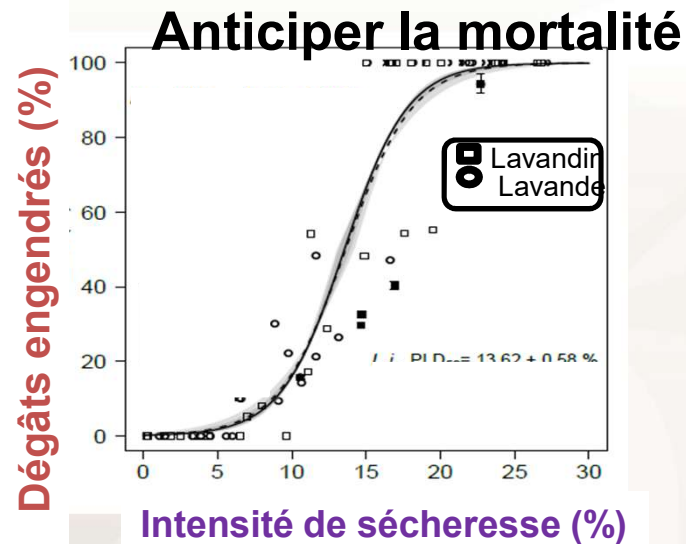
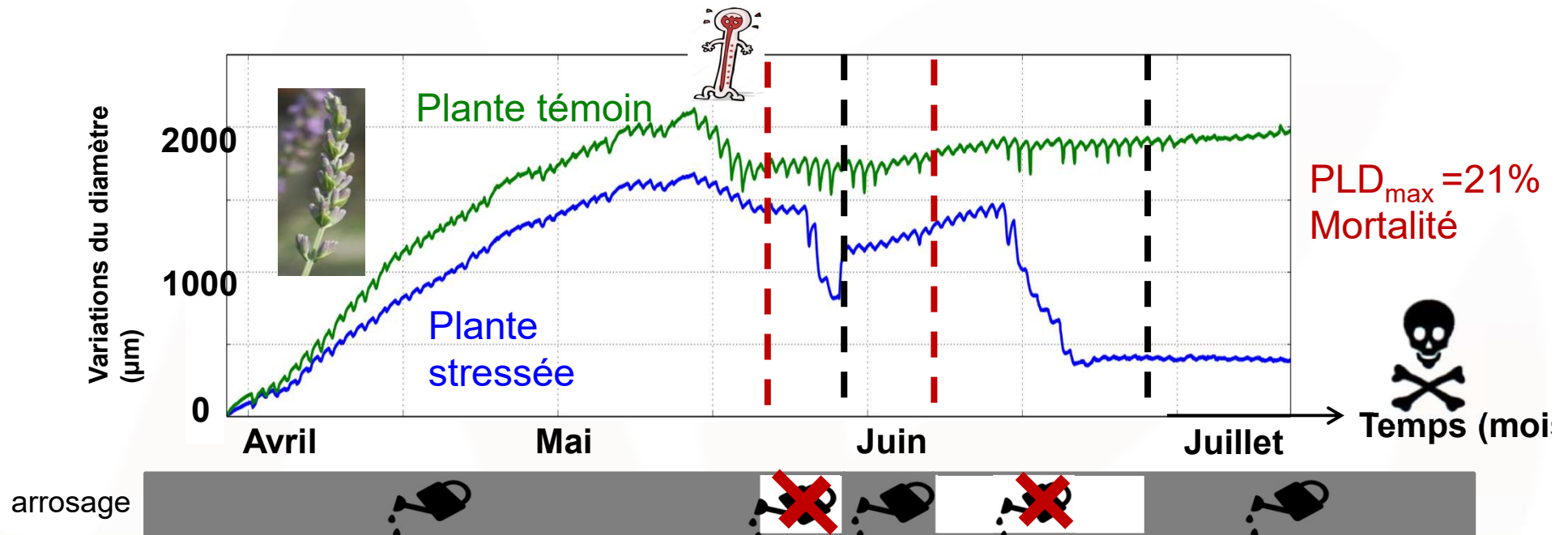
- ✓ Protection moléculaire (**antioxydants**)
- ✓ Accumulation de sucres



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



## Utilisation des micro-dendromètres pour comprendre les capacitances hydrauliques des arbres



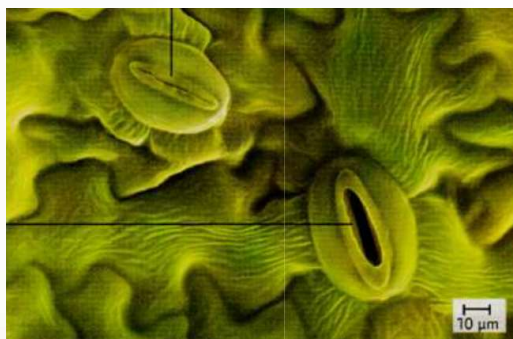
(Lamacque et al 2020)

# 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

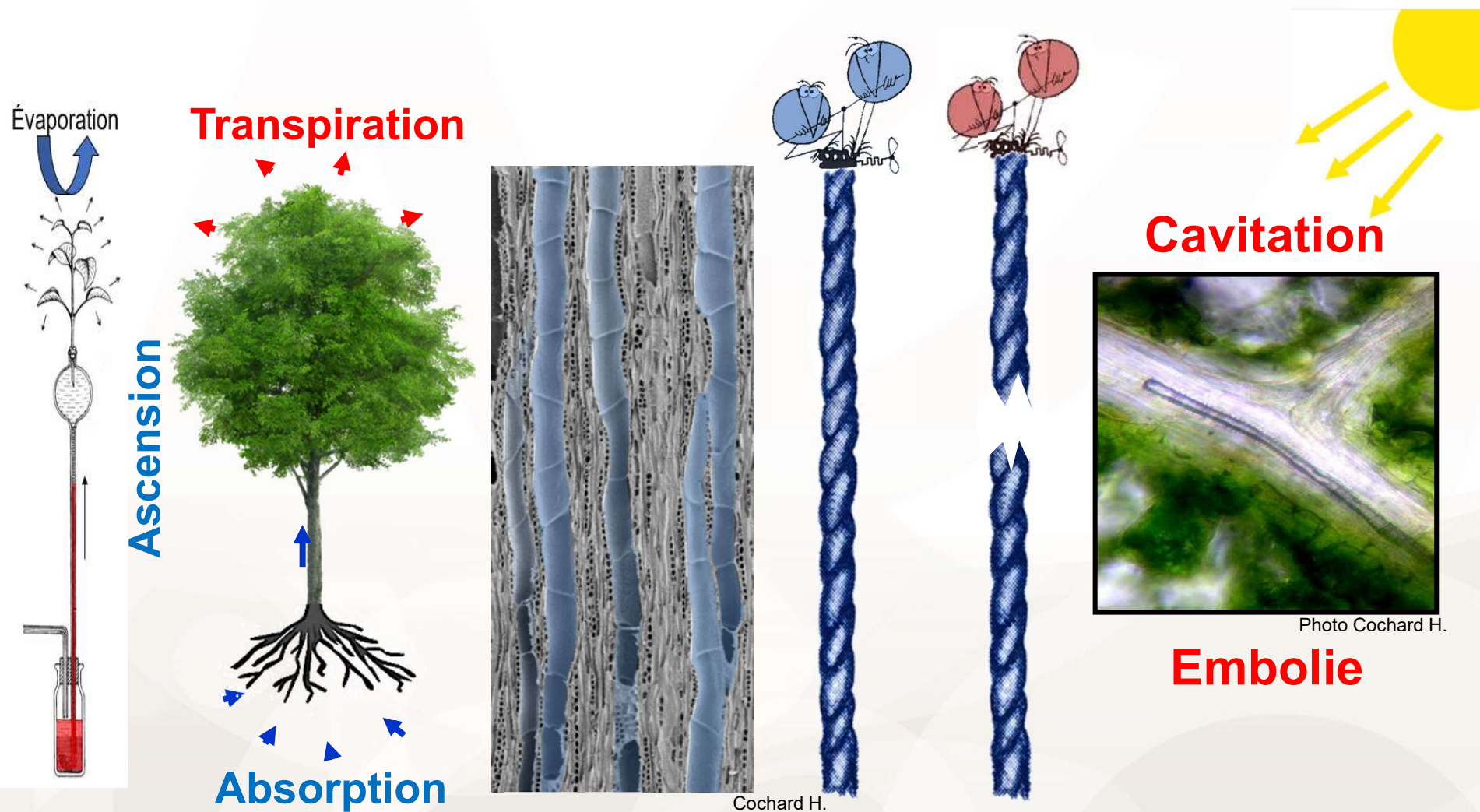


- ✓ Xylème **résistant à l'embolie**
- ✓ Utiliser les **réserves en eau**





# Un système vulnérable aux sécheresses



Sève sous tension dans les vaisseaux du xylème ( $P < 0$  Mpa)



# En résumé : la réponse des arbres à la sécheresse

## Lutte contre l'ICU

**Confort**  
croissance

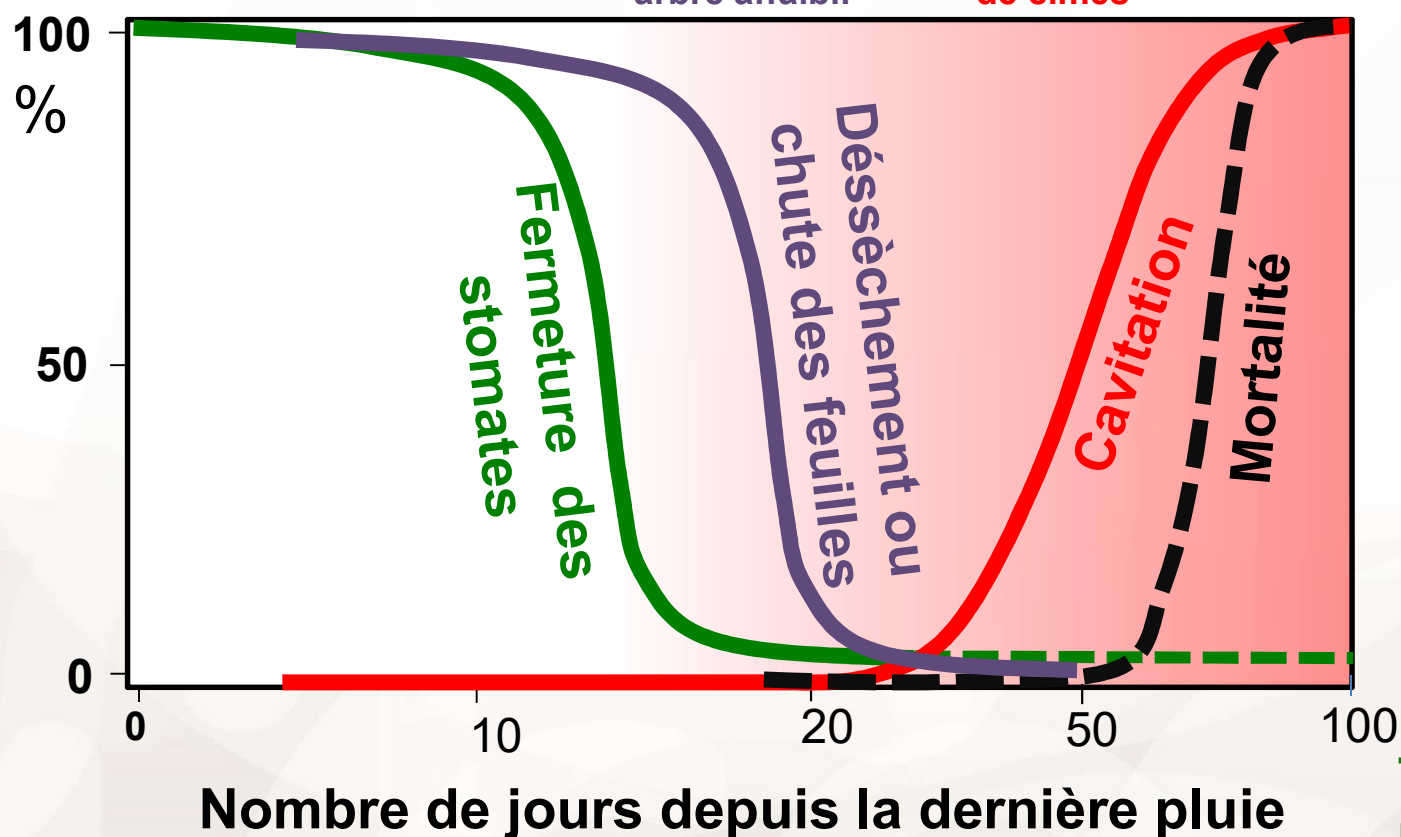
**Contrôle**  
réversible

**Vulnérabilité**  
réversible mais  
arbre affaibli

## Lutte pour sa survie

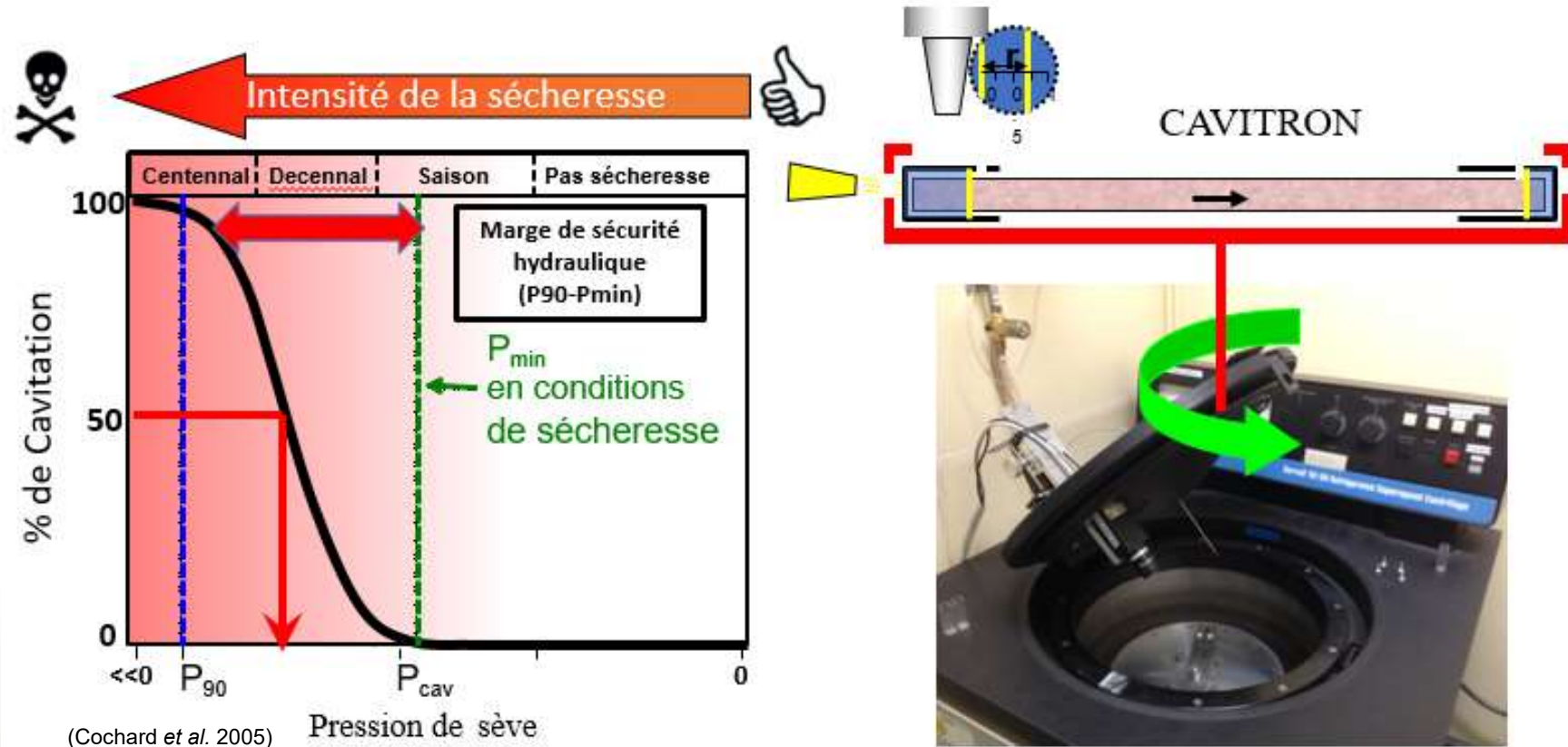
**Survie**  
Descentes  
de cimes

**Mortalité**



Transpiration  
résiduelle ( $g_{min}$ )  
sous forte chaleur!

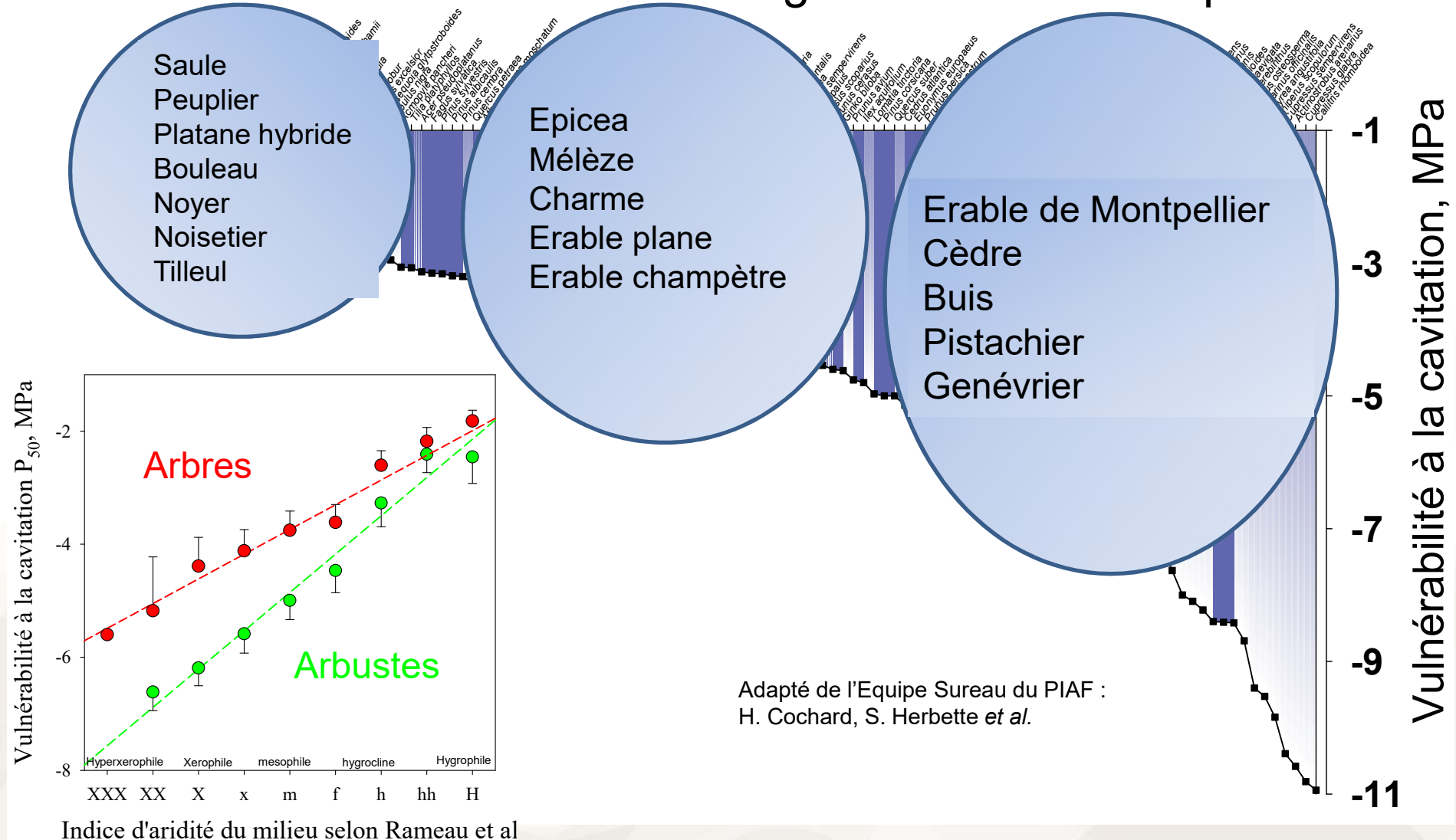
# Vulnérabilité à la cavitation et embolie des arbres



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

Définir des Marges de sécurité hydraulique selon les espèces

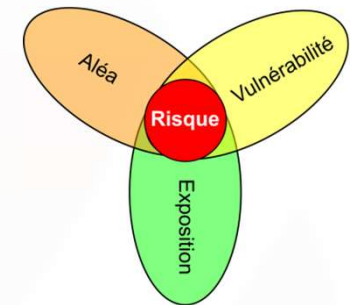
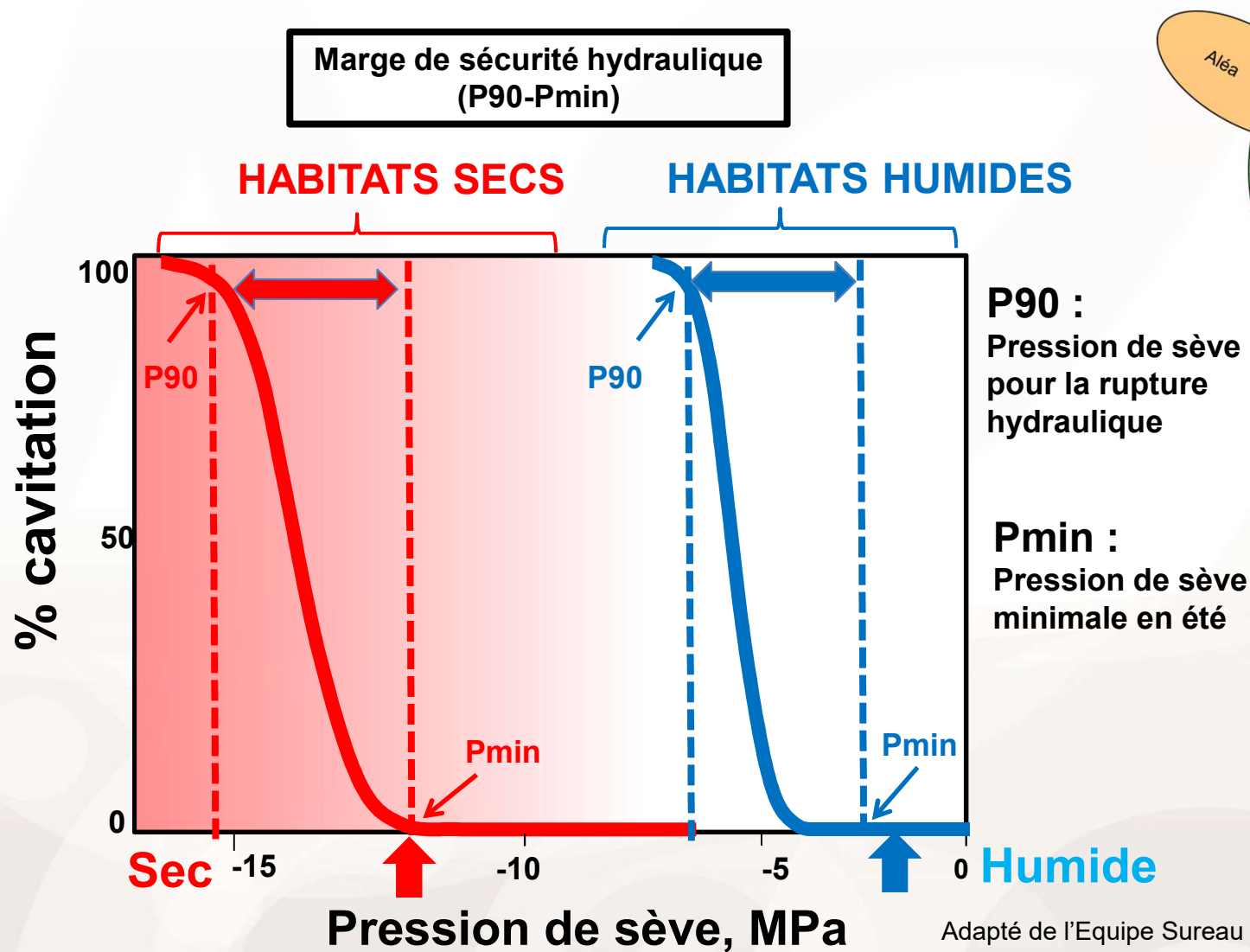
# La vulnérabilité à la cavitation des ligneux : un trait adaptatif



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

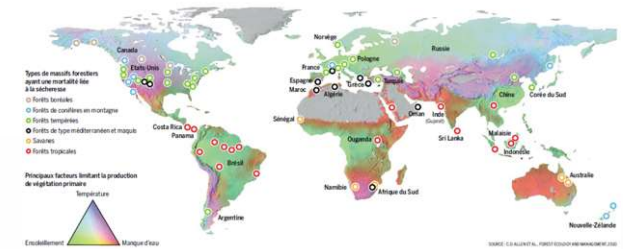
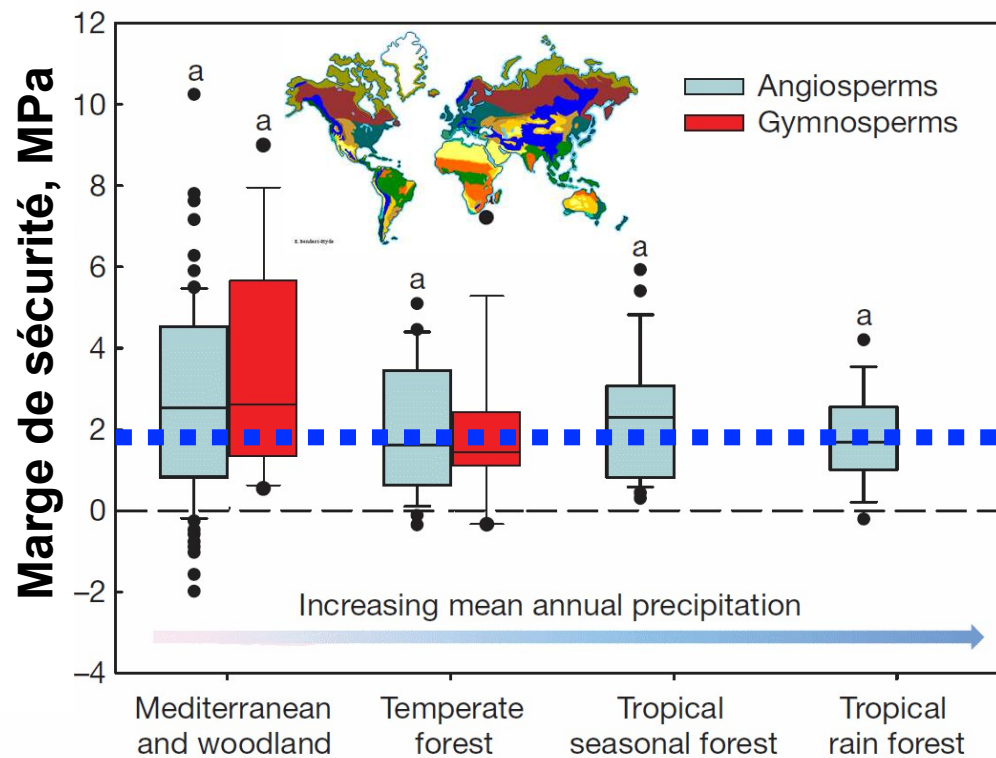


# Les espèces plus résistantes à la cavitation ne sont pas forcément moins exposées au risque de cavitation dans leur habitat naturel



Adapté de l'Equipe Sureau du PIAF :  
H. Cochard, S. Herbette *et al.*

# 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... !

# PETONCLE : Projet d'Étude d'un nOuvél améNagement à CLermont

## Recherche de « traits » physiologique de résistances à la sécheresse ...



Marge de sécurité hydraulique (P90-Pmin)

Micocoulier >

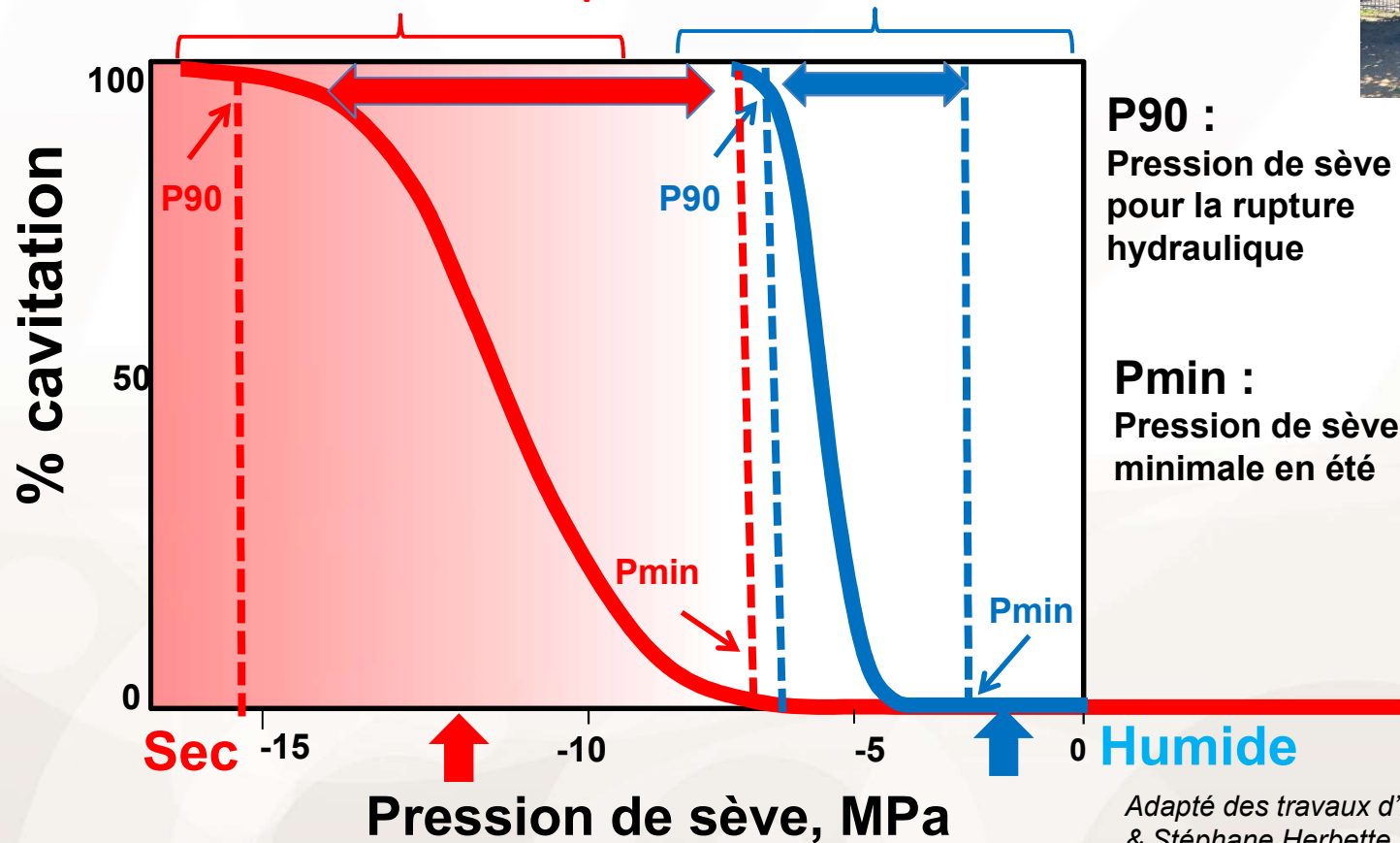
Tilleul >

Erable Plane =

Pin Sylvestre >

Cedre de l'Atlantique

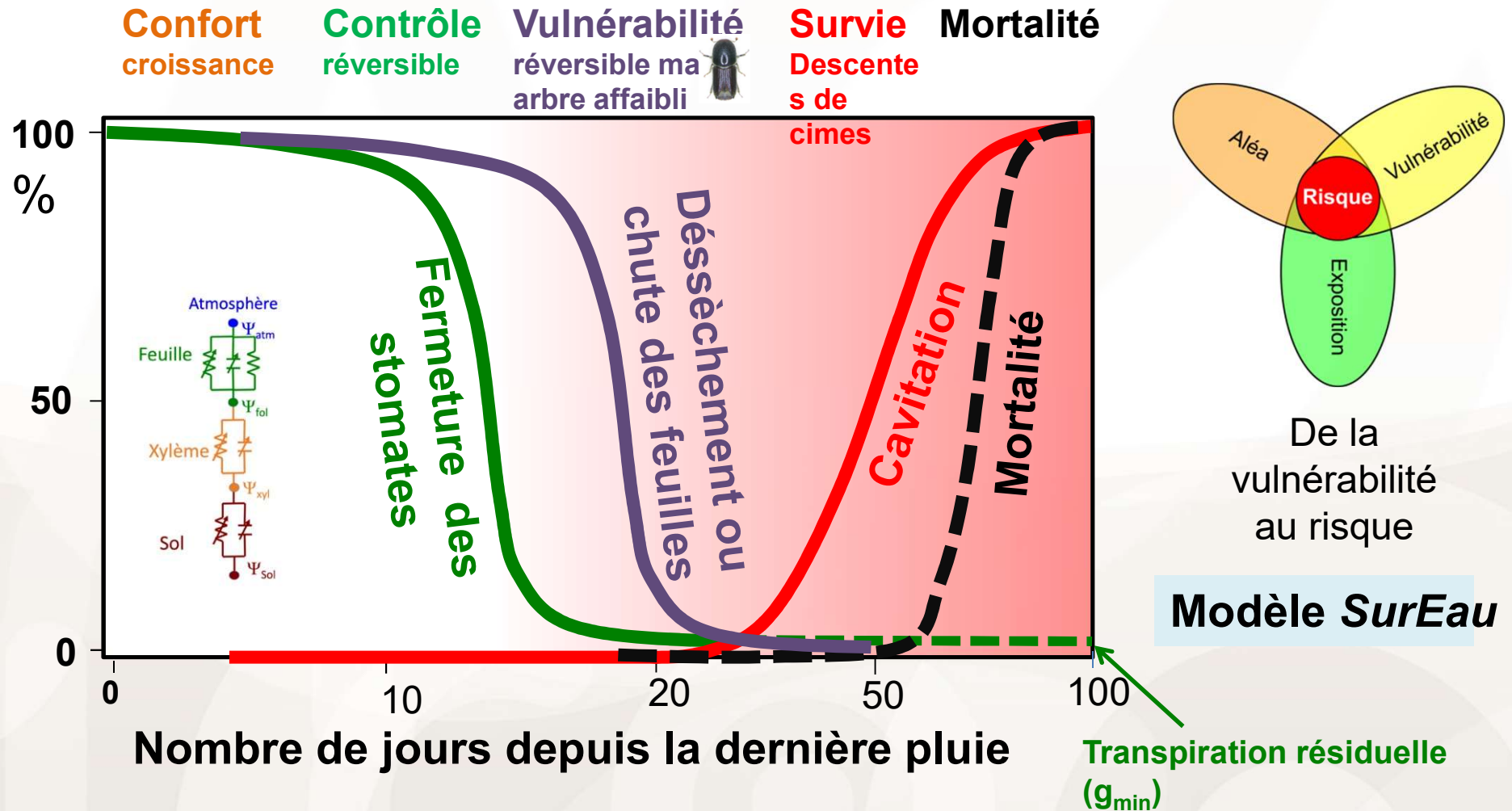
Platane



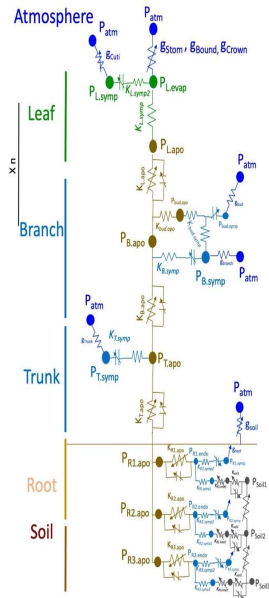
Adapté des travaux d'Eduardo Silva & Stéphane Herbette 2023



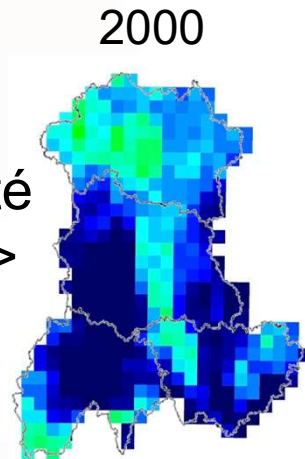
# Modèle mécaniste de la réponse des arbres à la sécheresse



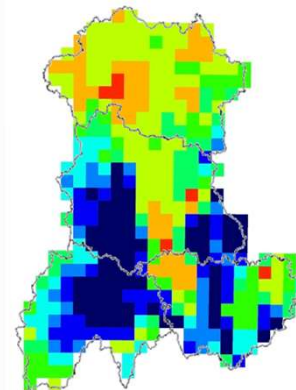
# SurEau: Modéliser le temps pour atteindre la rupture hydraulique appliqué au Sapin d'Auvergne.



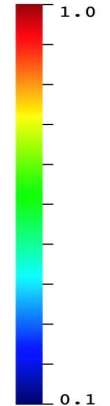
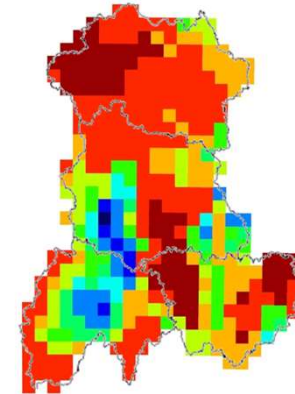
Probabilité  
Embolie >  
50%



2100 RCP 2.6



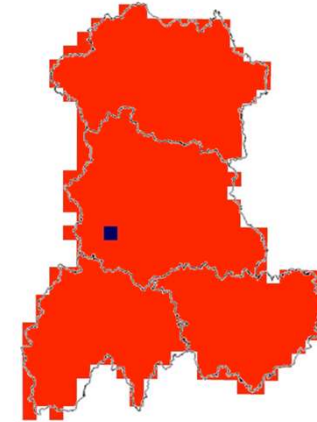
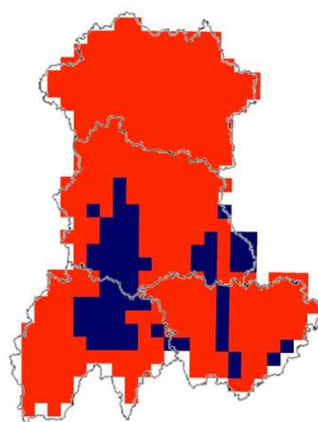
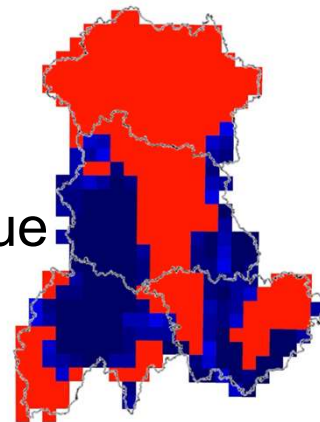
2100 RCP 8.5



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

Niche  
écophysiological

Zone compatible  
Zone non  
compatible



# Gérer la Santé des Arbres en ville

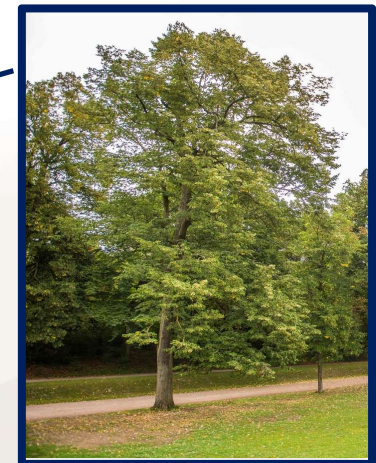
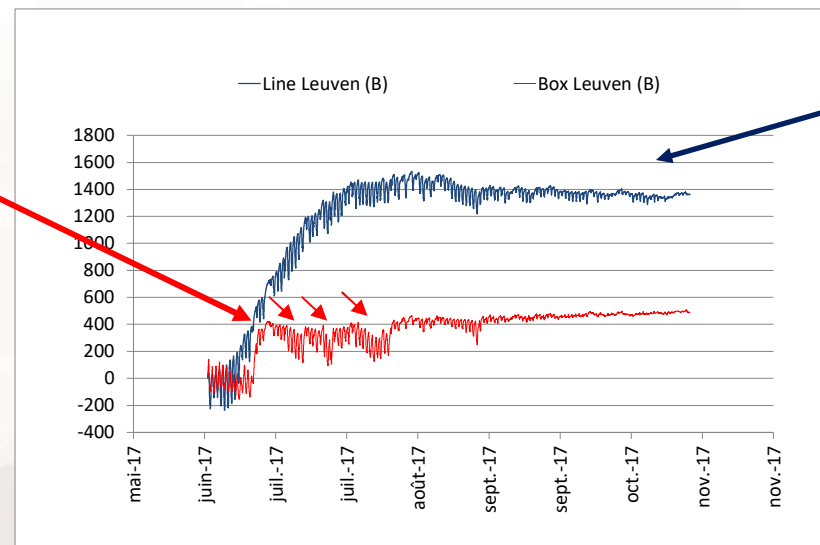


Nécessité de **gérer la santé des arbres** pour qu'ils puissent exercer correctement le service de lutte contre les ICU!

- *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,...







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)

GRAND LYON  
la métropole



## PROJET VILLE PERMÉABLE

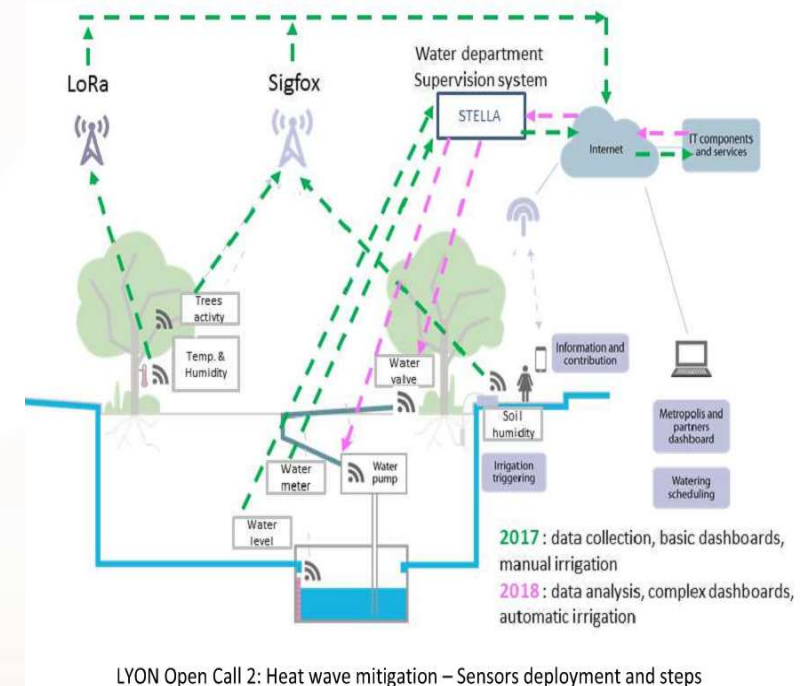
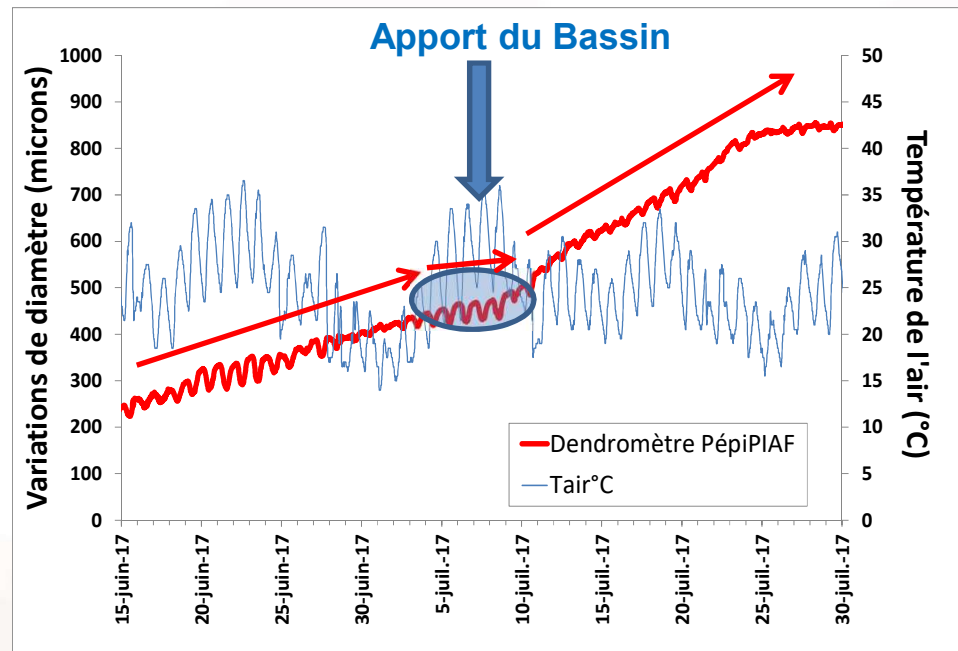
Comment réussir  
la gestion des  
eaux pluviales  
dans nos  
aménagements ?



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

# Infrastructure verte pour atténuer les Ilots de Chaleur Urbains

Projet Garibaldi **GRAND LYON**  
la métropole



**Apport 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 débournement, 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 écophysiologiques
    - 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 :  
- 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](mailto: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

**INRAE**

Dépérissement de l'Arbre Urbain – Qualiarbre® - Niort - 26 & 27 Juin 2025



UNIVERSITÉ  
 Clermont Auvergne