

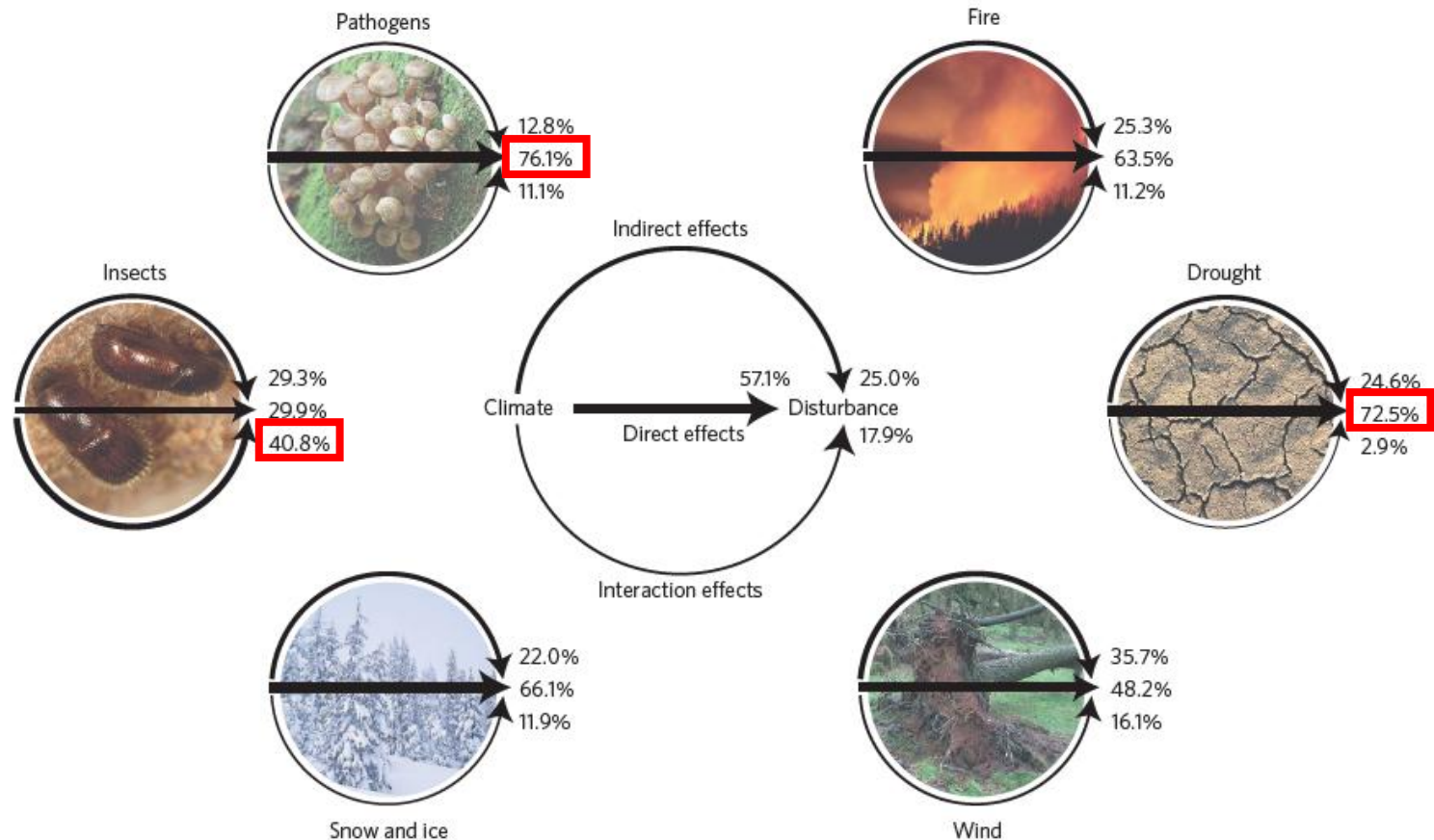
Le rôle de la sécheresse dans le développement des maladies forestières

Mireia Gomez-Gallego

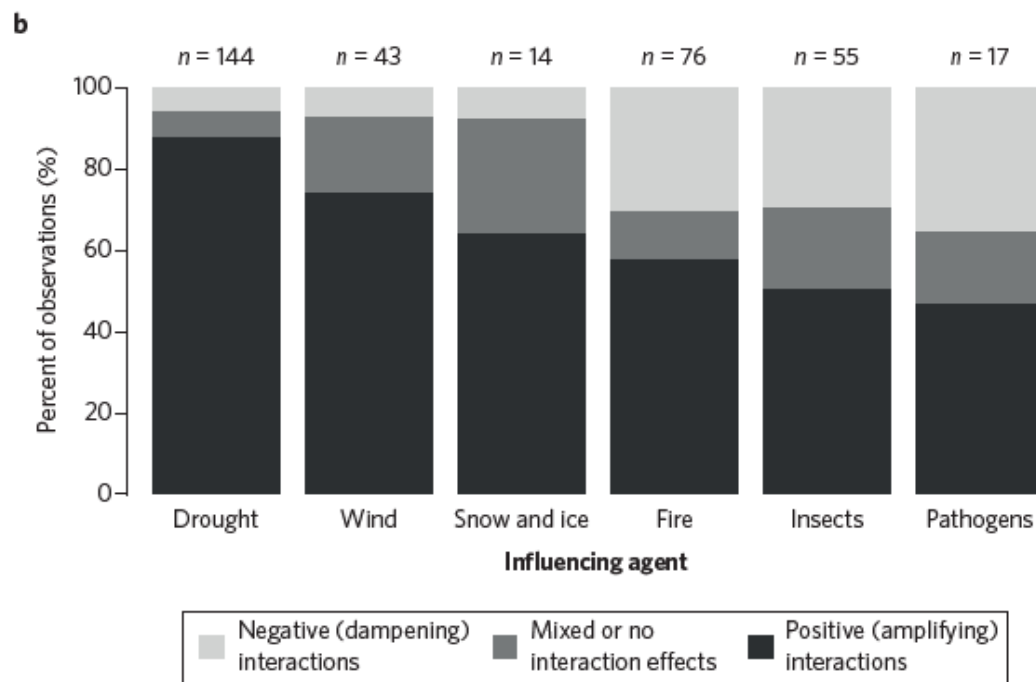
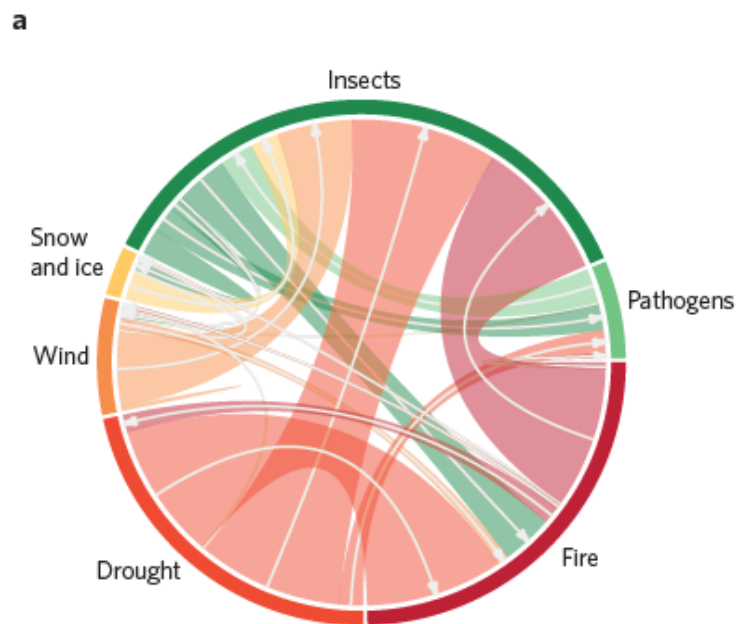
UMR Interactions Arbre-Microorganismes, INRAE Nancy

Changement climatique

Quel est le **risque réel** d'une **augmentation des perturbations** en forêt à cause du **changement climatique** ?



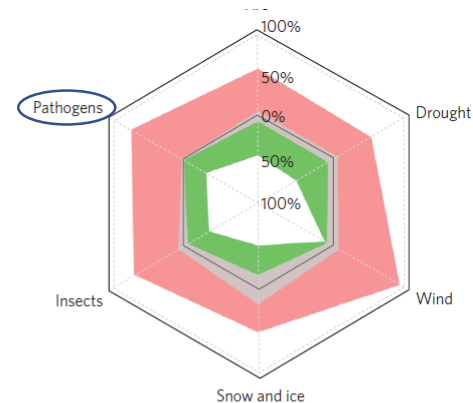
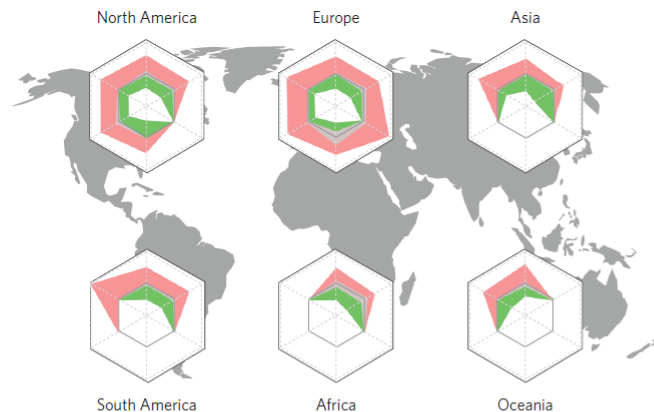
Quel est le **risque réel** d'une **augmentation des perturbations** en forêt à cause du **changement climatique** ?



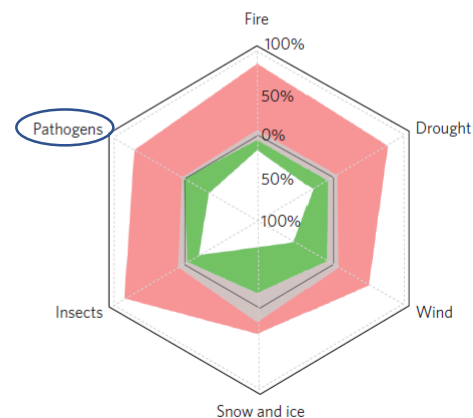
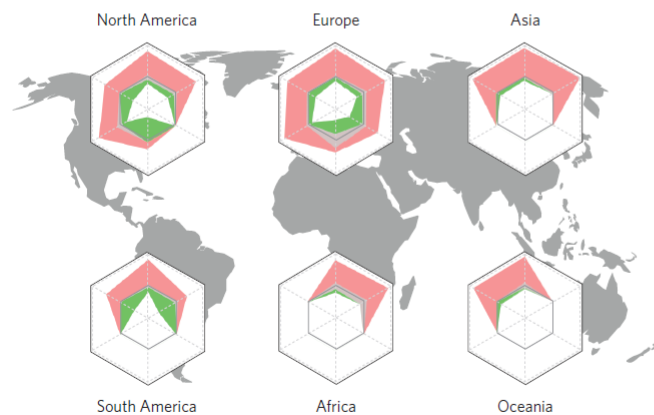
Changement climatique

Quel est le **risque réel** d'une **augmentation des perturbations** en forêt à cause du **changement climatique** ?

Conditions climatiques **plus chaudes et humides**



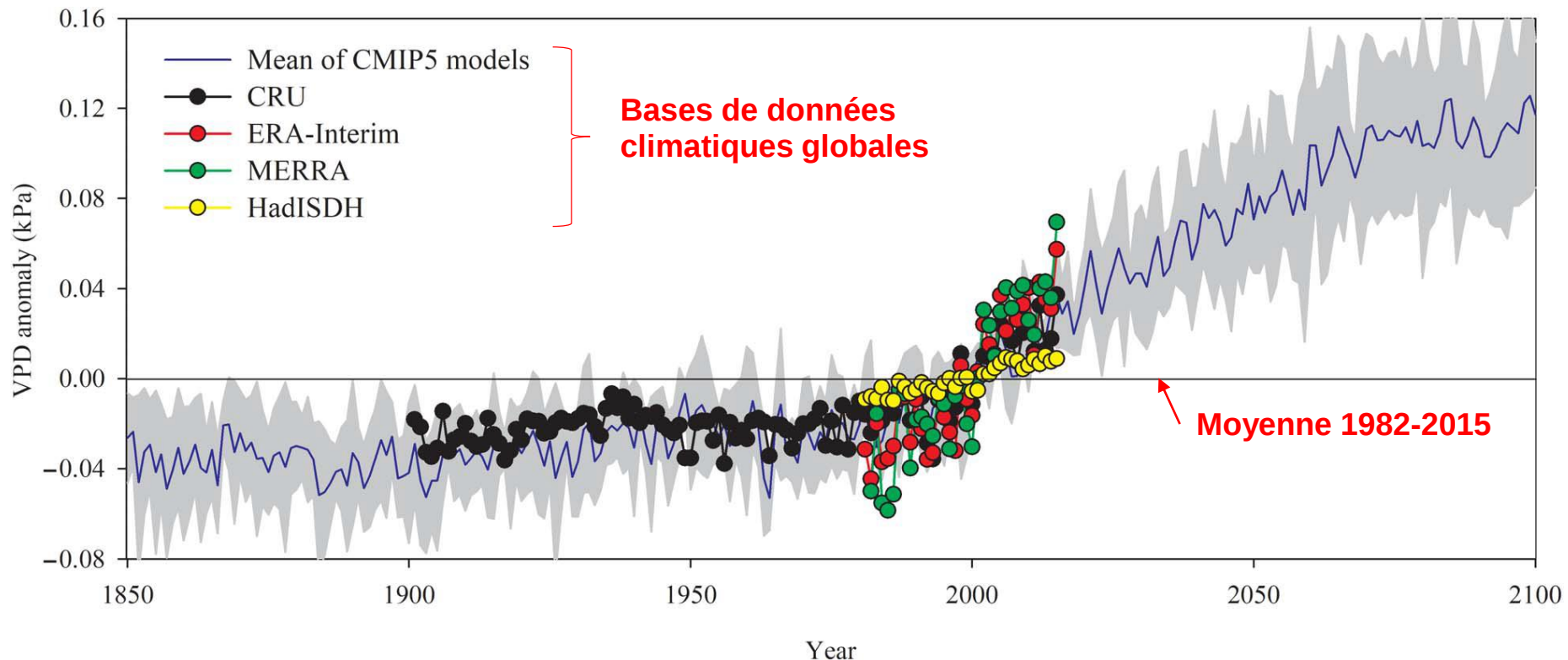
Plus chaudes et sèches



Changement climatique

Quel est le **risque réel** d'une **augmentation des perturbations** en forêt à cause du **changement climatique** ?

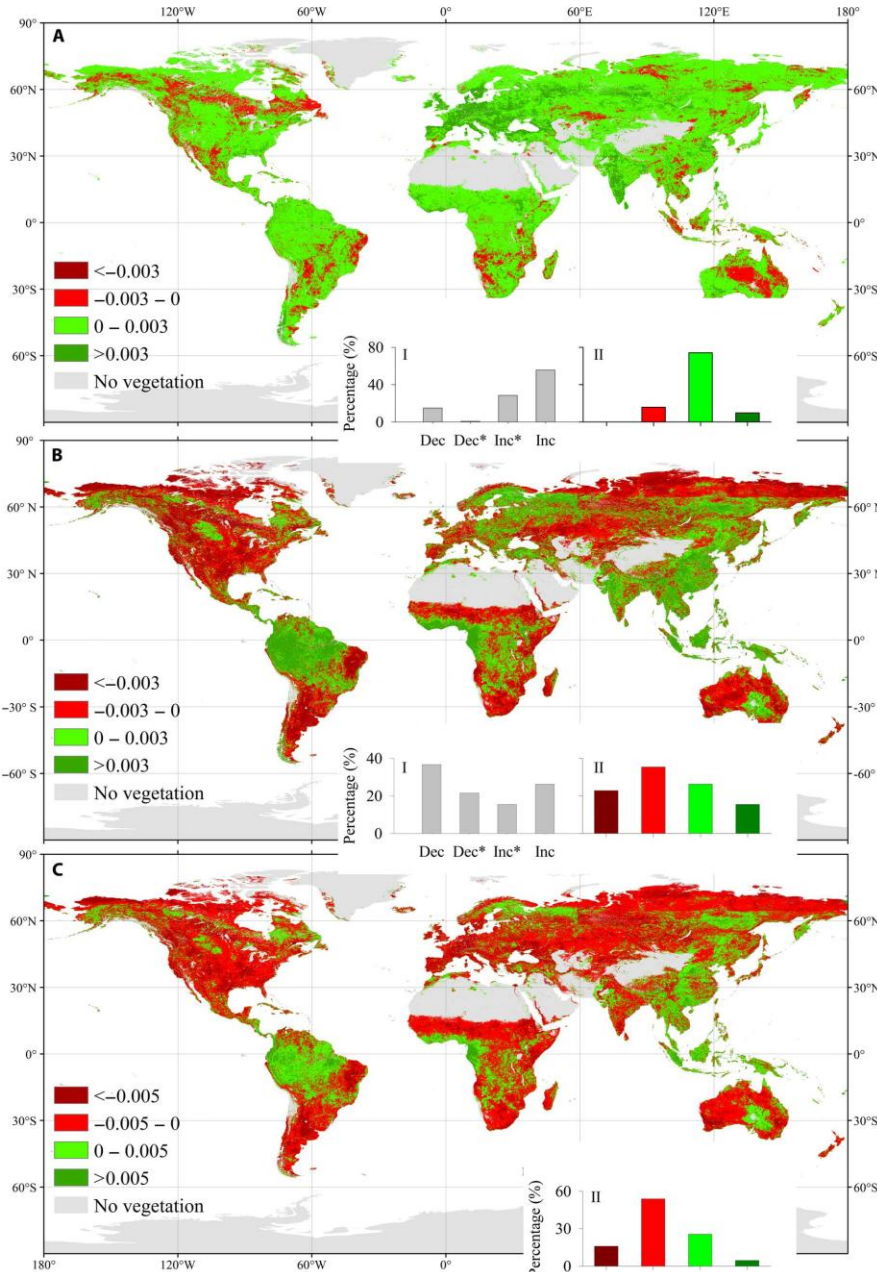
- Augmentation chronique de la **température globale**
- Augmentation du **Déficit de Pression de Vapeur (VPD)**



Valeurs sur aires avec végétation

Changement climatique

NVDI (Normalized Difference Vegetation Index
= Indice de végétation par différences normalisée)



Tendance 1982-1998

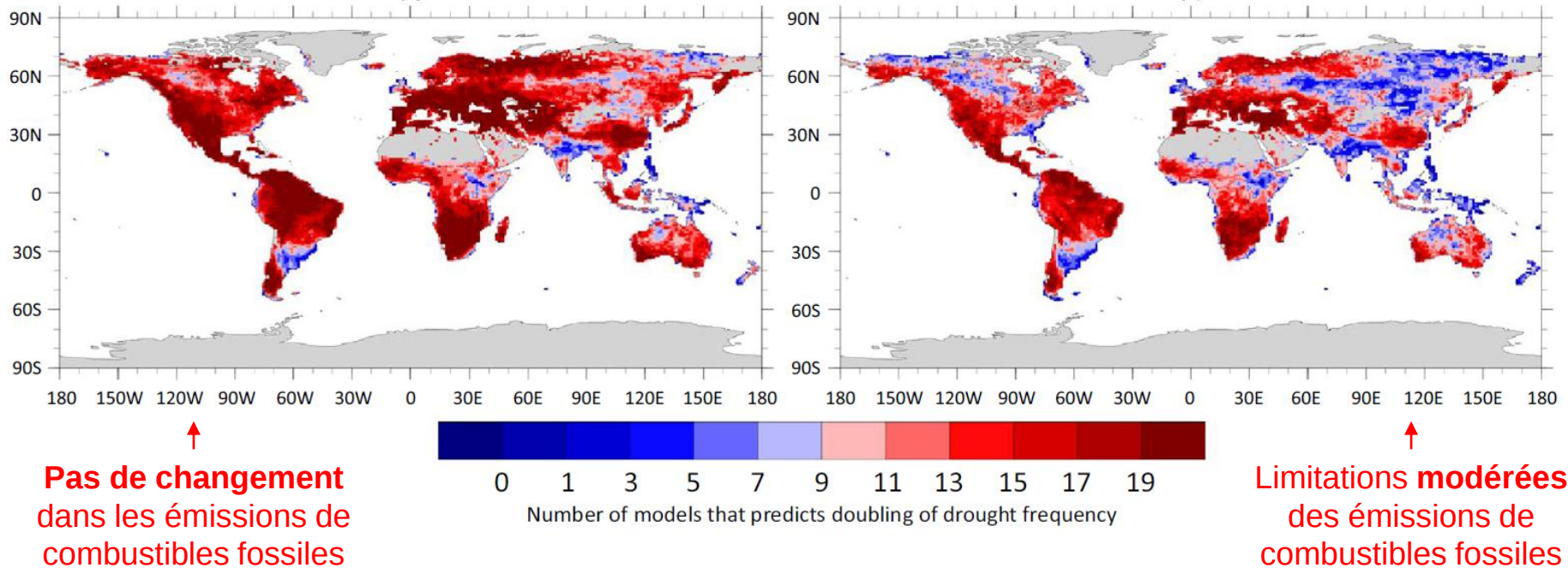
Tendance 1999-2015

Tendance à la perte de végétation
pendant les dernières décennies

Différence entre 1982-1998 et 1999-2015

Changement climatique

Quel est le **risque réel** d'une **augmentation des perturbations** en forêt à cause du **changement climatique** ?



Nombre de modèles qui prédisent que **la probabilité de sécheresse sévère** va être **doublée**

'Soil drought' (diminution de l'humidité du sol) est probable

Quel est le **risque réel** d'une **augmentation des perturbations** en forêt à cause du **changement climatique** ?

Augmentation de **CO₂**



Augmentation chronique de la **température globale**



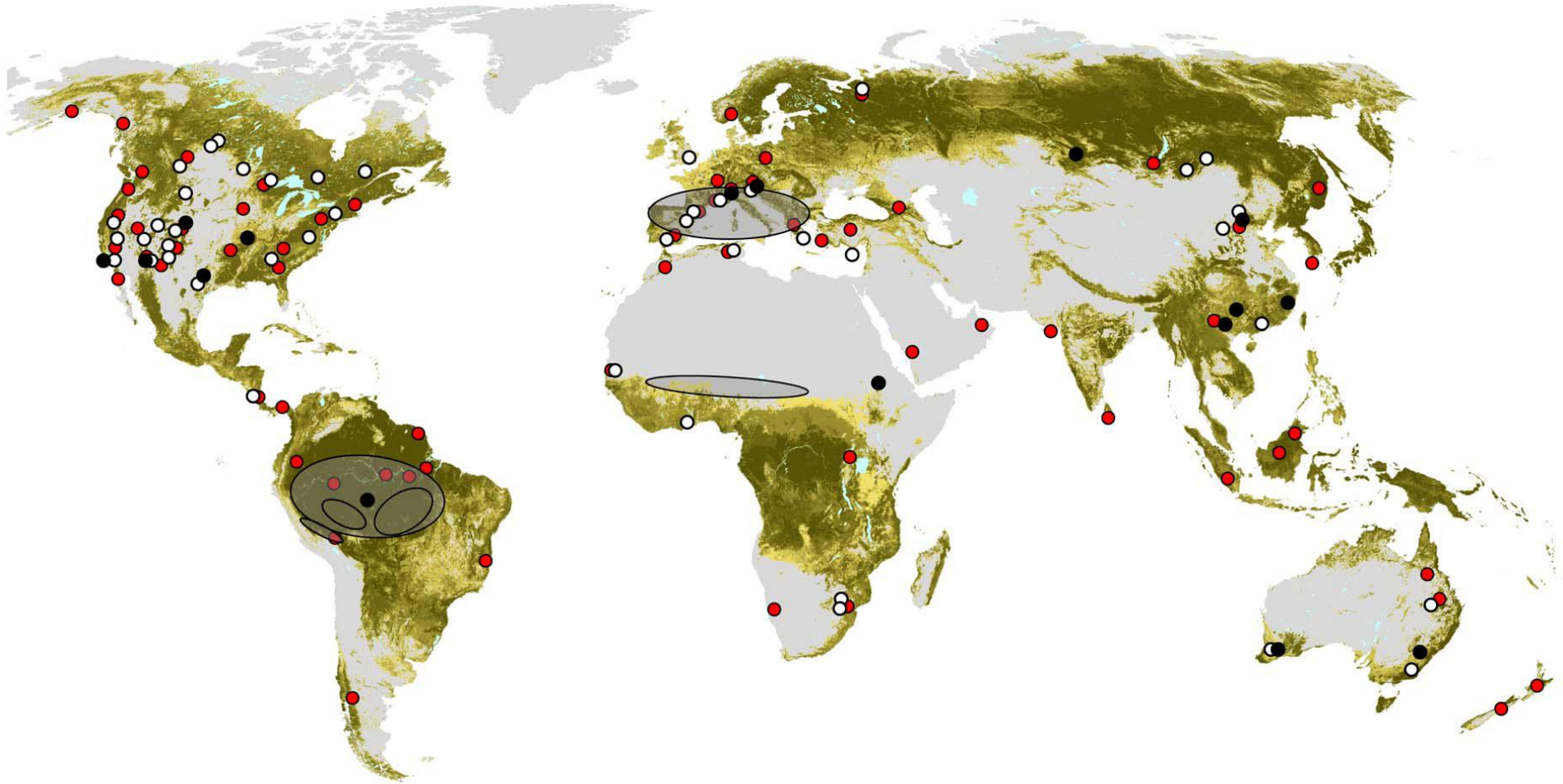
Augmentation chronique du **VPD**



Augmentation de la **fréquence et l'intensité** des épisodes de **sécheresse**

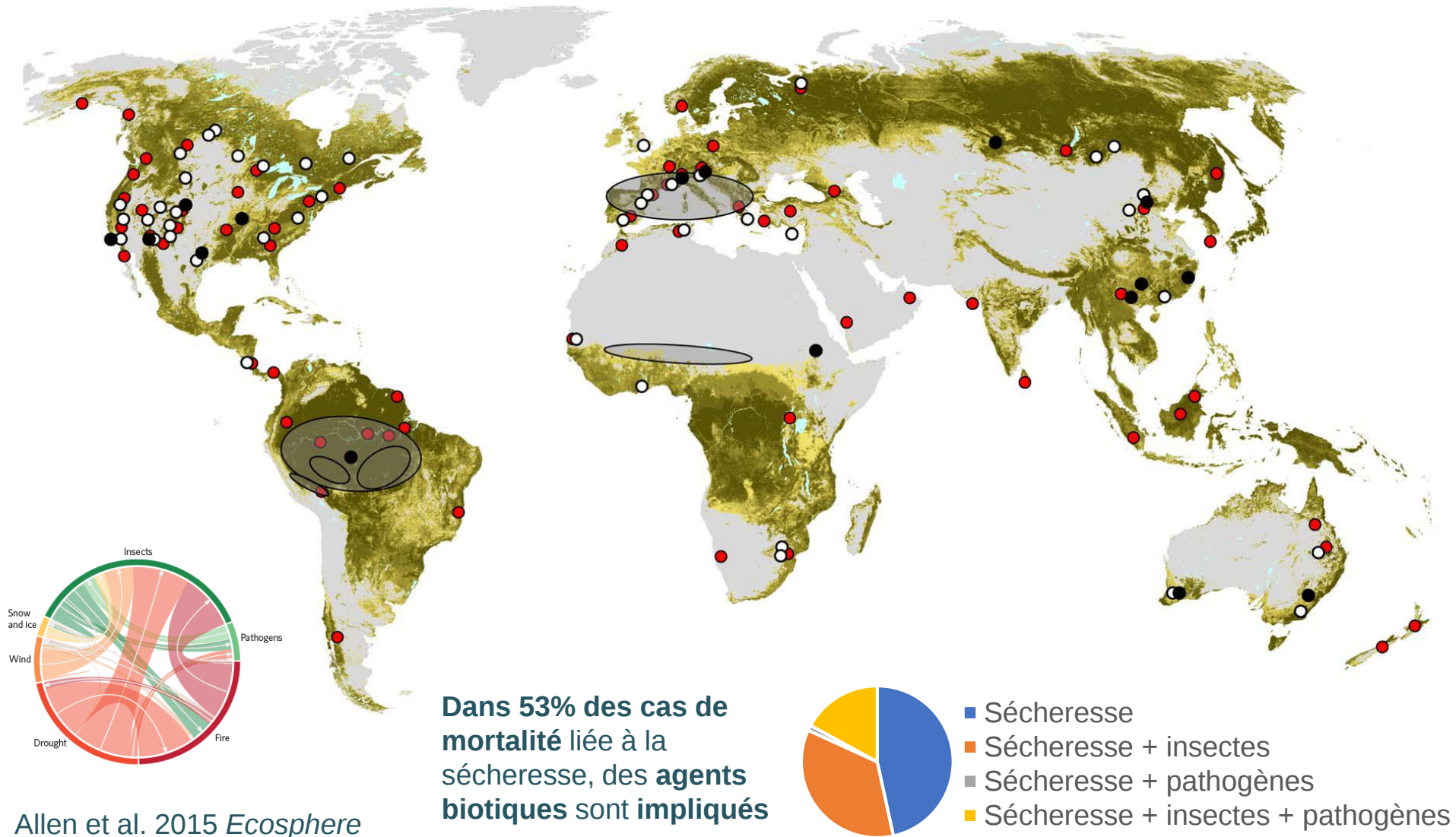
Mortalité des arbres

Mortalité globale des arbres causée par sécheresse ou canicule
du 1970 au 2015



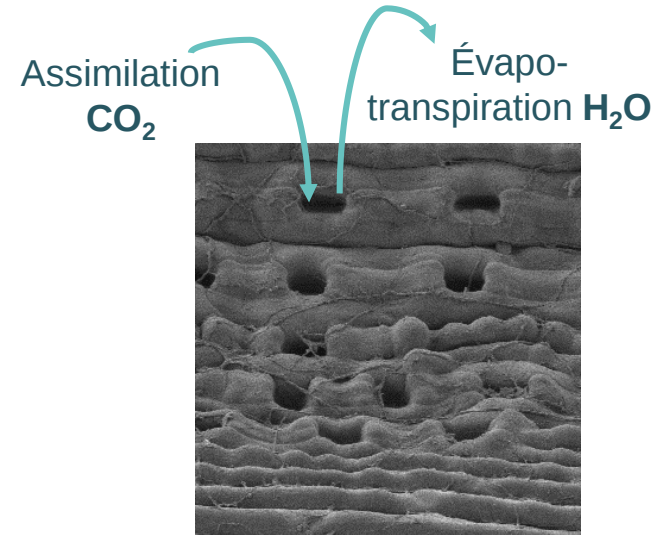
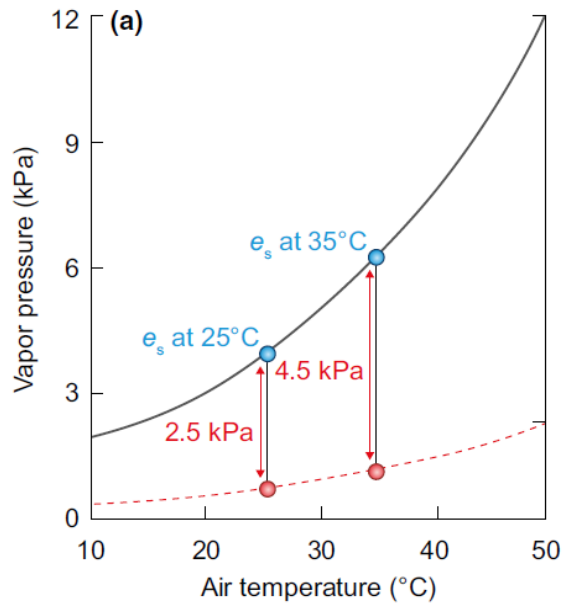
Mortalité des arbres

Mortalité globale des arbres causée par sécheresse ou canicule
du 1970 au 2015



Impact de la sécheresse sur les arbres

VPD ↑ Force évaporatoire de l'atmosphère

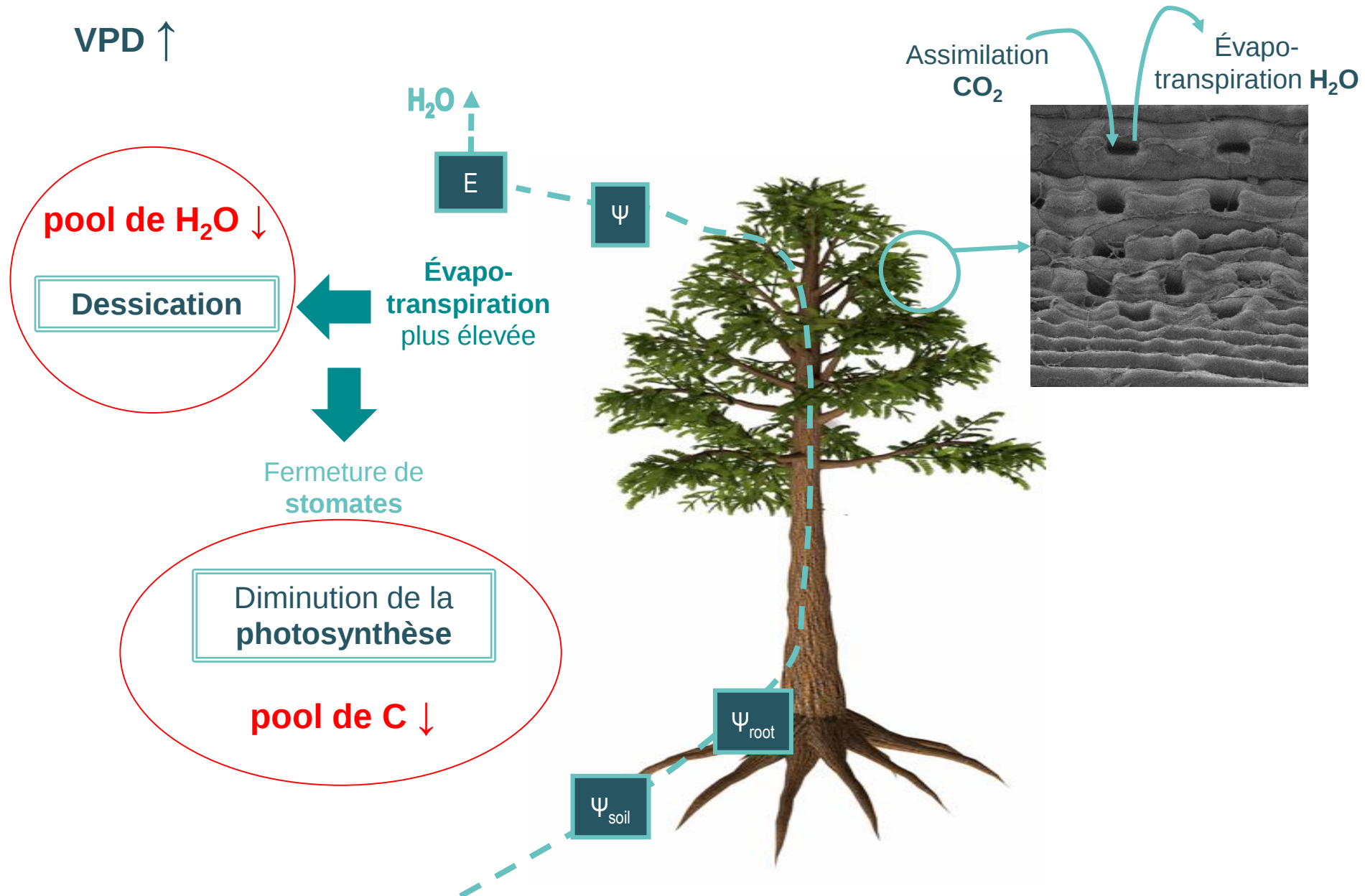


Les stomates sur le dessous d'une aiguille de Douglas

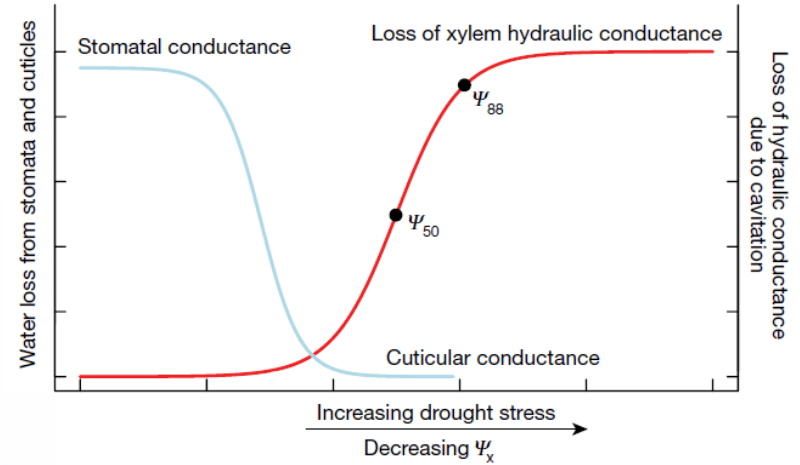
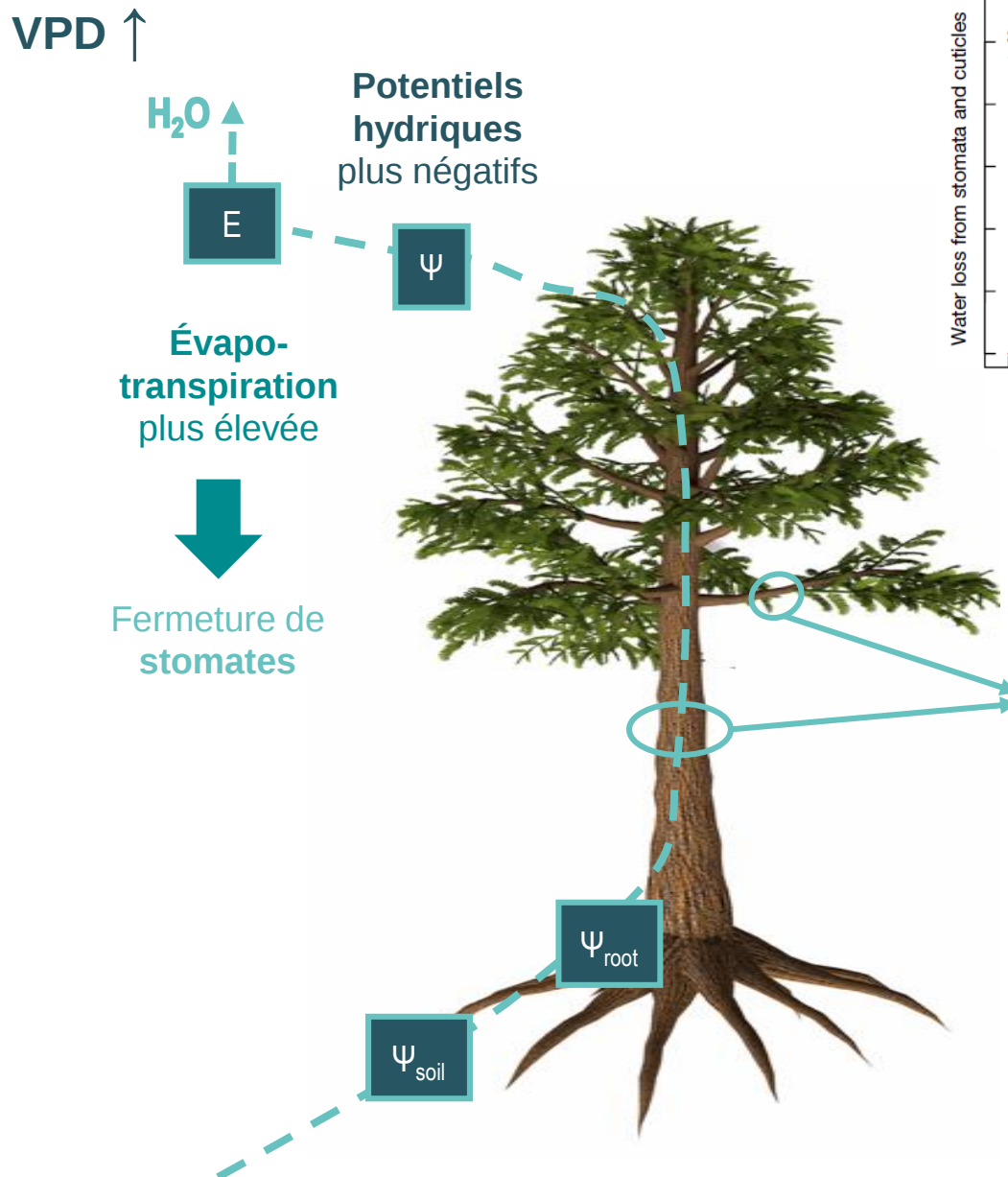


Grossiord et al. 2020 *New Phytologist*

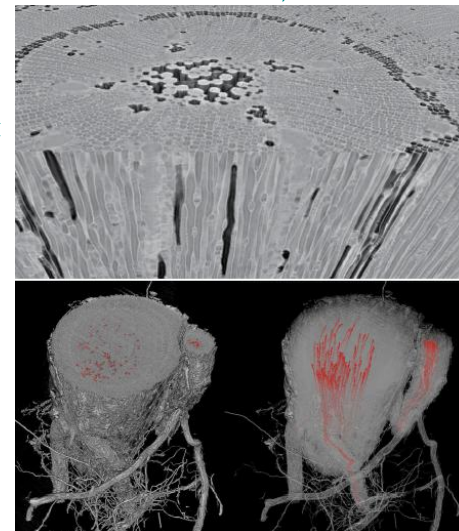
Impact de la sécheresse sur les arbres



Impact de la sécheresse sur les arbres

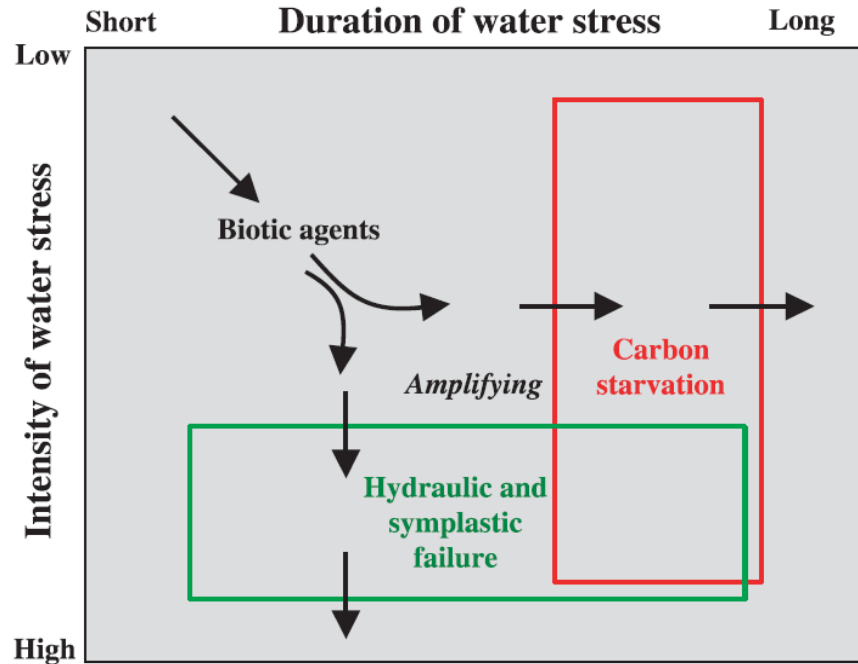


Embolies $\rightarrow$ Dysfonctionnement hydraulique



Choat et al. 2008 *Nature*

Mécanismes de mortalité



Sécheresse longue



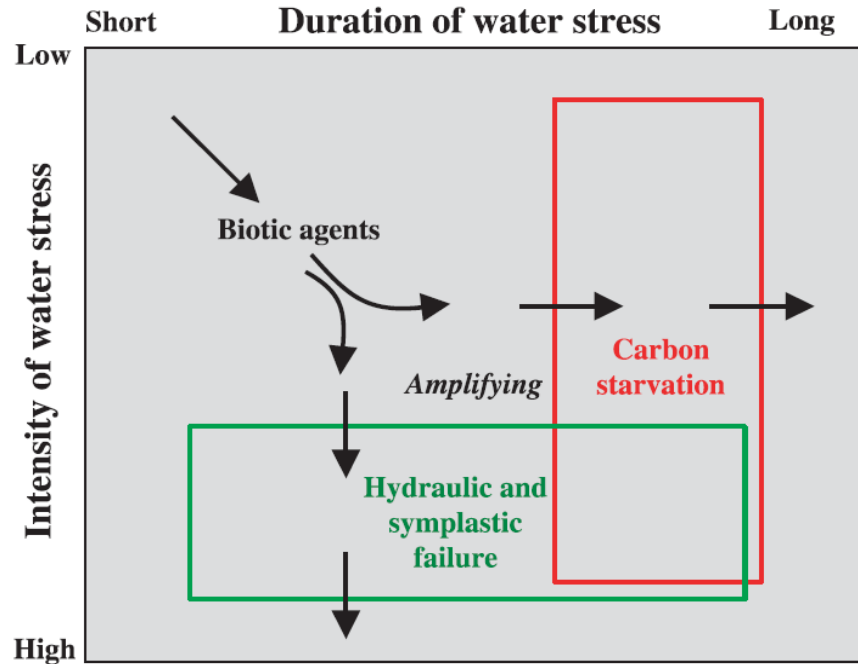
Appauvrissement en **carbone**

Sécheresse sévère



Dysfonctionnement **hydraulique**

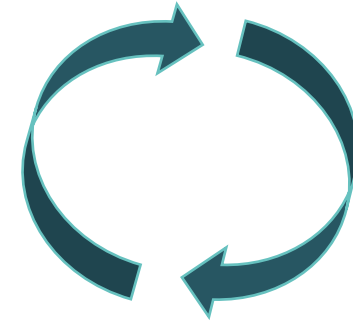
Mécanismes de mortalité



Sécheresse longue



Appauvrissement en **carbone**



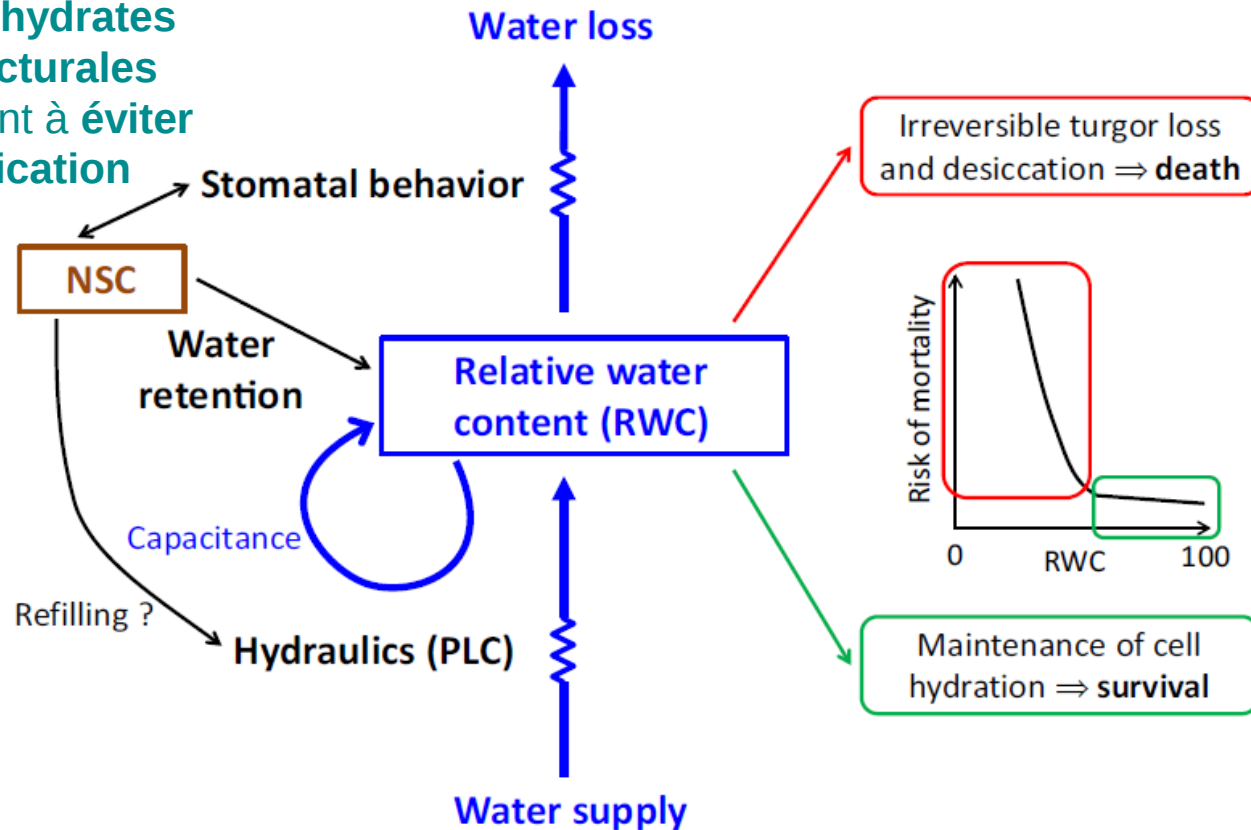
Sécheresse sévère



Dysfonctionnement **hydraulique**

Mécanismes de mortalité

Les **carbohydrates non-structuraux (NSC)** aident à **éviter la dessiccation**

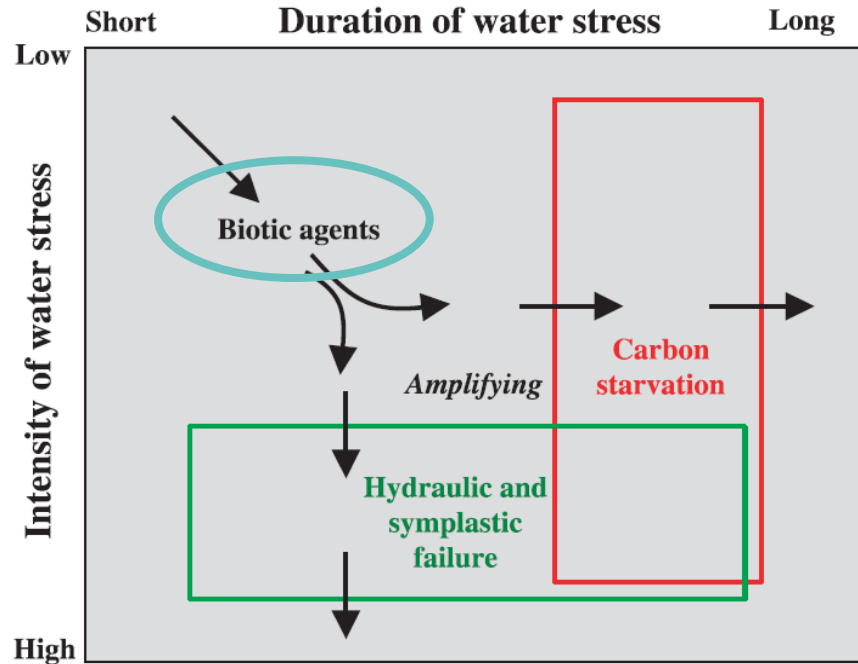


L'arbre va **éviter la dessiccation**



Les **pools d'eau** et de **carbone** sont **interdépendants**

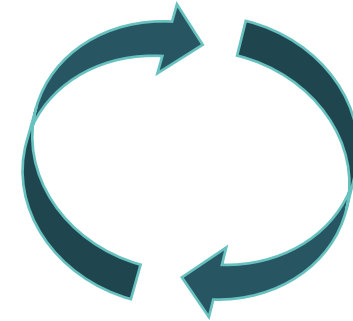
Mécanismes de mortalité



Sécheresse longue



Appauvrissement en **carbone**



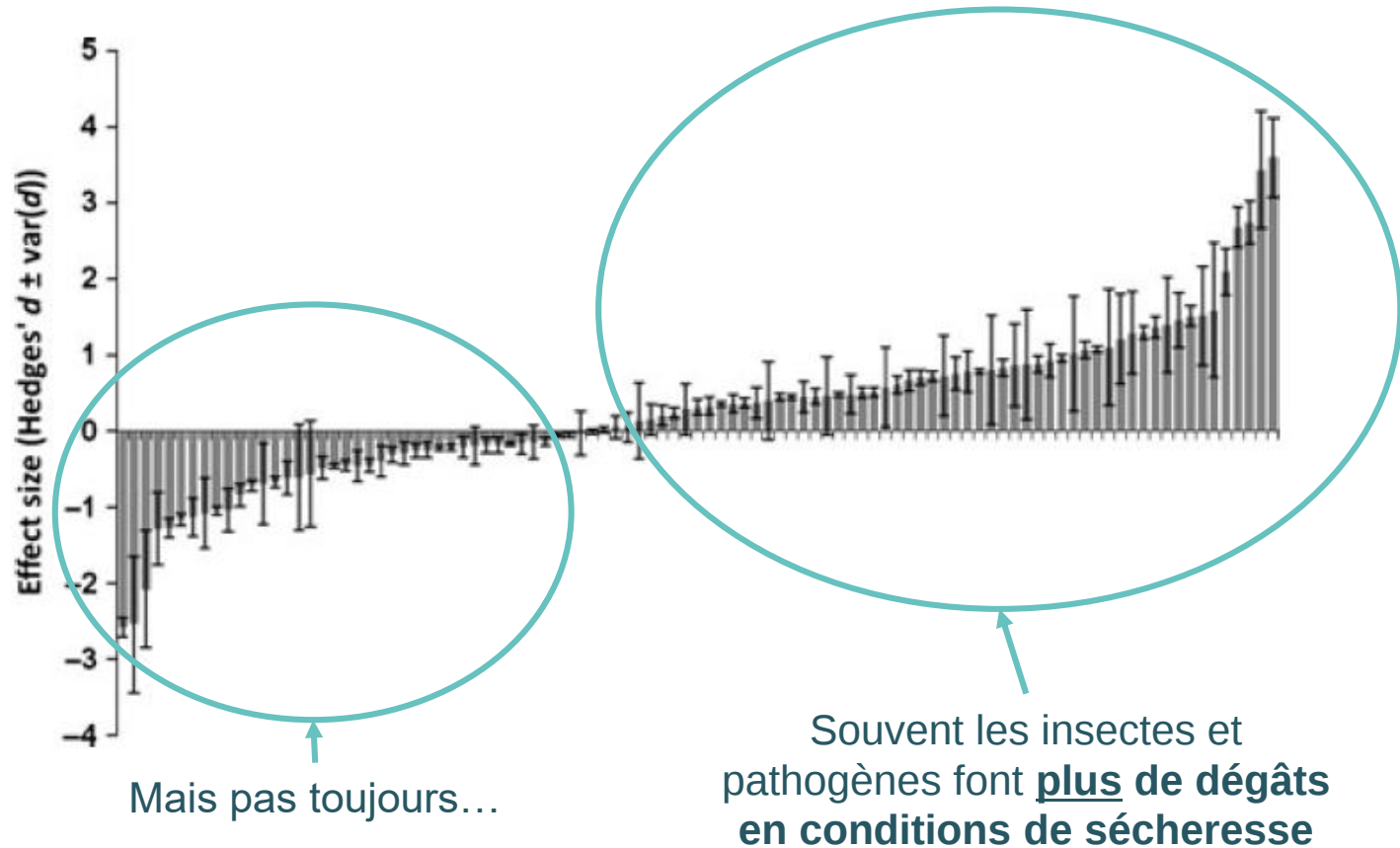
Sécheresse sévère



Dysfonctionnement **hydraulique**

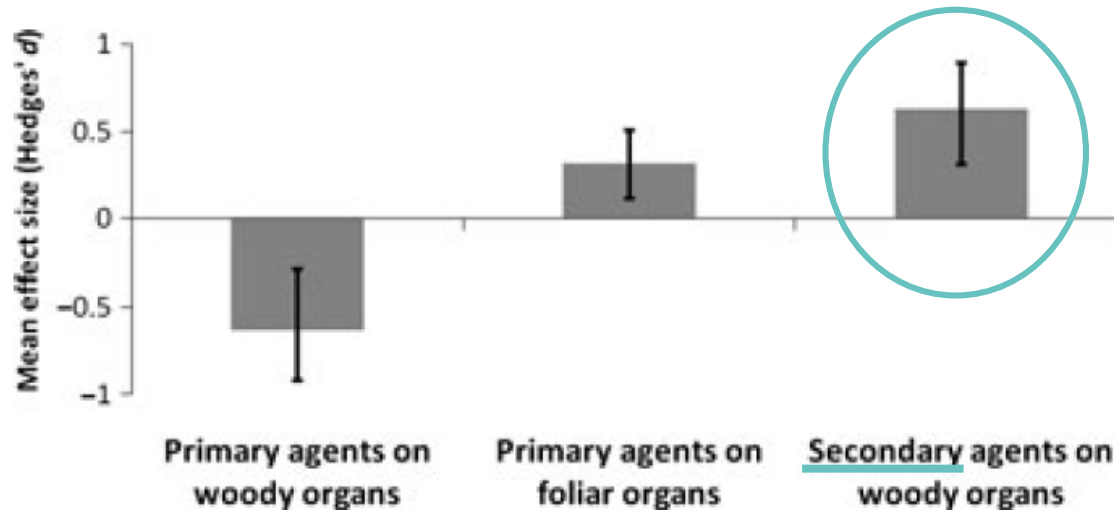
Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Magnitude des effets de la sécheresse sur 100 insectes et pathogènes forestiers



Impact de sécheresse sur les maladies forestières

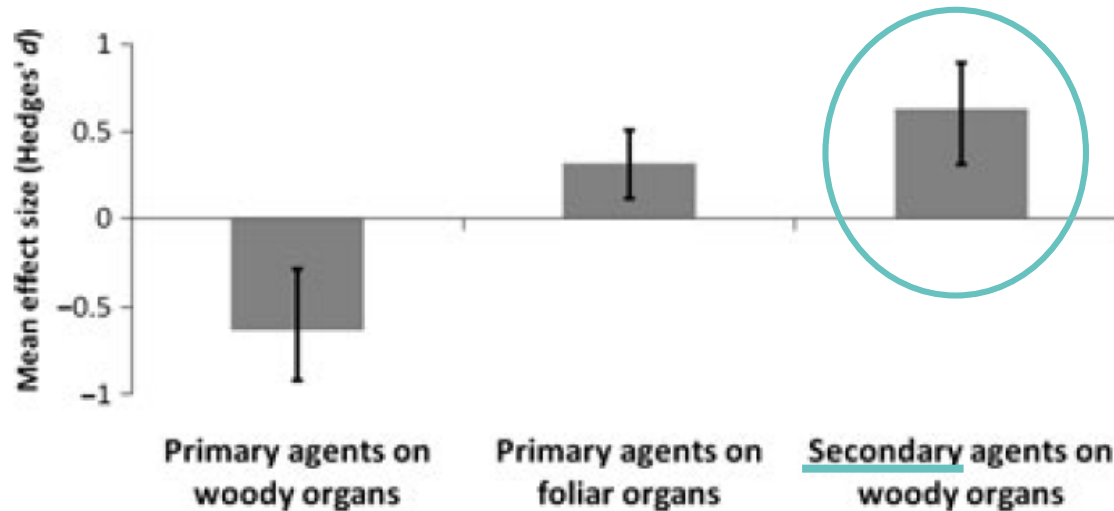
Cela dépend du **tissu infecté** (bois-feuilles) et du **groupe fonctionnel**



Pour **pathogènes secondaires** qui infectent le **bois**, il y a **plus** de dégâts en arbres stressés par sécheresse

Impact de sécheresse sur les maladies forestières

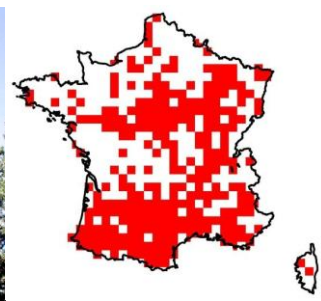
Cela dépend du **tissu infecté** (bois-feuilles) et du **groupe fonctionnel**



Cytospora du peuplier
(Ephytia)



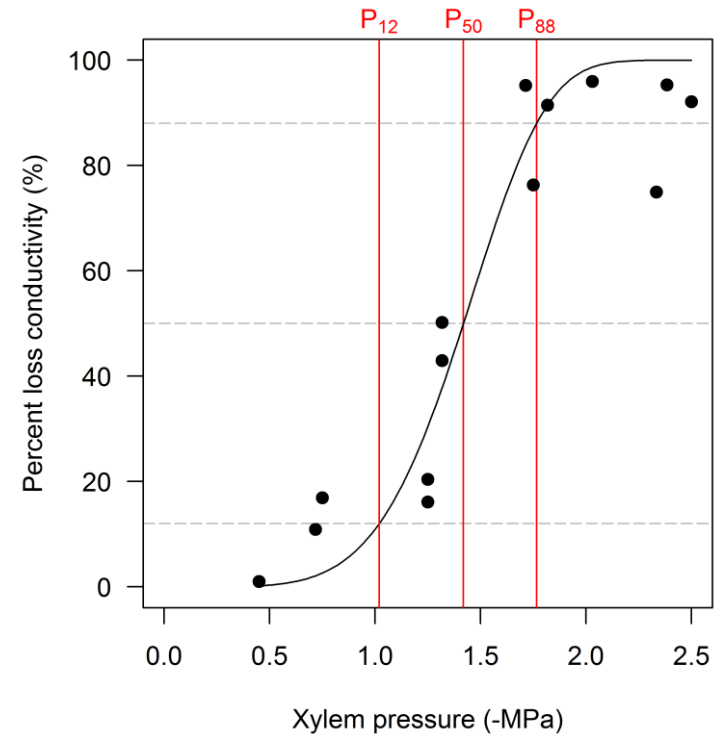
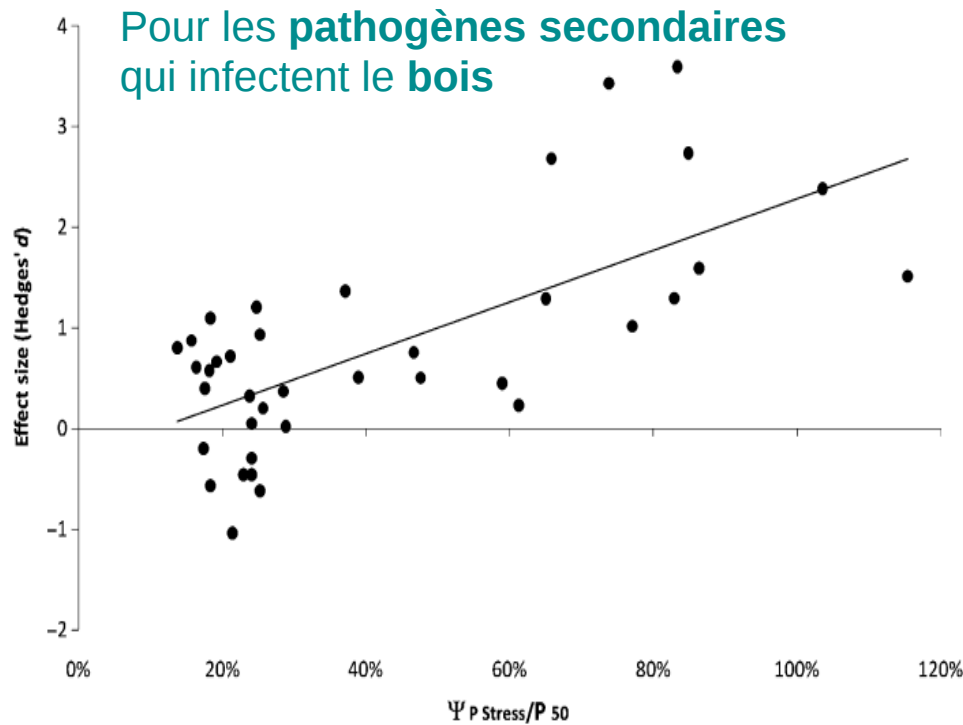
Biscogniauxia
mediterranea



Sphaeropsis des pins

Impact de sécheresse sur les maladies forestières

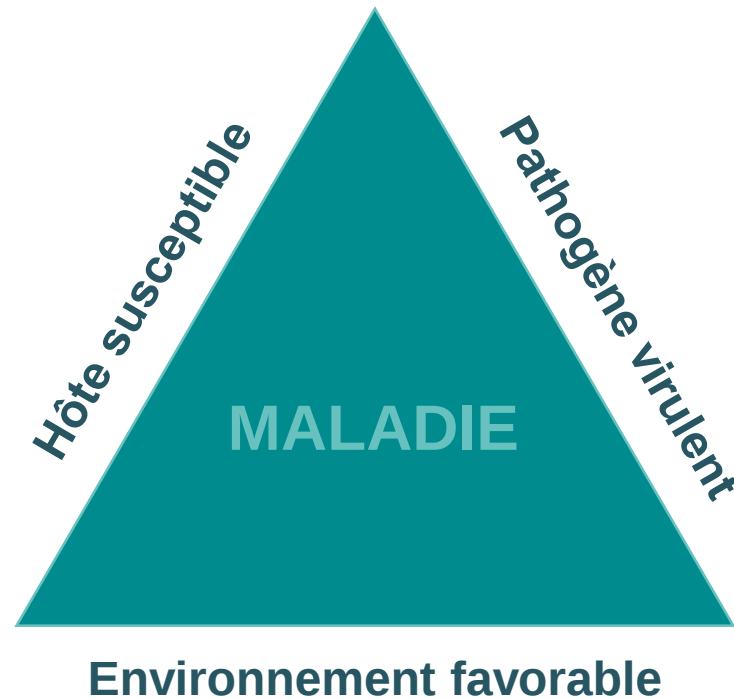
Le résultat dépend de la **sévérité du stress**



Water stress severity = ratio between predawn leaf water potential for water stressed trees (ΨP_{Stress}) / 50% of hydraulic conductivity lost due to cavitation (P_{50}) for the tree species

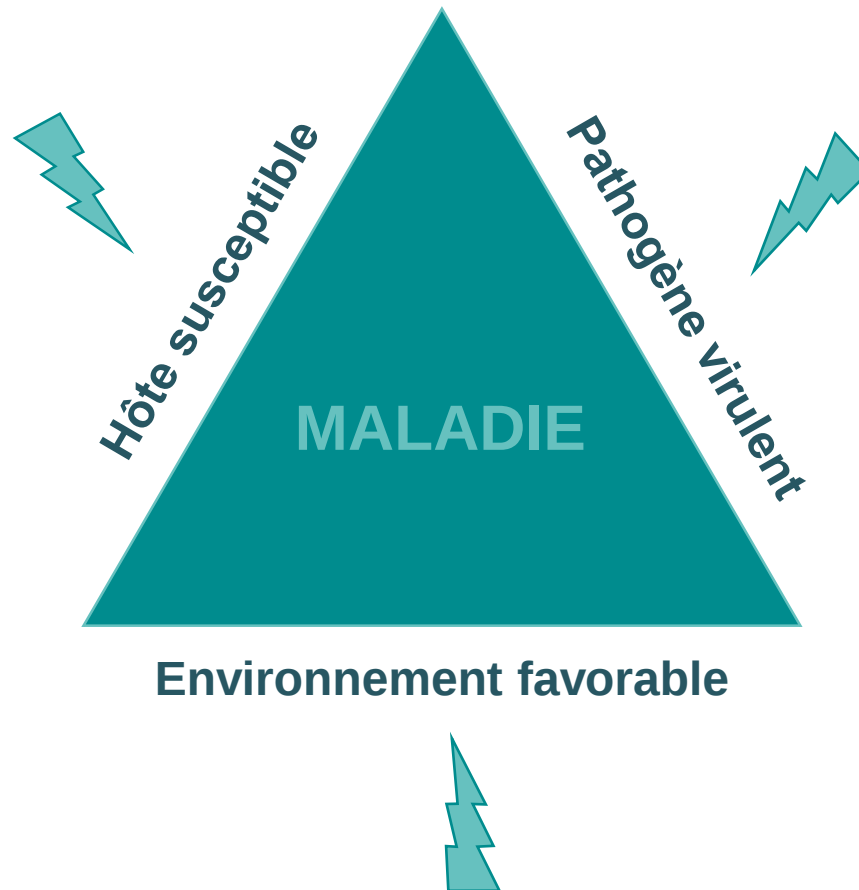
Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Mais pas si simple que ça... EFFETS MULTIDIMENSIONNELS



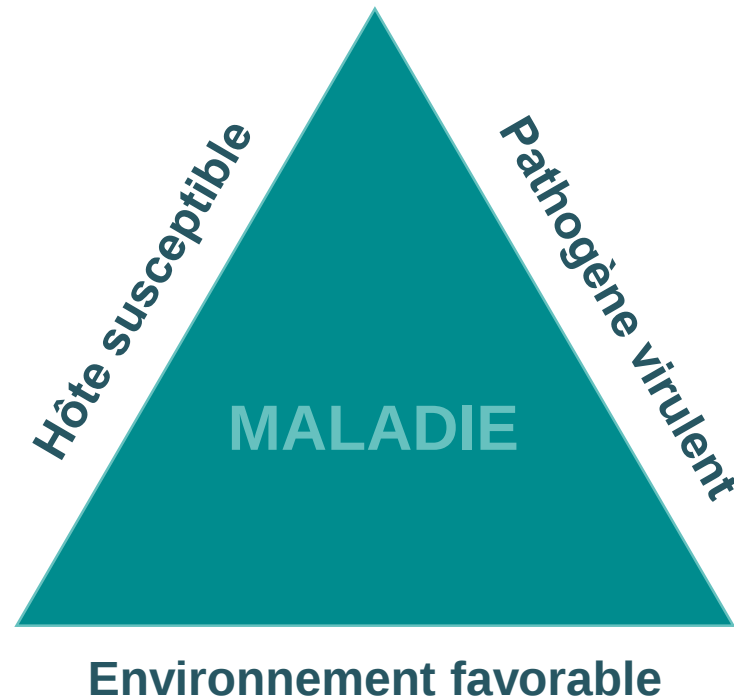
Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Mais pas si simple que ça... EFFETS MULTIDIMENSIONNELS



Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Mais pas si simple que ça... EFFETS MULTIDIMENSIONNELS

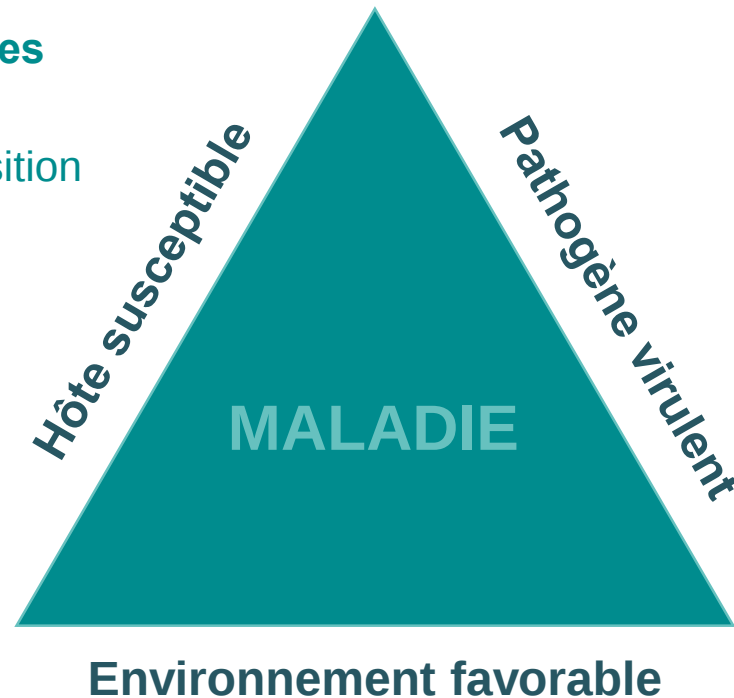


- Conditions plus **sèches et chaudes**
- Changement du **microbiote**

Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Mais pas si simple que ça... EFFETS MULTIDIMENSIONNELS

- Réduction en l'**humidité des tissus** végétaux
- Changement en la composition de **nutriments**
- **Réponse hormonal** potentiellement croisée (sécheresse/pathogène)

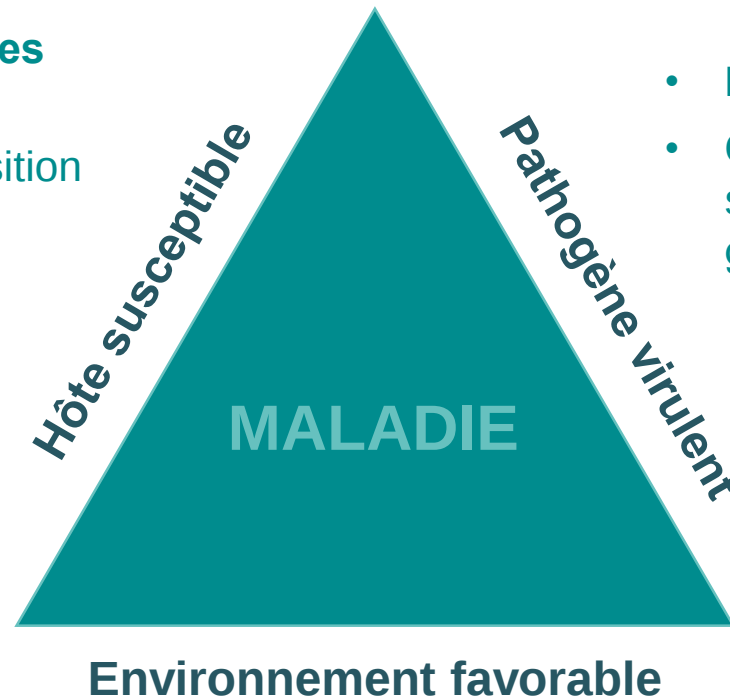


- Conditions plus **sèches et chaudes**
- Changement du **microbiote**

Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Mais pas si simple que ça... EFFETS MULTIDIMENSIONNELS

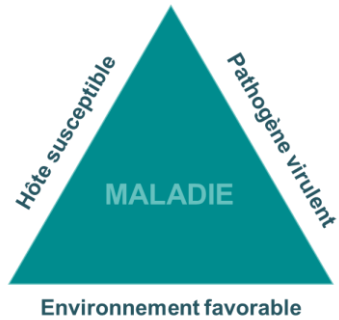
- Réduction en l'**humidité des tissus** végétaux
- Changement en la composition de **nutriments**
- **Réponse hormonal** potentiellement croisée (sécheresse/pathogène)



- **Niche** écologique
- **Cycle de vie** affecté par la sécheresse (sporulation, germination,...)

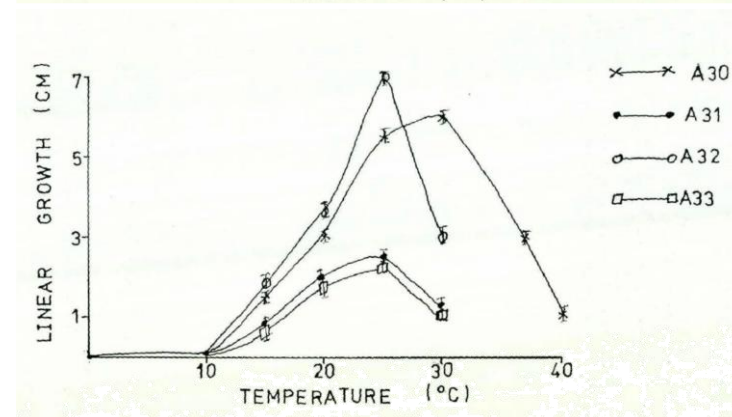
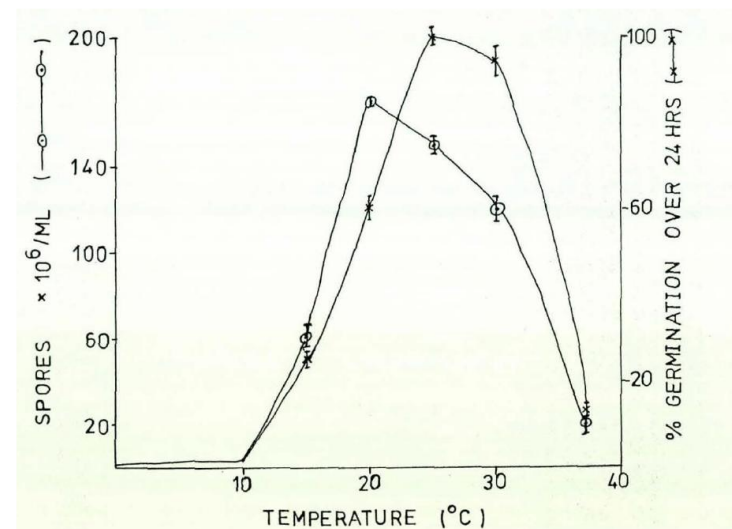
- Conditions plus **sèches et chaudes**
- Changement du **microbiote**

Impact de sécheresse sur les maladies forestières



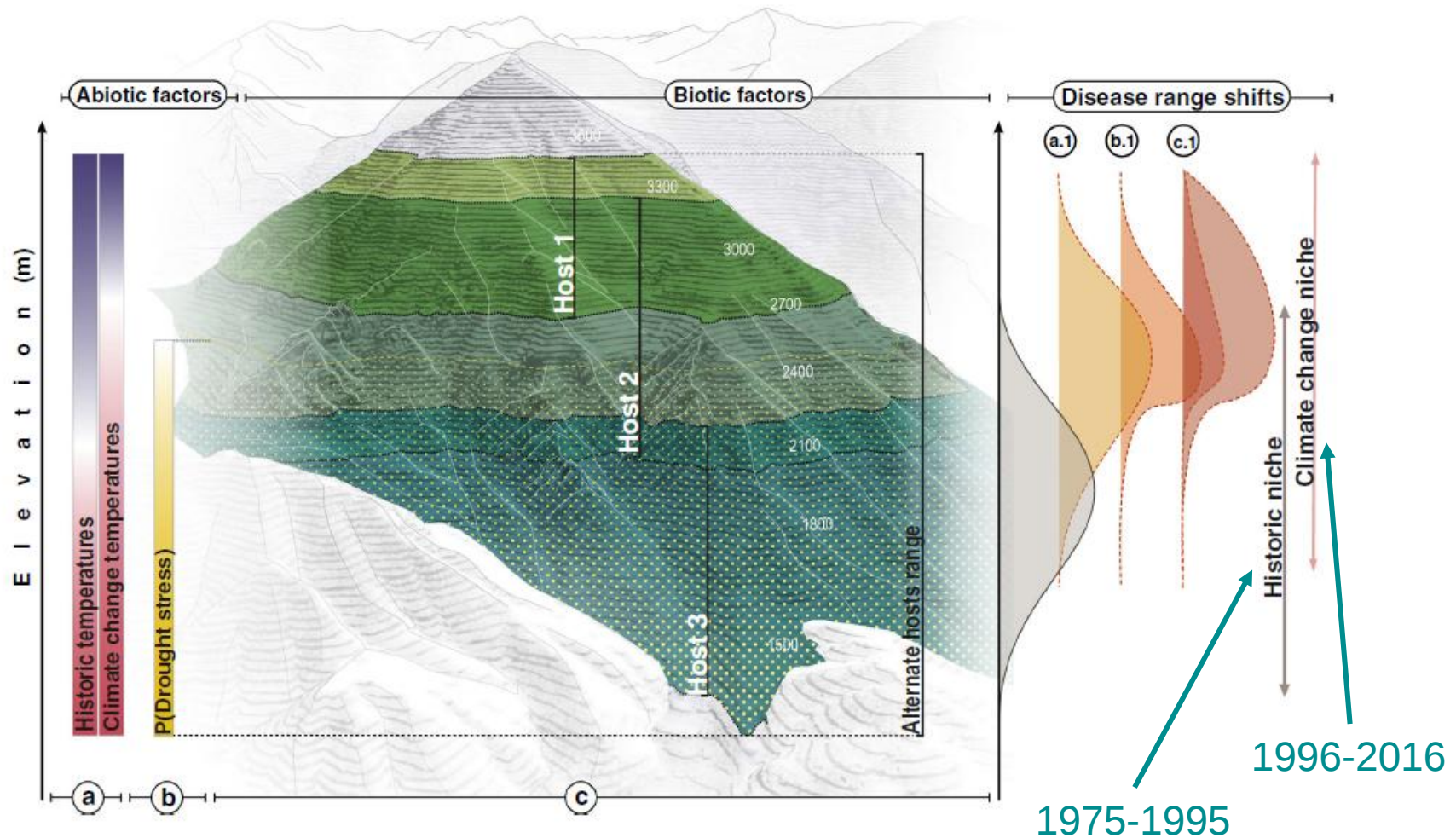
EFFETS MULTIDIMENSIONNELS

Courbes de **croissance**, **germination** et **sporulation** de *Cryptostroma corticale*



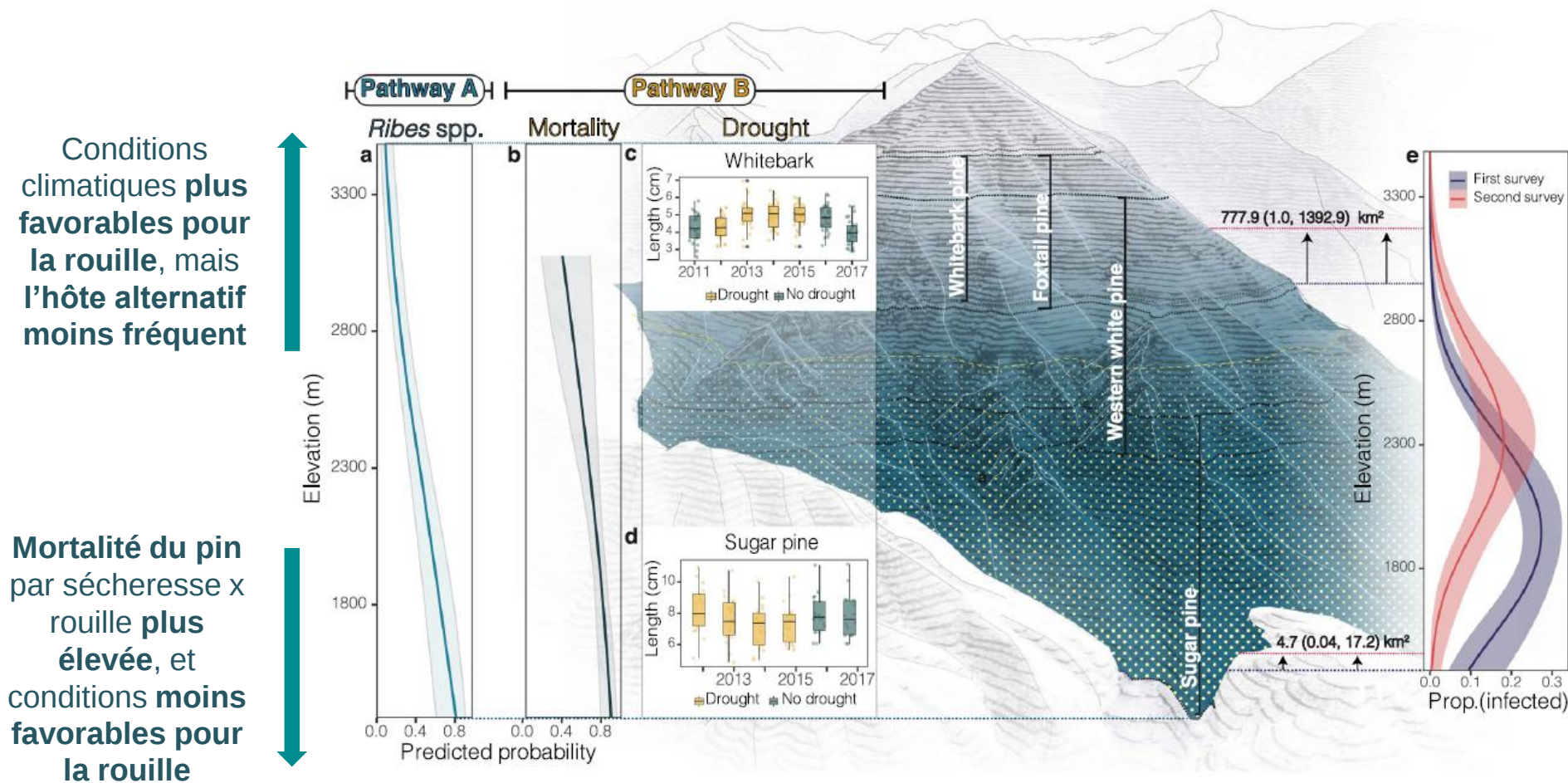
Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Changement **non-linéal** de distribution de la **rouille vésiculeuse des pins à 5 aiguilles** (*Cronartium ribicola*) en Californie à cause de la **sécheresse**



Impact de sécheresse sur les maladies forestières

Changement **non-linéal** de distribution de la **rouille vésiculeuse des pins à 5 aiguilles** (*Cronartium ribicola*) en Californie à cause de la **sécheresse**



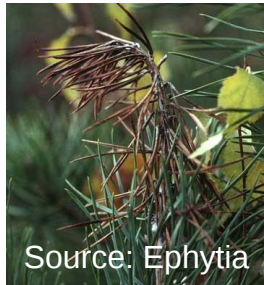
Quelques exemples chez nous...

- Le Fomes *Heterobasidion* spp



- Champignon de **pourriture**, **pathogène primaire**
- Infecte des **conifères**
- Quatre espèces présentes en Europe (3 en France)

- Le *Sphaeropsis* des pins *Diplodia sapinea* (= *Sphaeropsis sapinea*)



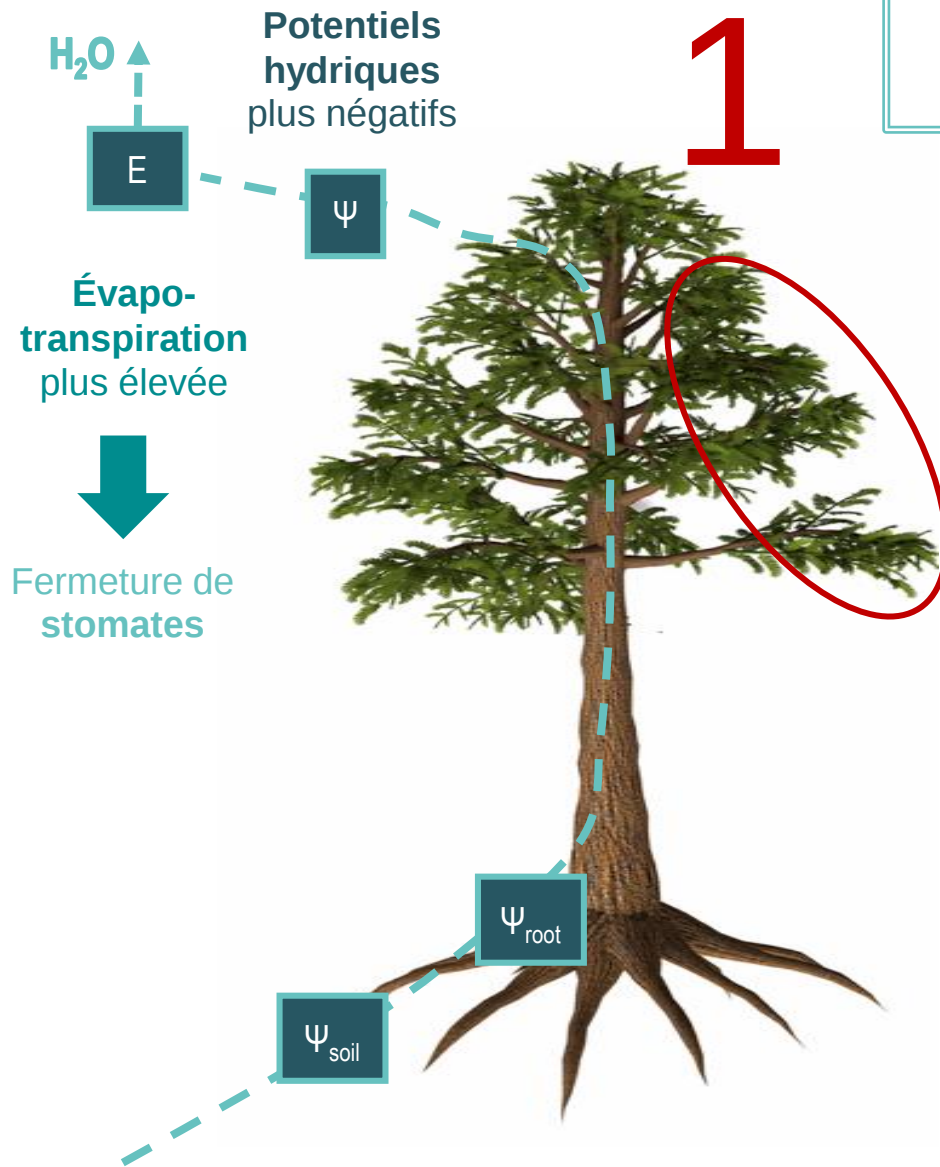
- **Endophyte** qui peut devenir pathogène sur des hôtes stressés
- Pathogène **vasculaire**
- Infecte des **conifères**, notamment des pins

- La maladie de la suie *Cryptostroma corticale*



- **Endophyte** qui peut devenir pathogène sur des hôtes stressés
- Pathogène **vasculaire**
- Infecte des **érables**, notamment l'érable sycomore

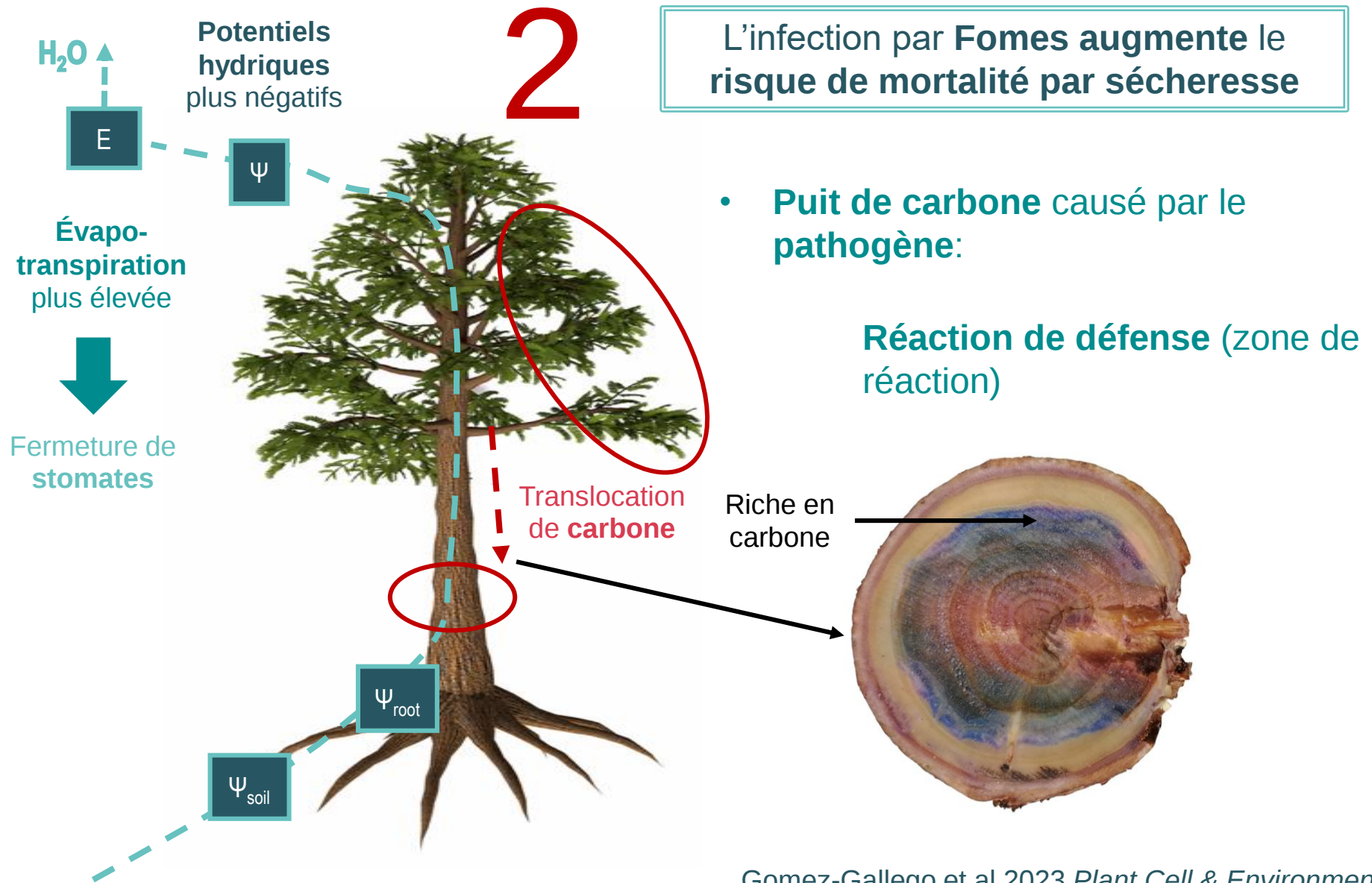
Le Fomes



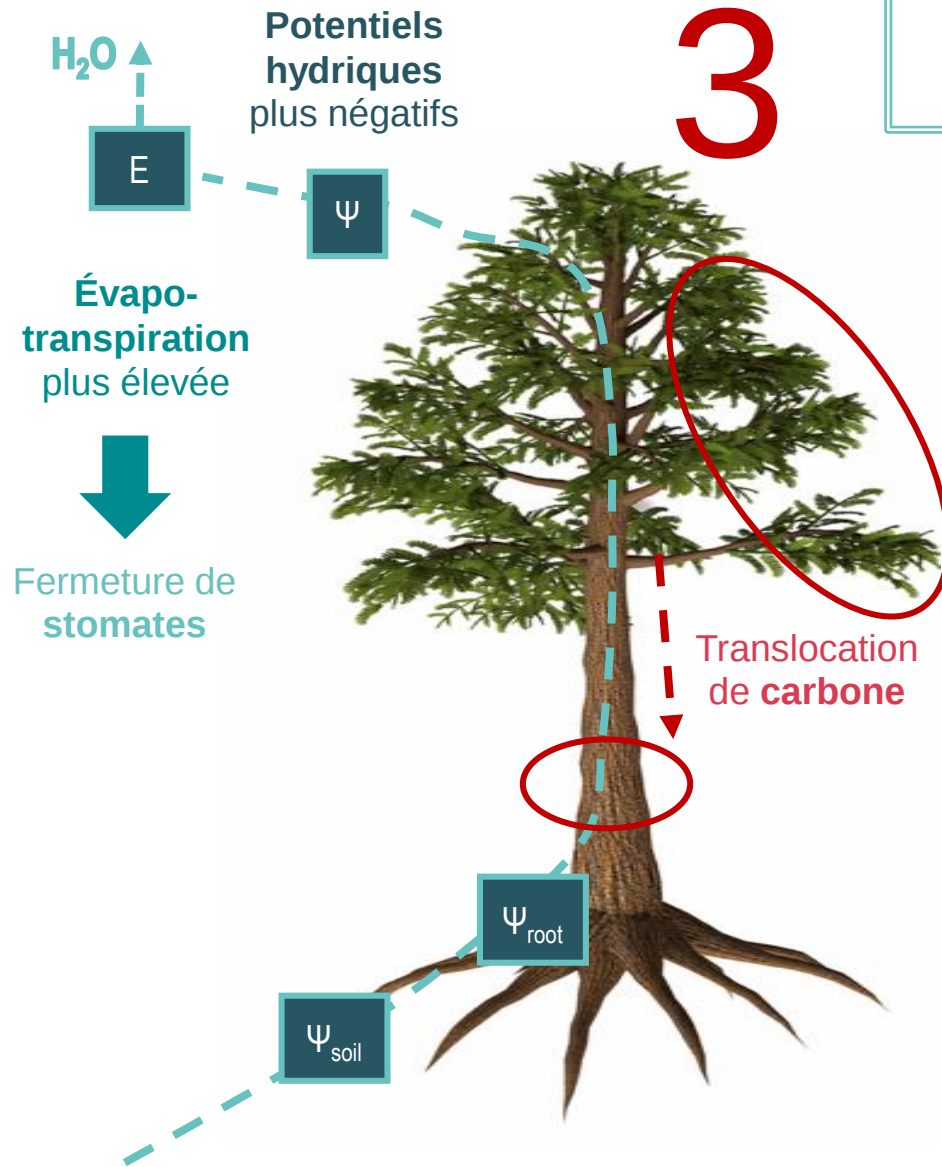
L'infection par **Fomes** augmente le risque de mortalité par sécheresse

- **Puit de carbone** causé par la sécheresse:
 1. **Moins d'assimilation de carbone**
 2. **Plus de carbone nécessaire** pour éviter la dessiccation des feuilles (**osmorégulation**)

Le Fomes



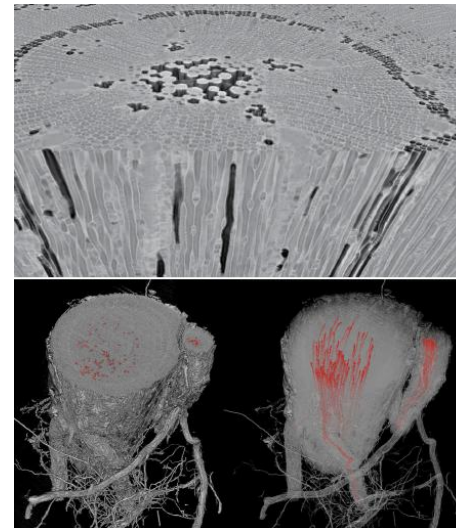
Le Fomes



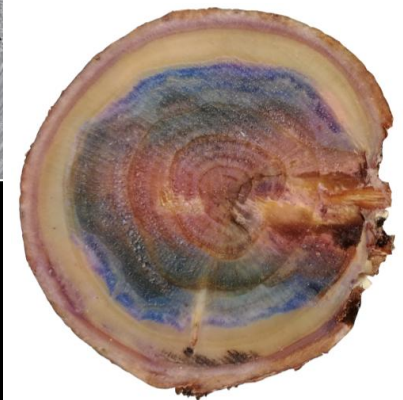
L'infection par **Fomes** augmente le risque de mortalité par sécheresse

- L'infection amplifie la **dysfonction hydraulique** causée par la sécheresse

Embolies



Pourriture



↓↓↓ Aubier fonctionnel

Le Fomes



- *Heterobasidion annosum* s.s. sur pin sylvestre et épicéa

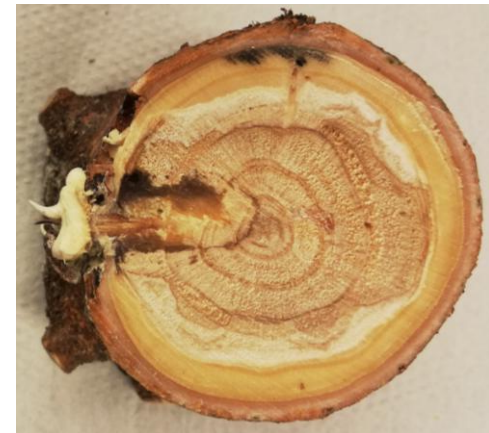
- Quatre combinaisons de traitements :

Well-watered/ non-inoculated

Well-watered/ inoculated

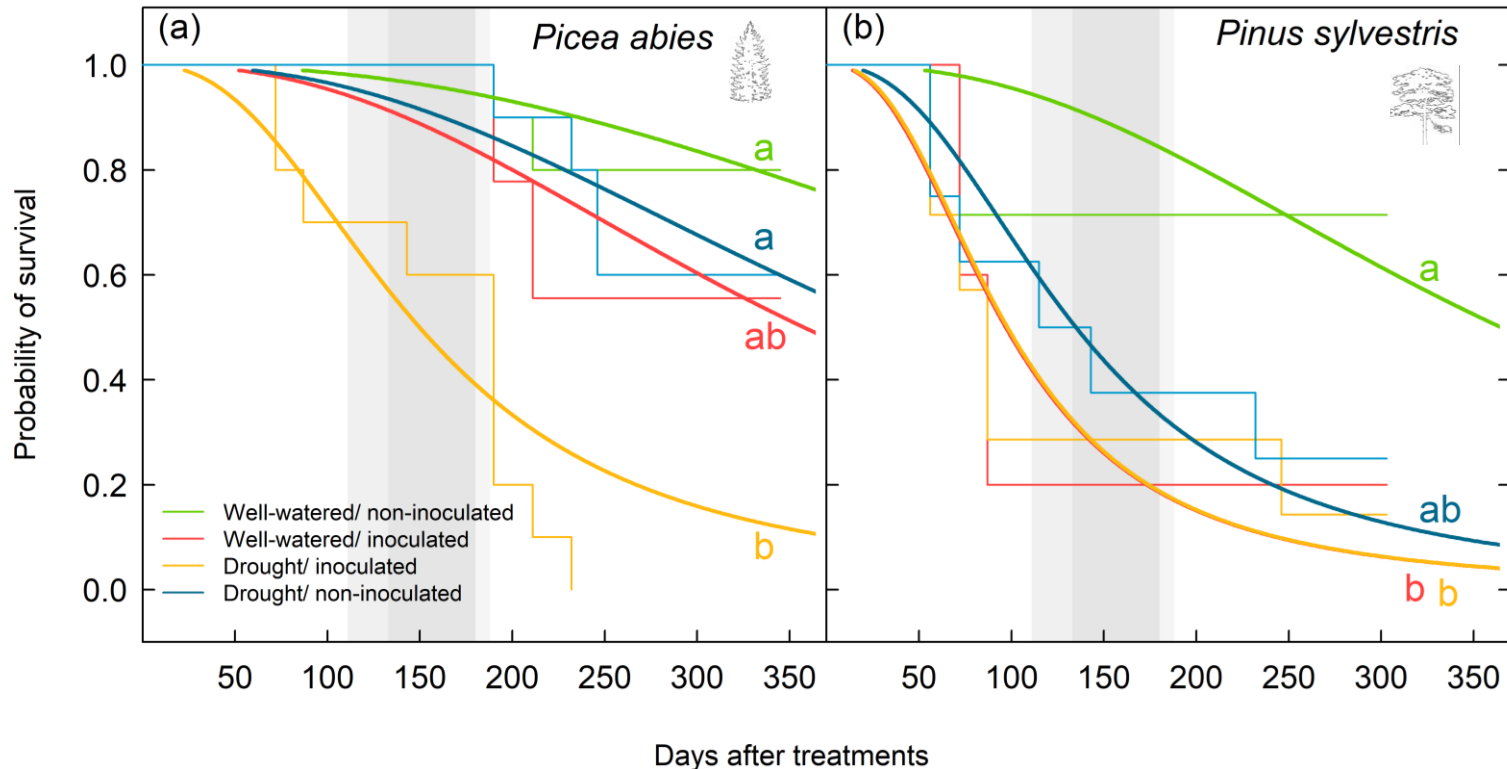
Drought/ non-inoculated

Drought/ inoculated



Le Fomes

L'infection par **Fomes** augmente le risque de mortalité par sécheresse

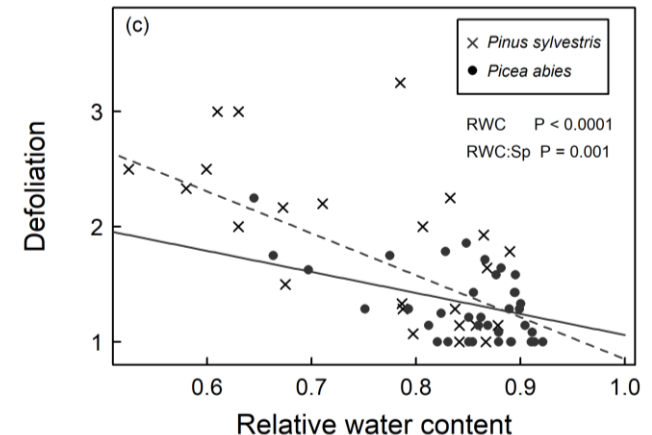
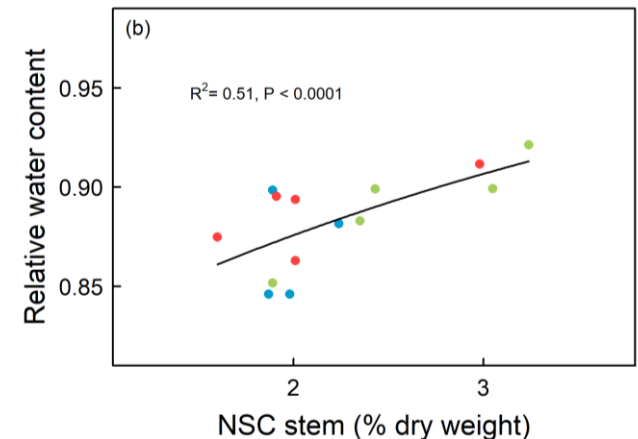
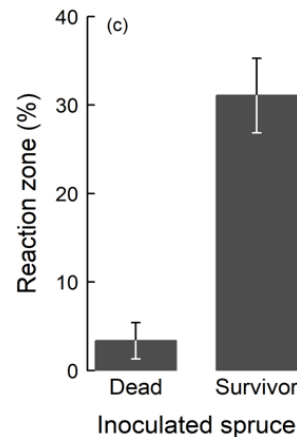
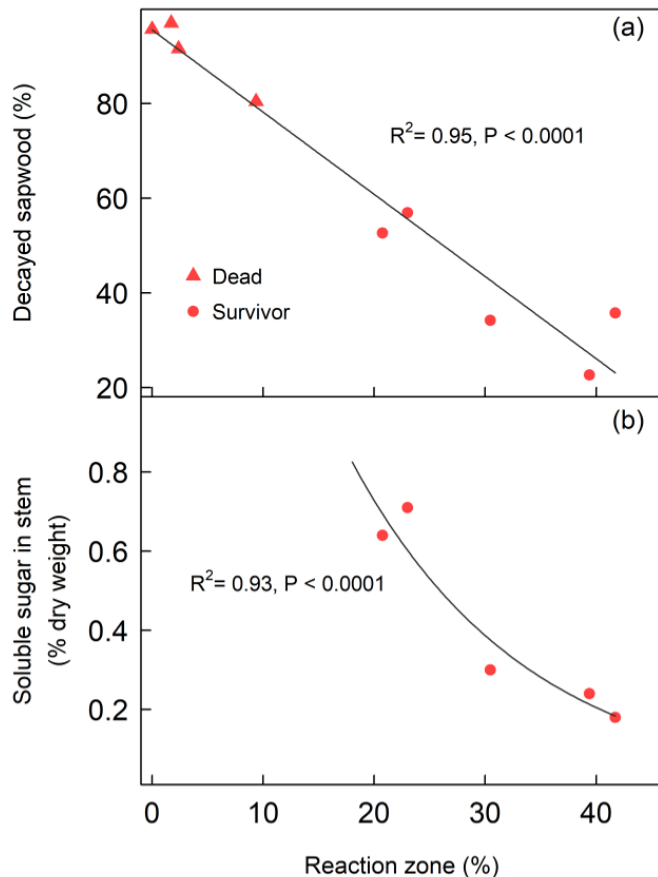


- ... **seulement** chez les **épicéas**
- **La mortalité par infection s'est plutôt passée après la période de dormance**

Le Fomes

Puits de carbone qui compètent causés par les deux stress

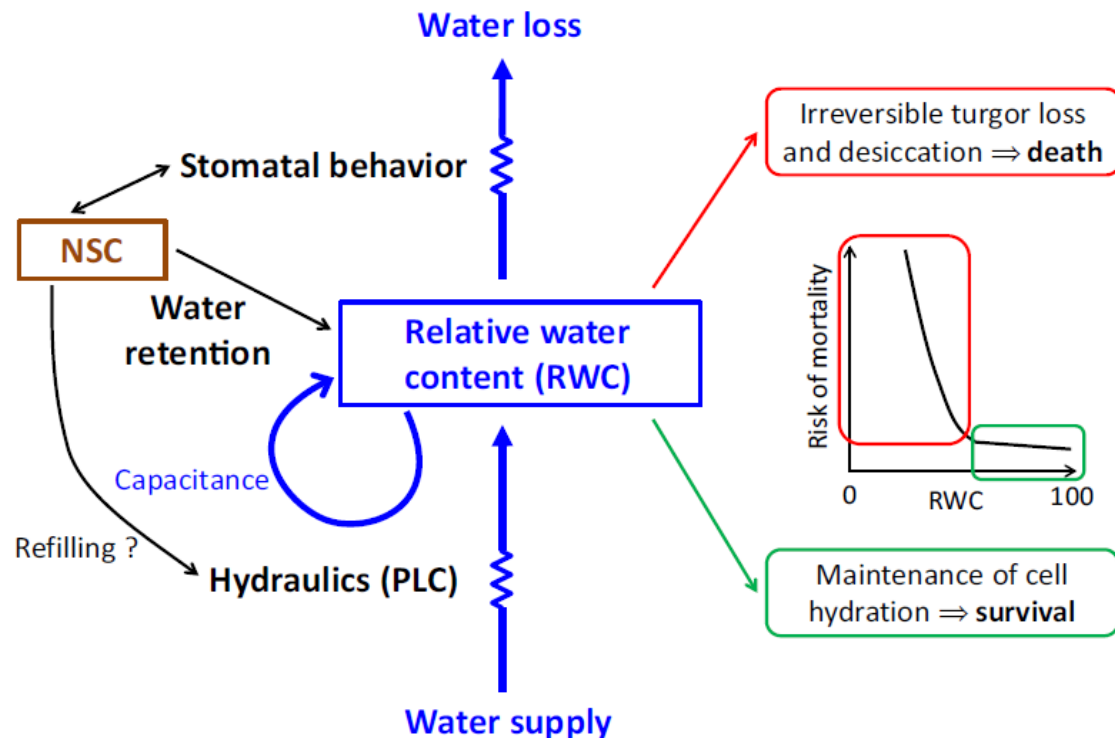
Le **contenu d'eau de la plante** a un rôle central dans la mortalité par sécheresse et pathogènes, en **liant l'état hydrique aux réserves de carbone, et la défoliation**



Le Fomes

Puits de carbone qui compètent **causés par les deux stress**

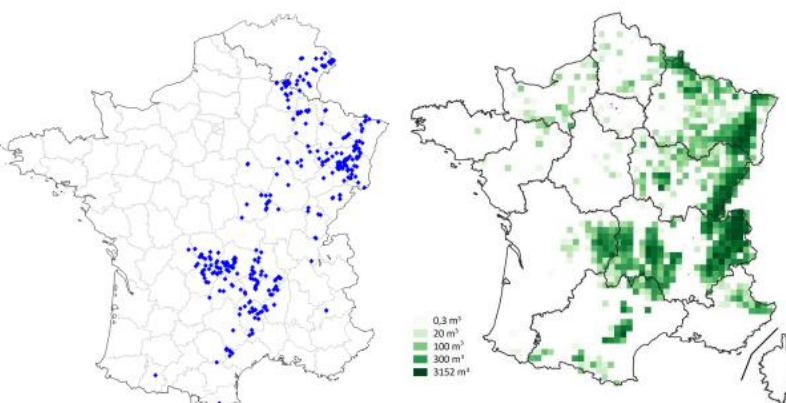
Le **contenu d'eau de la plante** a un rôle central dans la mortalité par sécheresse et pathogènes, en **liant l'état hydrique aux réserves de carbone, et la défoliation**



Le Fomes

Enquête Fomes sur épicéa en France (DSF)

337 placettes (2016-2019)



100 souches par placette ont été notées

Pourcentage de surface atteinte	Souche saine	Bois mou mais encore résistant	Bois mou voire creux sans résistance
0 %	0		
inférieur à 10 %		A	B
10 à 25 %		B	C
26 % à 50 %		C	D
supérieur à 50 %		D	D



Note C : 40% de souche atteinte
dont 20% de bois sans résistance



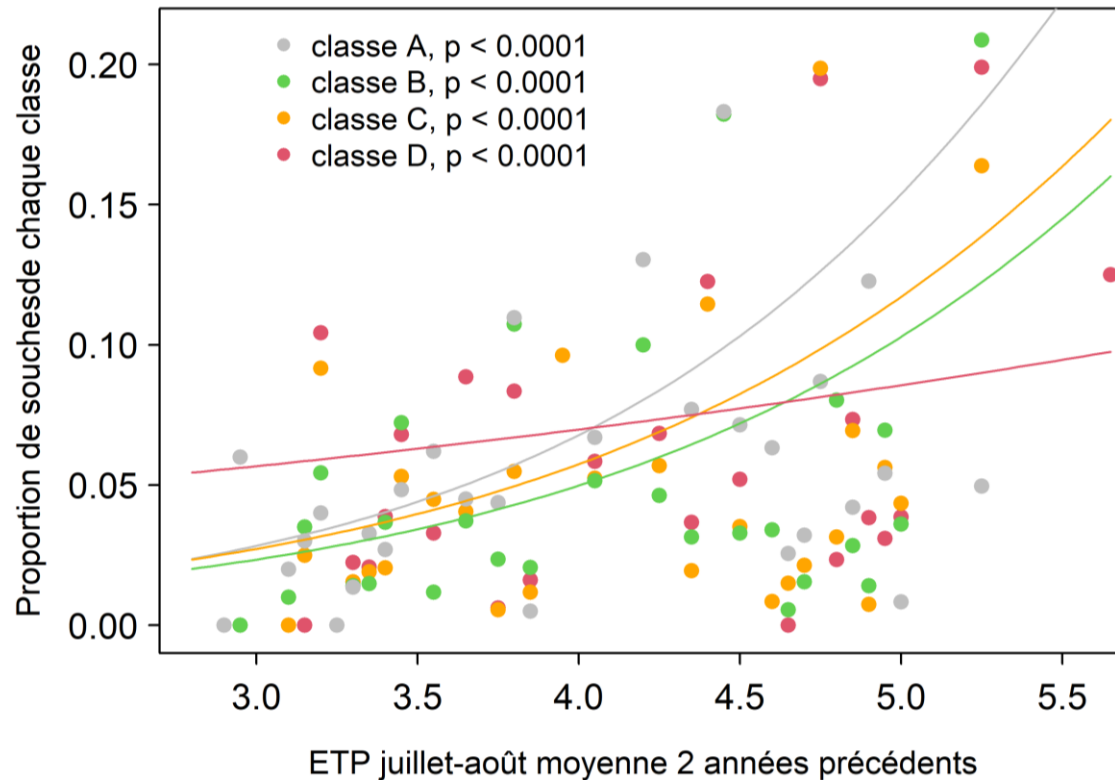
Note D : 60% de souche atteinte
dont 50% de bois sans résistance



Note D : 90% de souche atteinte
dont 50% de bois sans résistance

Le Fomes

Enquête Fomes sur épicéa en France (DSF)



La proportion de **souches infectées** de chaque classe par rapport aux non-infectées **augmente avec la sécheresse**

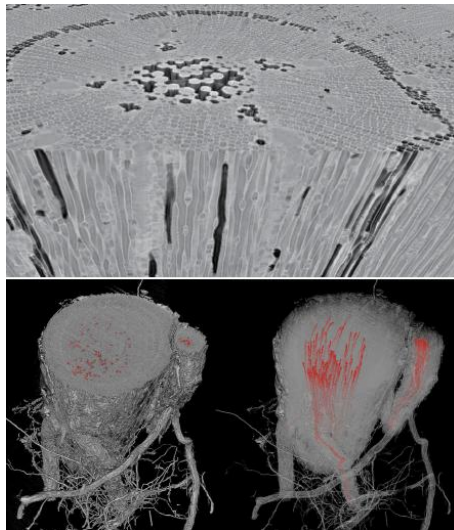
Le Fomes

Pour quoi *Heterobasidion annosum* pousse plus sur des conditions sèches ?

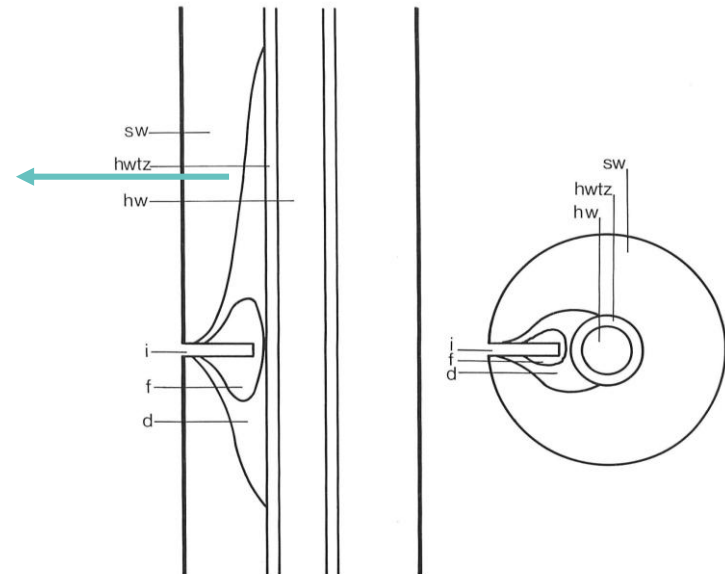
Le Fomes

Pour quoi *Heterobasidion annosum* pousse plus sur des conditions sèches ?

- Le xylème est normalement **rempli d'eau, anoxie** => conditions **défavorables** à la croissance des champignons
- Les **embolies** permettent l'**entrée d'air dans le bois**, en favorisant le **développement du champignon**

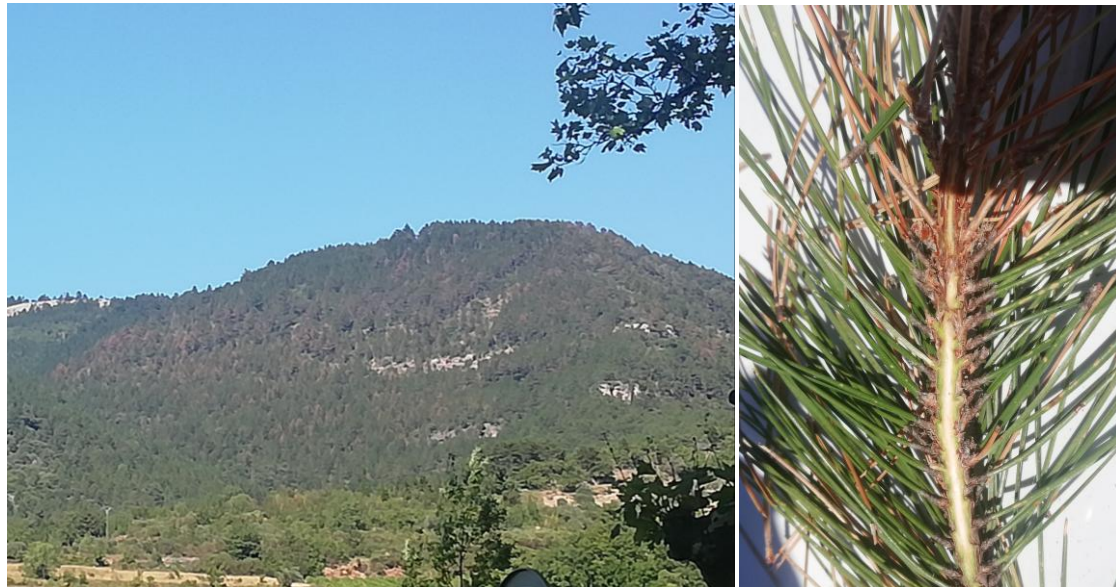


Mycelium *H. annosum* pousse plus vers le haut



Le Sphaeropsis des pins

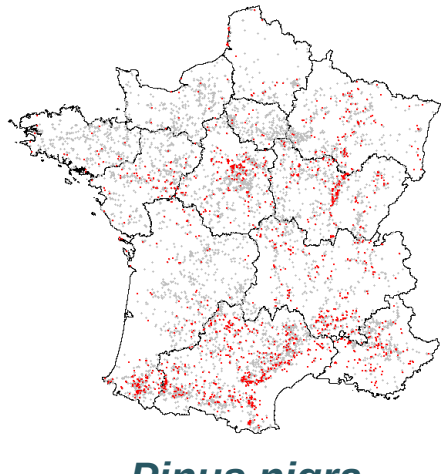
- Agent pathogène présent **en France** depuis le **siècle XIX**
- **Dépérissements sévères** induits par *Diplodia sapinea* signalés au début des années **1990s** sur *Pinus nigra* and *P. sylvestris*
- Cette **émergence** était liée au **réchauffement climatique** (Fabre et al 2011 *Global Change Biology*)
- Le champignon est présent de façon **asymptomatique dans des tissus de l'hôte**
- **Les épidémies suivent** des épisodes de **stress abiotique** (sécheresse, grêle...)



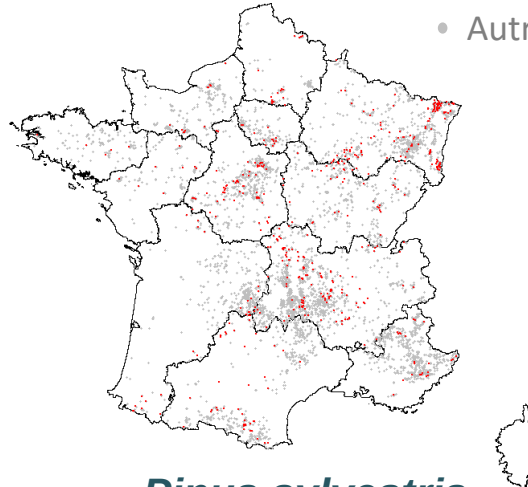
Le Sphaeropsis des pins

Signalements *Diplodia sapinea* de 1989-2022 base de données DSF

- *D. sapinea*
- Autres problèmes



Pinus nigra



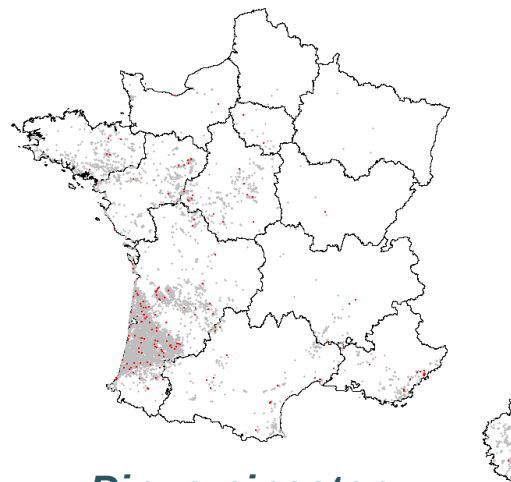
Pinus sylvestris



Pinus halepensis



Pinus pinea

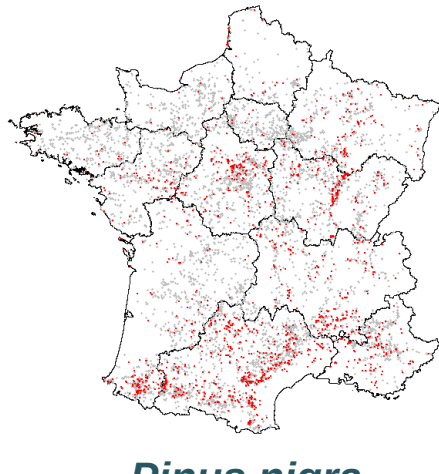


Pinus pinaster

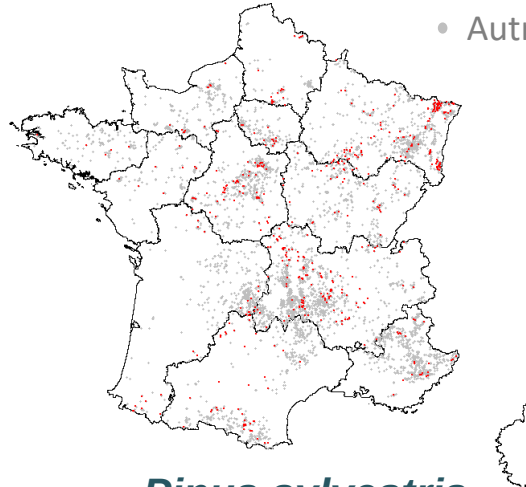
Le Sphaeropsis des pins

Signalements *Diplodia sapinea* de 1989-2022 base de données DSF

- *D. sapinea*
- Autres problèmes



Pinus nigra



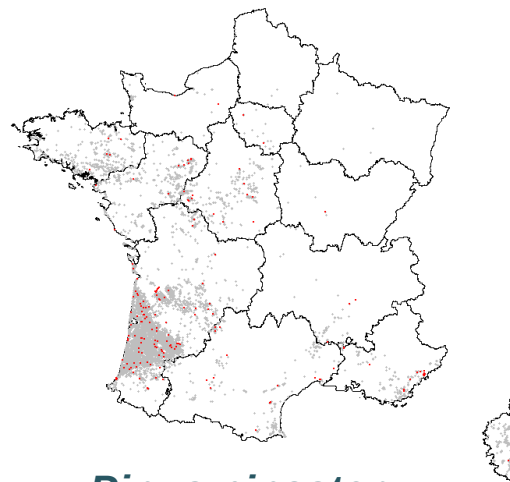
Pinus sylvestris



Pinus halepensis



Pinus pinea



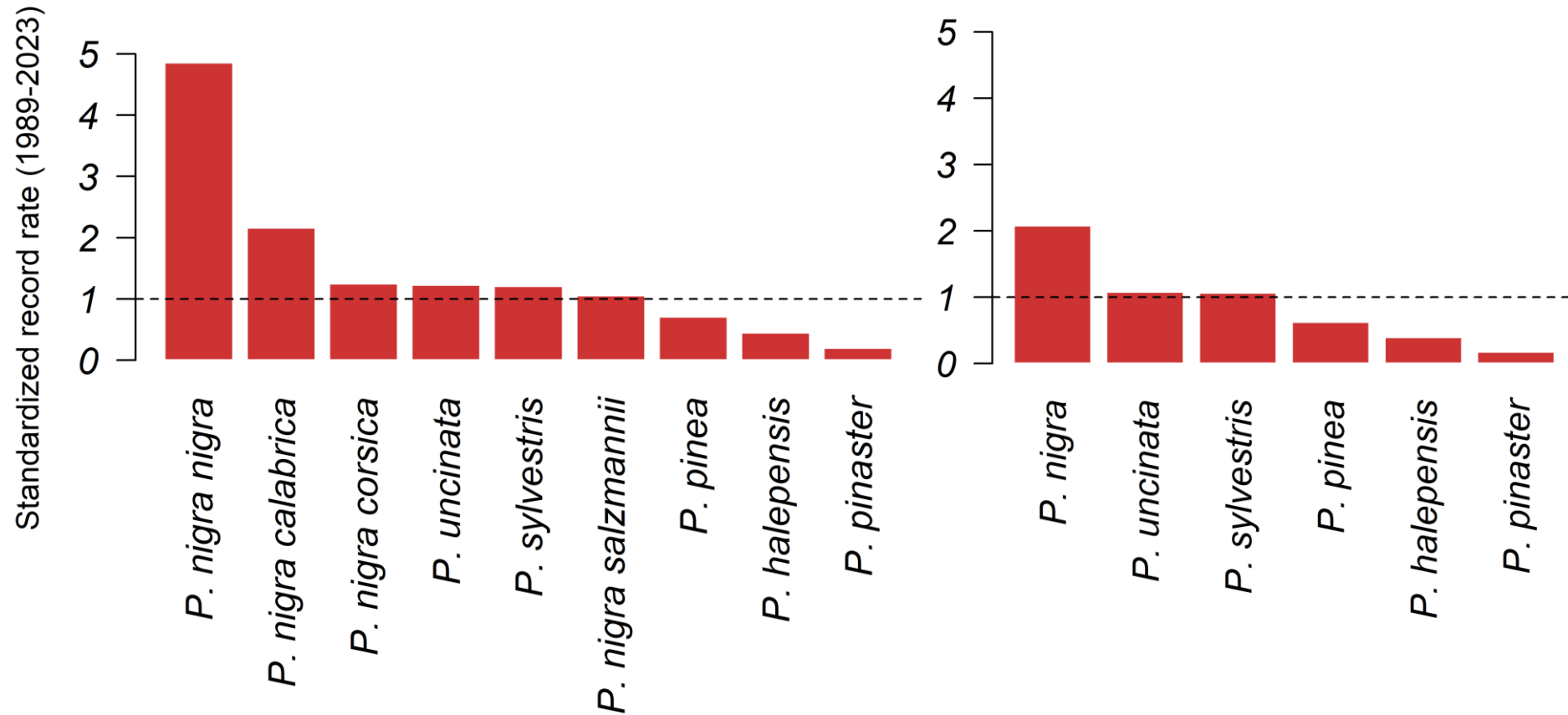
Pinus pinaster

Il faut **standardiser** les données pour éviter les biais

On utilise le **nombre d'autres problèmes signalés** pour la même espèce et la **moyenne total**

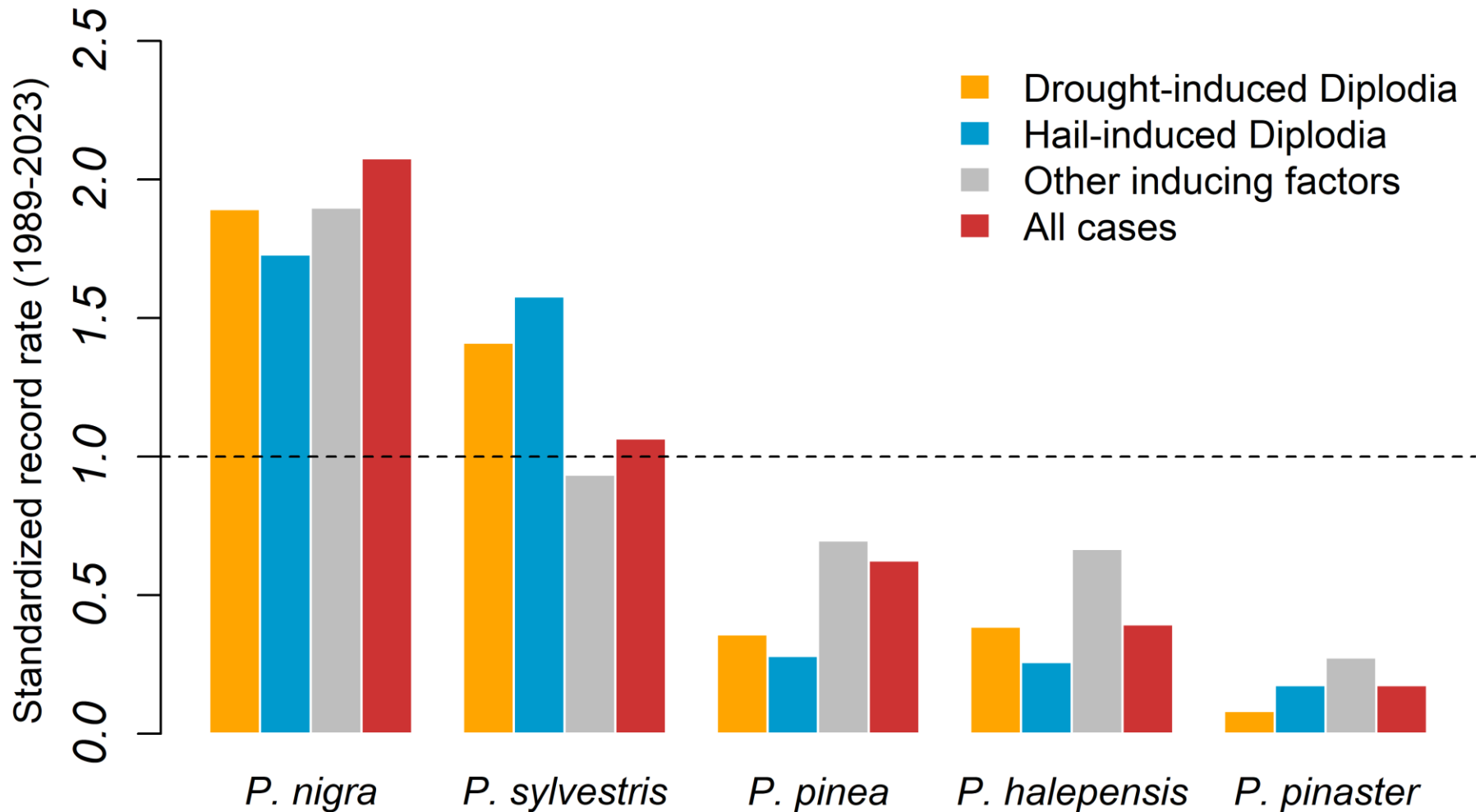
$$SRR_i = \frac{Dip_i / Ref_i}{\sum_i^n Dip / \sum_i^n Ref}$$

Le Sphaeropsis des pins



Les essences de pin les plus touchées par le Sphaeropsis des pins sont ***Pinus nigra*** suivi par ***Pinus sylvestris***

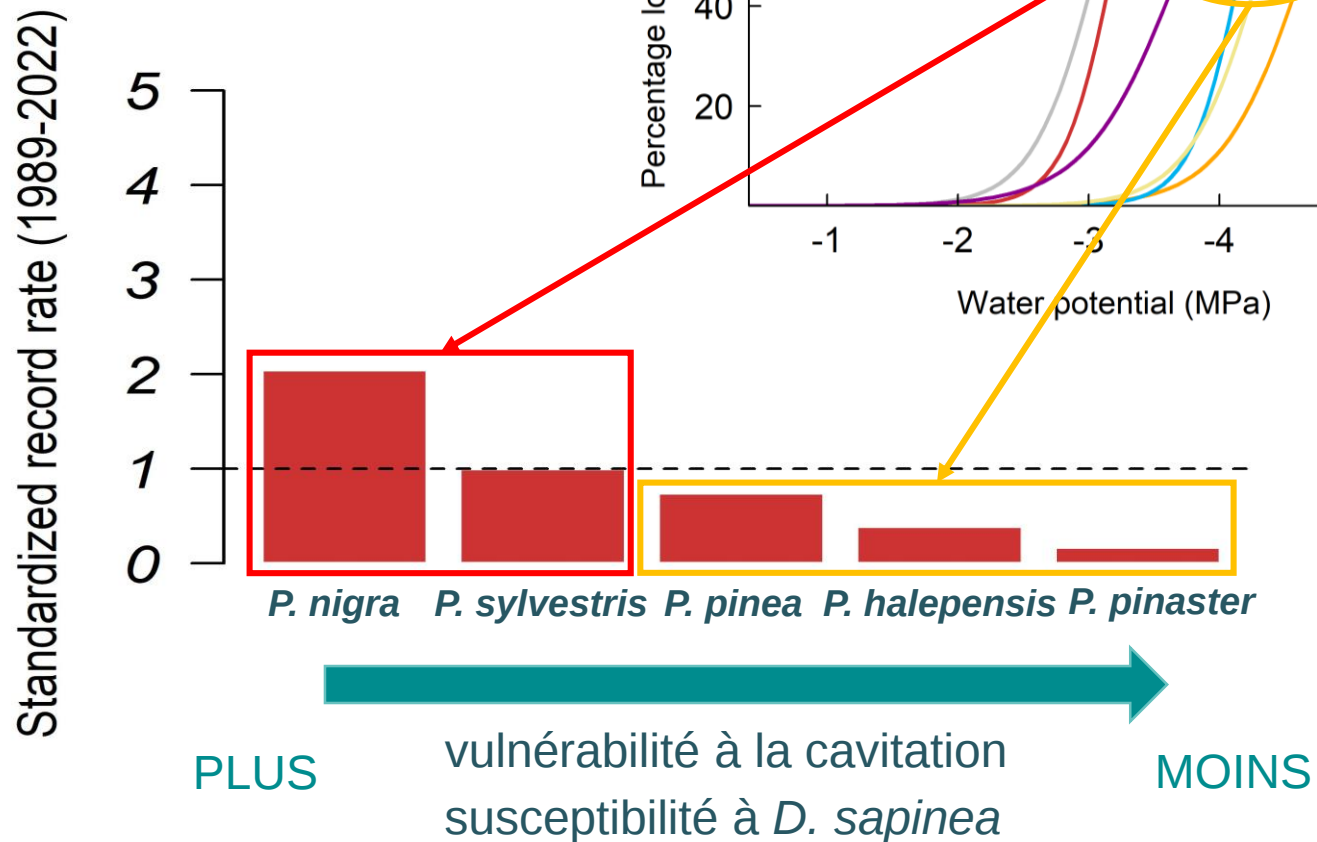
Le Sphaeropsis des pins



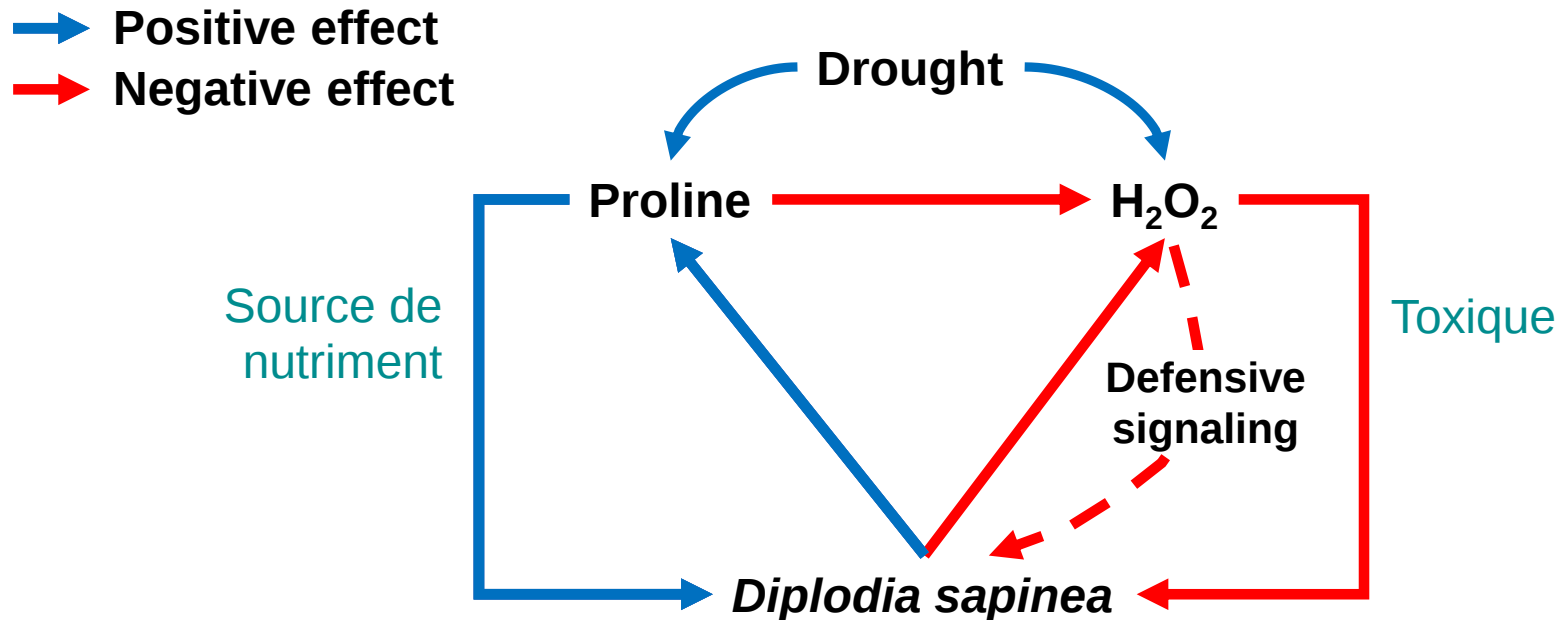
L'association avec **différents stress** peut **varier entre espèces**

Développement de *D. sapinea* post-stress

Est-ce que la **vulnérabilité à la cavitation** des différentes **espèces de pin** jouent un rôle dans l'infection par *Diplodia sapinea*?



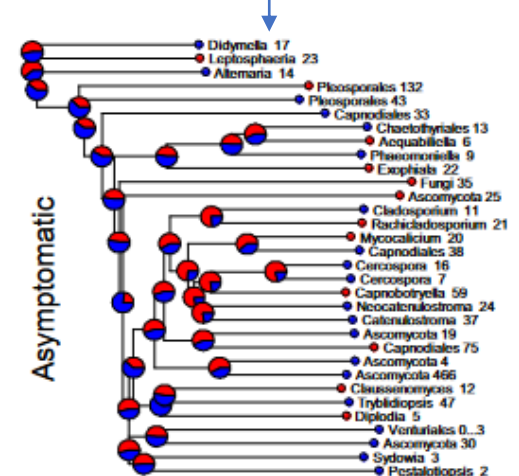
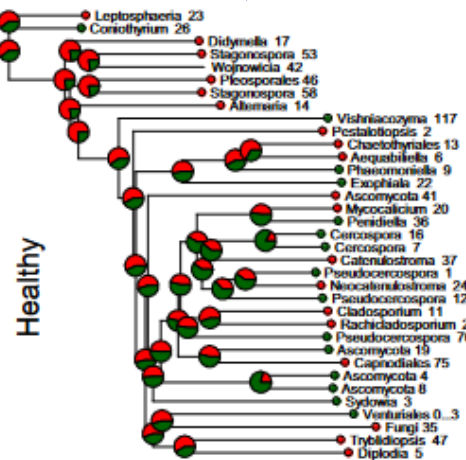
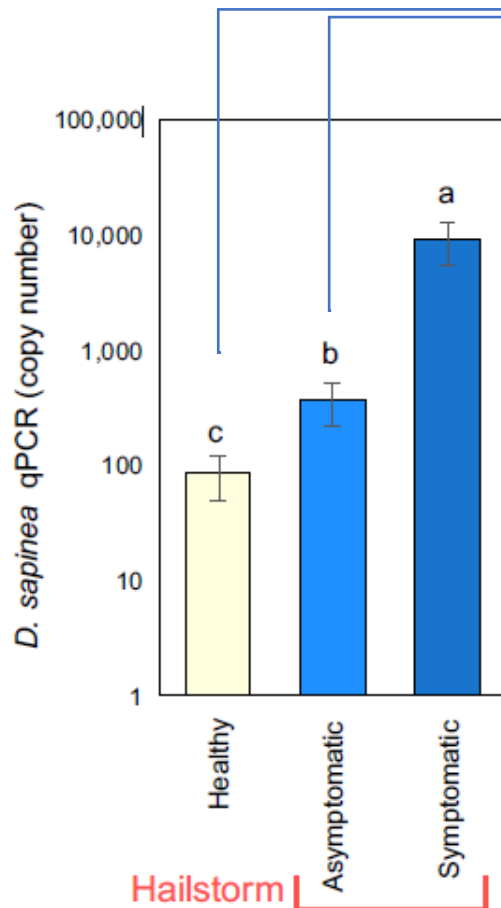
Développement de *D. sapinea* post-stress



- Drought induces the accumulation of **proline** and **H₂O₂**
- **Proline** is a **nutrient source** for *D. sapinea*
- **H₂O₂** is toxic to *D. sapinea* and is part of the defence reaction of the host
- *D. sapinea* detoxifies **H₂O₂** using enzymes like catalase
- *D. sapinea* enhances **proline production** by the host
- **Proline** neutralise **H₂O₂**

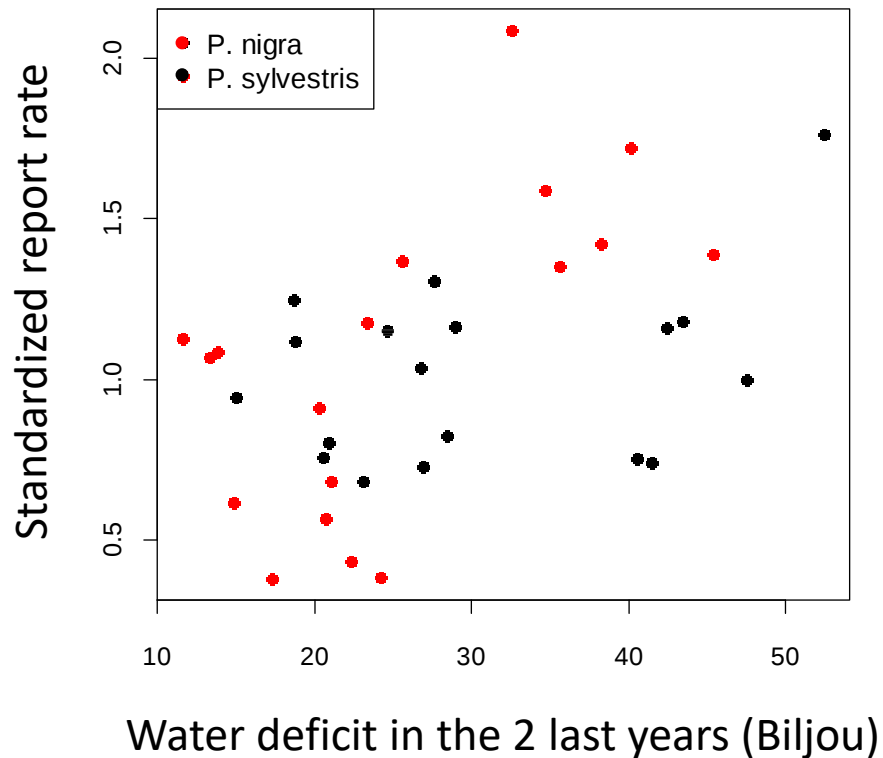
Développement de *D. sapinea* post-stress

Regroupement de champignons présents dans le microbiote des rameaux sains, asymptomatiques, et symptomatiques

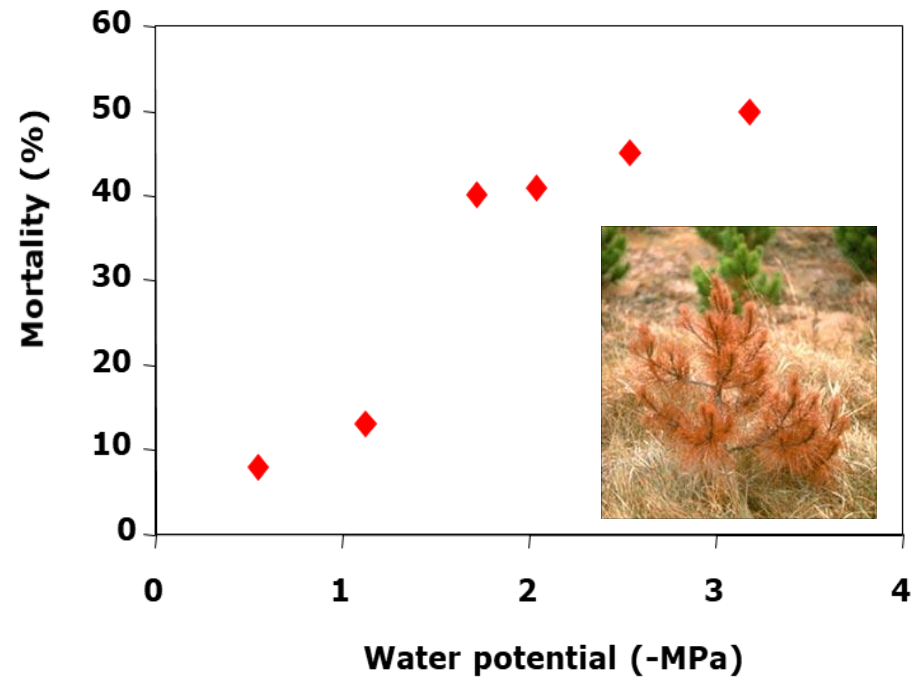


Le *Sphaeropsis* des pins

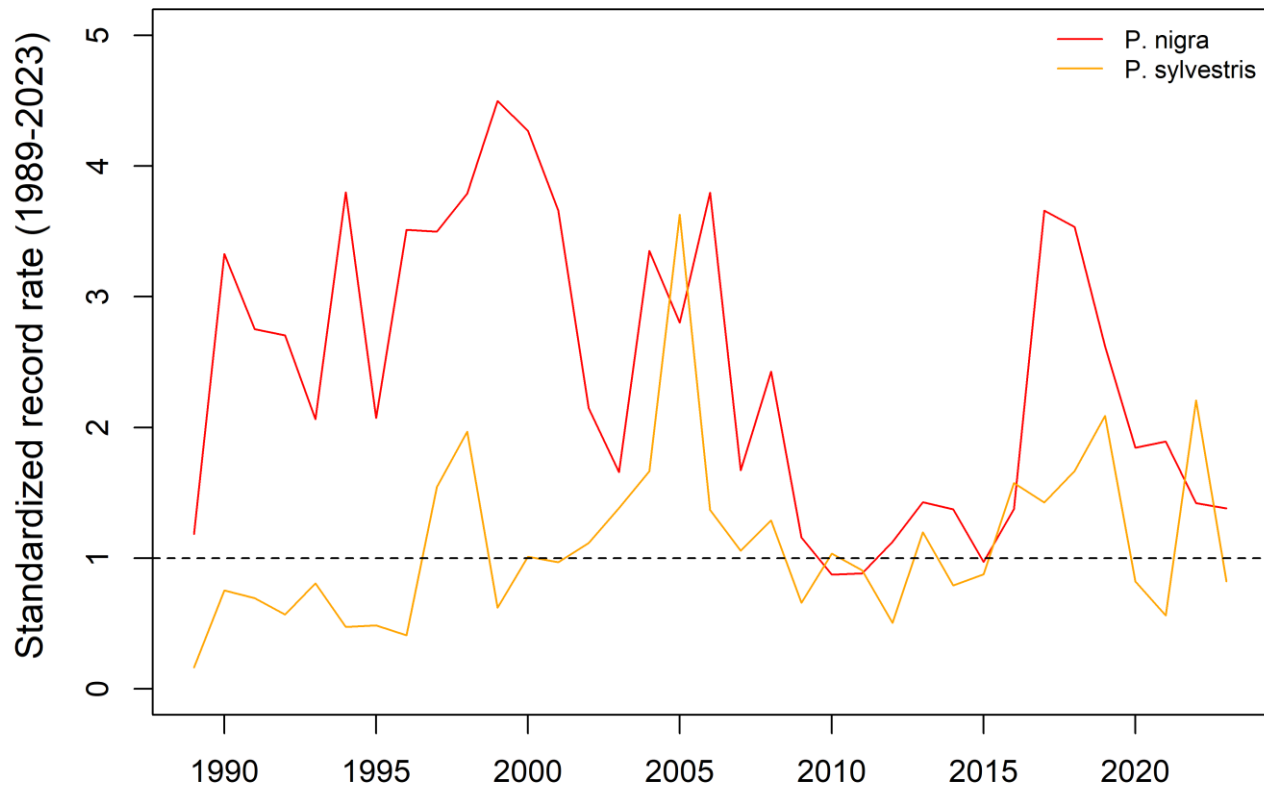
Liée à l'espèce de pin et à la sécheresse



Mortalité des semis de **pin rouge**
lié au **potentiel hydrique** et *D. sapinea*



Le *Sphaeropsis* des pins



Pour quoi il y a **donc une diminution de cas du Sphaeropsis** ces dernières années ?

Le *Sphaeropsis* des pins : perspectives d'étude

Pour quoi il y a **donc** une **diminution de cas** du *Sphaeropsis* ces derniers années ?

Host	<i>D. sapinea</i>	<i>D. scrobiculata</i>	No isolates	Cones
<i>P. halepensis</i> PACA	5	5	73	83
<i>P. sylvestris</i> PACA	8	2	73	83
<i>P. sylvestris</i> GE	12	0	40	40

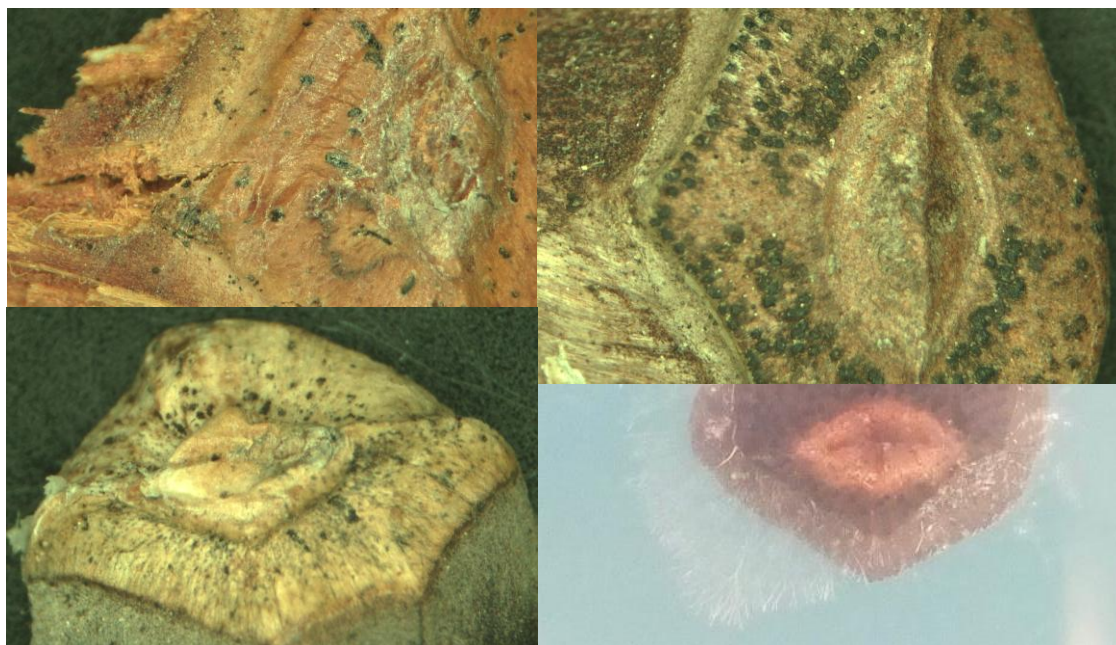
Fréquence basse d'isollements (15% de réussite)

Dans des cônes du Grand Est: **12 souches** de **40 cônes**, soit 30% de réussite)

Cette année, environ **30 souches** sur **120 cônes** (25% réussite) dans PACA

Dynamique temporelle de l'inoculum à surveiller

Présence de *D. scrobiculata* à surveiller



Le *Sphaeropsis* des pins : perspectives d'étude

- **Dynamique temporelle de l'inoculum de *D. sapinea*** sur les cônes, **variabilité** en fonction du climat, **impact sur l'épidémiologie** de la maladie
- Identification des **traits fonctionnelles de réponse à la sécheresse** de l'hôte qui ont un **impact sur le développement de la maladie : cavitation, accumulation de proline,...**?
- **Modélisation de l'impact** simultané de la sécheresse et l'infection par *D. sapinea*
- Étude des **traits fonctionnelles du microbiote** qui favorisent le développement de *D. sapinea*

La maladie de la suie

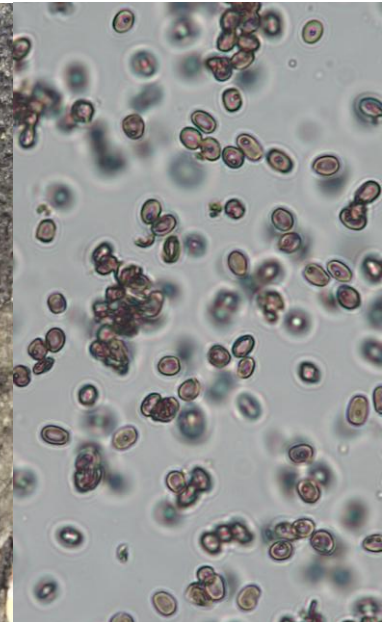
Cryptostroma corticale, pathogène **exotique** qui infecte les **tissus vasculaires** des érables



La maladie de la suie



- The preferential host is *Acer pseudoplatanus*
- **Present asymptotomatically** in host tissues
- The fungus **colonizes the cambium and phloem** of the tree
- Development linked to **hot summers** and **dry conditions**



La maladie de la suie

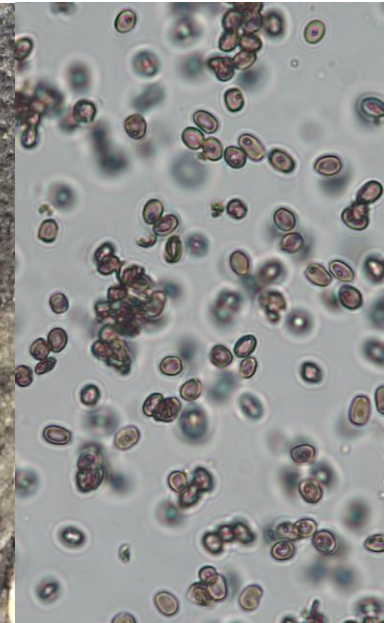


- **Early symptoms:** wilting of leaves, epicormic shoots, branch dieback → **too generic**

- **Late symptoms:** bark peeling off exposing the **black stroma** of the fungus with the spore mass → **too late**

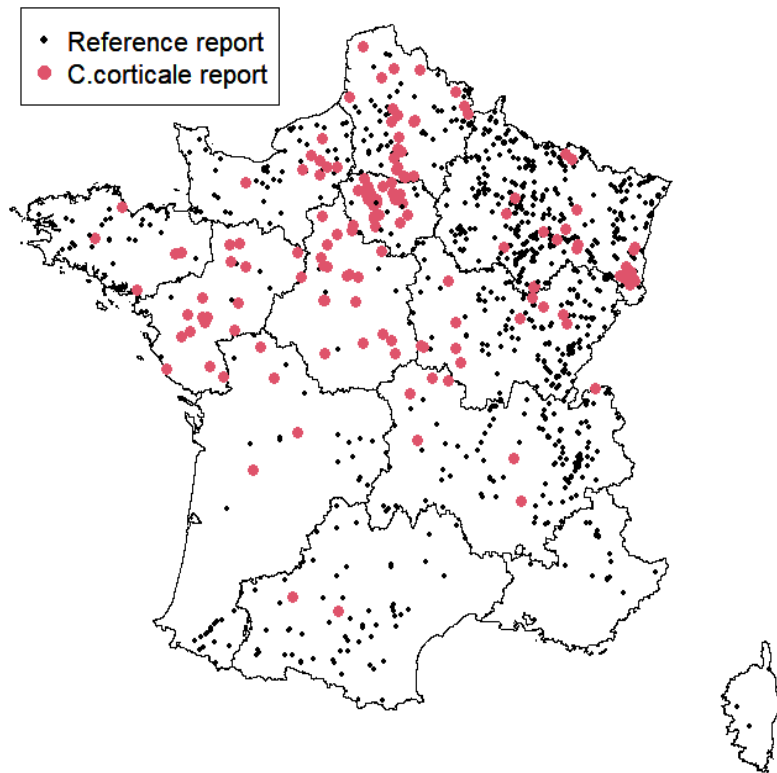


- **Airborne conidia**

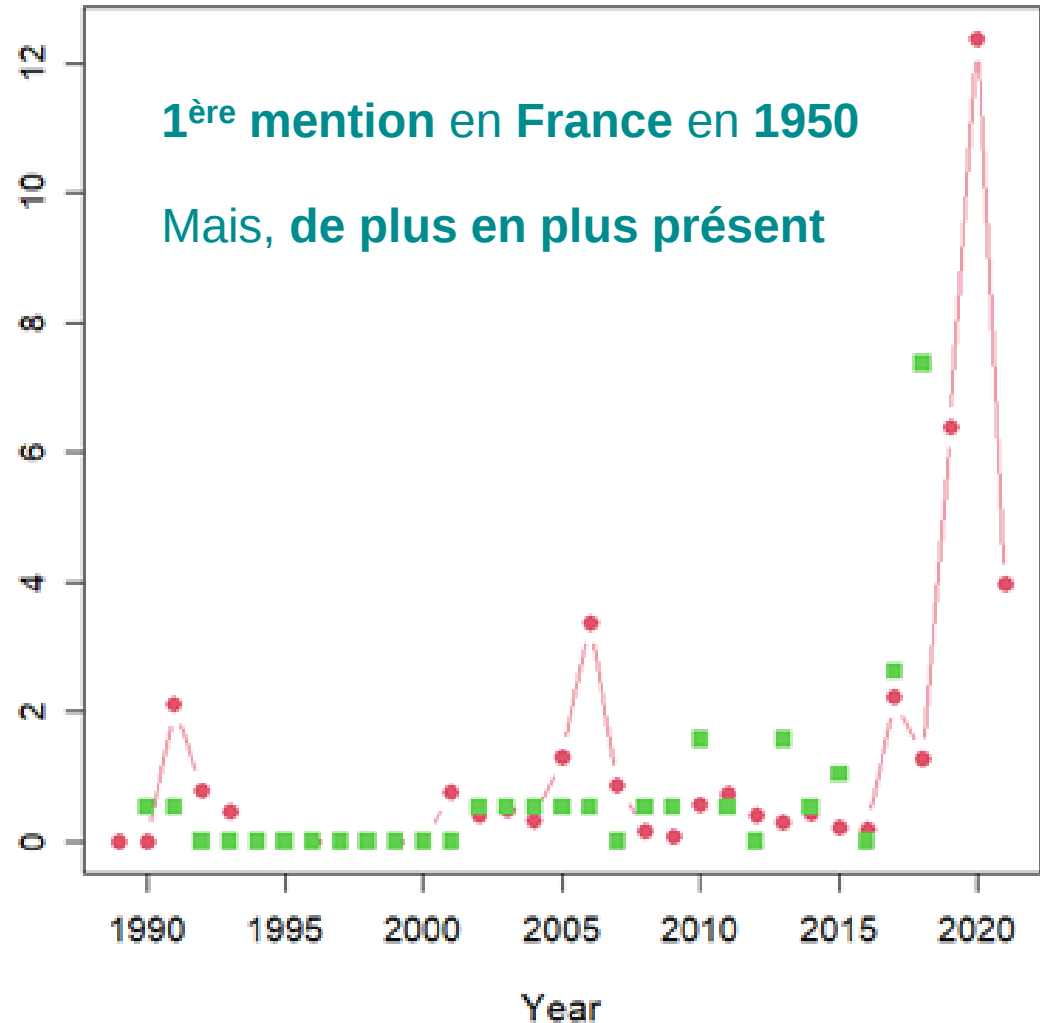


La maladie de la suie

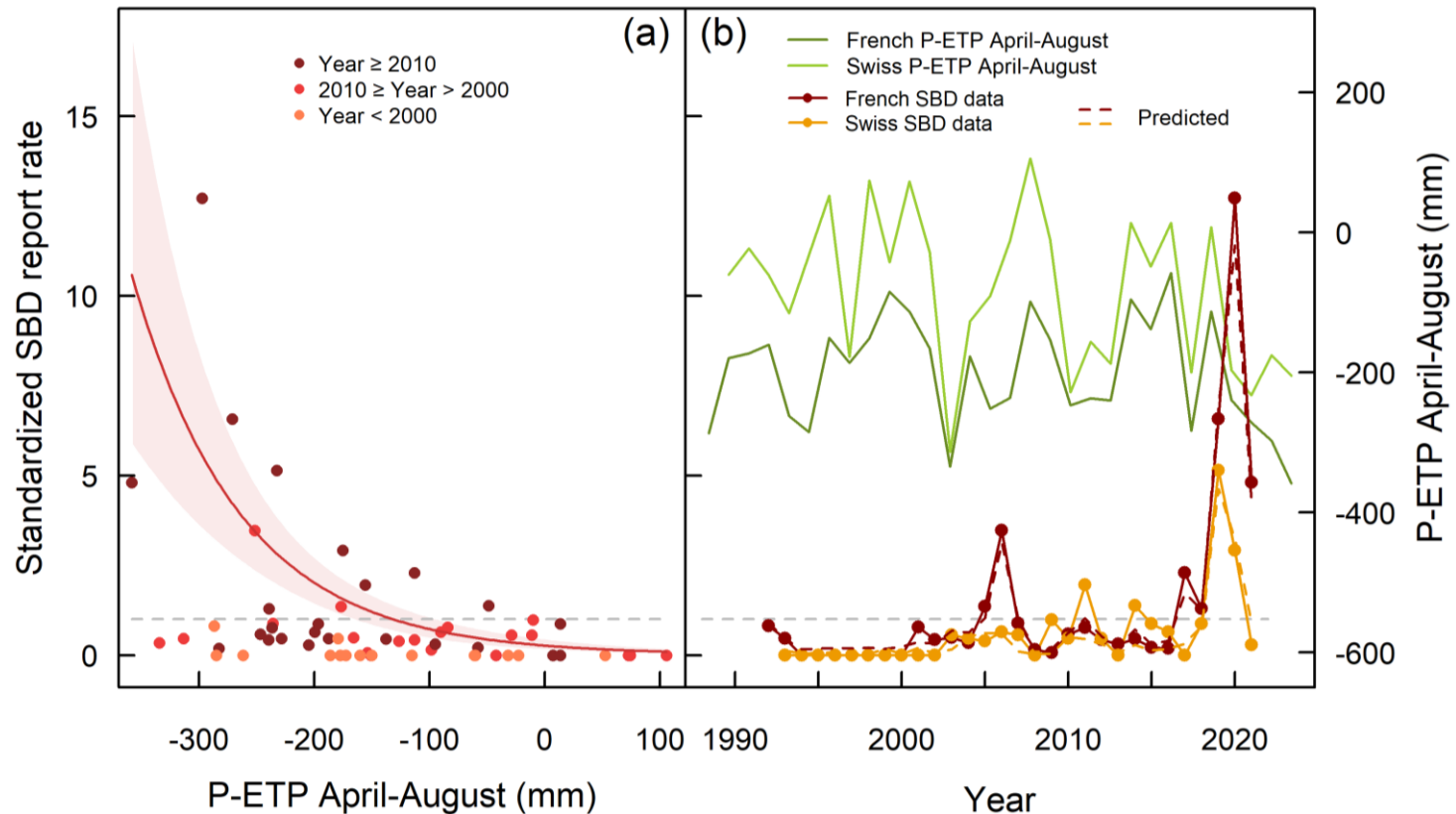
Cryptostroma corticale, pathogène **exotique** qui infecte les **tissus vasculaires** des érables



Mentions depuis 1989

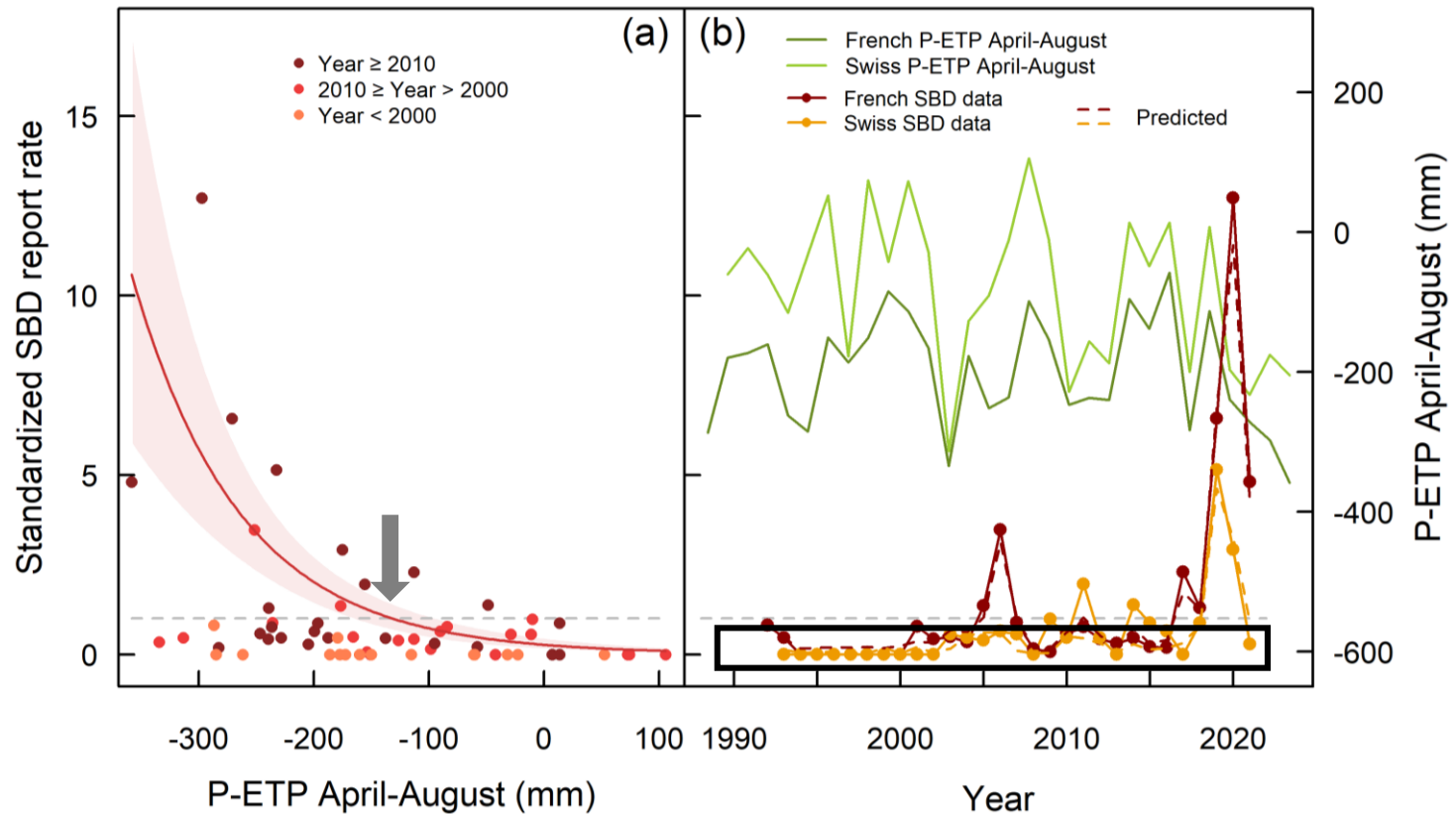


La maladie de la suie



Endophyte qui se développe suite à la **sécheresse** ou à des **épisodes caniculaires**

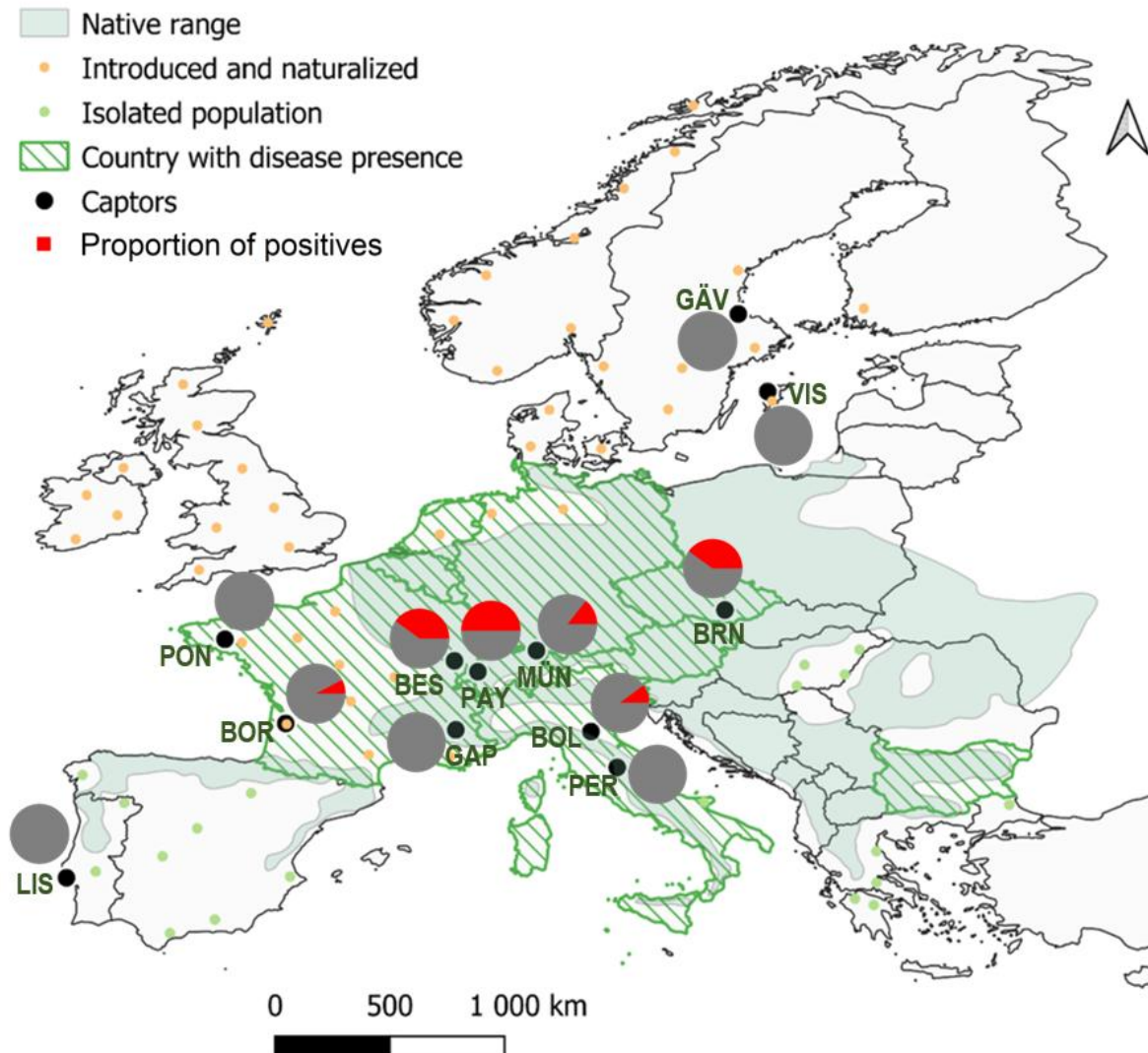
La maladie de la suie



Endophyte qui se développe suite à la **sécheresse** ou à des **épisodes caniculaires**

La maladie de la suie

Pathogène émergent en Europe, probablement favorisé par les canicules de plus en plus fréquentes



Conclusions

- **Evidence** que les **épisodes de sécheresse** vont devenir **plus fréquentes** en **Europe**, avec de la **mortalité des arbres associée**
- L'**impact de la sécheresse** sur les **maladies** forestières peut-être **positif** ou **négatif**
- L'interaction **positive sécheresse x pathogènes** est **habituelle**, plutôt sur les **pathogènes secondaires** qui infectent le bois
- Beaucoup des pathogènes secondaires sont **endophytes** qui sont déjà **présents** dans les **tissus asymptomatiques**
- Le **développement des pathogènes latents** suite aux **épisodes de stress biotique** semble **lié** à la **production de métabolites secondaires** et au **changement du microbiote**
- Quelques **maladies liées à la sécheresse** sont en **expansion en Europe**: le ***Sphaeropsis*** des pins, la **maladie de la suie**