



HAL
open science

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique, une stratégie basée sur l'analyse des cernes de croissance

Philippe Rozenberg

► **To cite this version:**

Philippe Rozenberg. Adaptation des arbres forestiers au changement climatique, une stratégie basée sur l'analyse des cernes de croissance. Master. France. 2020. hal-03552232

HAL Id: hal-03552232

<https://hal.inrae.fr/hal-03552232>

Submitted on 2 Feb 2022

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.



➤ Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

Une stratégie basée sur l'analyse des cernes de croissance

Philippe Rozenberg, INRAE Val de Loire, Orléans

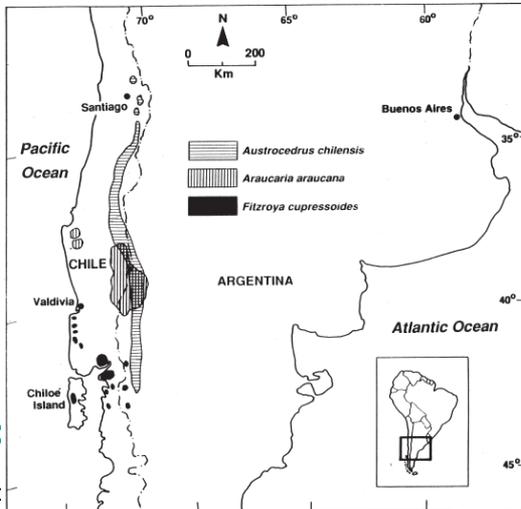
➤ Ecosystèmes forestiers

- Gérés ou non, régénérés naturellement ou plantés, peuplements purs ou mélangés, ...intégrant parfois des productions agricoles (systèmes agroforestiers)
- ...dont les **arbres** sont les principaux composants
 - Biodiversité,
 - Climats (directement : cycle de l'eau, effet albédo, indirectement : stockage du carbone, émission de substances chimiques...),
 - Matières premières services environnementaux, sociaux, culturels...



➤ Arbres

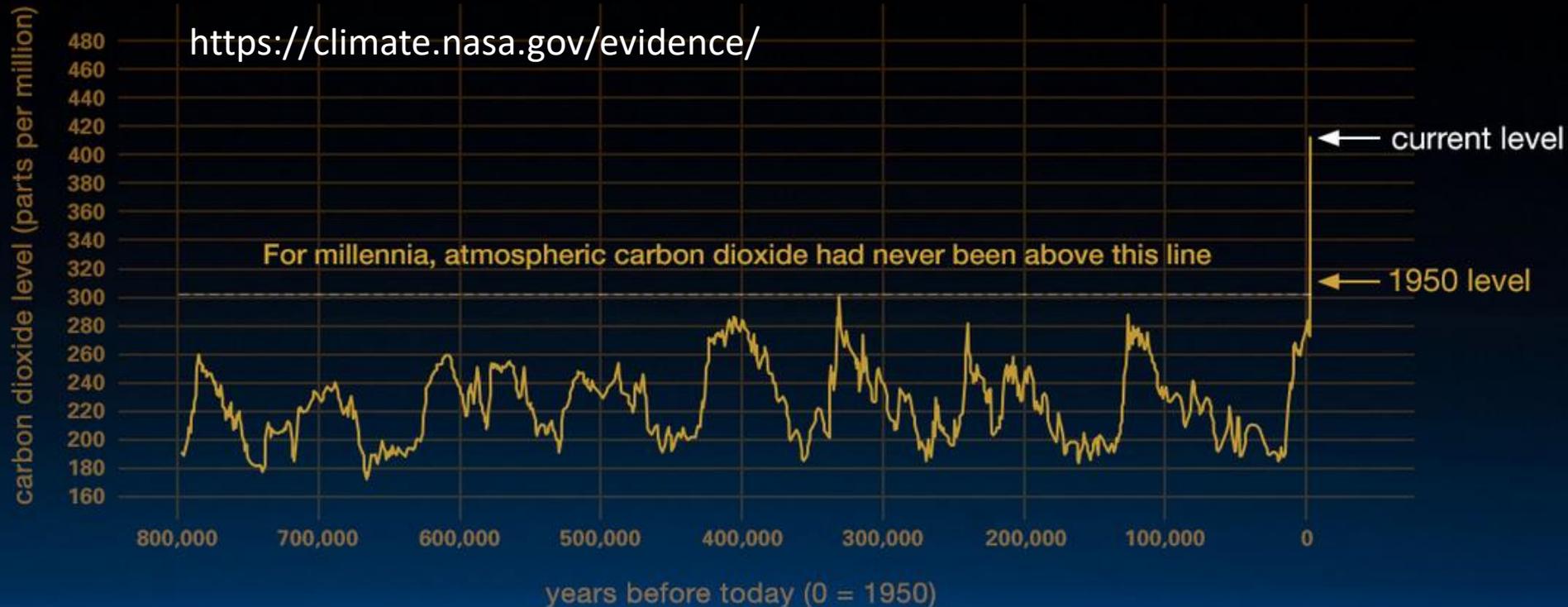
- Espèces caractéristiques des écosystèmes forestiers
- Distribués selon des *aires* dont les étendues varient
 - artificiellement : *déforestation, boisement ou reboisement*
 - naturellement, en fonction :
 - Potentiel **climatique** et **édaphique** des régions
 - Variation **génétique** intra spécifique
 - Compétition, mutualisme et parasitisme avec les **autres espèces**
- Pour aboutir aux aires réelles

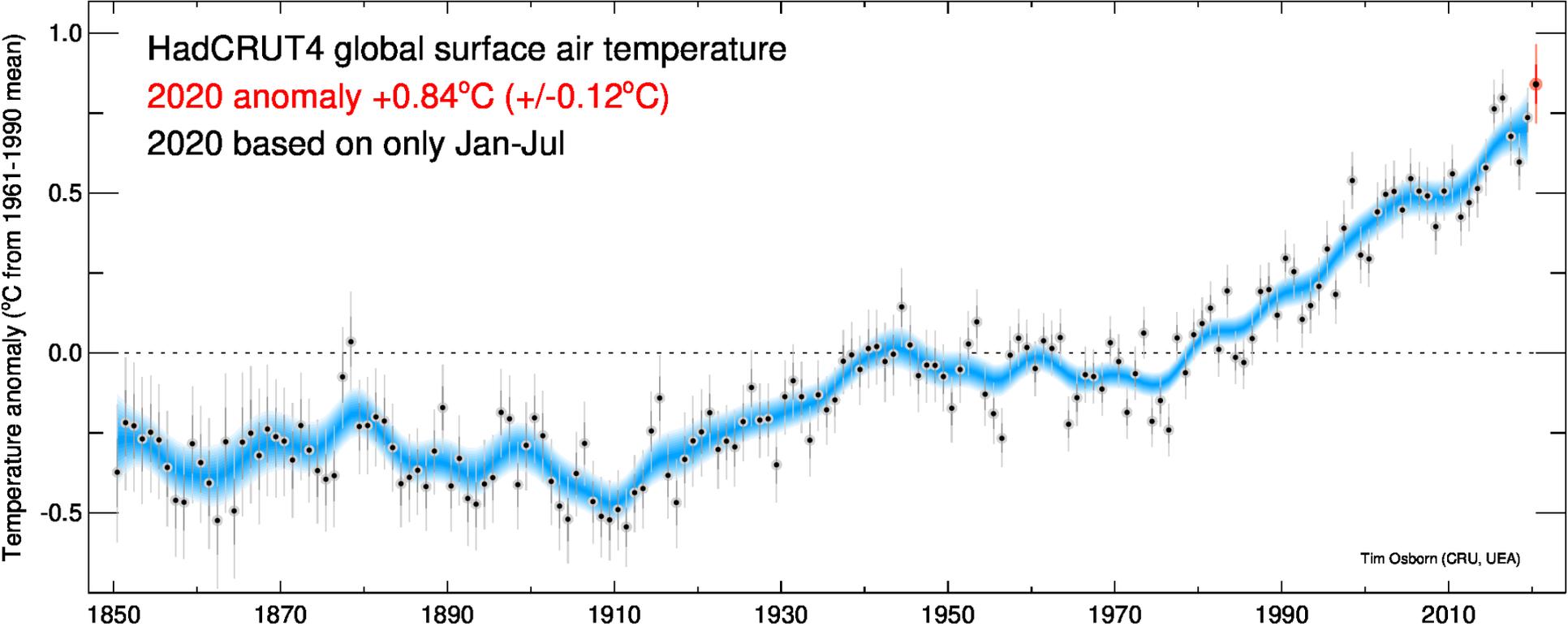


➤ Fluctuations du climat

- Durant les 650 000 dernières années, 7 glaciations
- Fin de la dernière glaciation : -11700 ans
 - Période climatique moderne
 - Ere humaine moderne, invention de l'agriculture

<https://climate.nasa.gov/evidence/>





- Aujourd'hui :

- Le climat se réchauffe plus vite que jamais
- Les activités humaines sont responsables de ce réchauffement
- Les écosystèmes montrent des signes évidents de *réponses*

➤ Effet du changement climatique sur les forêts

Fin du XXème siècle, les premières manifestations

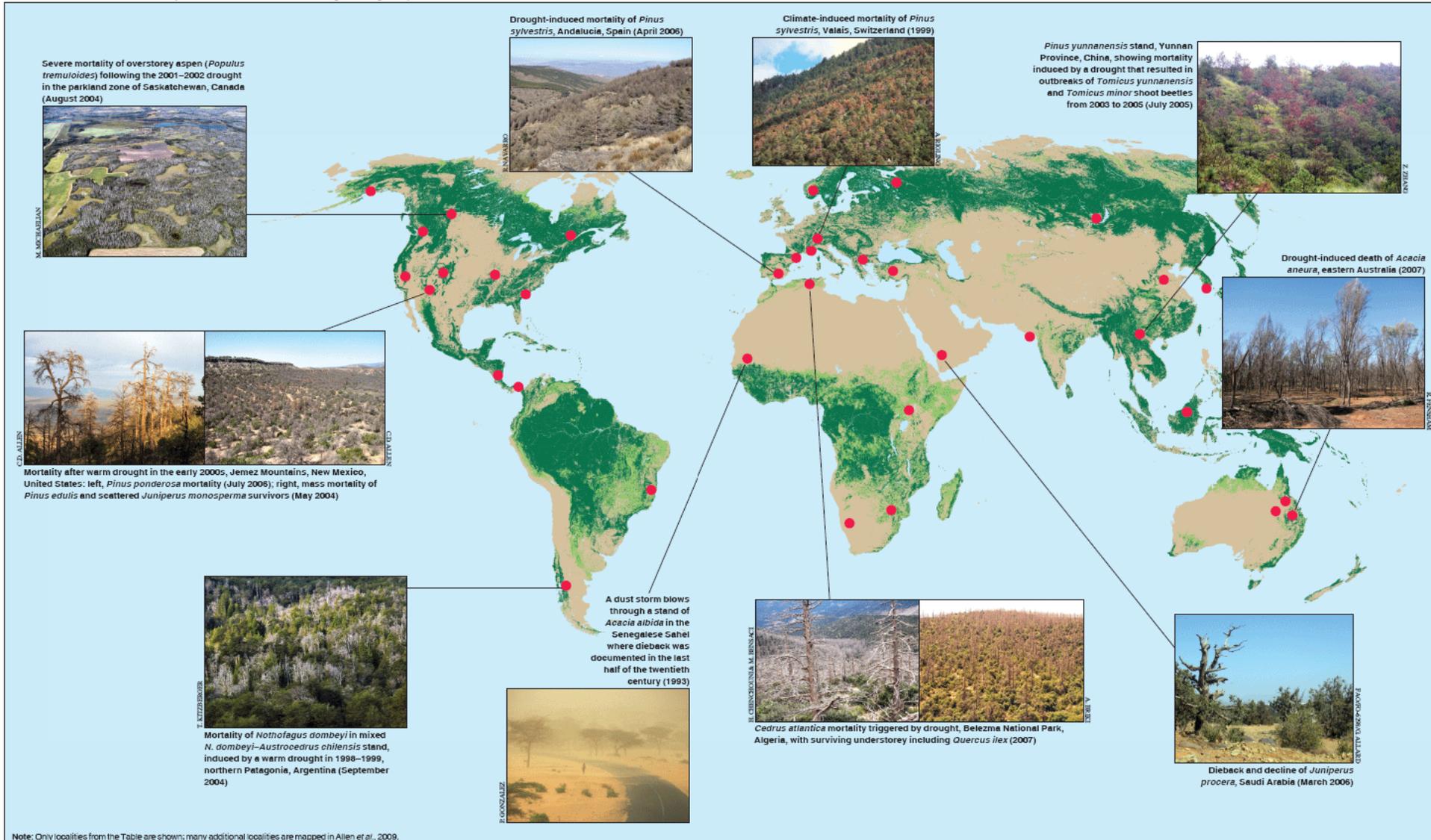
- Dans les années 1980 augmentation de la croissance
 - Réchauffement + dépôts d'azote et CO₂
- Depuis 1990-2000 signalements de dépérissements



Pinus ponderosa, Patagonie, Argentine, 2011

➤ Prémices d'une catastrophe ? Synthèse 2009

Localities with increased forest mortality related to climatic stress from drought and high temperatures

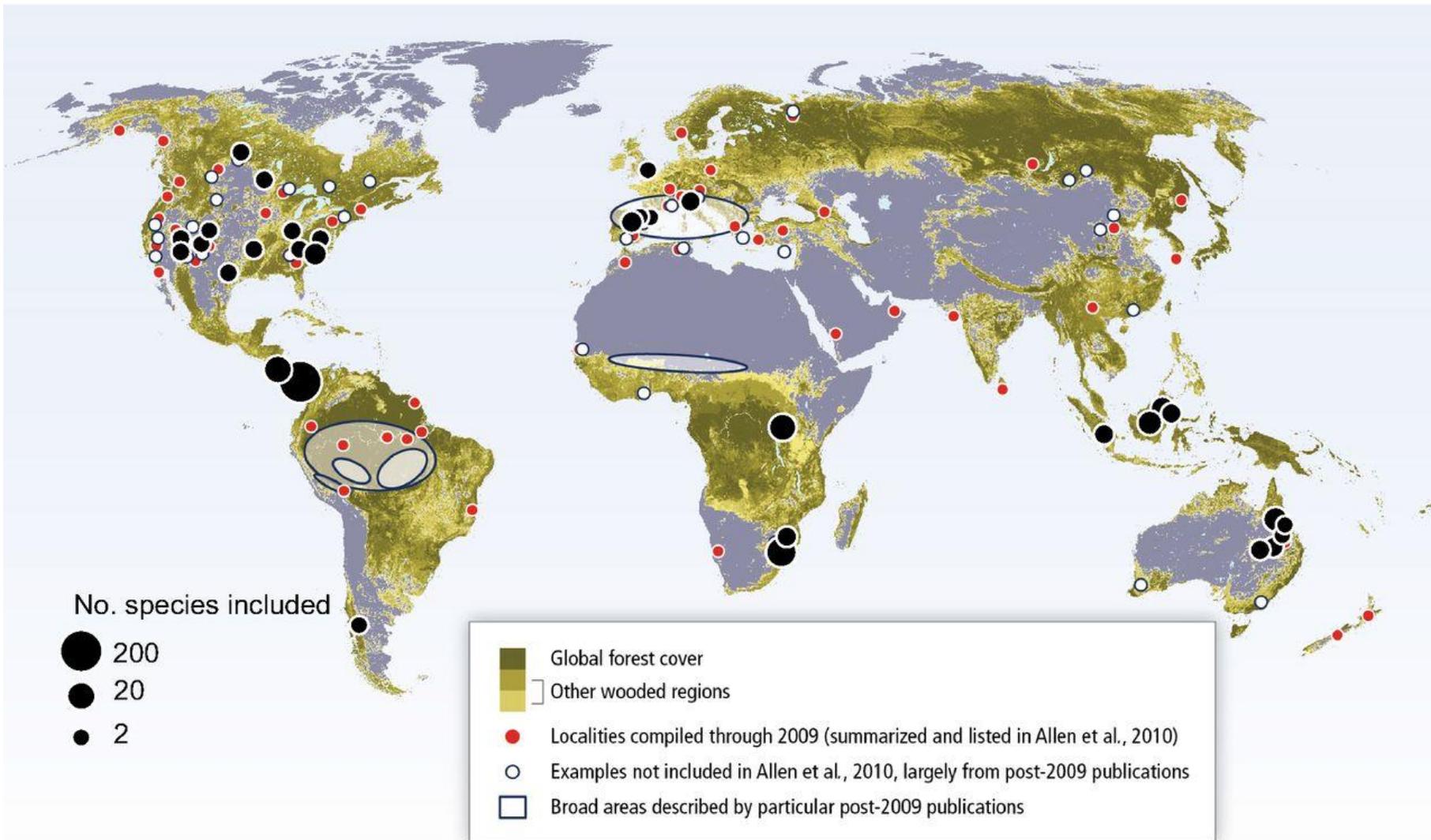


Allen, C.D. (2009). Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? *Unasylva* 231/232, Vol. 60

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Synthèse 2015



INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

Hartmann, H., Adams, H.D., Anderegg, W.R.L., Jansen, S., and Zeppel, M.J.B. (2015). Research frontiers in drought-induced tree mortality: crossing scales and disciplines. *New Phytol* 205, 965–969.

> Sécheresse

Cause **identifiée** de nombreux dépérissements

...forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

... forêts boréales du Canada

... cyprès de la cordillère en Patagonie

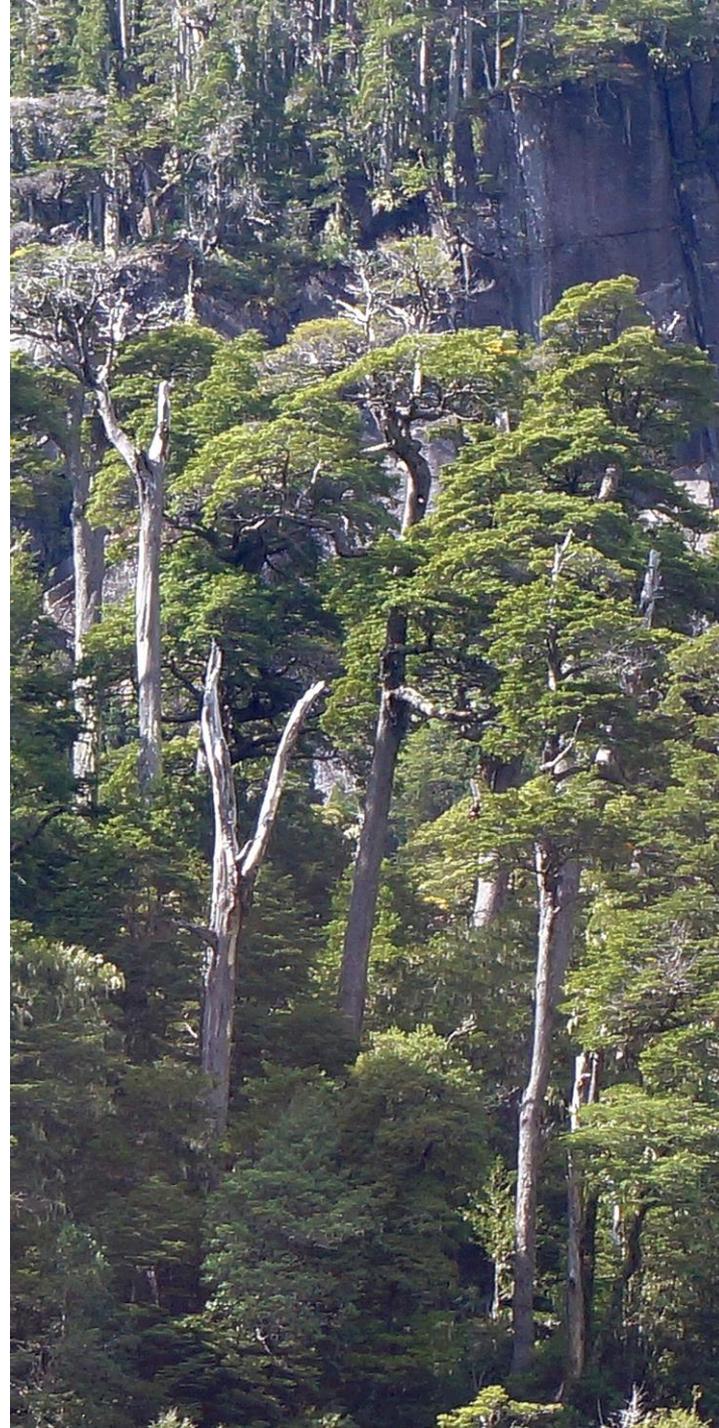
... bouleau en Sibérie

...douglas et du sapin en France

...pin maritime en Espagne

...pin ponderosa aux Etats-Unis

...tremble en Amérique du Nord



Sécheresse et autres facteurs

Nord-ouest de l'Amérique du Nord, 2000, *Dendroctonus ponderosae*,
« Mountain pine beetle »



Sugden, A., Fahrenkamp-Uppenbrink, J., Malakoff, D., and Vignieri, S. (2015). Forest health in a changing world. *Science* 349, 800–801.

UGA1306003

➤ Sécheresses et dépérissements

Manifestations spectaculaires

Russie 2010

Portugal 2017

Californie 2017, 2018, 2019, 2020

Grèce 2018

Amérique du Sud (Brésil, Bolivie, Argentine...) 2019, 2020

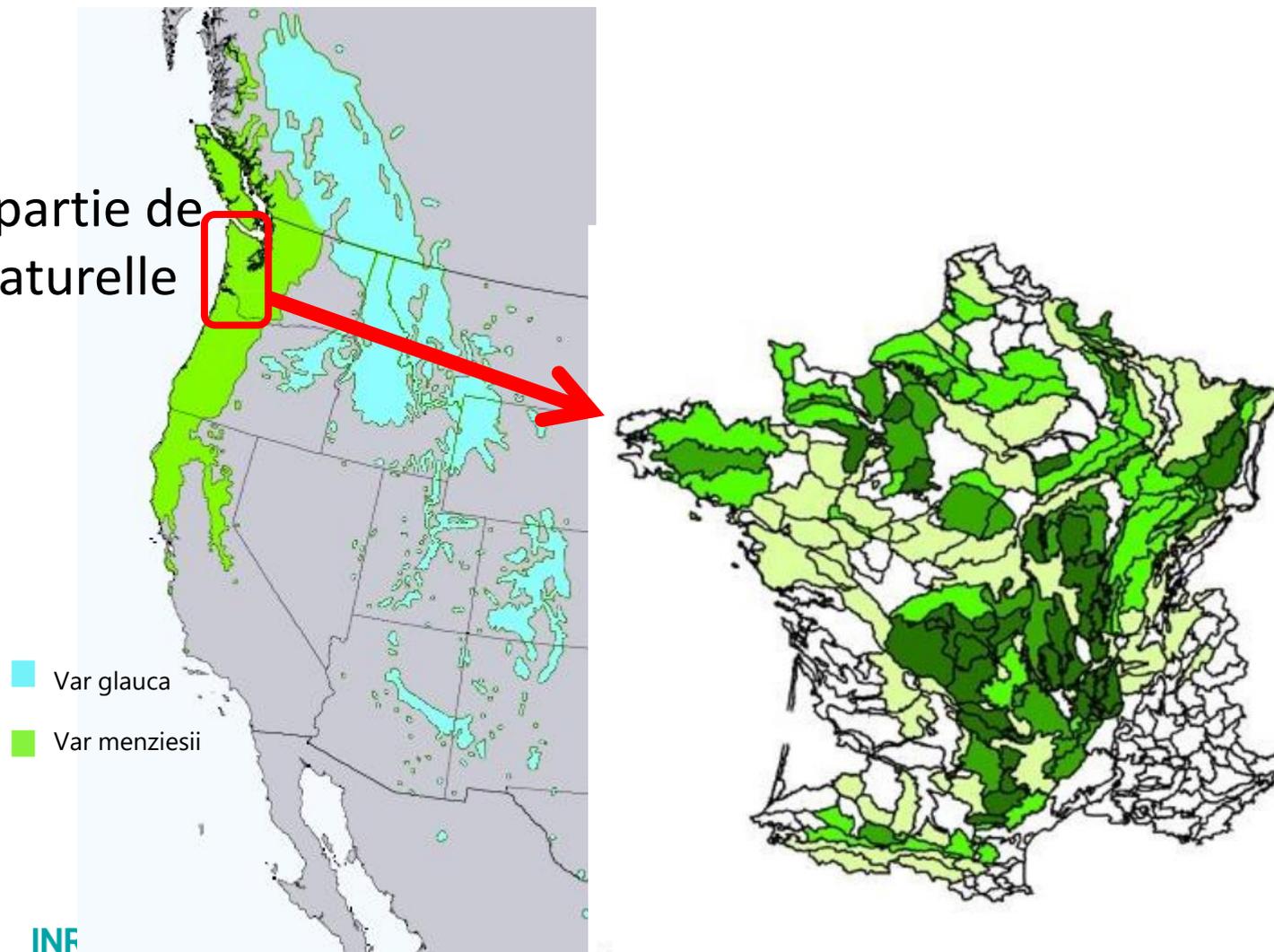
Australie 2019, 2020



➤ Role de la sécheresse

Le cas du douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en France

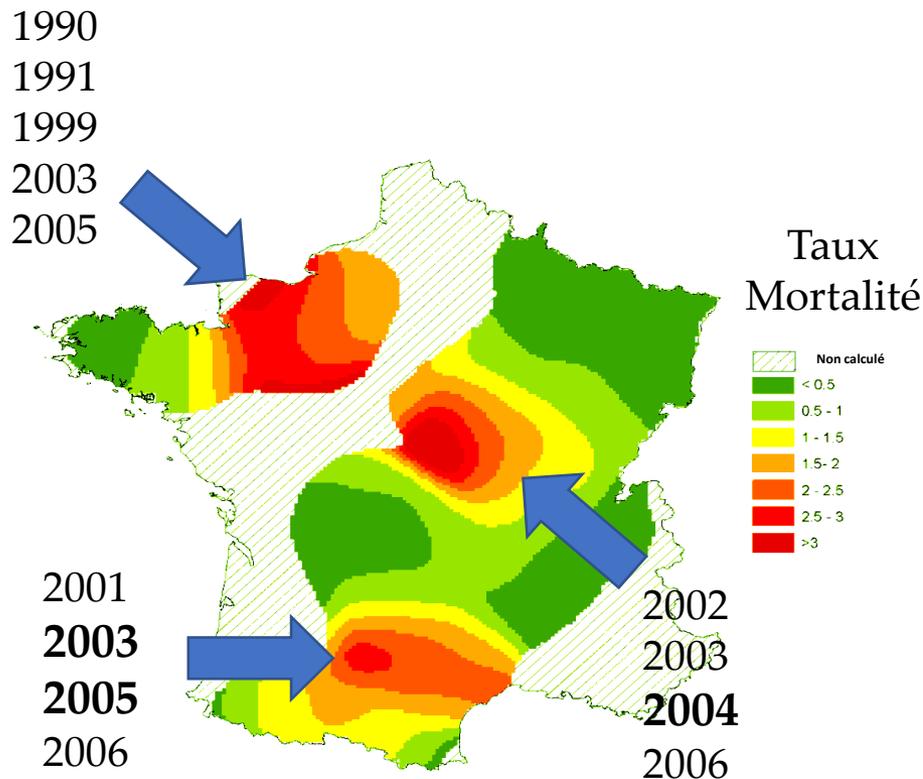
Petite partie de
l'aire naturelle



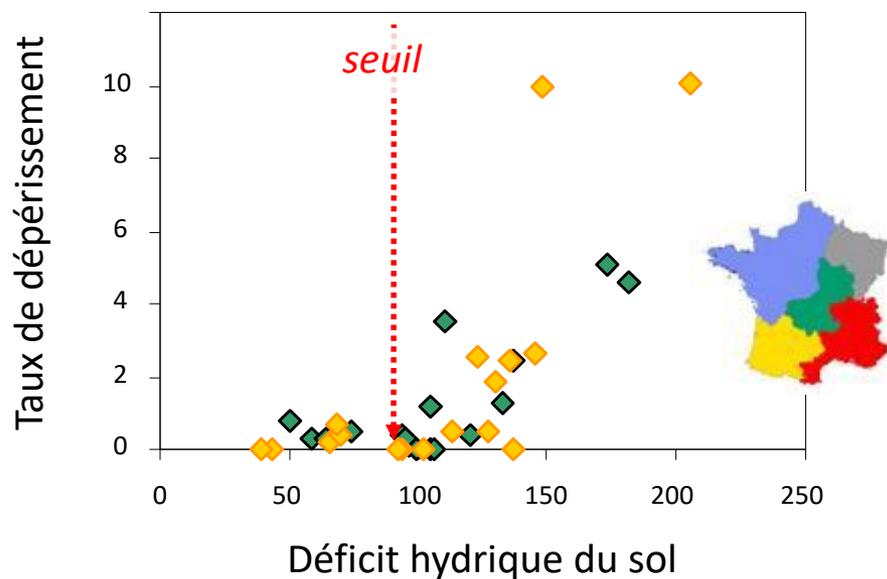
INF

➤ Le cas du douglas en France

Données du département de la santé des forêts, thèse A. S. Sergent



Déficit hydrique du sol



INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

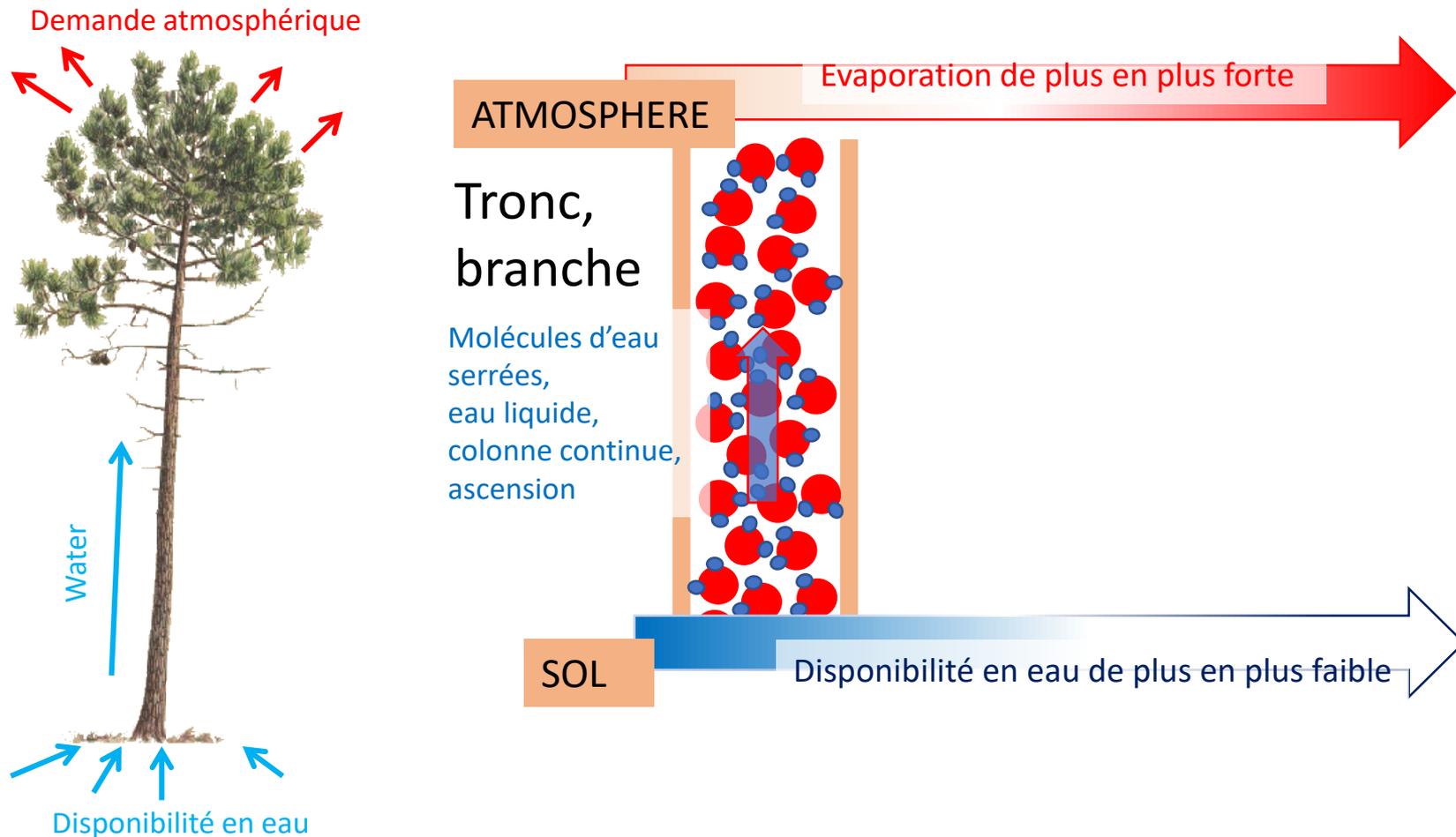
➤ Caractéristiques des épisodes de dépérissement

- Augmentation du nombre d'observations
- Tous climats concernés
- Augmentation du taux de mortalité : plutôt en climats secs
- Dispersés ou massifs
- En plantations aussi bien que peuplements naturels
- Pour des espèces introduites aussi bien qu'autochtones



➤ Sécheresse et déficience hydraulique

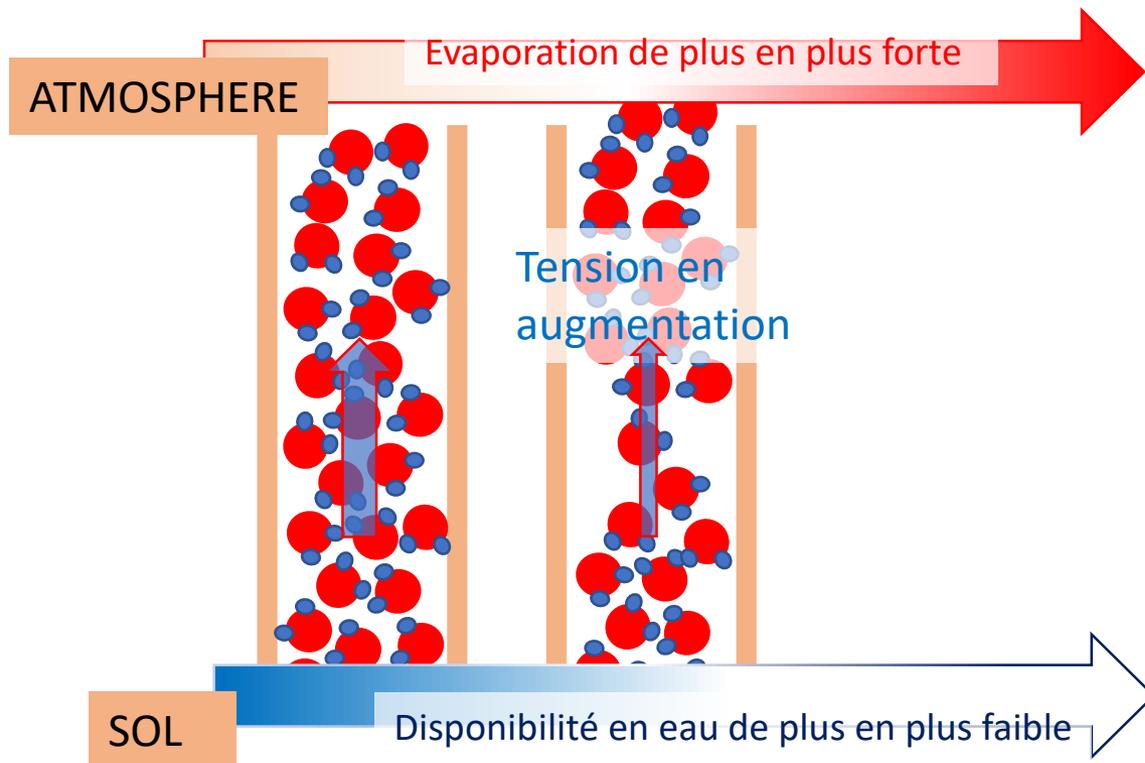
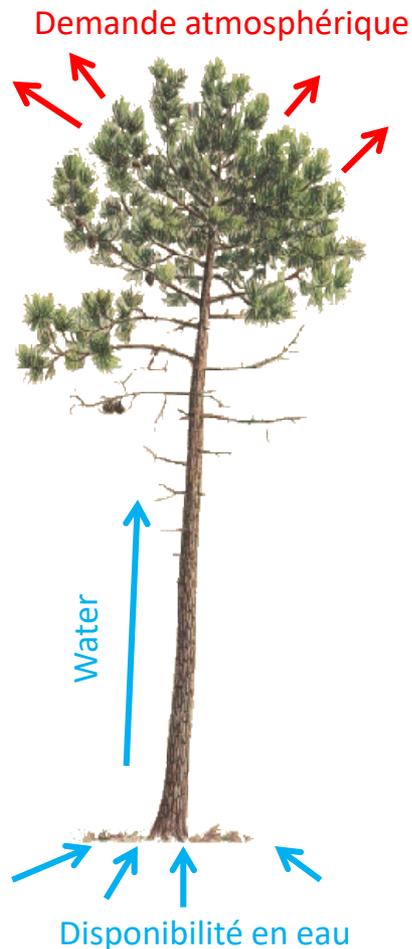
Mécanisme de la mortalité par sécheresse



INRAE

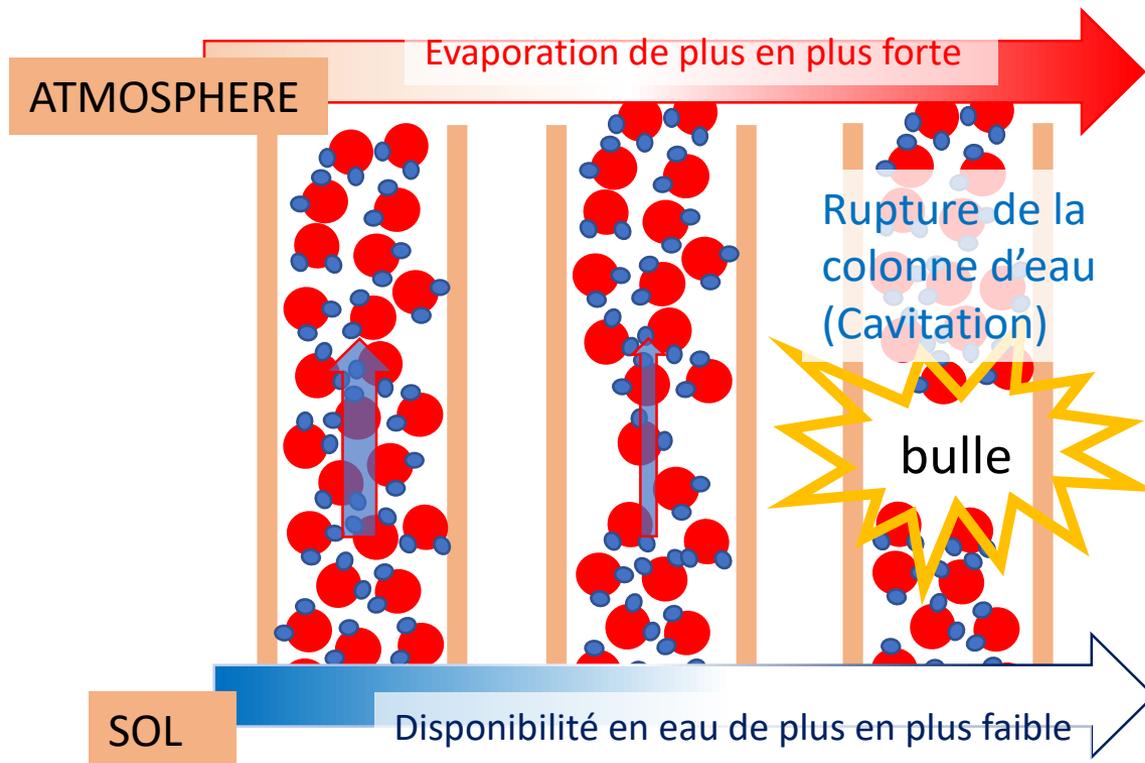
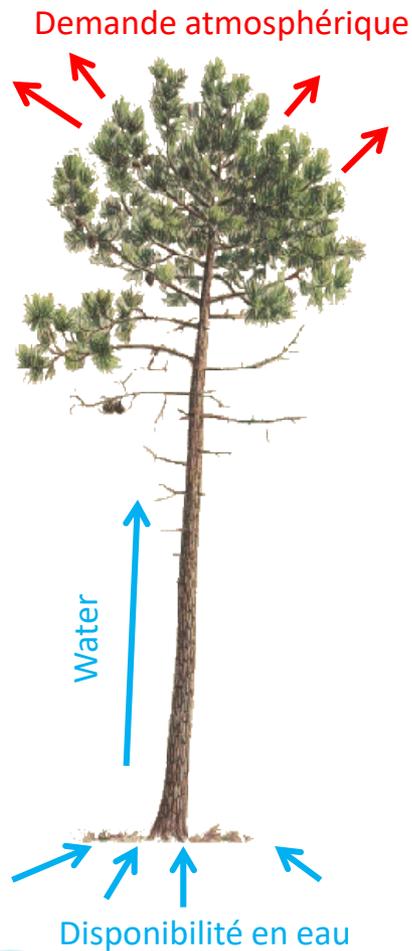
➤ Sécheresse et déficience hydraulique

Mécanisme de la mortalité par sécheresse



➤ Sécheresse et déficience hydraulique

Mécanisme de la mortalité par sécheresse



Cavitation (embolie)



➤ Quels mécanismes d'adaptation ?

Mécanismes naturels de l'adaptation des forêts au changement climatique

A court terme :

Plasticité phénotypique

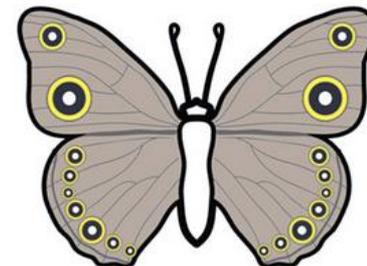
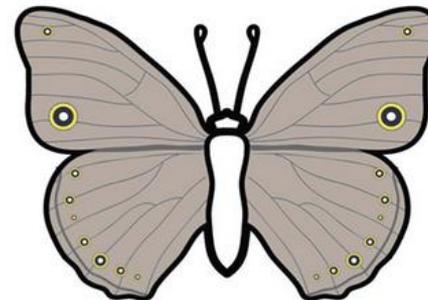
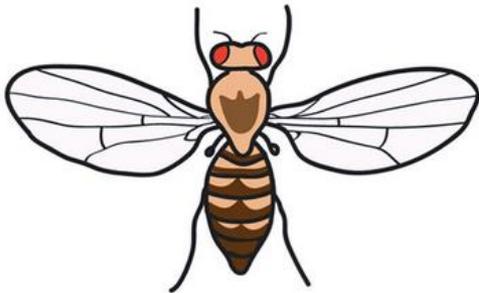
Capacité d'un **individu** à modifier son phénotype sous l'effet d'une variation de son environnement

Development at lower temperature

Development at higher temperature

Development at lower temperature

Development at higher temperature



Lafuente, E., and Beldade, P. (2019). Genomics of Developmental Plasticity in Animals. *Front. Genet.* 10.

➤ Mécanismes d'adaptation

Mécanismes naturels de l'adaptation des forêts au changement climatique

A long terme :

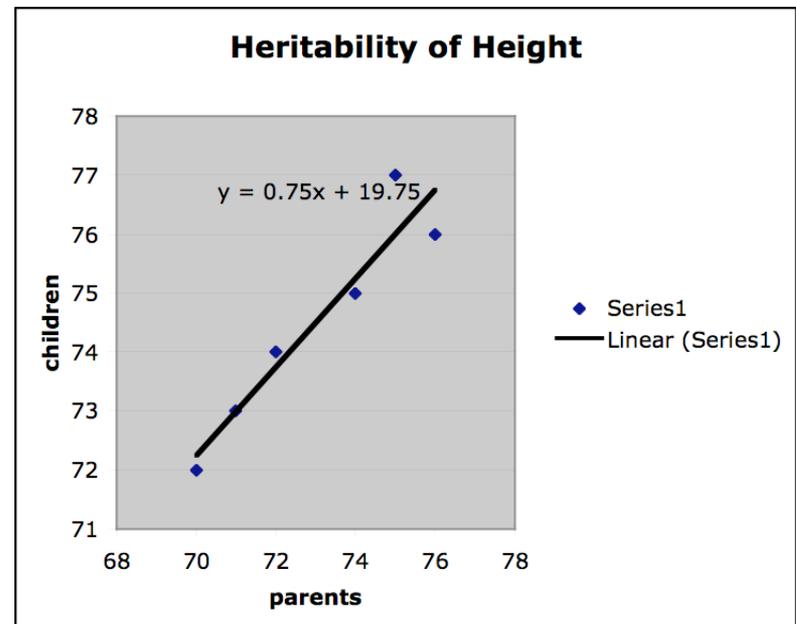
Evolution par sélection naturelle

Capacité d'une **population** à modifier les phénotypes de ses individus, sous l'effet **sélection** suivant une **pression environnementale**, suivi de la **transmission** des caractères favorables portés par les survivants aux générations suivantes,

Variabilité



Héritabilité



➤ Mécanismes d'adaptation

Mécanismes naturels de l'adaptation des forêts au changement climatique

A long terme :

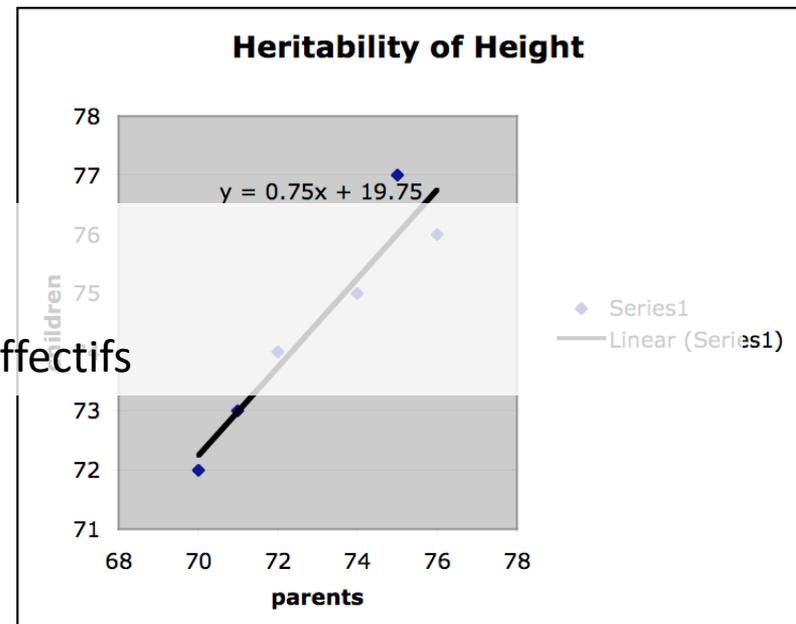
Evolution par sélection naturelle

Capacité d'une **population** à modifier les phénotypes de ses individus, sous l'effet **sélection** suivant une **pression environnementale**, suivi de la **transmission** des caractères favorables portés par les survivants aux générations suivantes,

Variabilité



Héritabilité



➤ Mécanismes d'adaptation

Un cas particulier de l'évolution : la migration

Des géotypes **dispersés naturellement** (pollen, graines, autres parties d'arbres en cas de multiplication végétative) **découvrent**, **expérimentent**, et, en cas de succès, **colonisent** de nouveaux environnements



Migration *assistée*

➤ Adaptation à la *sécheresse*

Pour quel(s) caractère(s) ?

Notion de caractère **adaptatif**

Caractères dont la variation détermine l'ajustement de l'organisme à son environnement

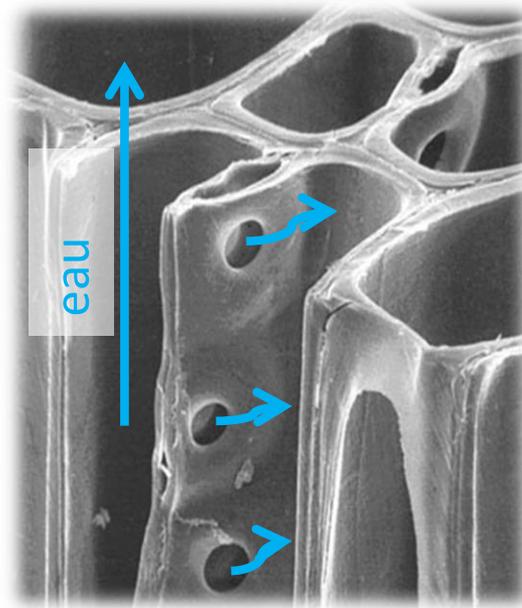
Caractères **fonctionnels**

Liés à l'**anatomie du bois** :

Conduits + ponctuations

Mesures et observations...

« **proxys** » de ces caractères fonctionnels ?



➤ Résistance à la sécheresse

Caractères adaptatifs

Comment identifier les caractères adaptatifs pertinents pour la résistance à la sécheresse ?

relations avec la fonction « résistance à la sécheresse »

relations avec la valeur adaptative (« fitness ») pour la résistance à la sécheresse

Comment étudier leur potentiel d'adaptation à la sécheresse ?

Potentiel d'adaptation par plasticité phénotypique

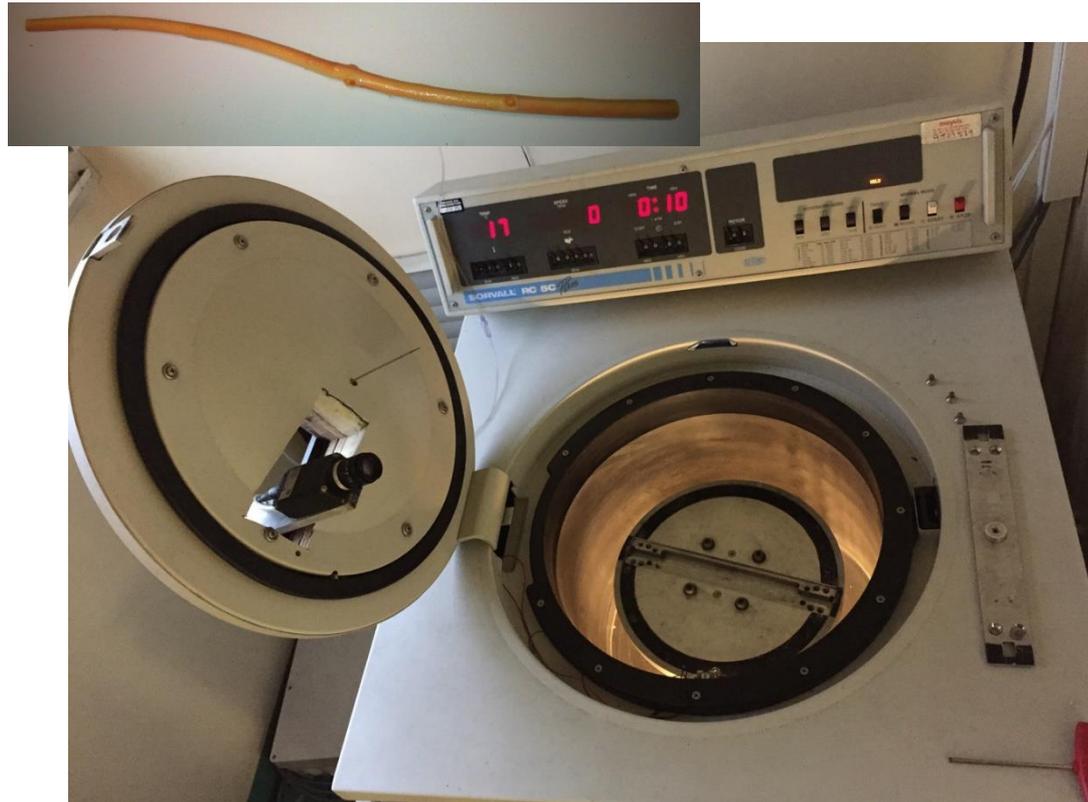
Potentiel d'adaptation par sélection naturelle

Comment valoriser ces informations pour favoriser et accélérer l'adaptation à la sécheresse ?



➤ Relations avec la fonction « résistance à la sécheresse »

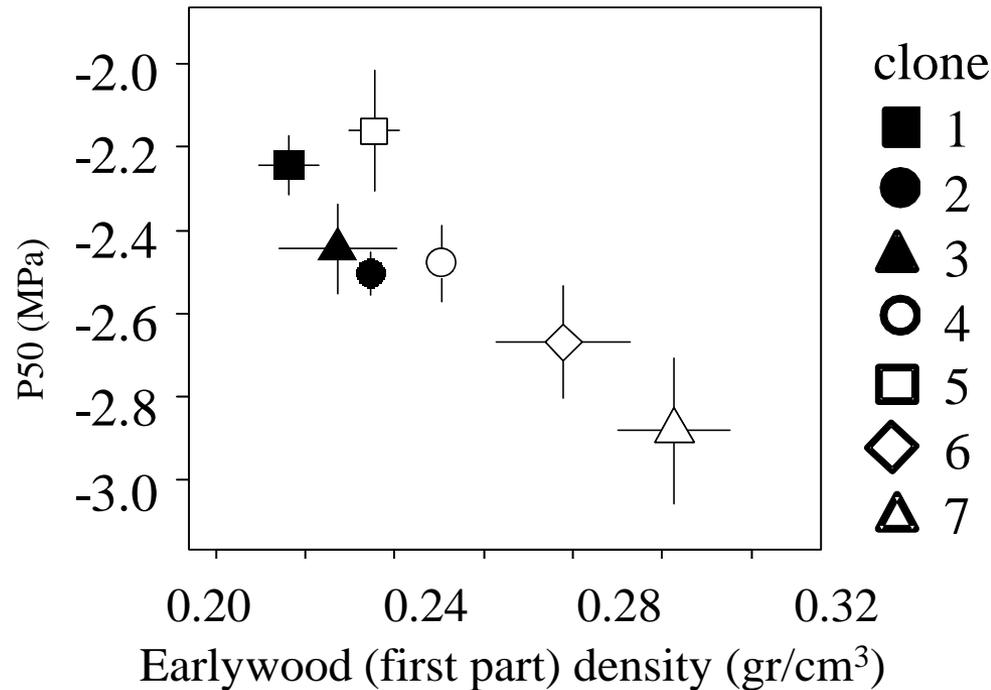
Résistance à la sécheresse et résistance à la cavitation



Cavitron (INRA PIAF Clermont-Ferrand)

Relations avec la fonction « résistance à la sécheresse »

Relation entre la **résistance à la cavitation** et les dimensions des conduits du bois



Dalla-Salda, G., A. Martinez-Meier, H. Cochard, et P. Rozenberg. 2011. « Genetic Variation of Xylem Hydraulic Properties Shows That Wood Density Is Involved in Adaptation to Drought in Douglas-Fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.)). » *Annals of Forest Science* 68 (4).

➤ Relation avec la valeur adaptative

Qu'est-ce que la valeur adaptative (« fitness ») d'un caractère ?

Fitness

Nombre de **descendants** atteignant l'âge **adulte** produits par un individu au cours de sa vie = **survie** + **succès reproducteur** (« succès reproducteur global »)

La composante « reproduction » de la fitness est particulièrement difficile à évaluer chez les arbres forestiers



Composante « **survie** » de la fitness...?

➤ Comparer arbres morts et survivants !

- Quels caractères ?



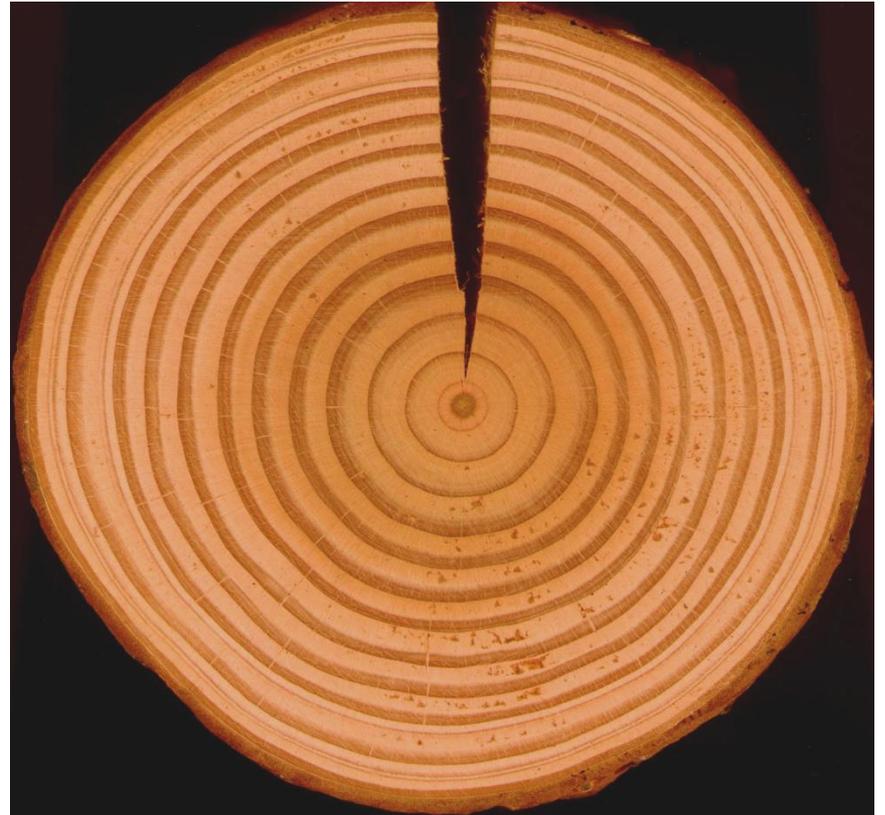
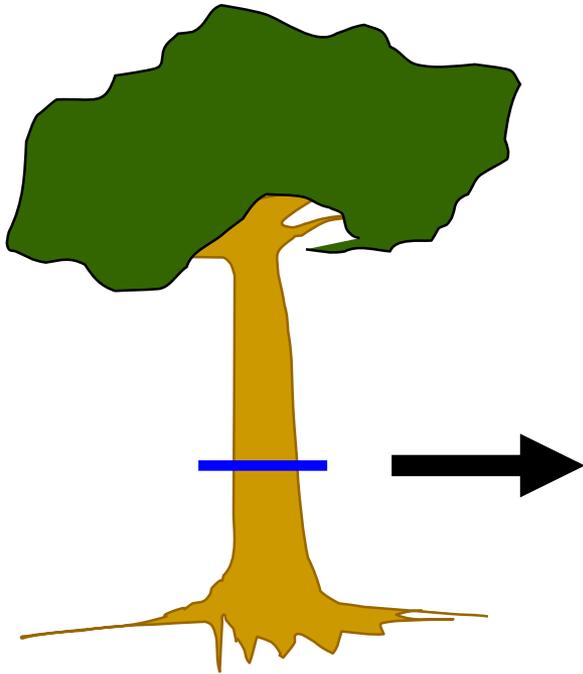
Problème **méthodologique** :

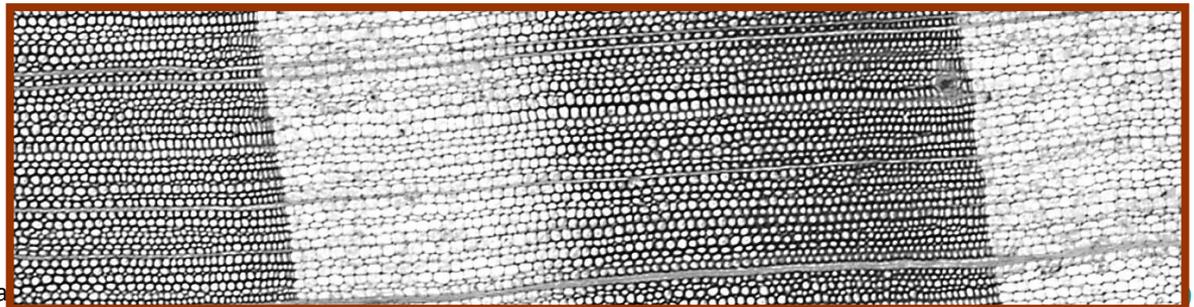
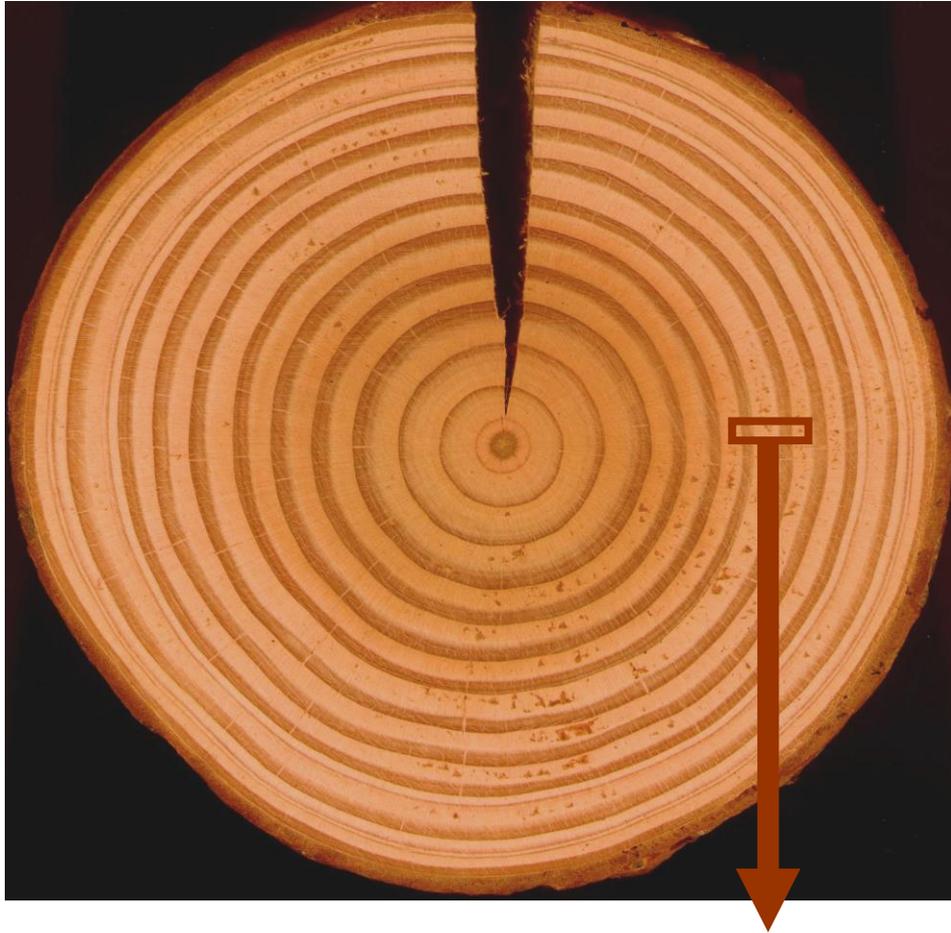
- Sur arbres morts et vivants
- mesurables à une échelle compatible avec l'estimation des paramètres génétiques

INRAE

➤ Comparer arbres morts et survivants

- Le bois



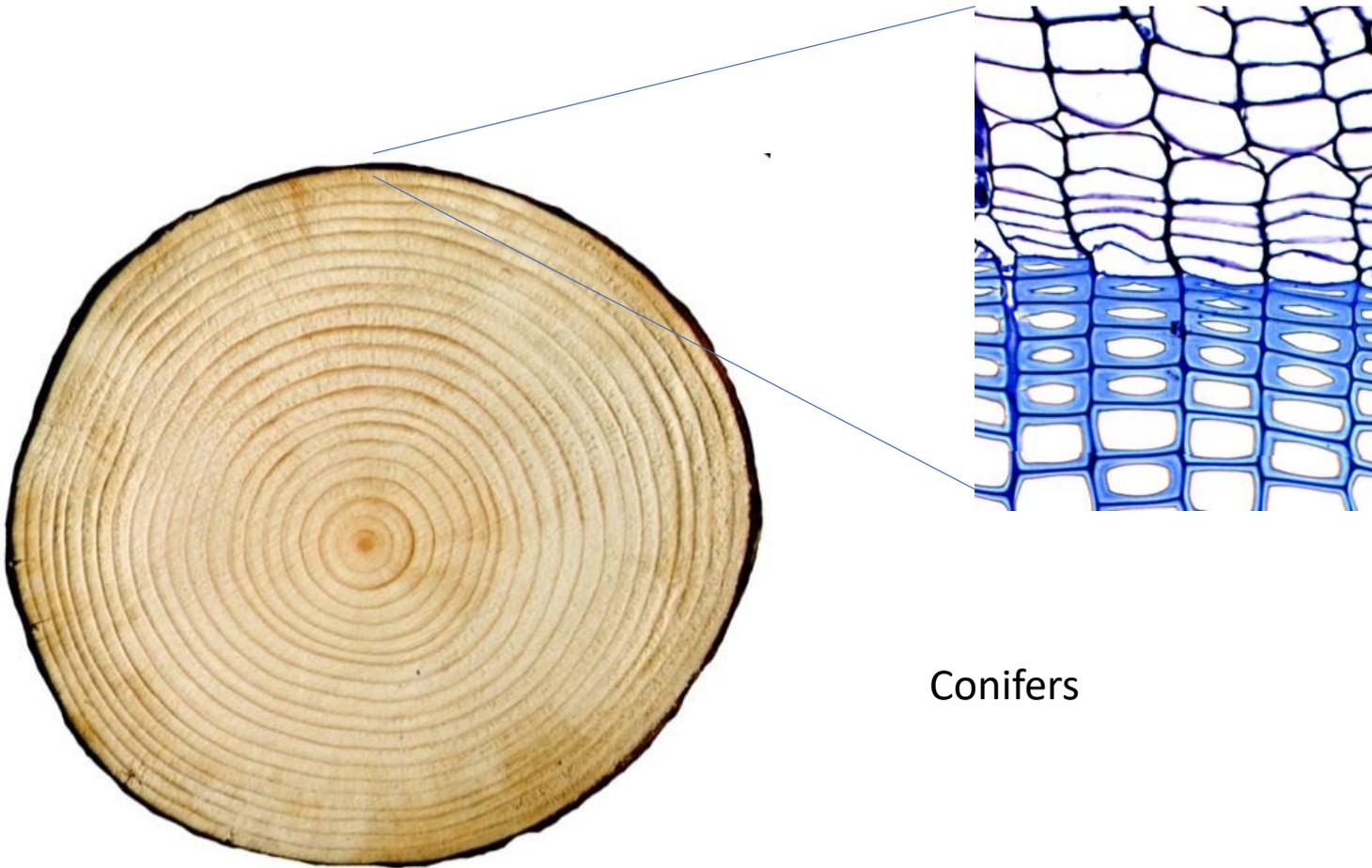


INRAE

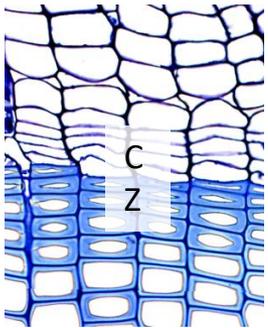
Adaptation des arbres forestiers au cha

27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Wood Formation



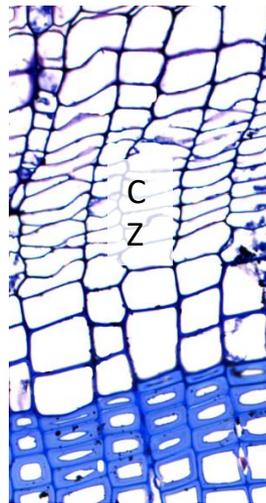
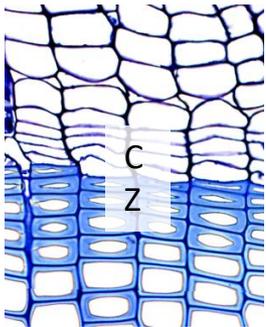
Conifers

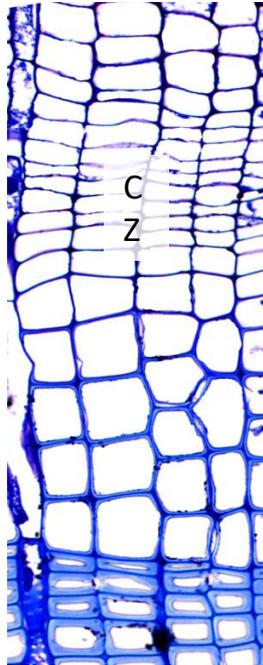
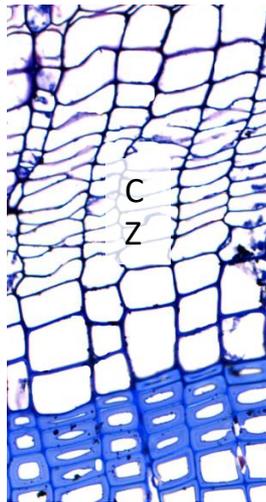
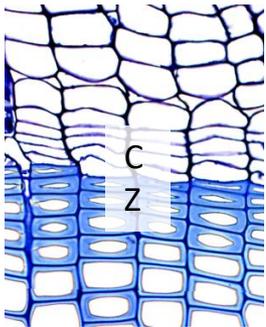


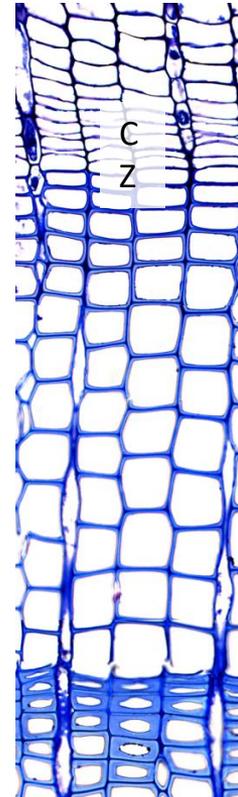
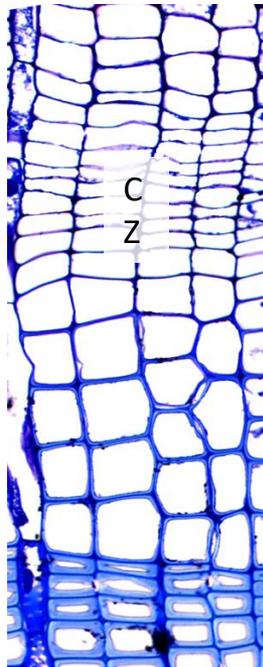
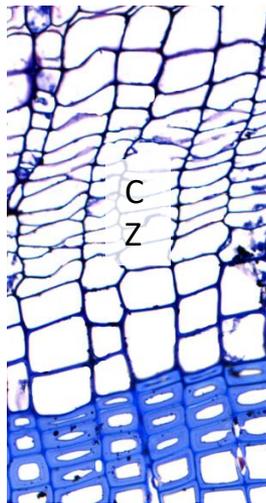
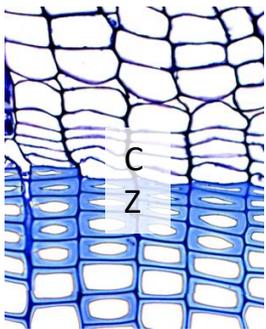
Phloem

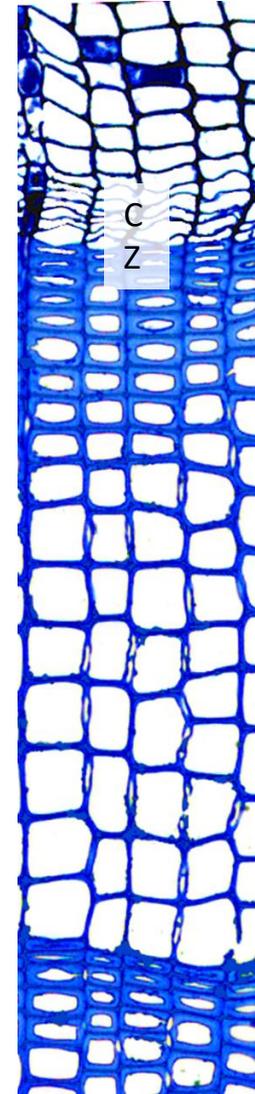
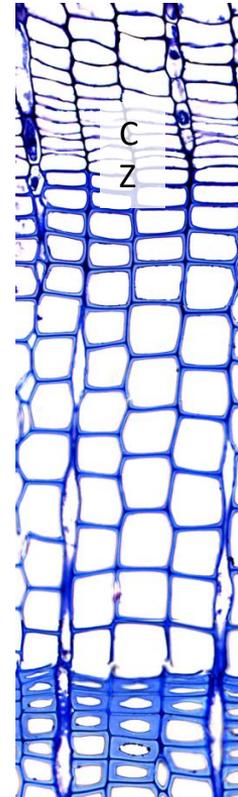
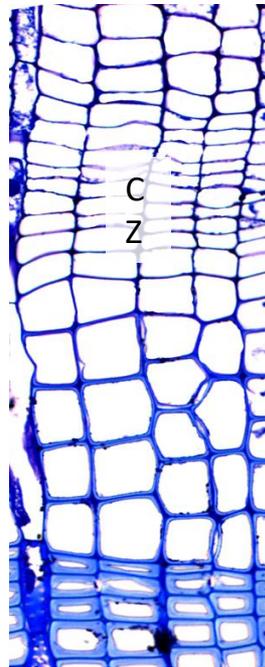
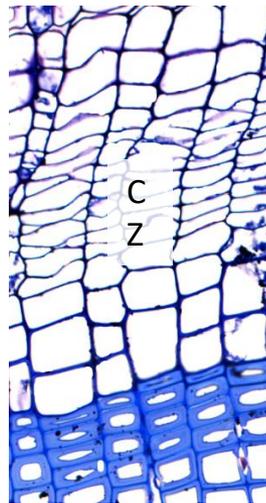
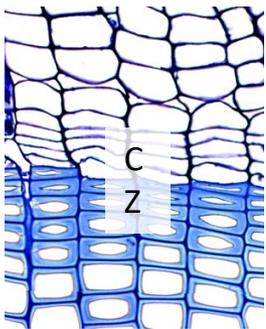
Xylem





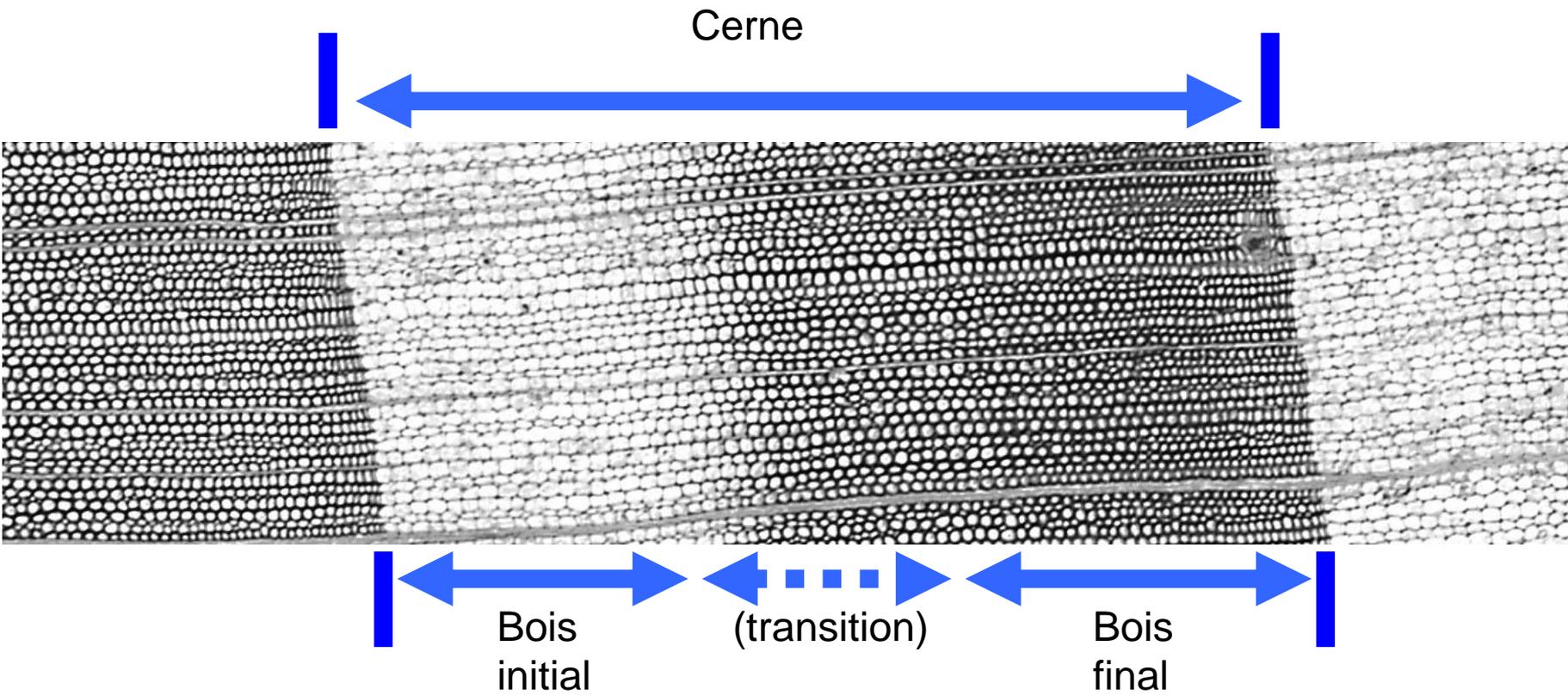






Images and inspiration by Cyrille Rathgeber et al.





Pseudotsuga menziesii

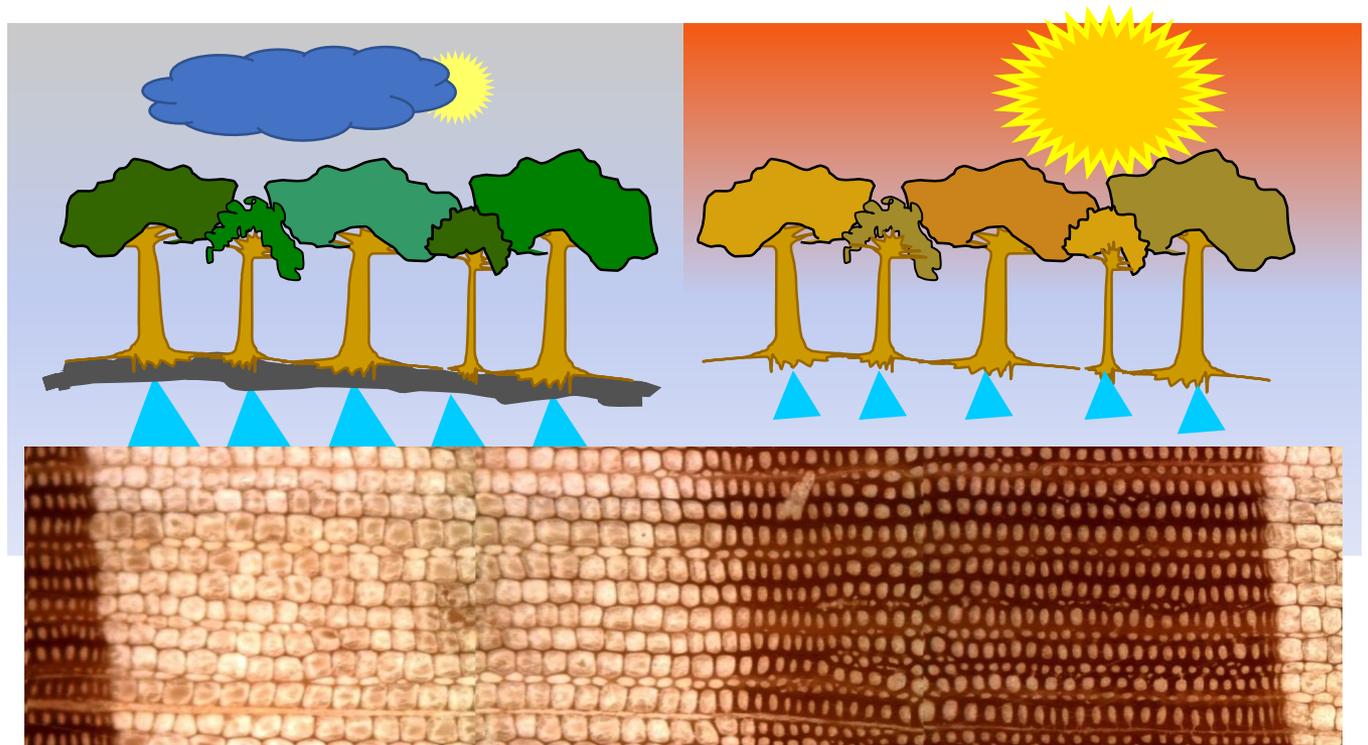
INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

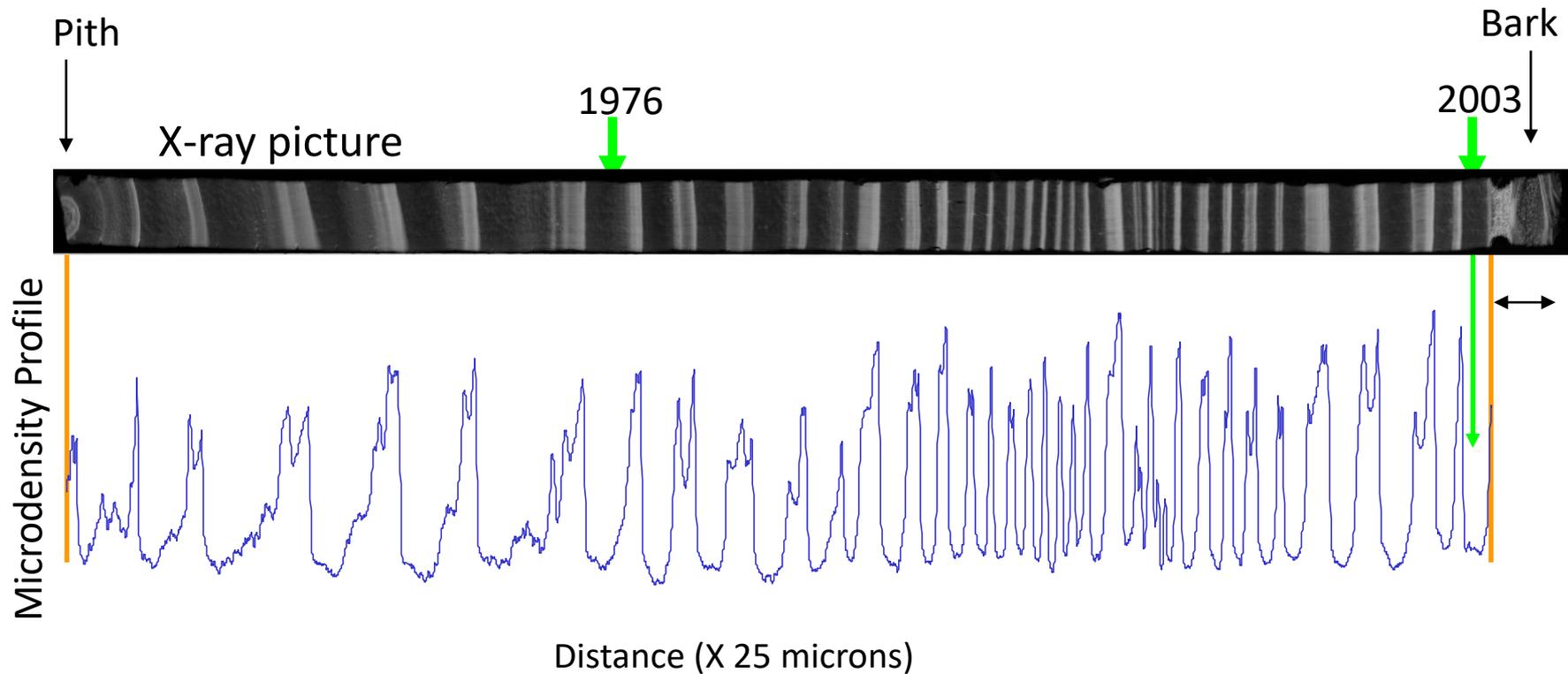
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Les cernes

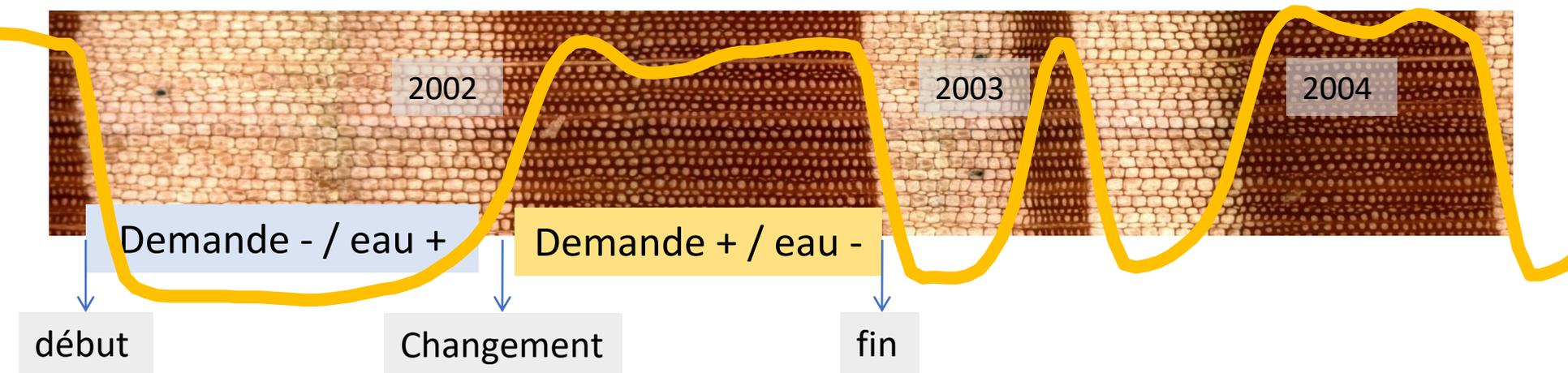
- Un cerne = un an = une saison de végétation
- Fonctions
 - Support
 - Réserves
 - Conduction
- Accès *rétrospectif*



➤ Microdensité indirecte aux rayons X



➤ Microdensité

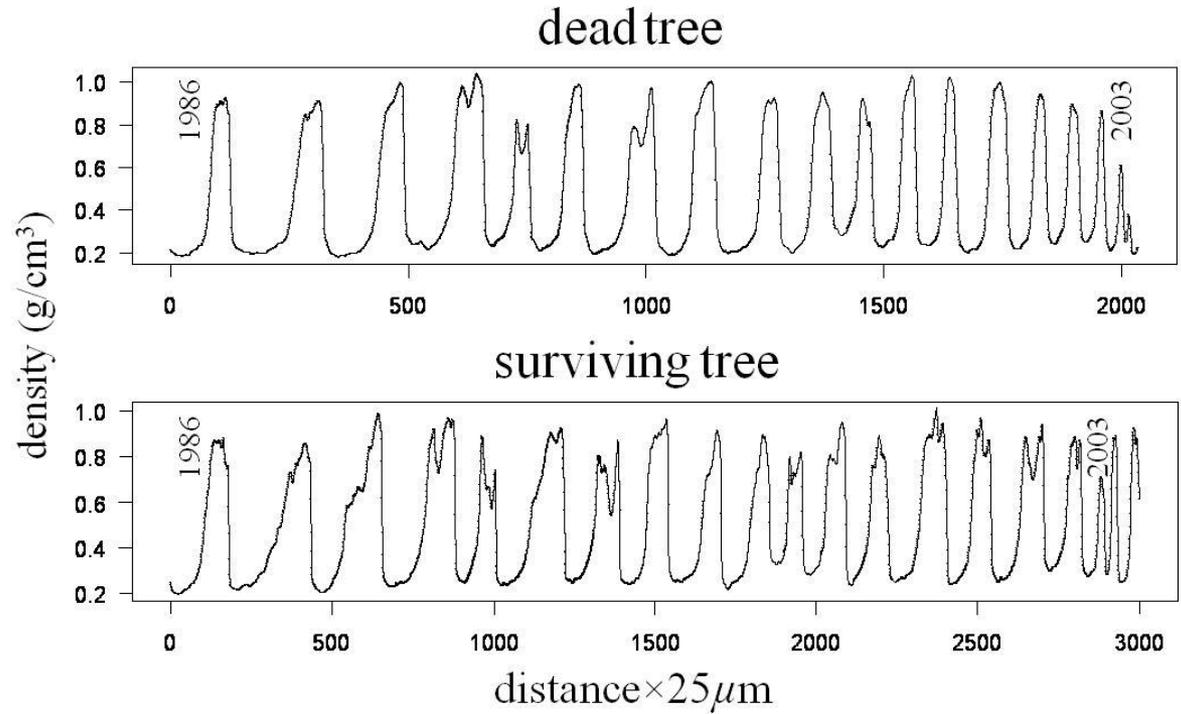


➤ Carottes



➤ Profils d'arbres morts et survivants

Martinez-Meier, A., L. Sanchez, M. Pastorino, L. Gallo, et P. Rozenberg. « What Is Hot in Tree Rings? the Wood Density of Surviving Douglas-firs to the 2003 Drought and Heat Wave. » *Forest Ecology and Management* 256, n° 4 (2008).

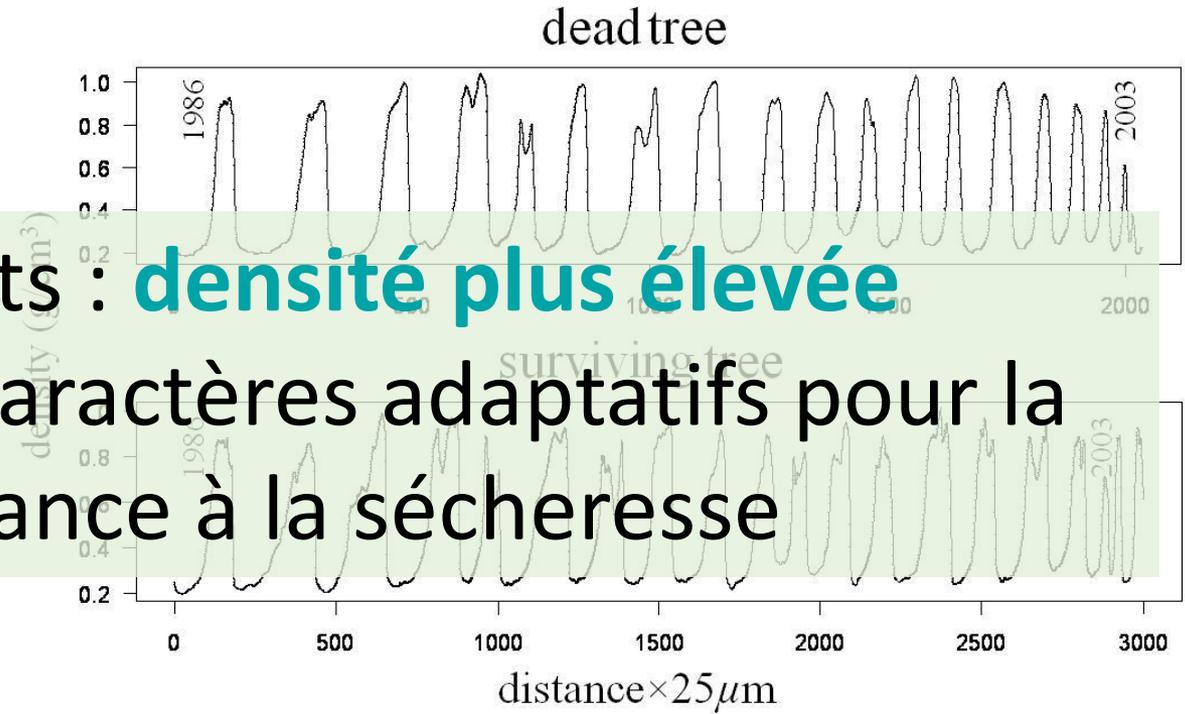


➤ Profils d'arbres morts et survivants

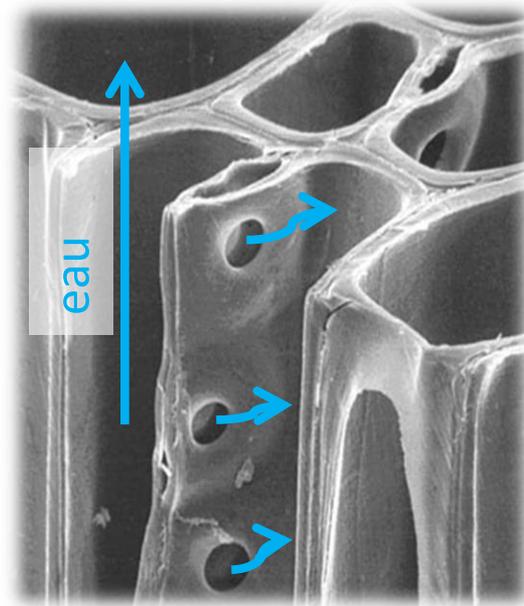
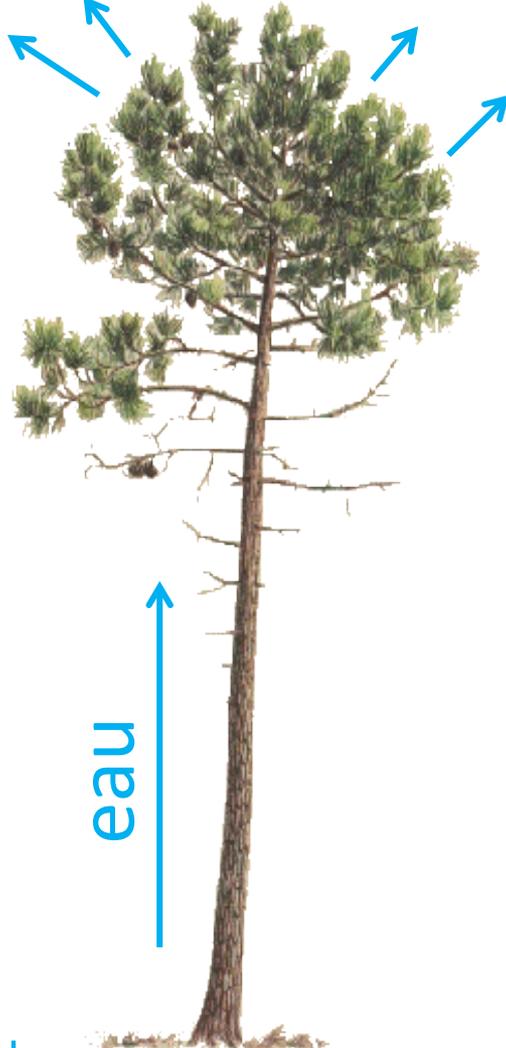
Martinez-Meier, A., L. Sanchez, M. Pastorino, L. Gallot et P. Rozenberg
« What Is Hot in Tree Rings? the Wood Density of Surviving Douglas-firs to the 2003 Drought and Heat Wave. » *Forest Ecology and Management* 256, 164 (2008).

Survivants : **densité plus élevée**

➤ Proxys de caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse



➤ Pourquoi une densité du bois plus élevée ?



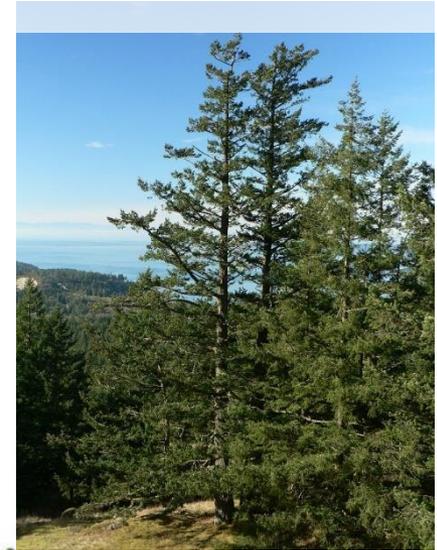
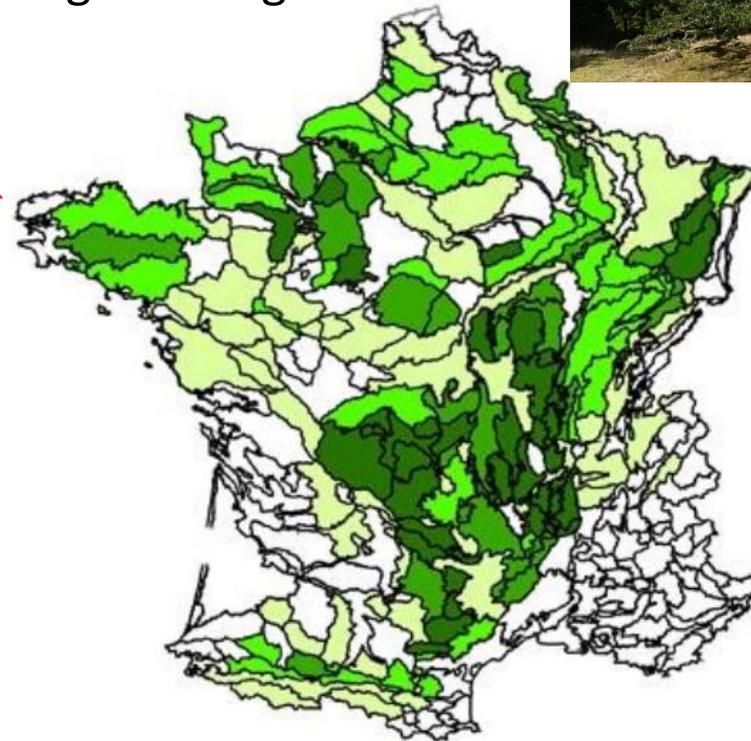
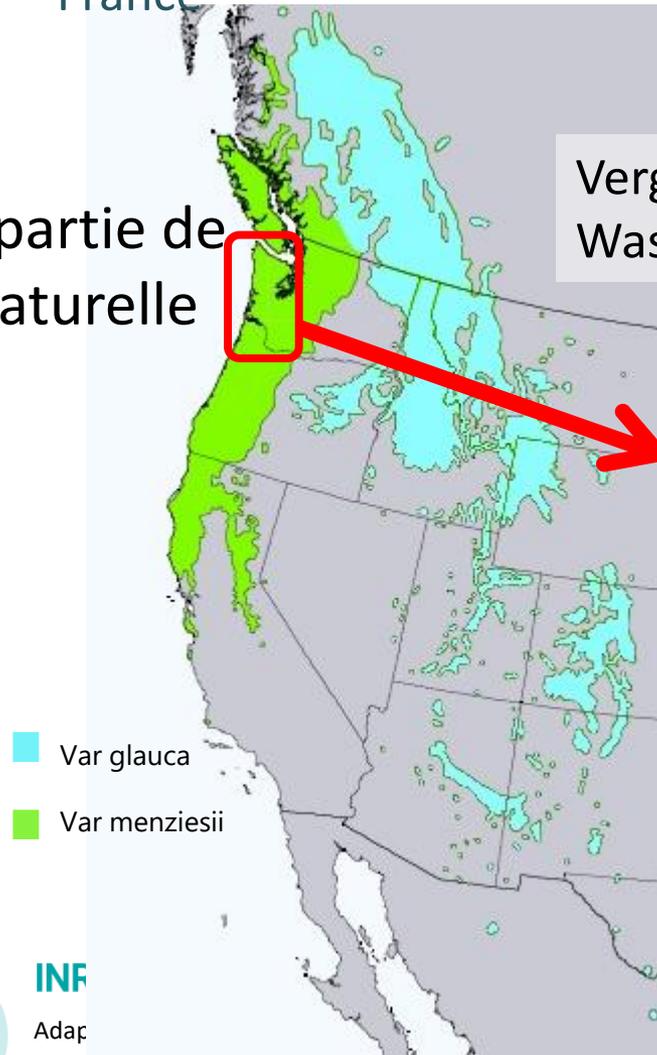
eau
INRAE

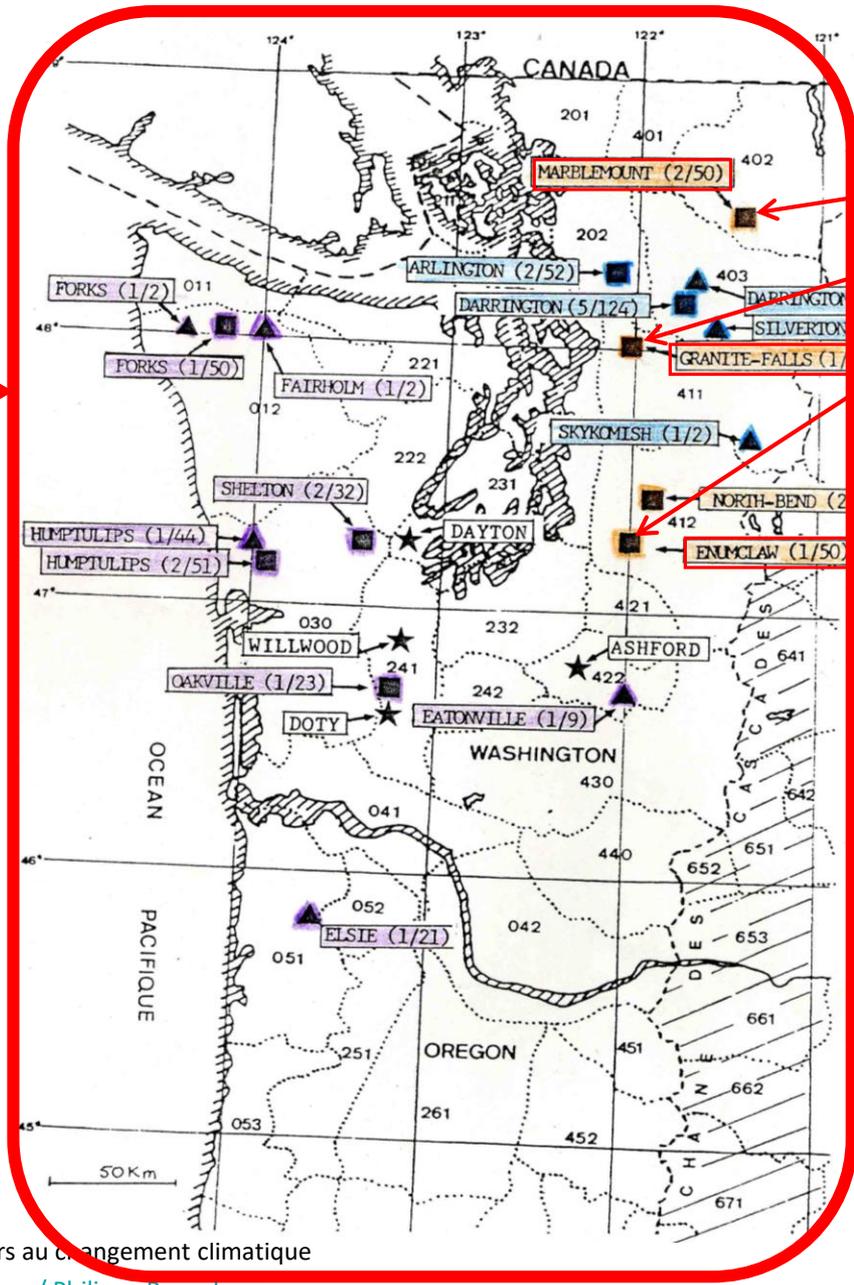
➤ Application

Estimation du potentiel d'adaptation évolutive de la résistance à la sécheresse du douglas introduit en France

Petite partie de l'aire naturelle

Vergers à graines d'origines Washington-Oregon





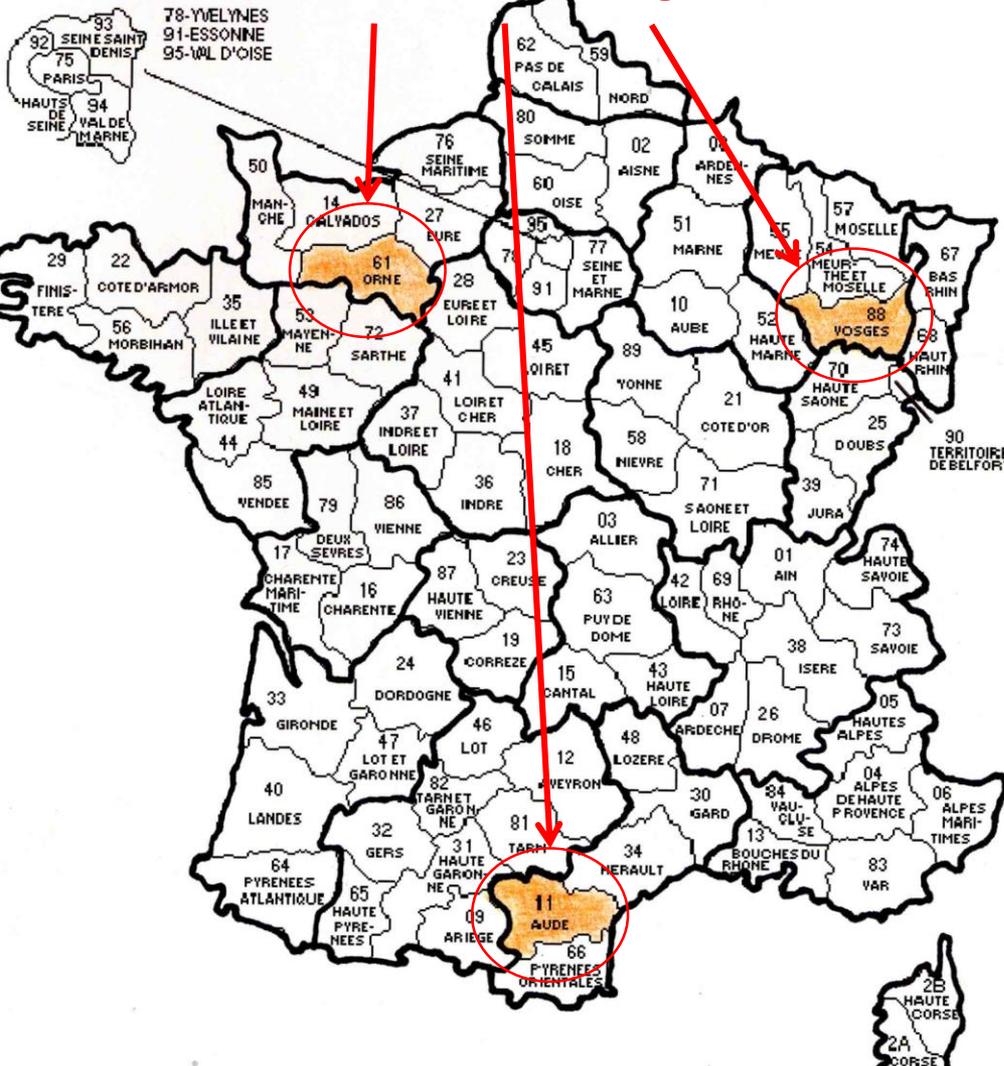
Marblemount
 Granite-Falls
 Enumclaw

56 familles

ers au changement climatique

Dispositifs génétiques : estimation de la variabilité et de l'héritabilité

Orne, Aude, Vosges



➤ 1600 carottes



INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ 1600 profils de microdensité

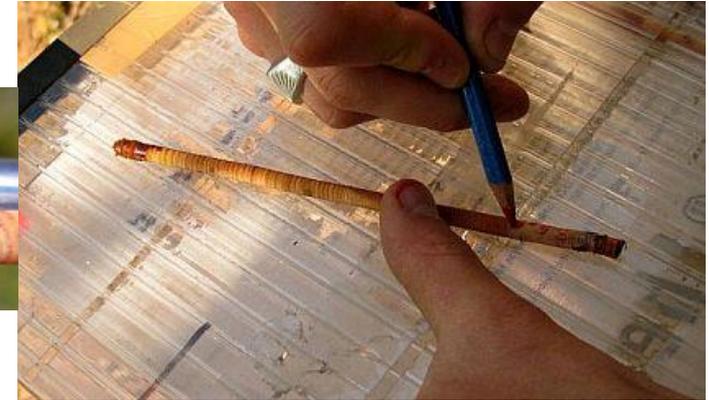
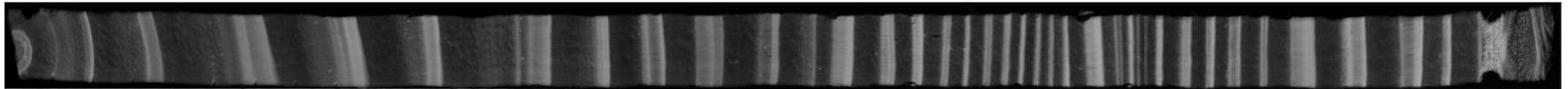
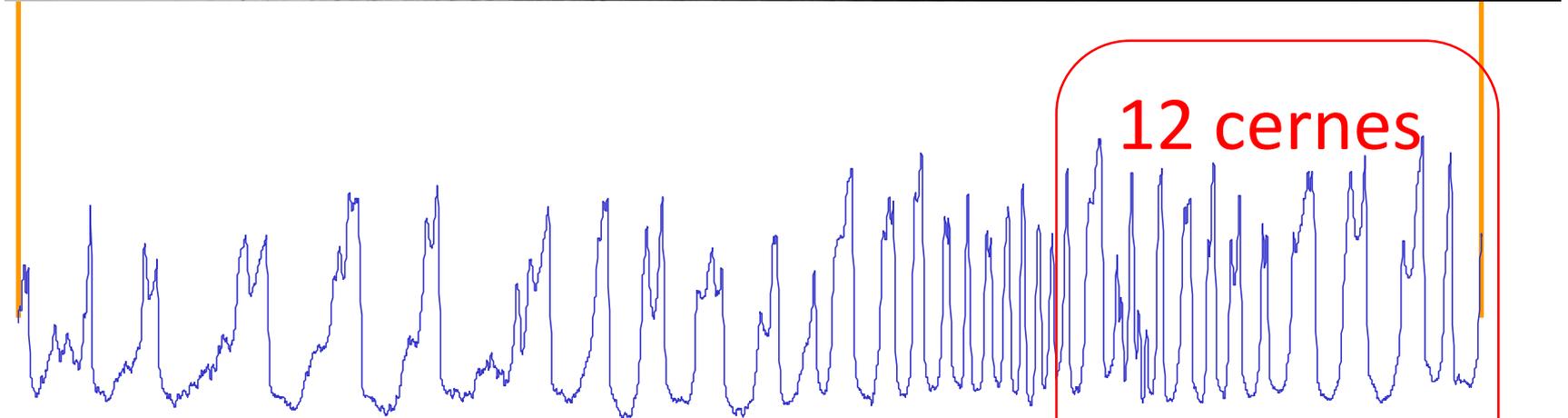


Image rayons X



Microdensité



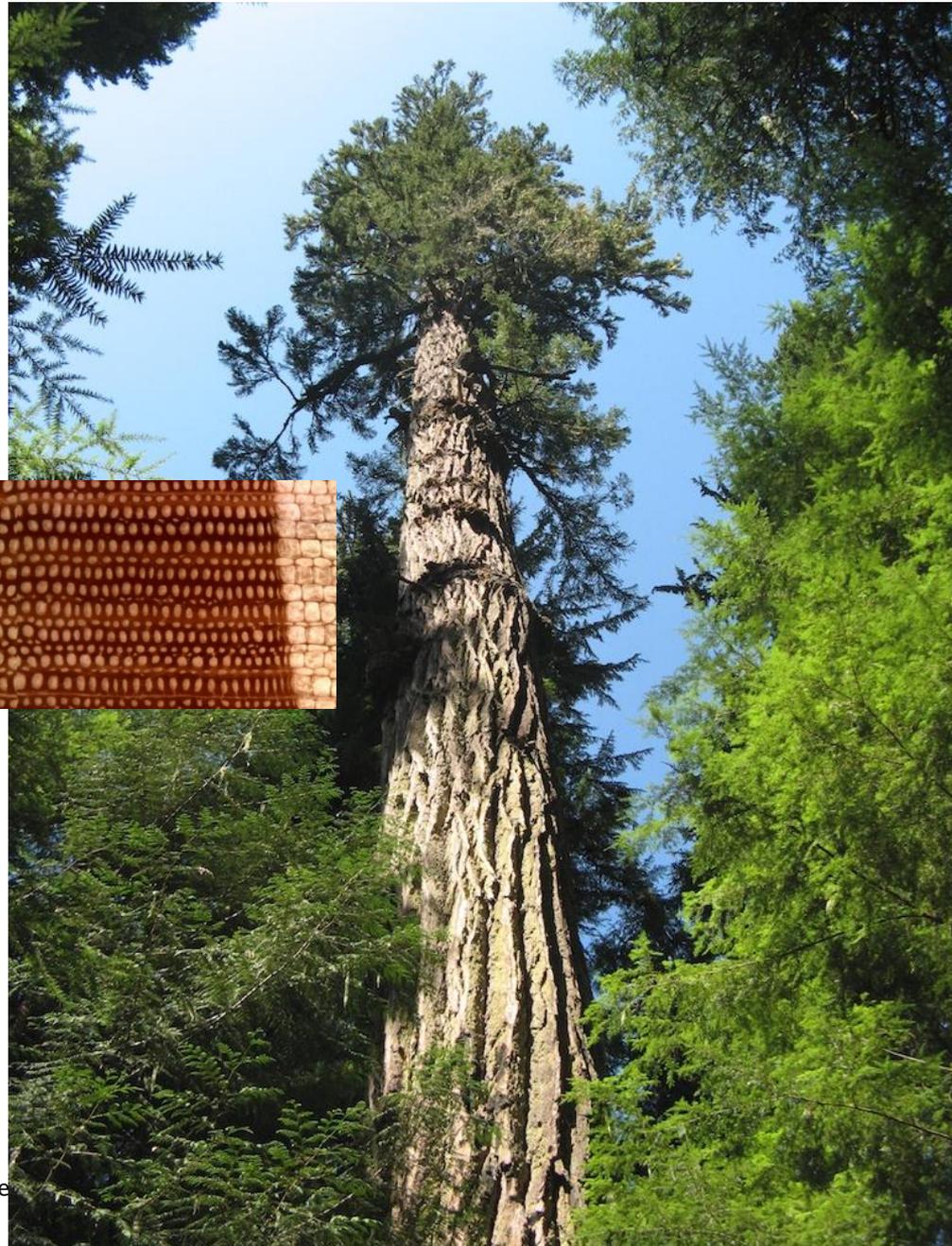
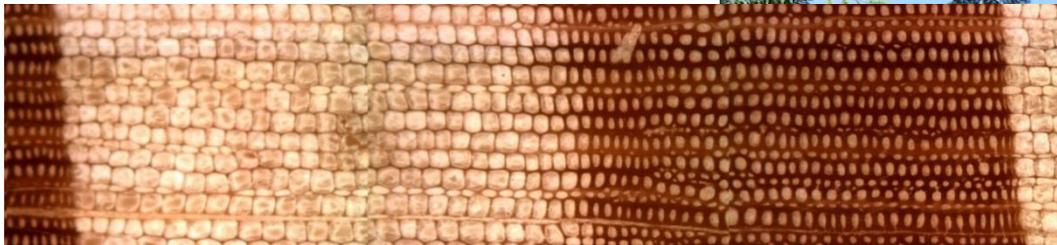
12 cernes

12 années

Distance (X 25 microns)

➤ Résultats

- Déterminisme génétique de caractères de résistance à la sécheresse



INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Résultats

- Déterminisme génétique de caractères de résistance à la sécheresse



- Valorisation dans le cadre du programme d'amélioration du douglas



➤ Mécanismes d'adaptation

Mécanismes naturels de l'adaptation des forêts au changement climatique

A court terme :

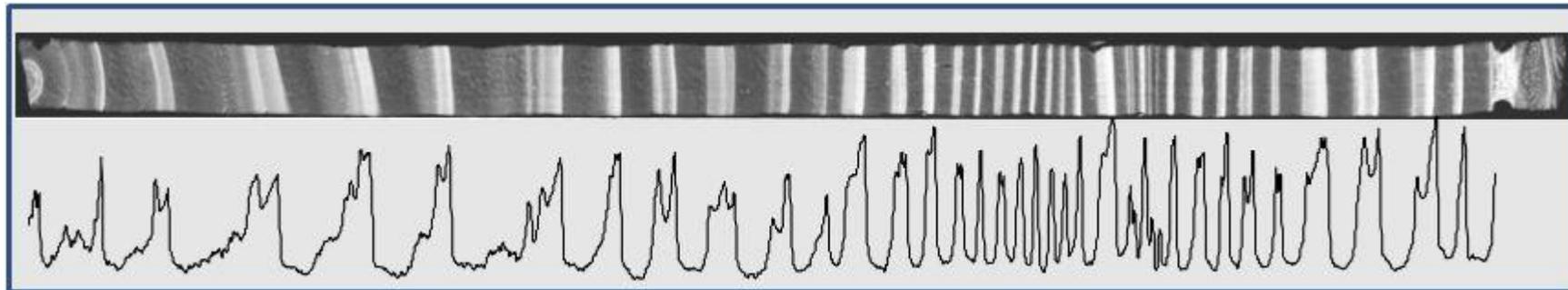
Plasticité phénotypique

Capacité d'un *individu* à modifier son phénotype sous l'effet d'une variation de son environnement



➤ Cernes de croissance et plasticité

Les cernes sont bien adaptés à la mesure rétrospective de la plasticité phénotypique



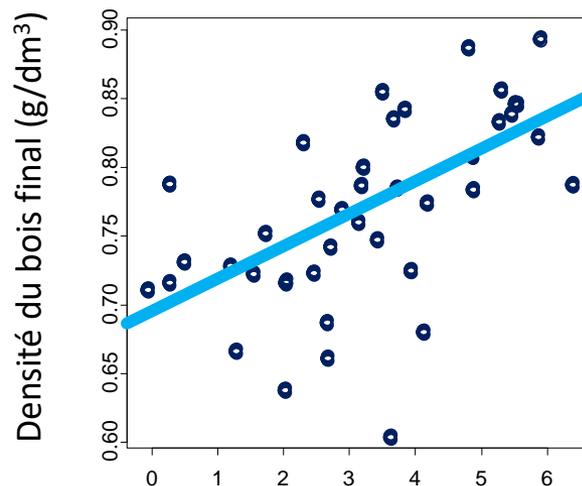
Chaque **cerne** est formé durant une **année** particulière

Les conditions environnementales (climatiques) de chaque année déterminent les caractéristiques de chaque cerne

Si, pour **chaque arbre**, on réussit à établir une **relation** entre les caractéristiques de chaque **cerne**, et celles de chaque **année**, alors on peut estimer la **plasticité phénotypique**

➤ Relation significative = norme de réaction

Entre une variable de cerne et une variable climatique annuelle



$$r = 0.77, p < 0.05$$

Qualité de la relation

Plasticité phénotypique :

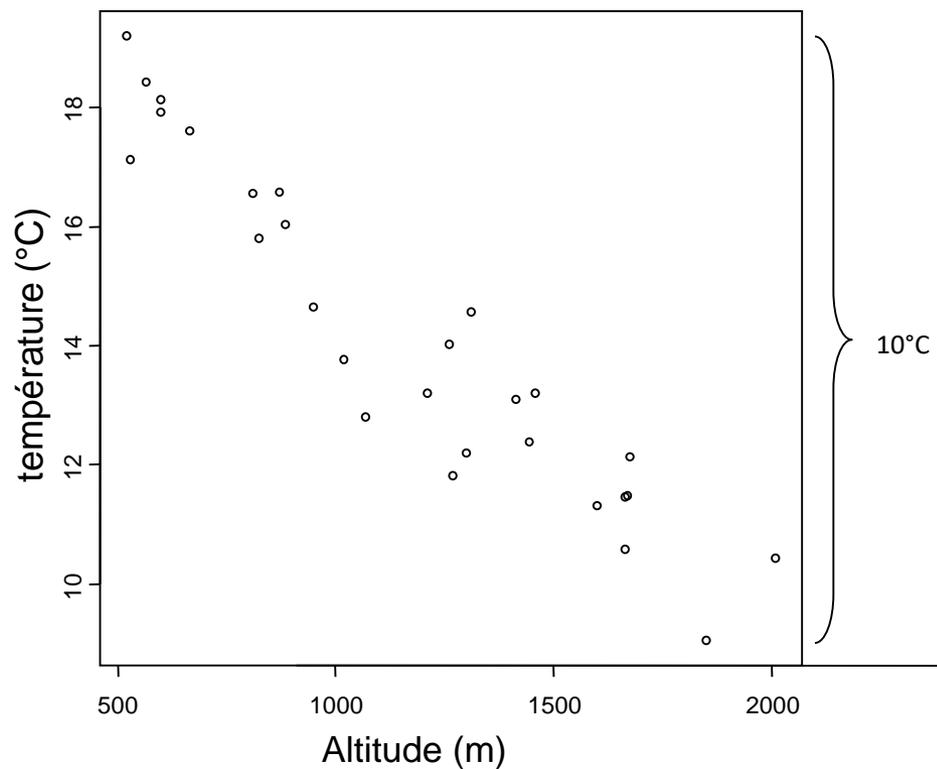
$$\text{Pente} = 0.023 \text{ g/dm}^3/\text{°C}$$

Température maximale (moyenne de la période (°C))

➤ Gradients altitudinaux

gradients de température

2005, moyennes
annuelles des
températures
maximales
quotidiennes des
stations météo-
France des Hautes-
Alpes



+ 10°C sur 1500 m

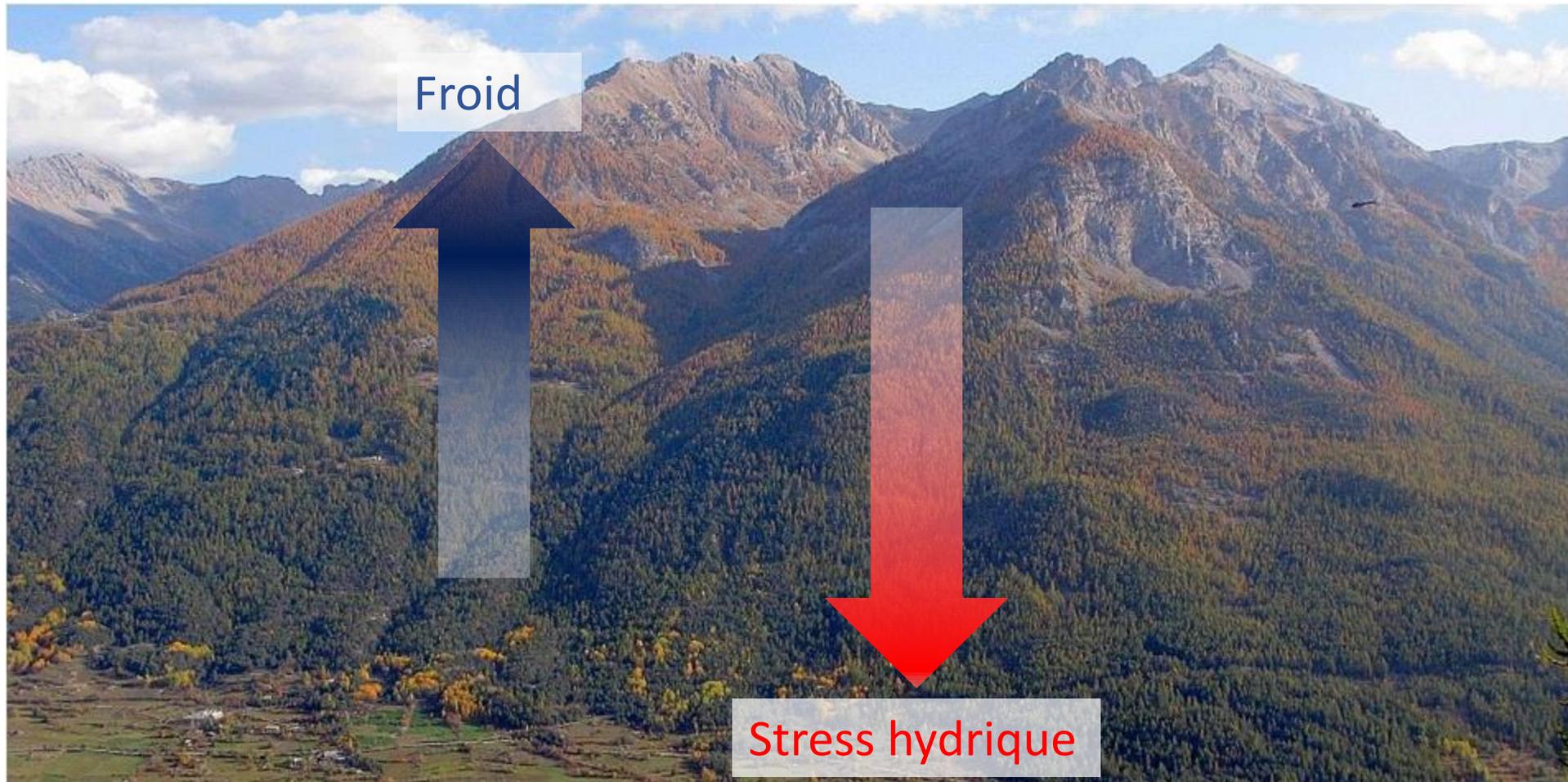


INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Pressions de sélection





INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg



Pin sylvestre, pin à crochet et leur hybride



INRAE

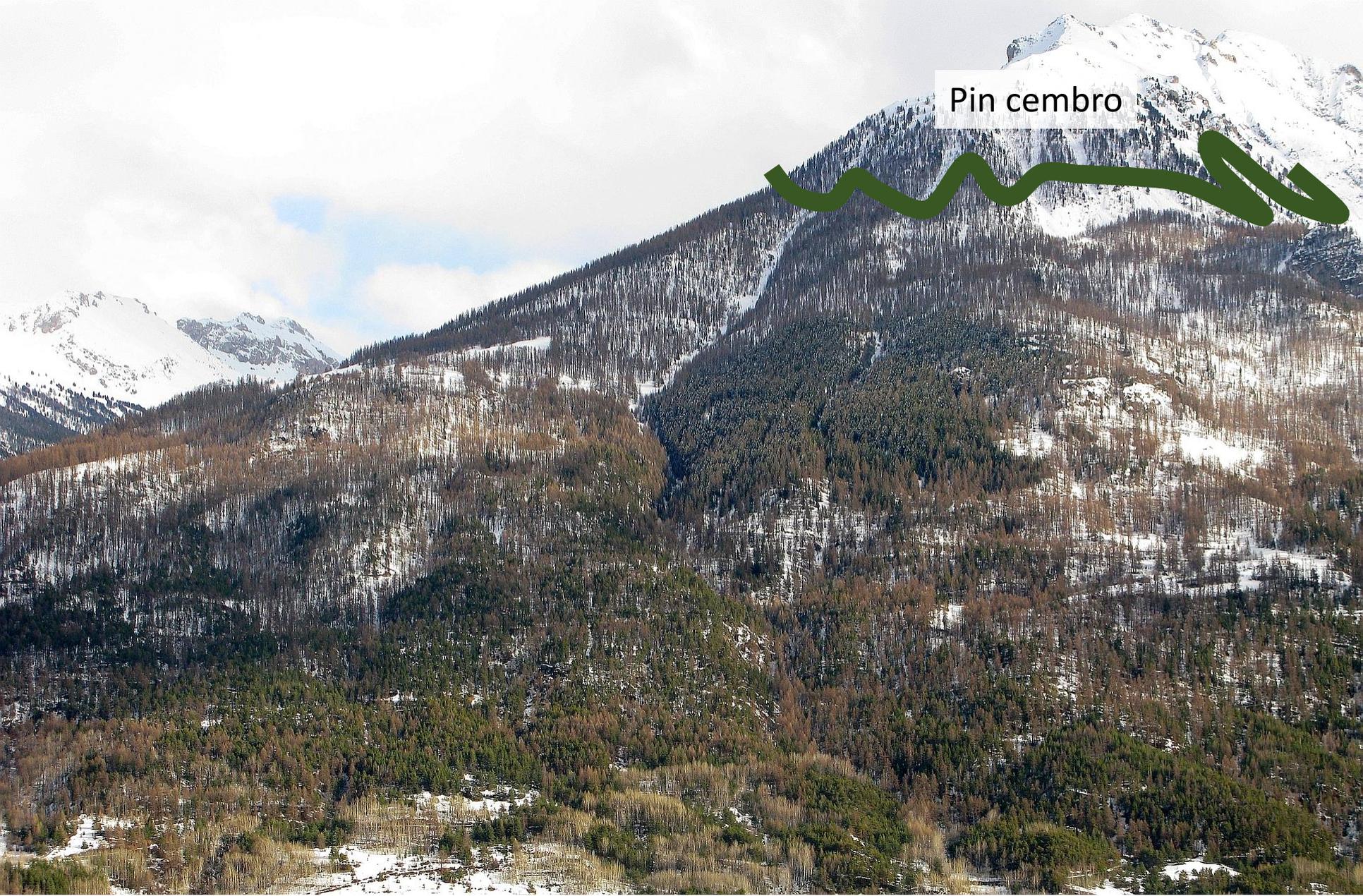
Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg



Sapin pectiné



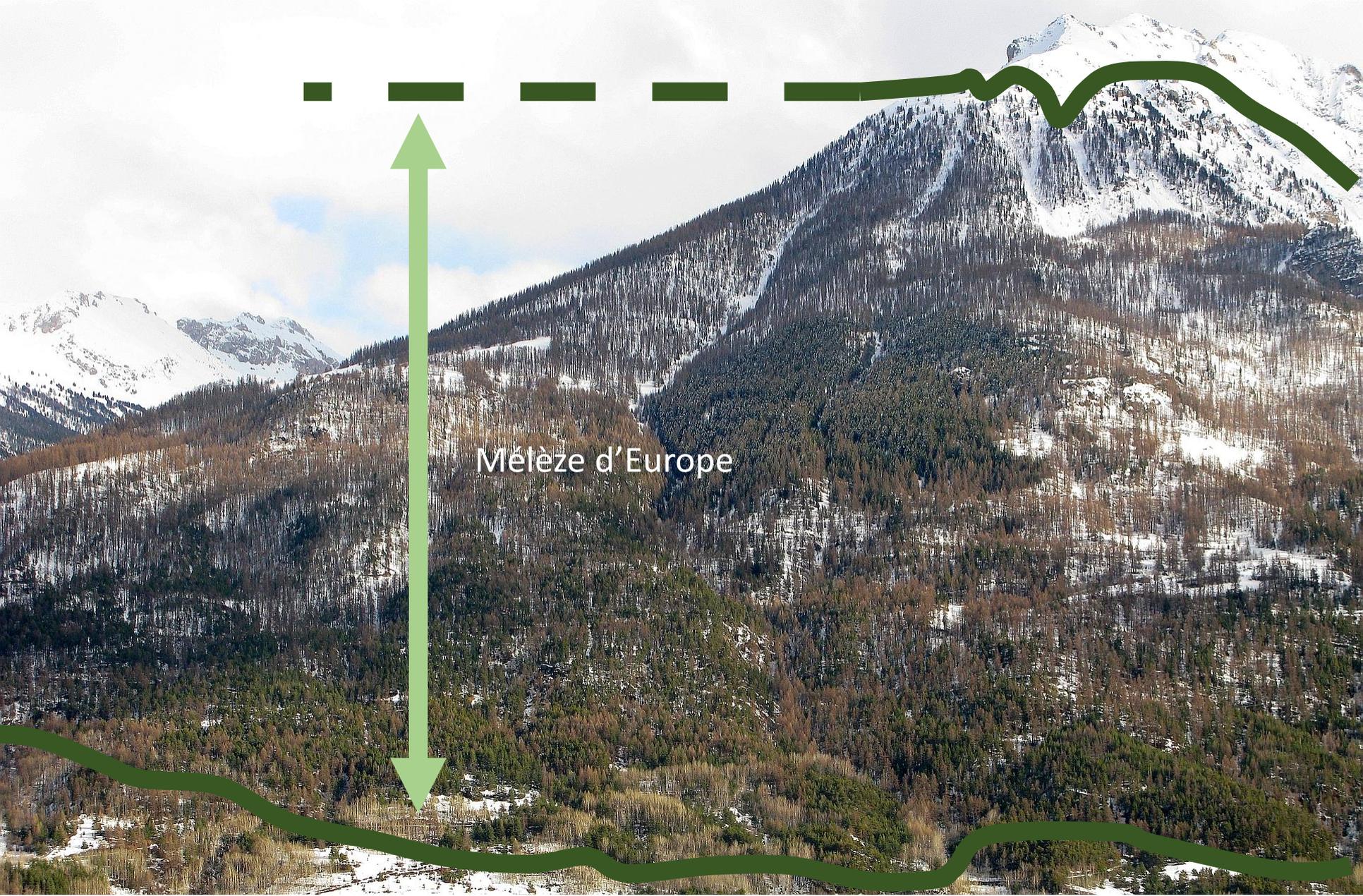
INRAE



Pin cembro



INRAE



Mélèze d'Europe

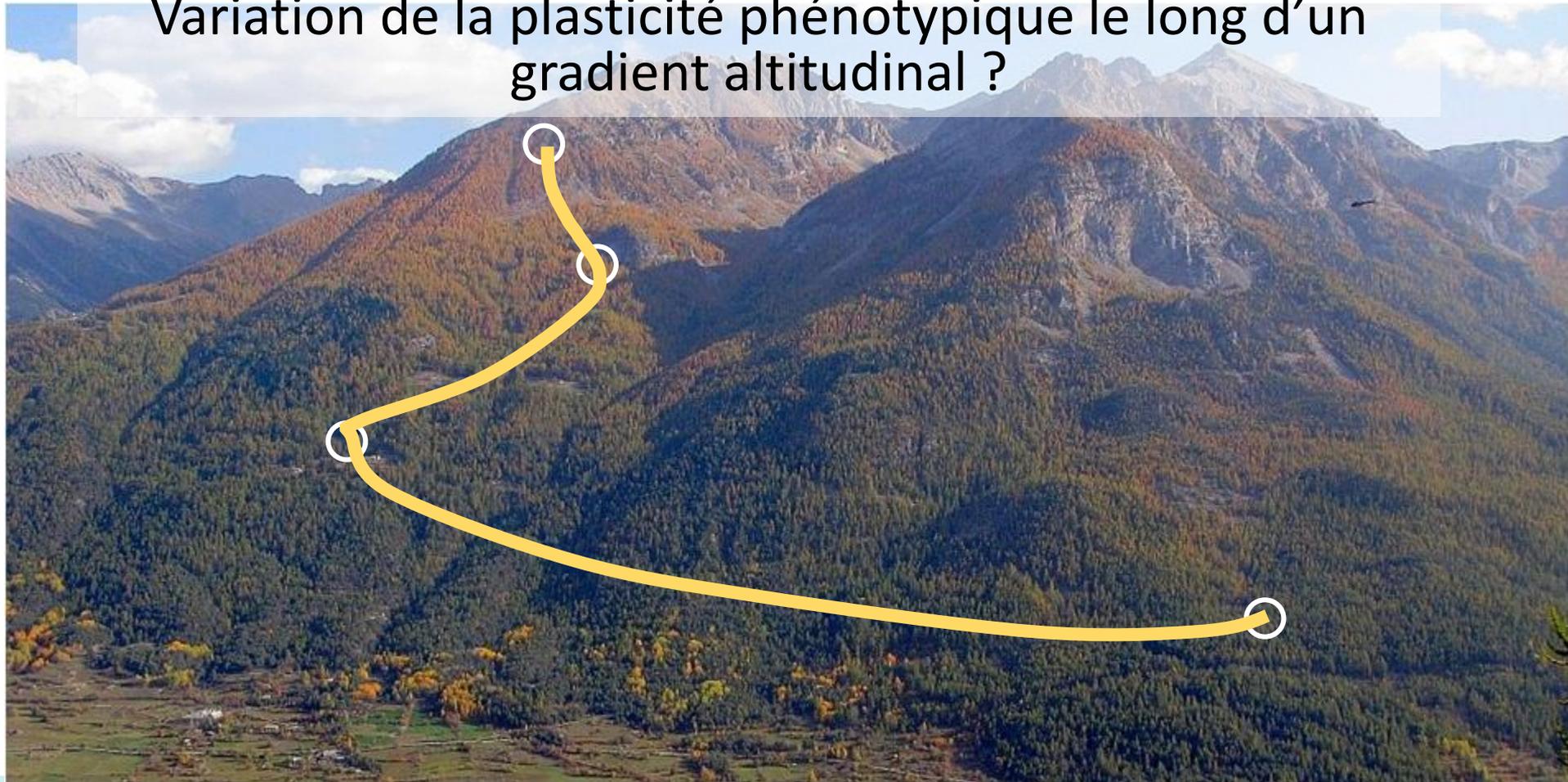


INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Gradients altitudinaux

Variation de la plasticité phénotypique le long d'un gradient altitudinal ?



➤ Microdensitométrie

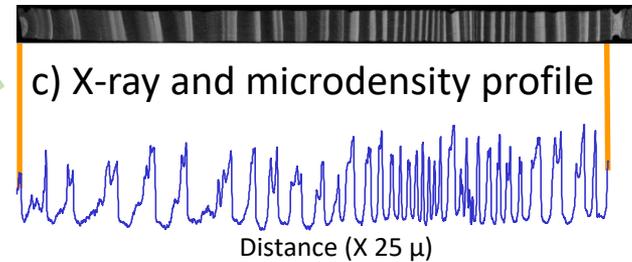
a) Collection of wood samples



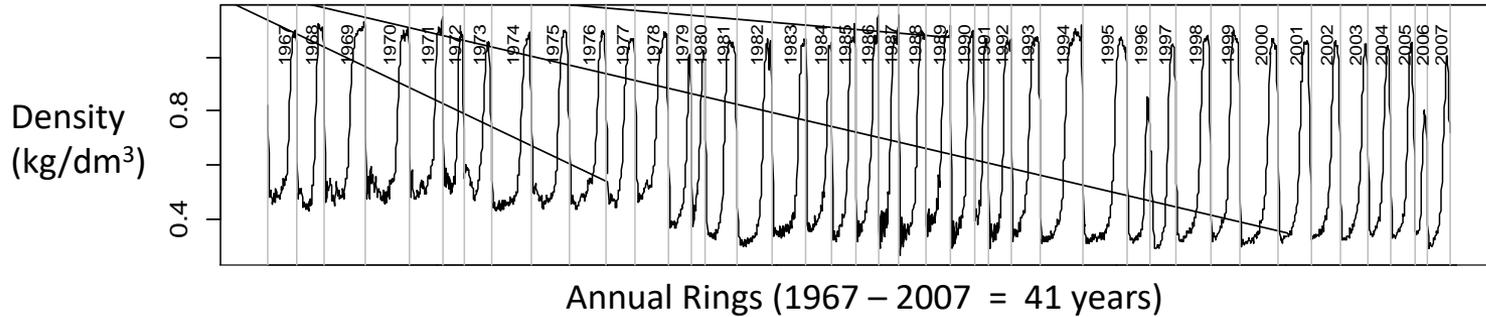
b) Wood samples



c) X-ray and microdensity profile

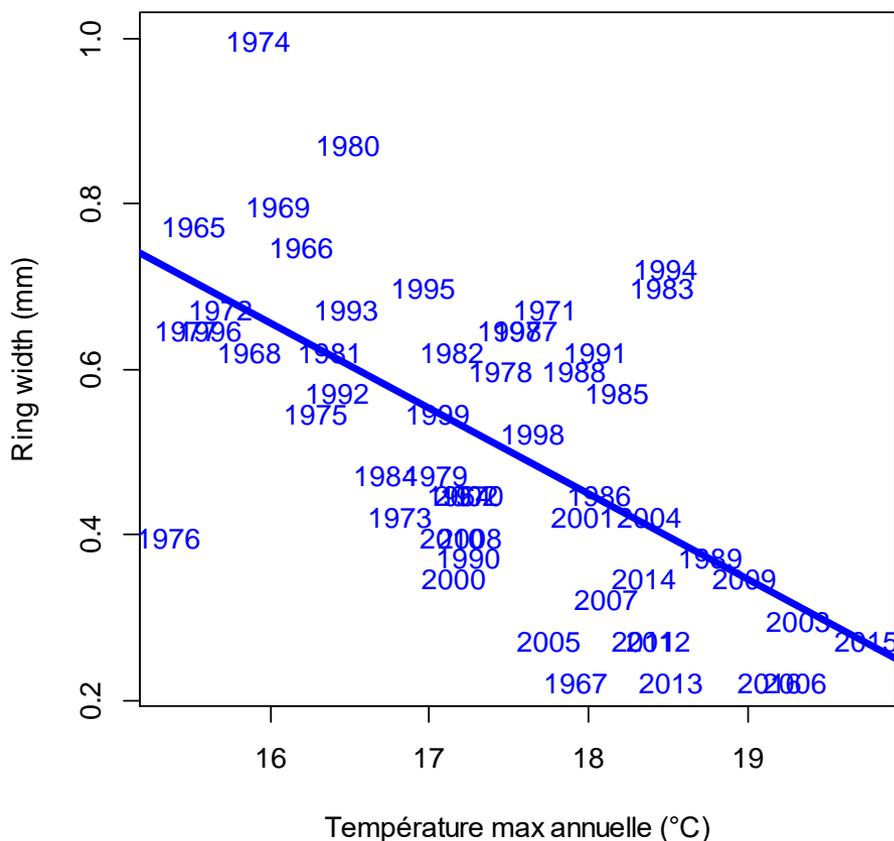


d) Complete microdensity profile

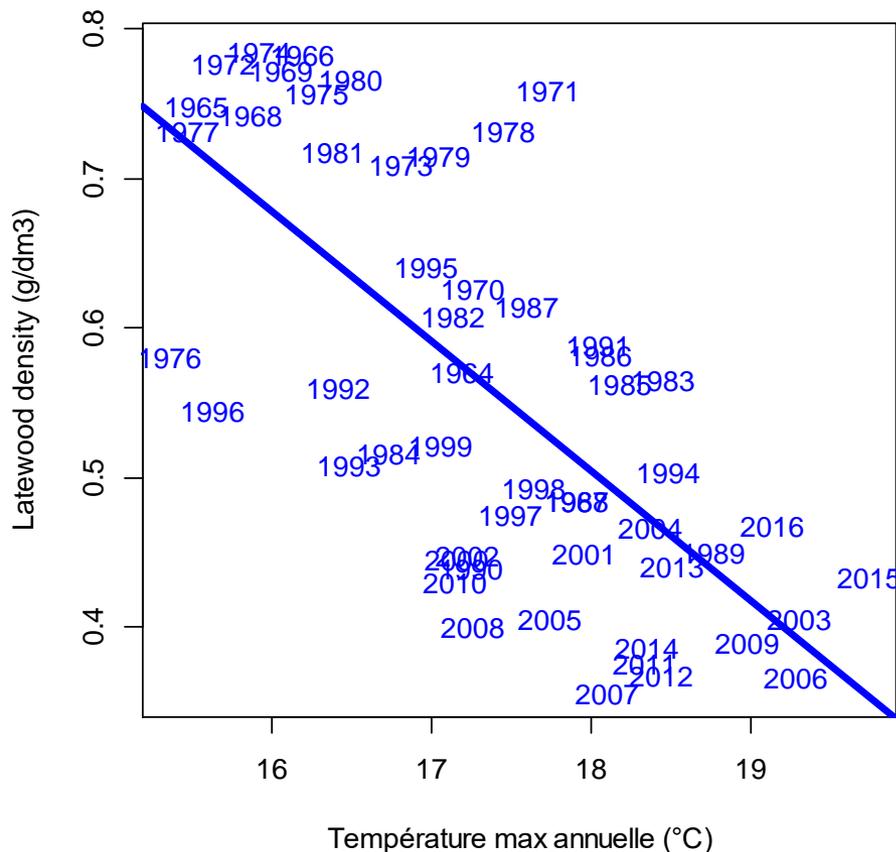


➤ Arbre 008

Ring width (mm)
Tree b008 $r = -0.62$ $p = 0$

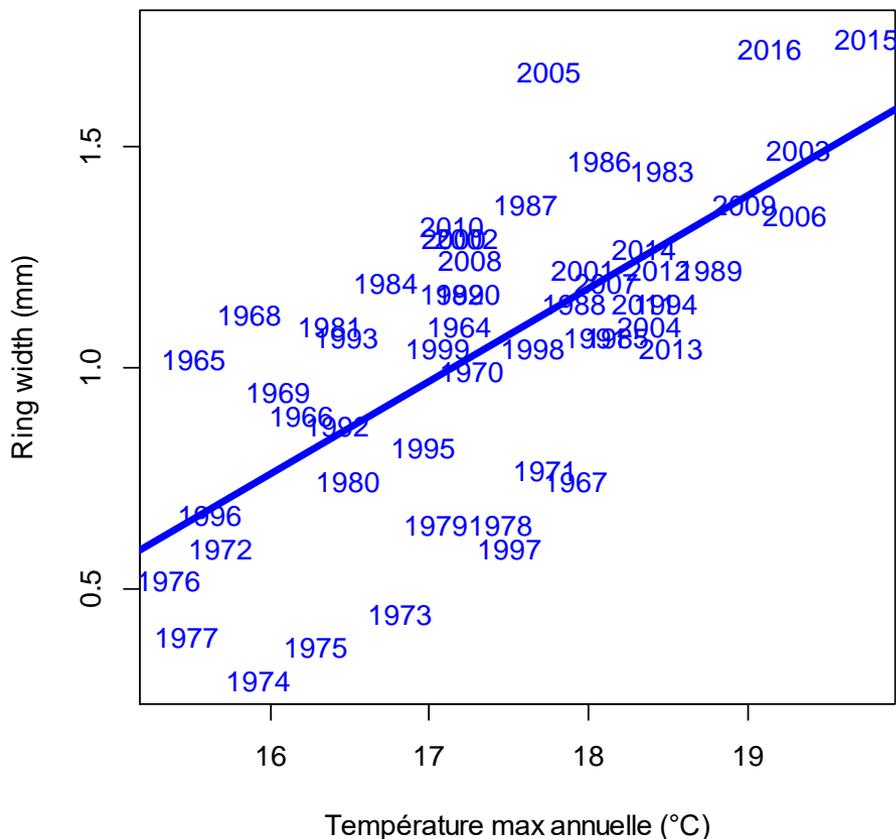


Latewood density (g/dm³)
Tree b008 $r = -0.69$ $p = 0$

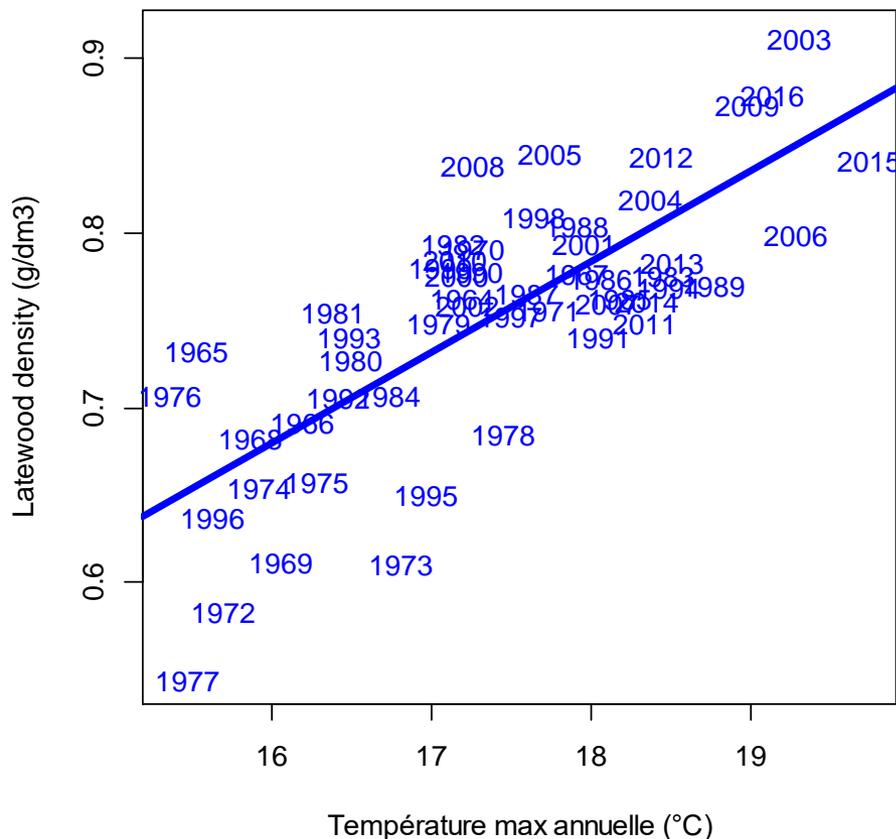


➤ Arbre 161

Ring width (mm)
Tree b161 $r = 0.68$ $p = 0$

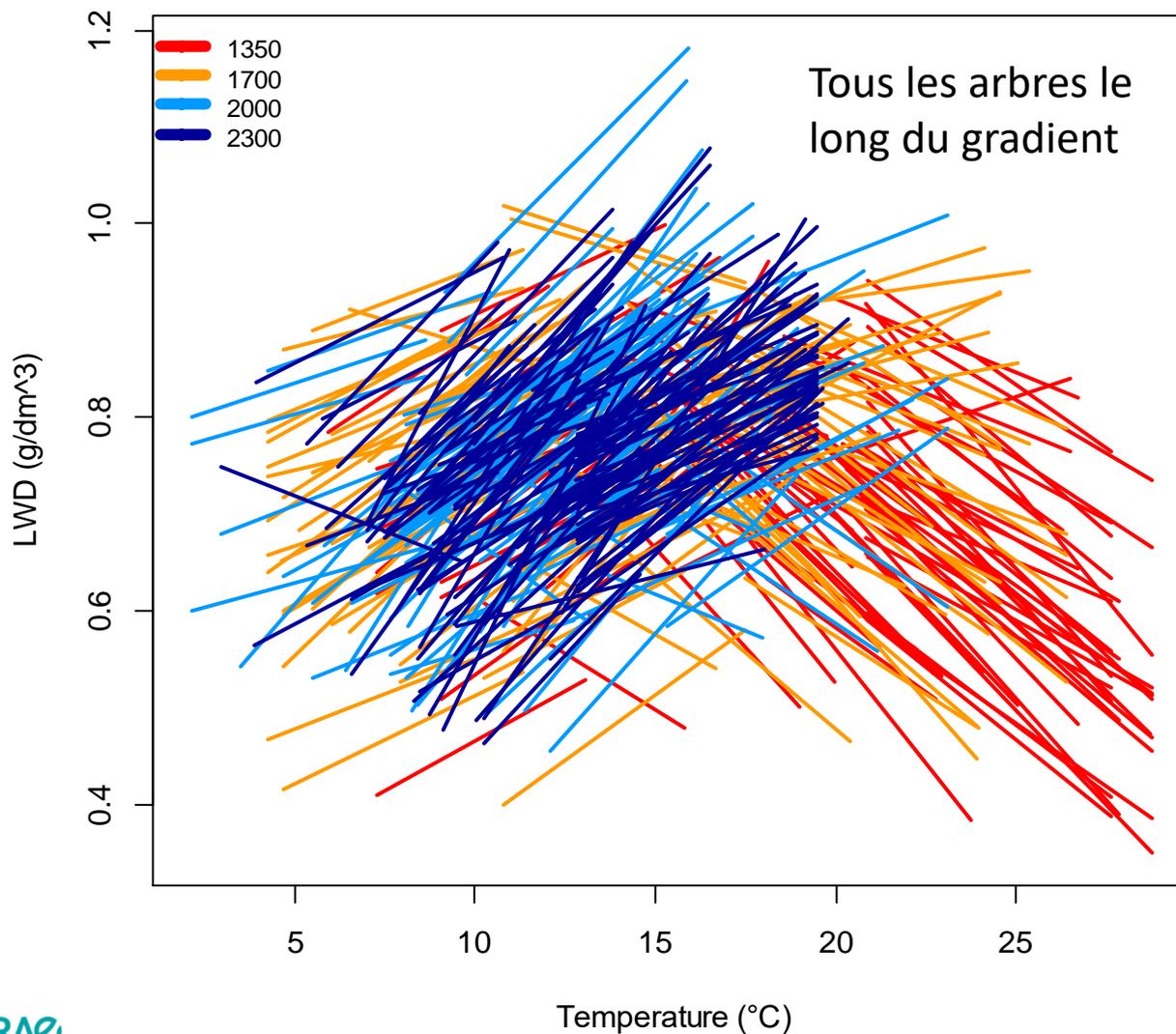


Latewood density (g/dm³)
Tree b161 $r = 0.76$ $p = 0$

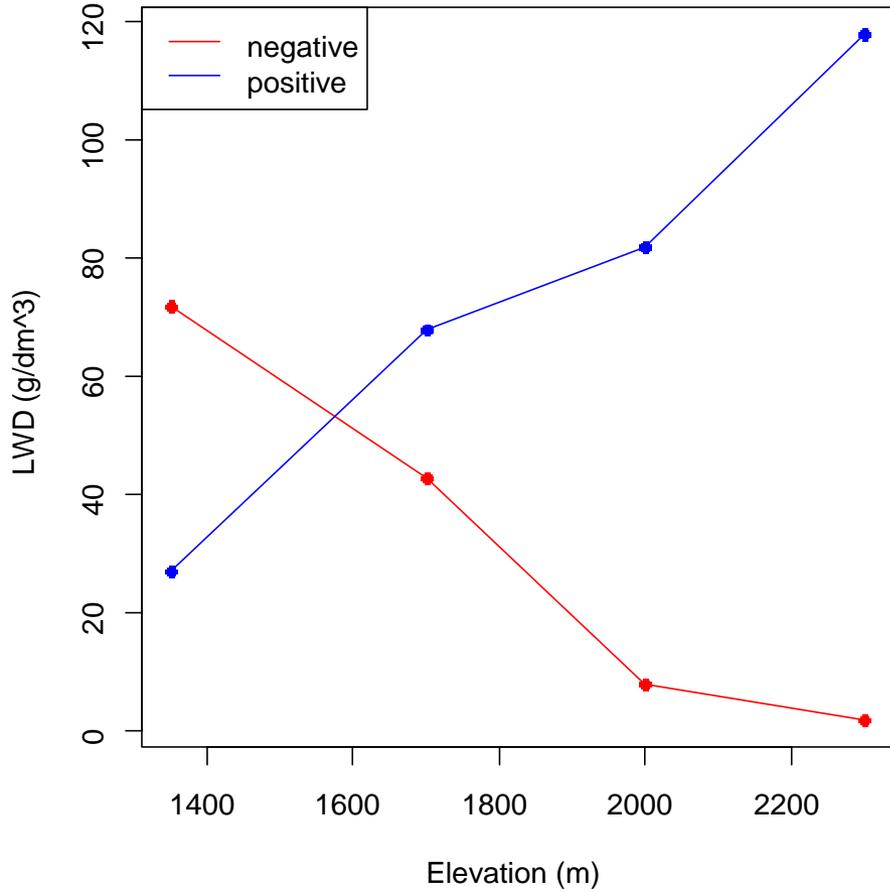


➤ Normes de réaction

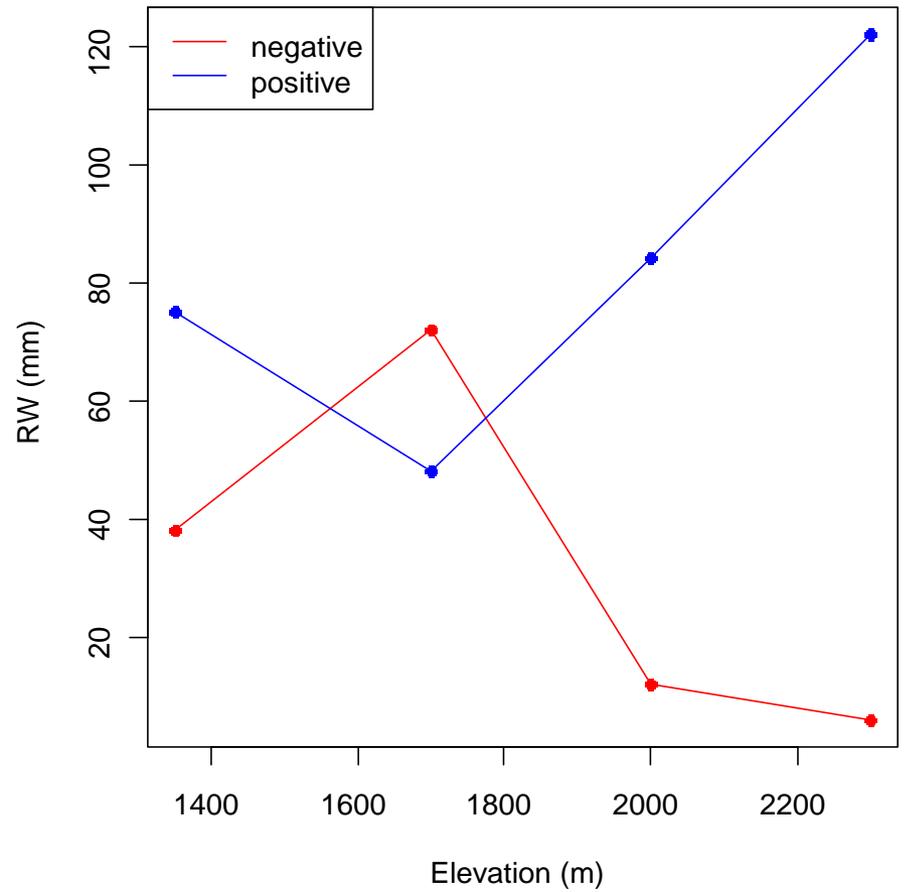
Reaction Norms LWD



LWD (g/dm³)



RW (mm)



➤ Que se passe-t-il à haute et basse altitude ?

Croissance du mélèze et changement climatique dans le Briançonnais

Température minimum

Température maximum

Précipitation

Périodes 1966-2017

Données Météo-France Briançon et Villard St Pancrace



INRAE

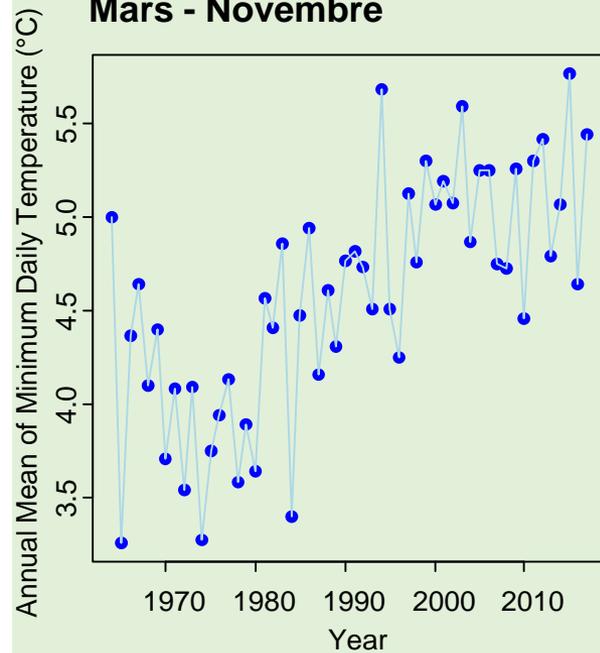
Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

➤ Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

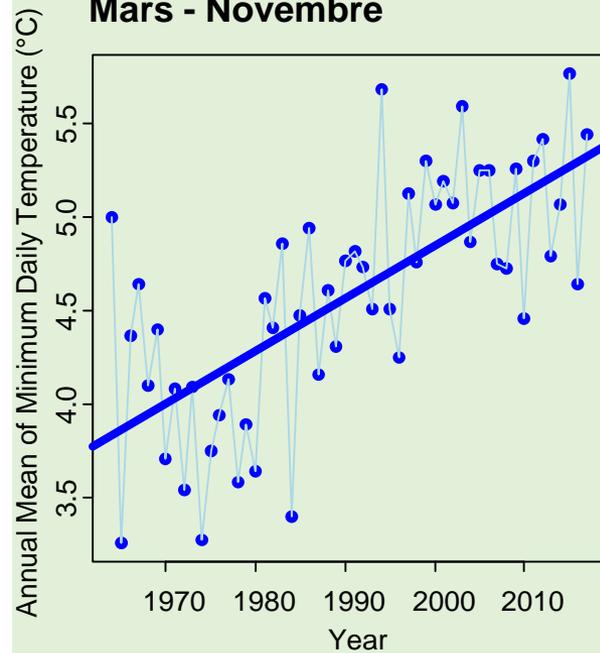
Température Minimum
Mars - Novembre



➤ Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

Température Minimum Mars - Novembre



$$Y = -51.35 + 0.0281 X$$

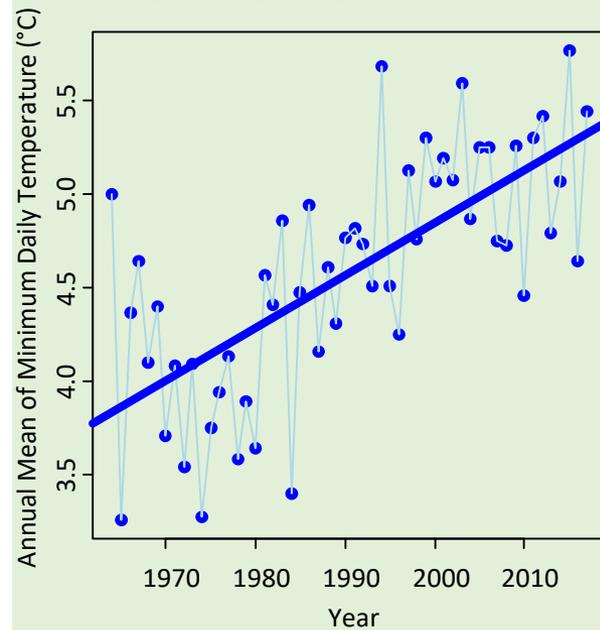
$$R^2 = 0.48$$



➤ Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

Température Minimum Mars - Novembre



$$Y = -51.35 + 0.0281 X$$

$$R^2 = 0.48$$

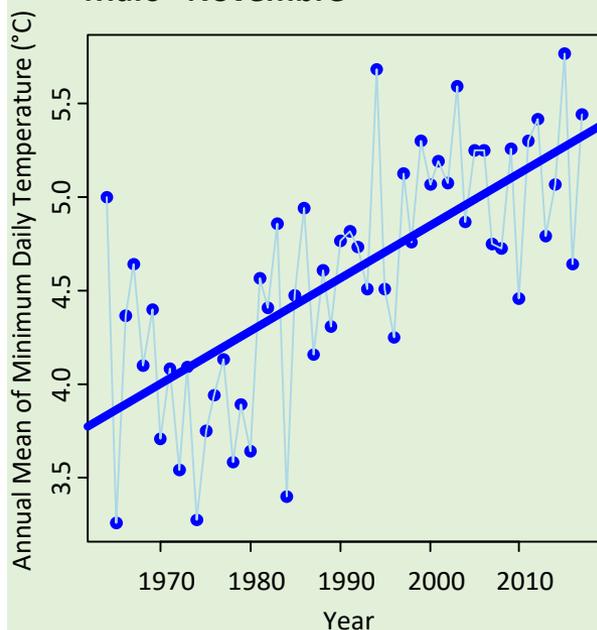
Augmentation de près de **0,03 °C** par an

$R^2 = 0,48$: près de la moitié des variations de la température minimale s'explique par cet effet « réchauffement »

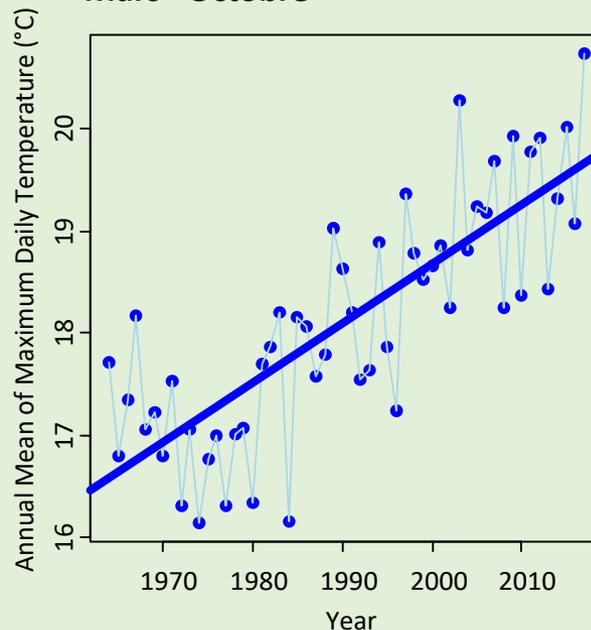
➤ Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

Température Minimum
Mars - Novembre



Température Maximum
Mars - Octobre



Augmentation de près de **0,06 °C** par an

$R^2 = 0,63$: 63% des variations de la température maximale s'expliquent par l'effet « réchauffement »

$$Y = -97.41 + 0.058 X$$

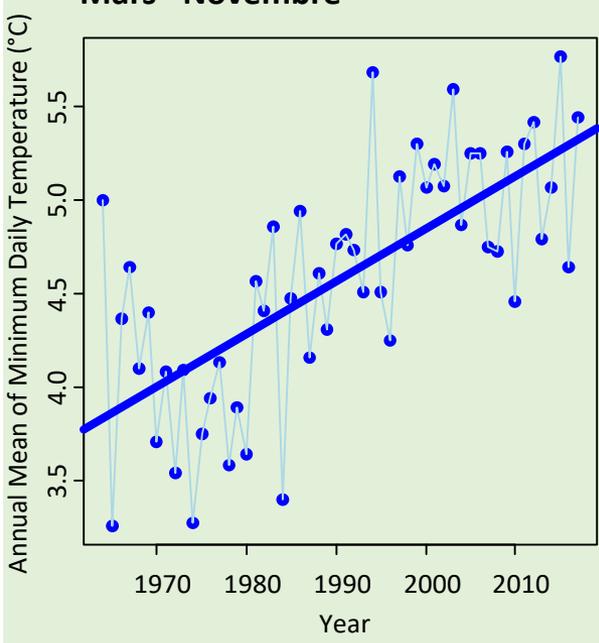
$$R^2 = 0.63$$



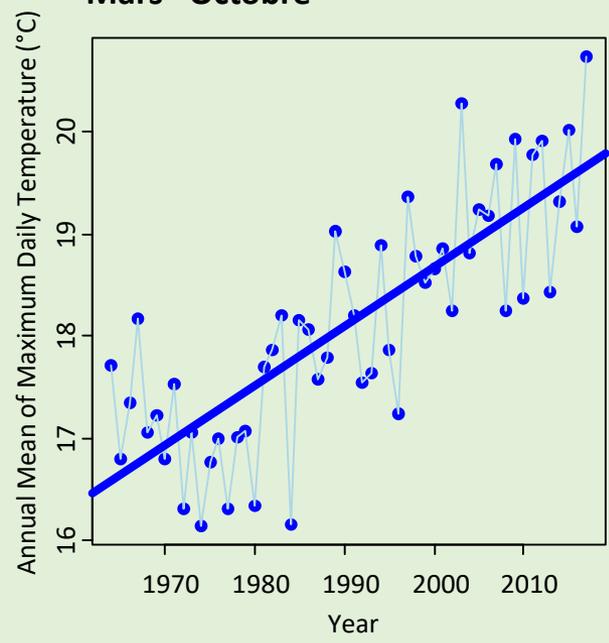
➤ Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

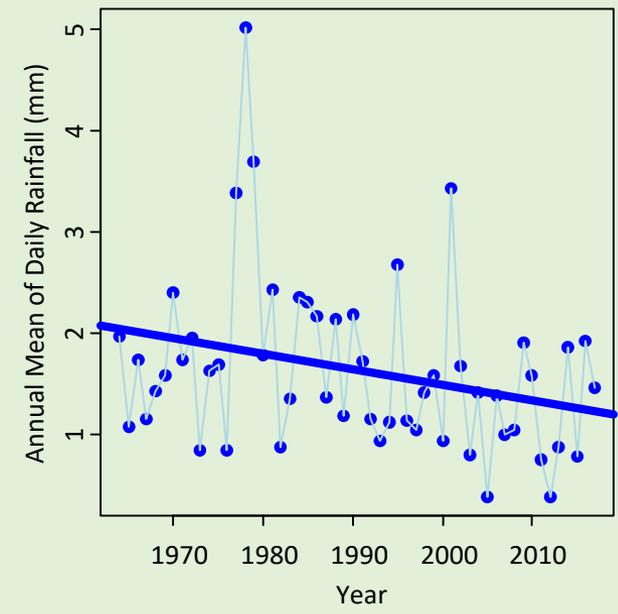
Température Minimum
Mars - Novembre



Température Maximum
Mars - Octobre



Précipitations
Période janvier-mars



$Y = 32.21 - 0.0154 X$
 $R^2 = 0.06$



➤ Changement climatique dans le Briançonnais

- Augmentation de la température minimum de la période mars-novembre (1,5 °C en 50 ans)
- Augmentation de la température maximum de la période mars-novembre (3 °C en 50 ans)
- Pas (ou très peu) de changement de précipitations



➤ Changement climatique dans le Briançonnais

- Augmentation de la température minimum de la période mars-novembre (1,5 °C en 50 ans)
- Augmentation de la température maximum de la période mars-novembre (3 °C en 50 ans)

• Pas (ou très peu) de changement de précipitations

Quel impact sur la croissance du mélèze ?



➤ Approche Analyse de cernes

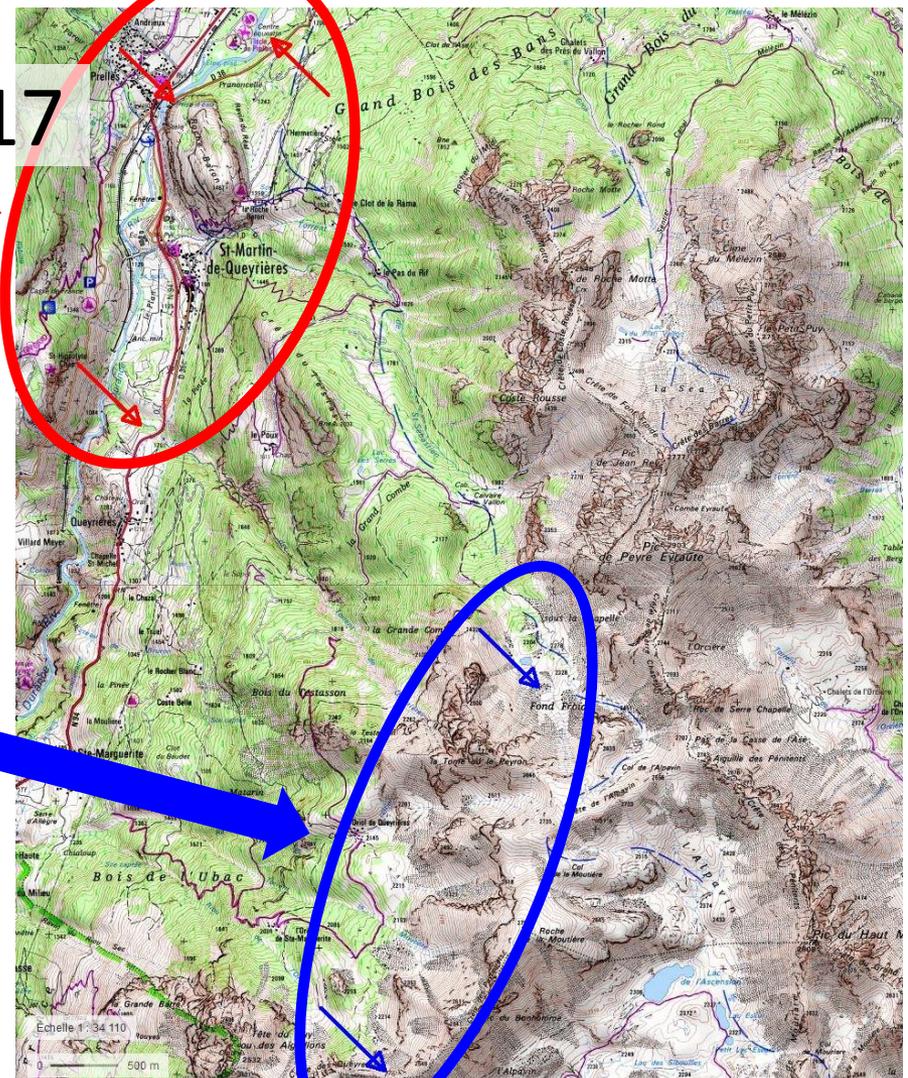


Echantillonnage 2017

- 1200 m

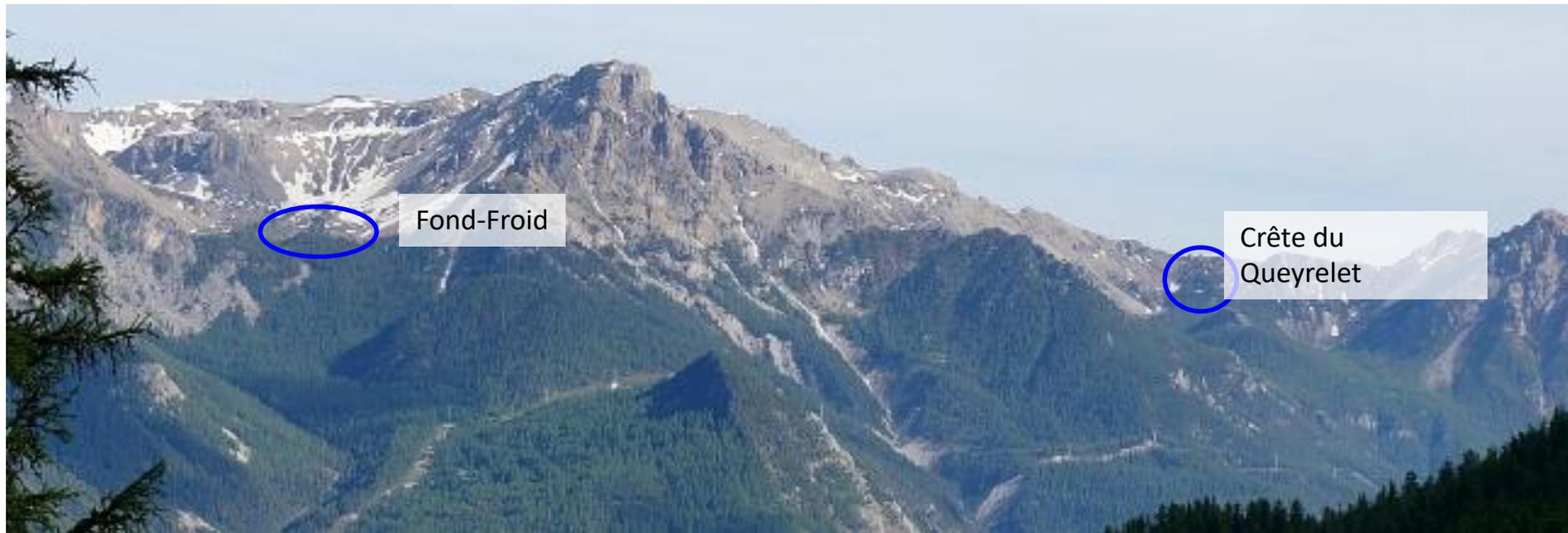


- 2300-2400 m



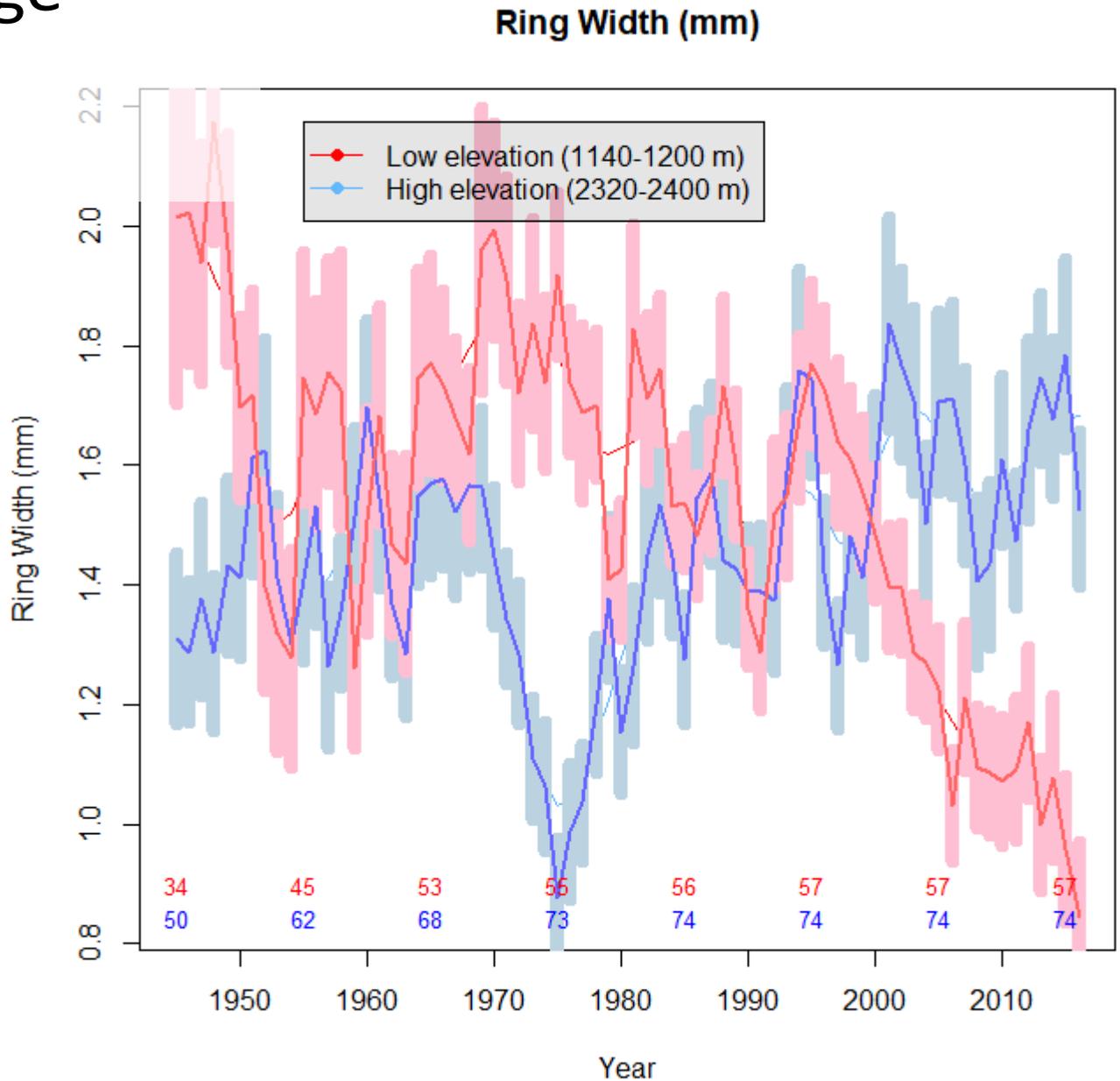
INRAE

Les deux secteurs de haute altitude



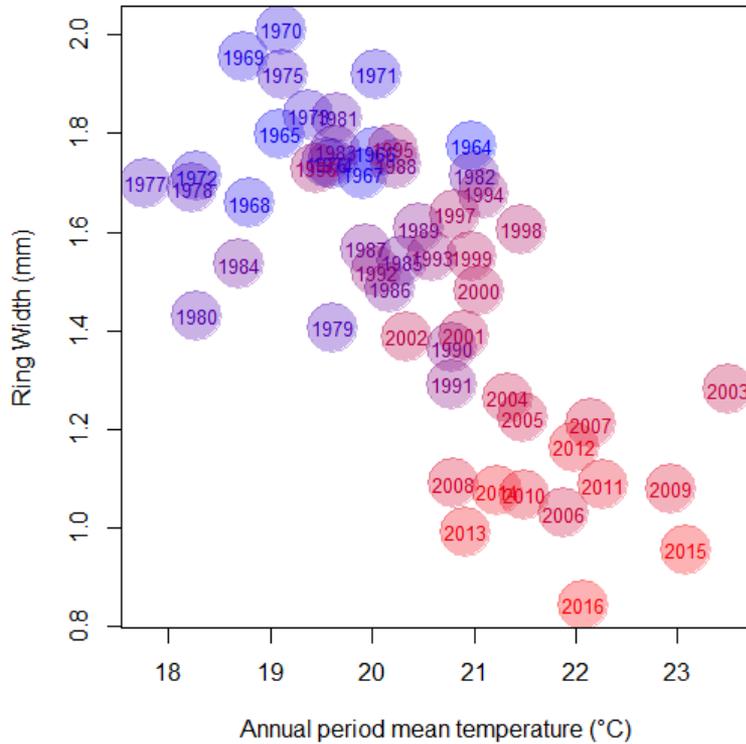
Echantillonnage 2017

— Haute altitude (2320-2400 m)
— Basse altitude (1140-1200 m)

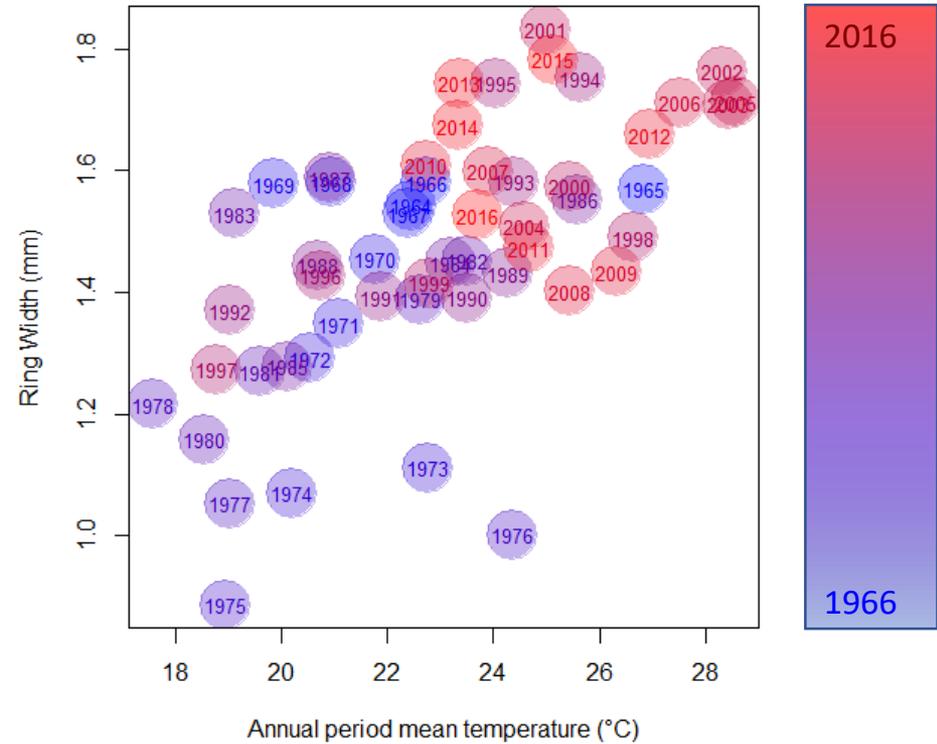


Relations avec la température

Basse altitude



Haute altitude

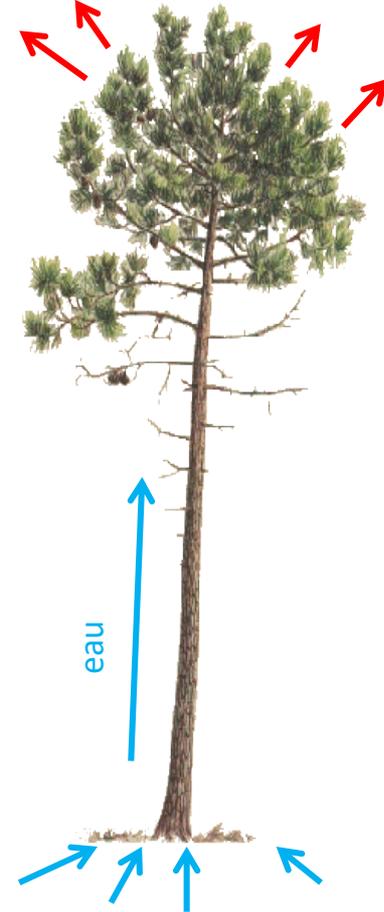


INRAE

➤ Gradient altitudinal mélèze...

- Forte diminution de croissance en grosseur à très basse altitude
 - totalement liée au **réchauffement global**
- Légère augmentation de la croissance en grosseur à très haute altitude
 - Partiellement lié au réchauffement
- Faut-il s'attendre à des dépérissements aux altitudes les plus basses ? Jusqu'à quelle altitude ? Pourquoi ?

Demande atmosphérique (température, humidité)



Disponibilité en eau (précipitations, sol)

➤ Comment utiliser ces résultats ?

- Forêts plantées : produire et planter des variétés plus résistantes à la sécheresse



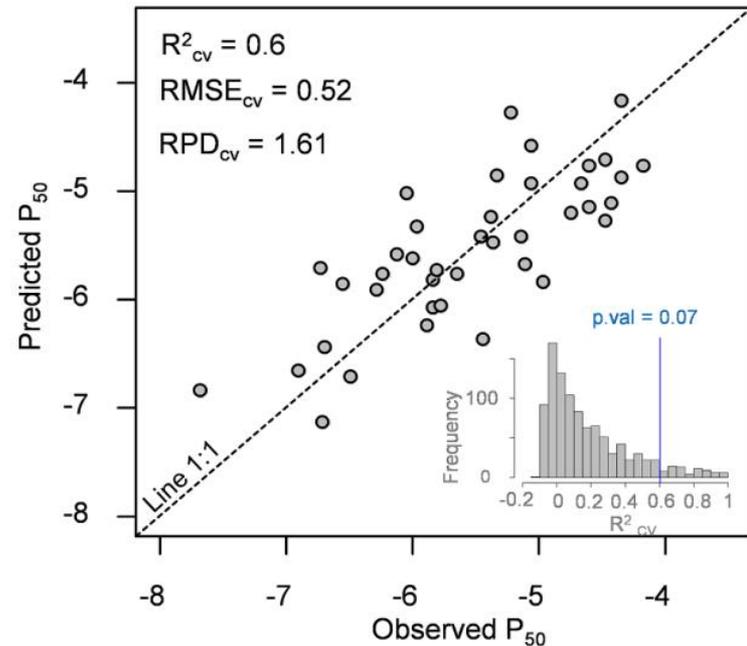
➤ Perspectives : comment utiliser ces résultats ?

- Forêts plantées : produire et planter des variétés plus résistantes à la sécheresse
- Forêts régénérées naturellement : sélectionner les géniteurs des prochaines régénérations naturelles



➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes



Sergent, A.S., Segura, V., Charpentier, J.P., Dalla-Salda, G., Fernández, M.E., Rozenberg, P., and Martinez-Meier, A. (2020). Assessment of resistance to xylem cavitation in cordilleran cypress using near-infrared spectroscopy. *Forest Ecology and Management* 462, 117943.

➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes



➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes



➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes



➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractère bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes



➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes

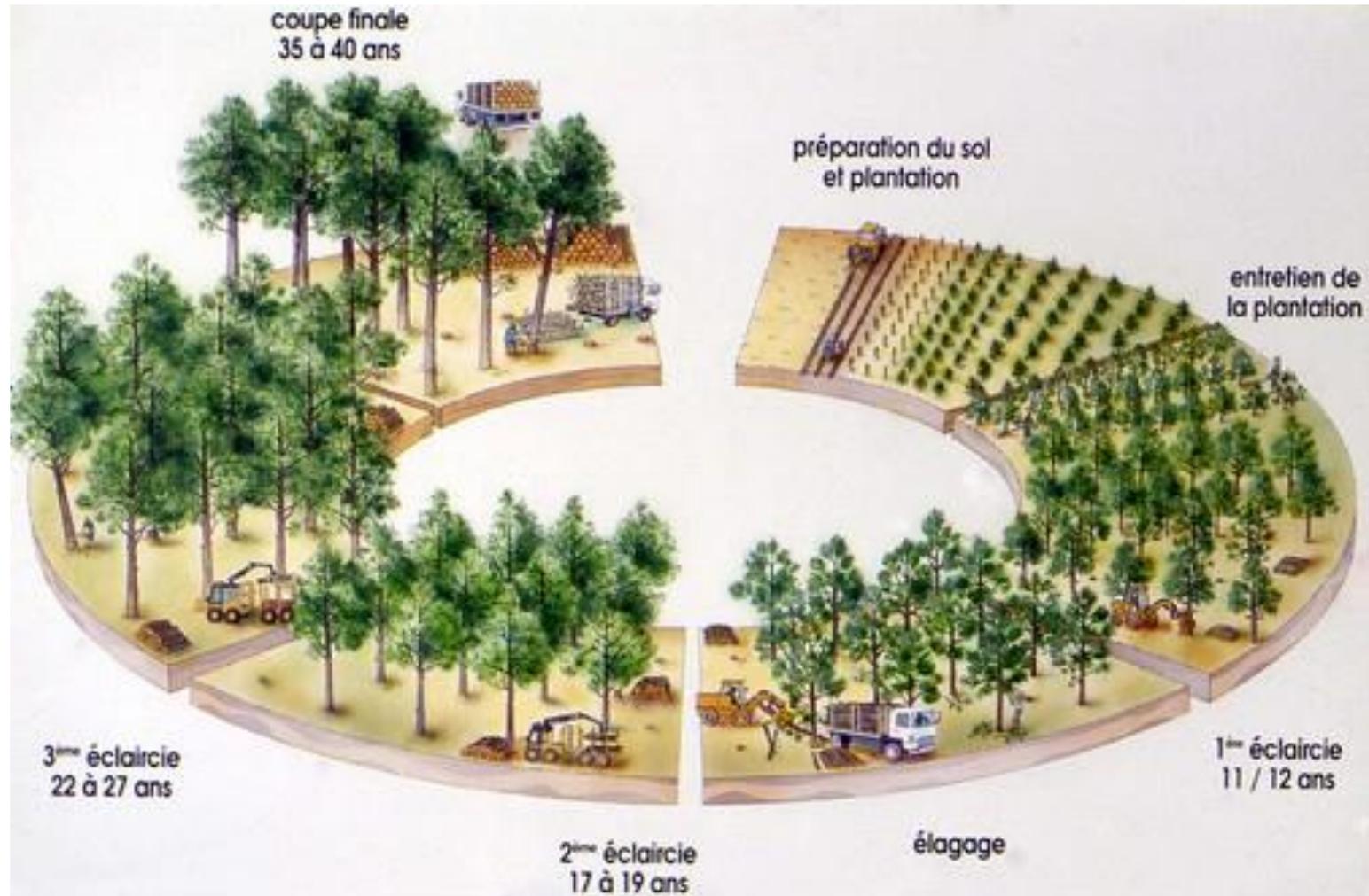


➤ Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants
 - Installation de vergers à graines
 - Production de graines
 - Production et plantation de variétés résistantes



➤ Sylviculture

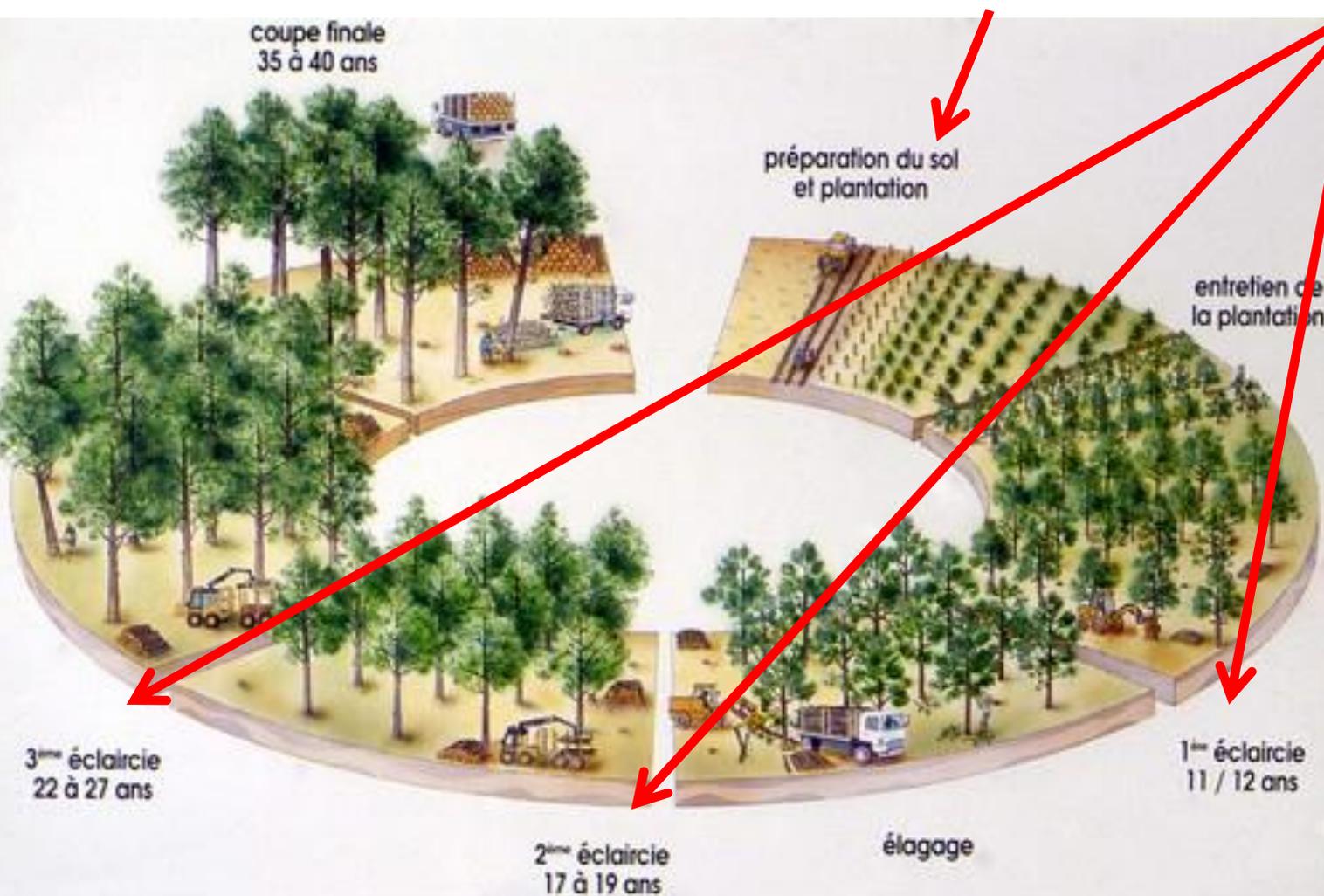


INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique
27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

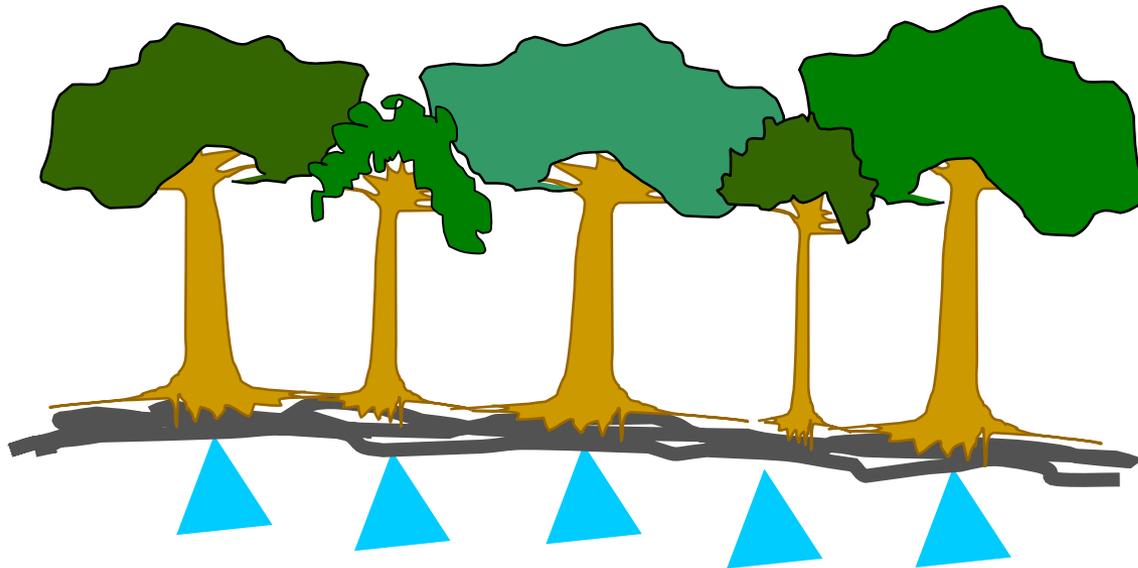
➤ Sylviculture

- Choisir espèces ([Migration assistée](#)) et variétés résistantes ([Amélioration](#))
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies



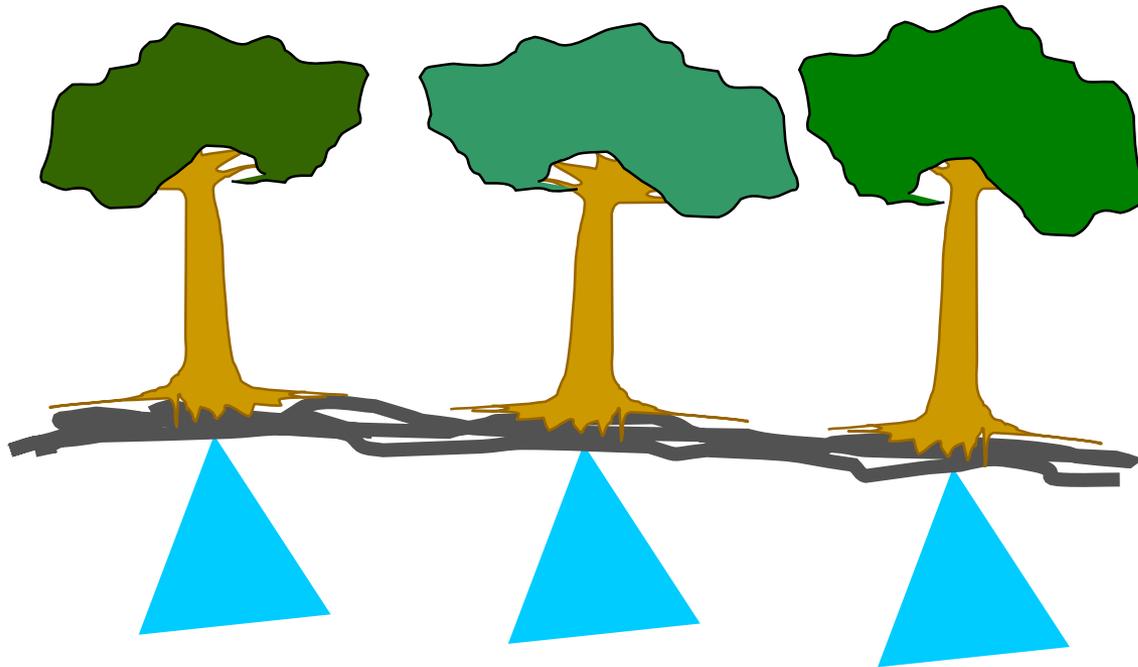
➤ Sylviculture

- Choisir espèces et variétés résistantes
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies



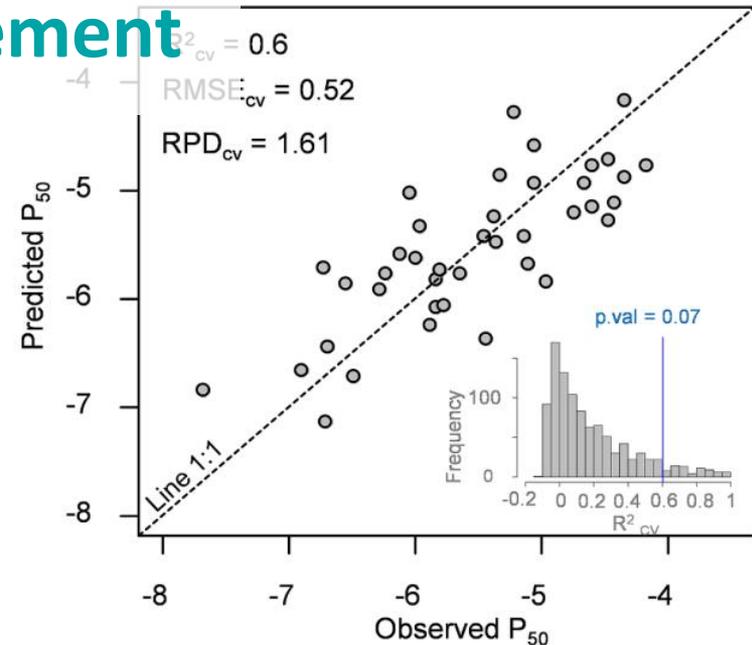
➤ Sylviculture

- Choisir espèces et variétés résistantes
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies



➤ Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
- Repérage des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et de semis
- Nouvelle génération plus résistante



INRAE

Adaptation des arbres forestiers au changement climatique

27/11/2020 / Université de Tours / Philippe Rozenberg

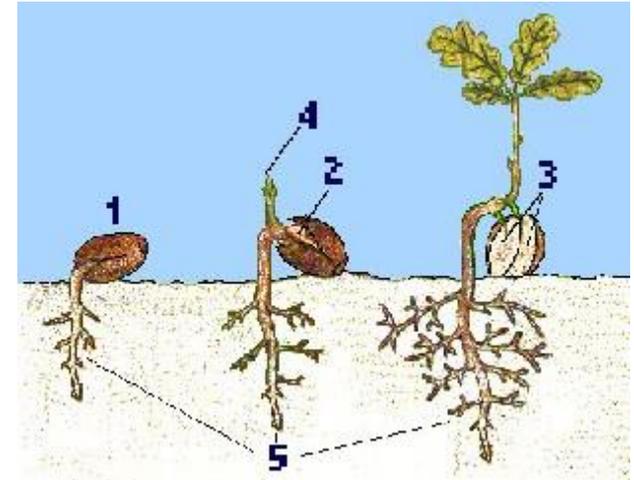
➤ Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
- Repérage des arbres résistants
- **Élimination des autres arbres**
- Croisements naturels
- Production de graines et de semis
- Nouvelle génération plus résistante



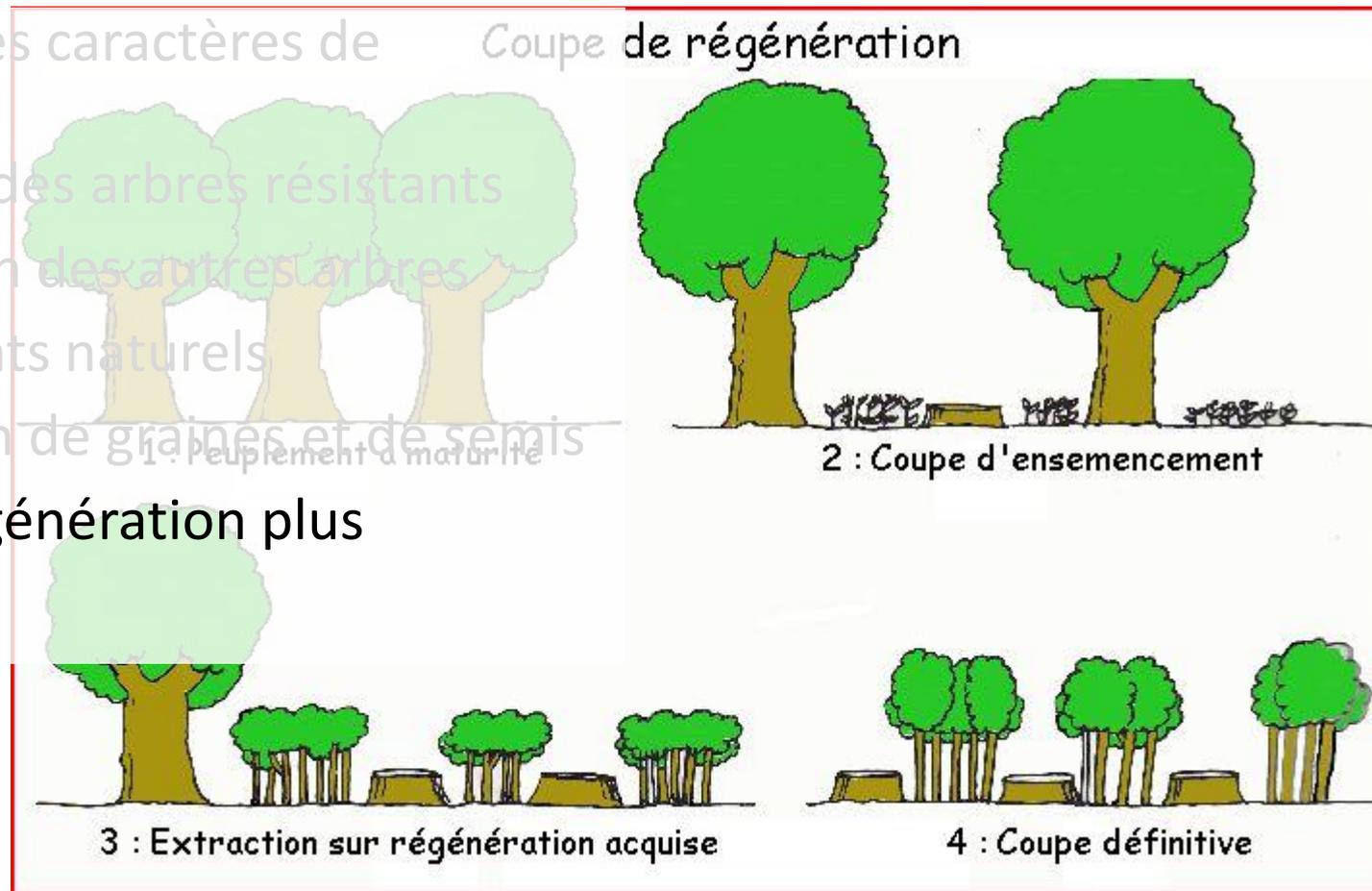
➤ Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
- Repérage des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et de semis
- Nouvelle génération plus résistante



➤ Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
- Repérage des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et de semis
- Nouvelle génération plus résistante



➤ Conclusions (....)

- Climat : changement **rapide**
- Trop rapide ou trop marqué pour l'adaptation naturelle des forêts ?
- Adaptation assistée par l'homme
 - Suffisamment rapide?
 - Pour quelles **conditions futures ? Incertitudes majeures...**
- Le plus efficace, le plus sûr et le moins couteux...
- **...limiter l'intensité du changement climatique**



A close-up photograph of pine needles, showing their characteristic three-needle clusters. The needles are a vibrant yellow-green color, suggesting they might be young or have been treated with a specific product. The background is dark and out of focus, making the needles stand out prominently. A semi-transparent white banner is overlaid across the middle of the image, containing the text.

➤ **Merci pour votre attention**