



ECOLOGIE DES FORETS MEDITERRANEENNES

Le Ventoux

Laboratoire à ciel ouvert pour étudier la vulnérabilité et l'adaptation des forêts au changement climatique

HENDRIK DAVI (URFM)

EQUIPE: ECOLOGIE FONCTIONNELLE ET DYNAMIQUE
DES COMMUNAUTES

Plan

1. Contexte
2. Climat
3. Modélisation
4. Stress hydrique
5. Phénologie
6. Croissance
7. Mortalité
8. Reproduction
9. Evolution génétique

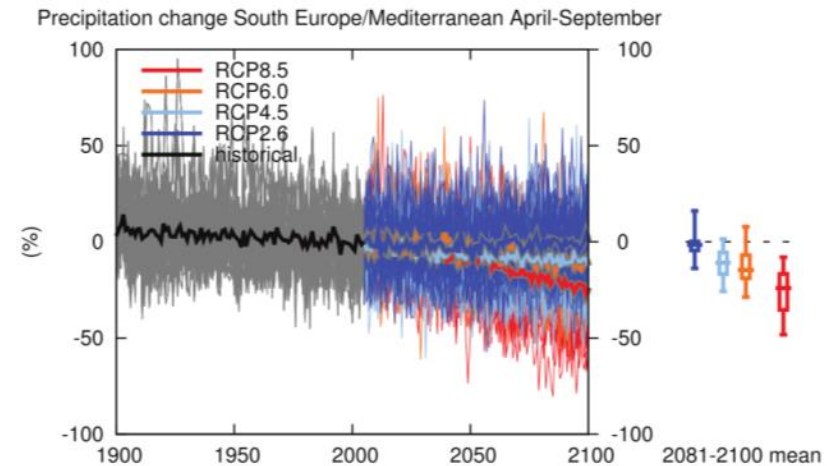
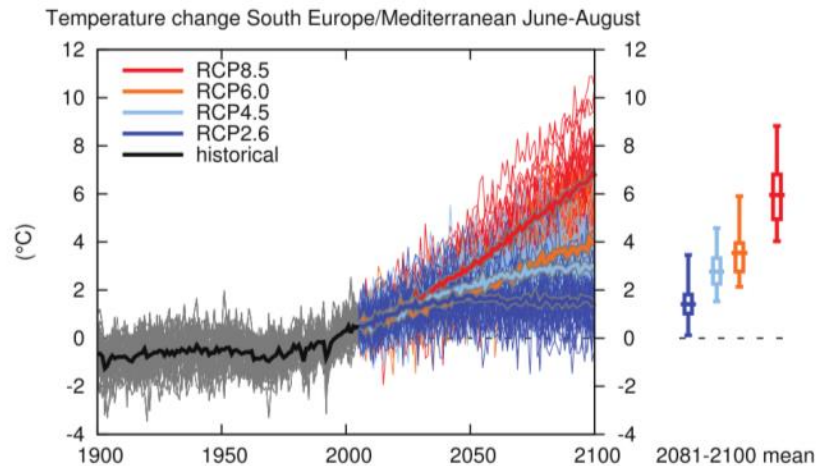


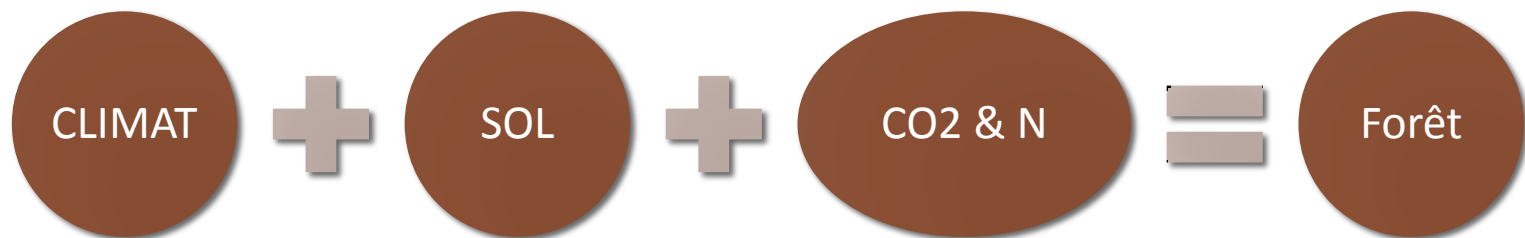
PASSE

- ↗ 0.88°C depuis 1860
- ↘ 23 mm depuis 1902
- ↗ fortes sécheresses depuis 500 ans

FUTUR

- ↗ de températures estivales de 1 à 9°C
- ↘ de précipitations estivales de 0 à 25%

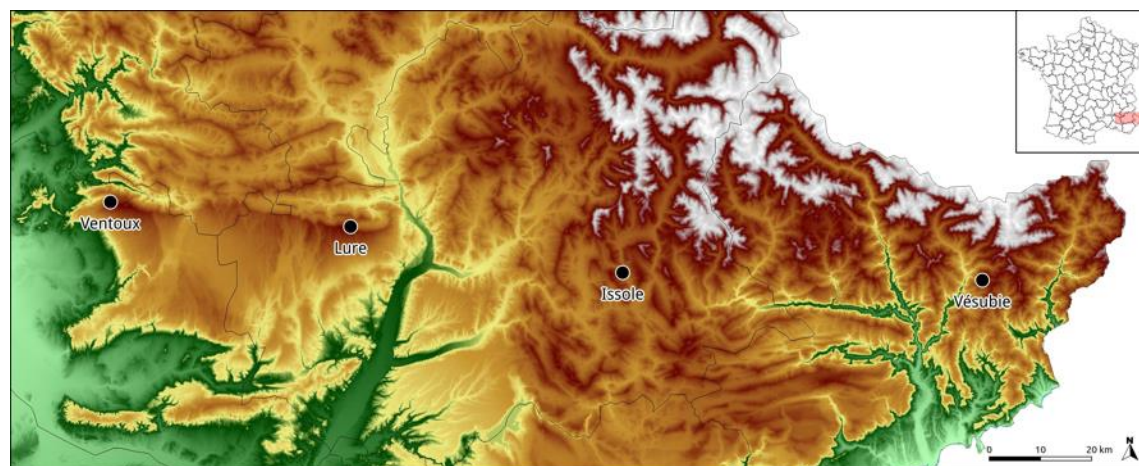
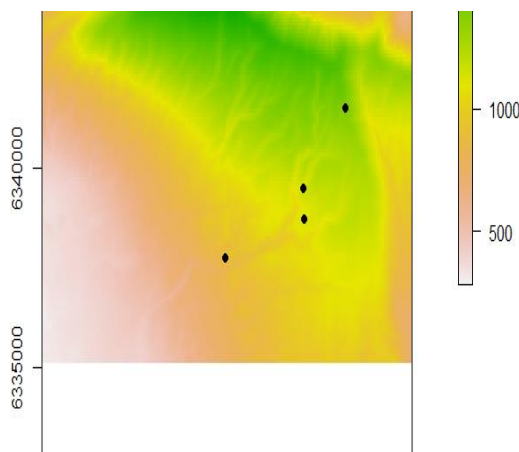




FACTEURS	Risques	Bénéfices
CLIMAT		
↗ températures estivales	↗ stress hydrique	
↘ précipitations estivales	↗ dépérissements, ↗ incendies	
↗ températures printanières	gel tardif	↗ durée de végétation
↗ températures hivernales	dormance	↗ Photosynthèse hivernale
↗ fortes précipitations hiver et printemps	érosion chutes d'arbres	↗ eau des nappes
AUTRES FACTEURS DU CHANGEMENT GLOBAL		
Dépôts azotés		↗ productivité
Hausse du CO ₂		↗ productivité
Déforestation	↗ érosion des sols	
Déprise agricole		↗ surface forestière
Ongulés et pathogènes	↗ dégâts régénération	

Comment estimer l'impact des changements climatiques sur les forêts?

1. Séries temporelles: le passé pour comprendre le présent et anticiper l'avenir
2. Les variations spatiales mimant le changement climatique: gradient en latitude et altitude
3. La modélisation



Les données climatiques sur le Mont Ventoux



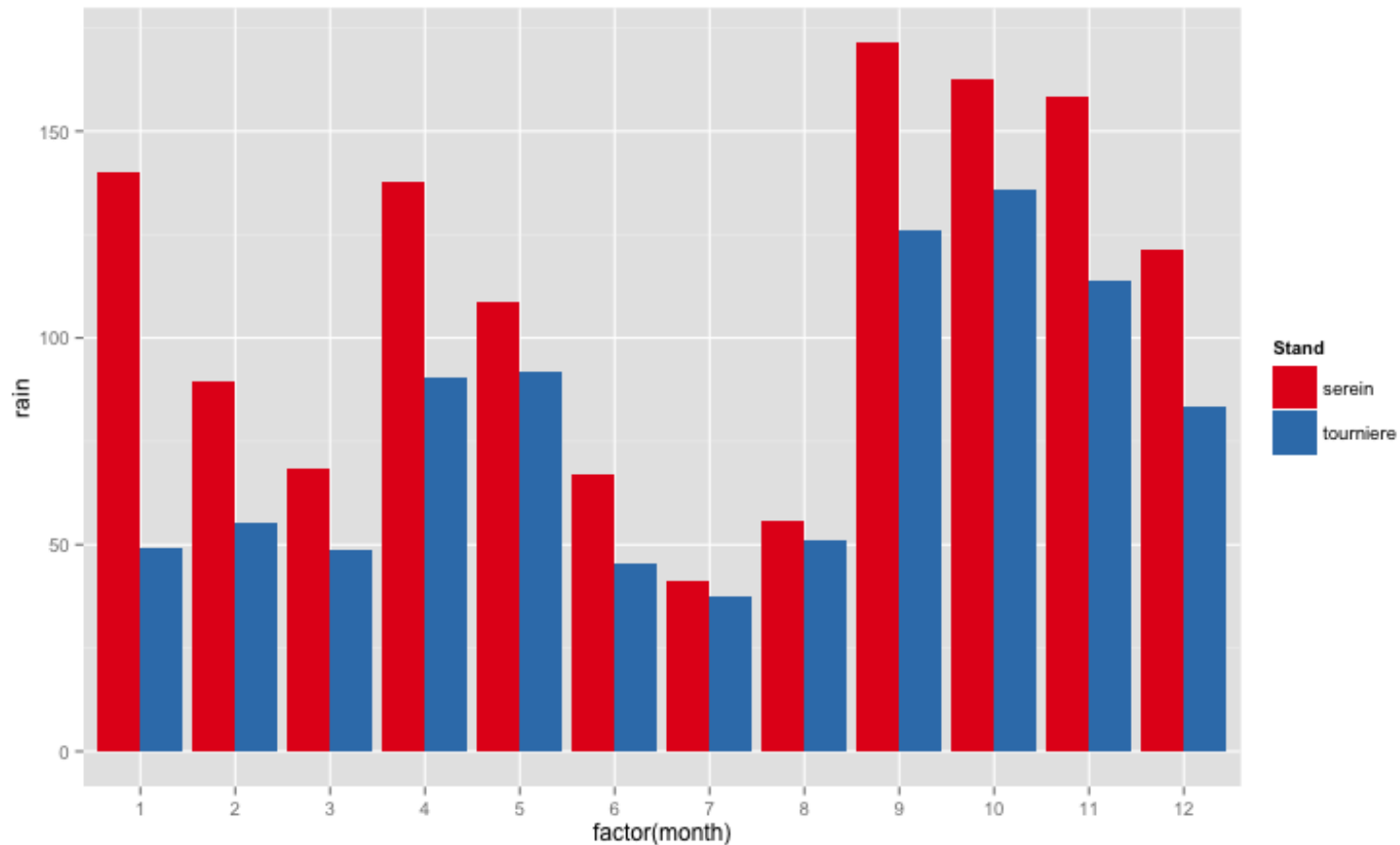
1. Qualifier les gradients altitudinaux
2. Obtenir des séries passées sur le long terme
3. Modéliser un climat équivalent (200-300 ans)



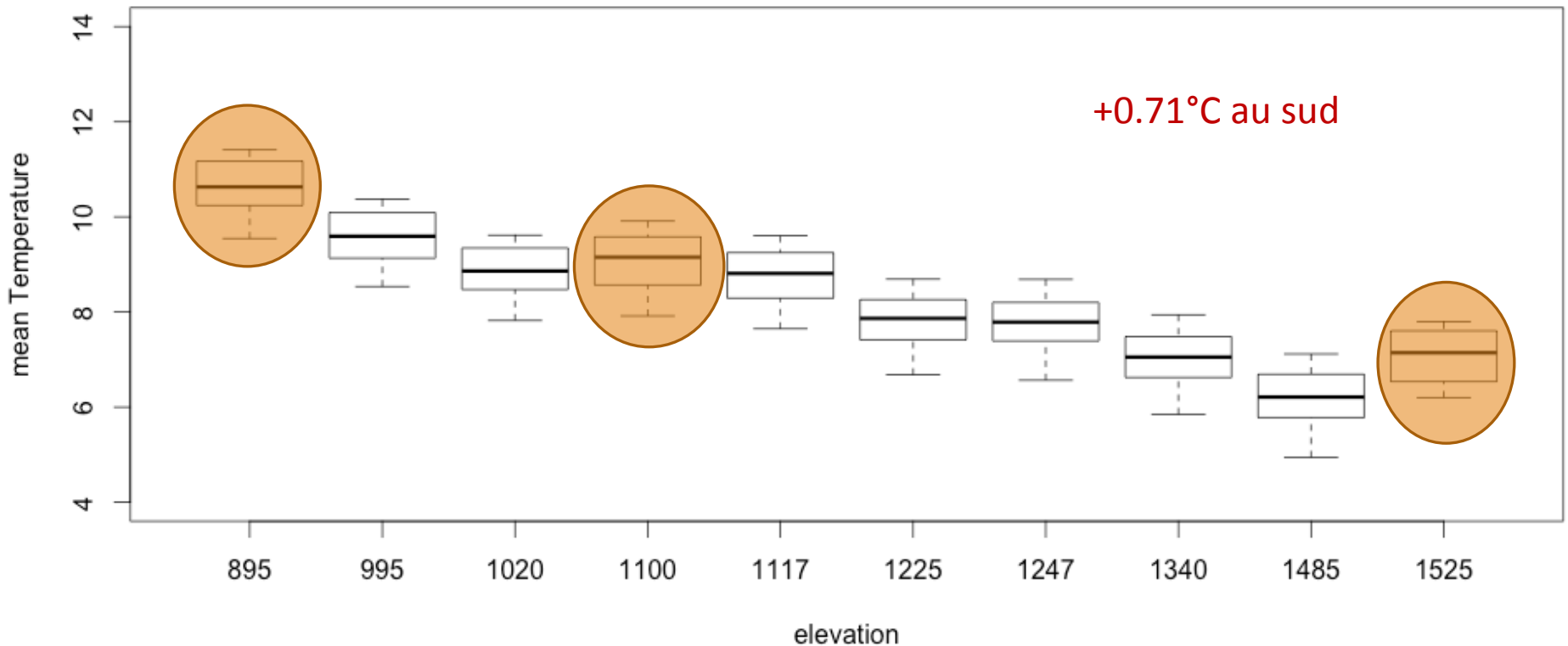
Les données climatiques sur le Mont Ventoux

- 1. Des stations micro météorologiques depuis 2007** (hobo prosensor) mesurant toutes les heures, la température (T, °C), l'humidité relative (RH, %) et les pluies. 7 se situent le long d'un gradient altitudinal sur le versant Nord, 4 le long d'un transect en courbe de niveau, 3 le long d'un gradient altitudinal sur le versant sud.
- 2. 2 stations météorologiques plus complètes** (Rg, T, RH, Vent) aux Tournières (Ventoux Sud entre 2000 et 2007) et une station Ventoux Nord (depuis 2014-). Les stations météoFrance et les données SAFRAN (1959-2013)
- 3. Un générateur de climat** développé par Denis Allard (WACS generator)

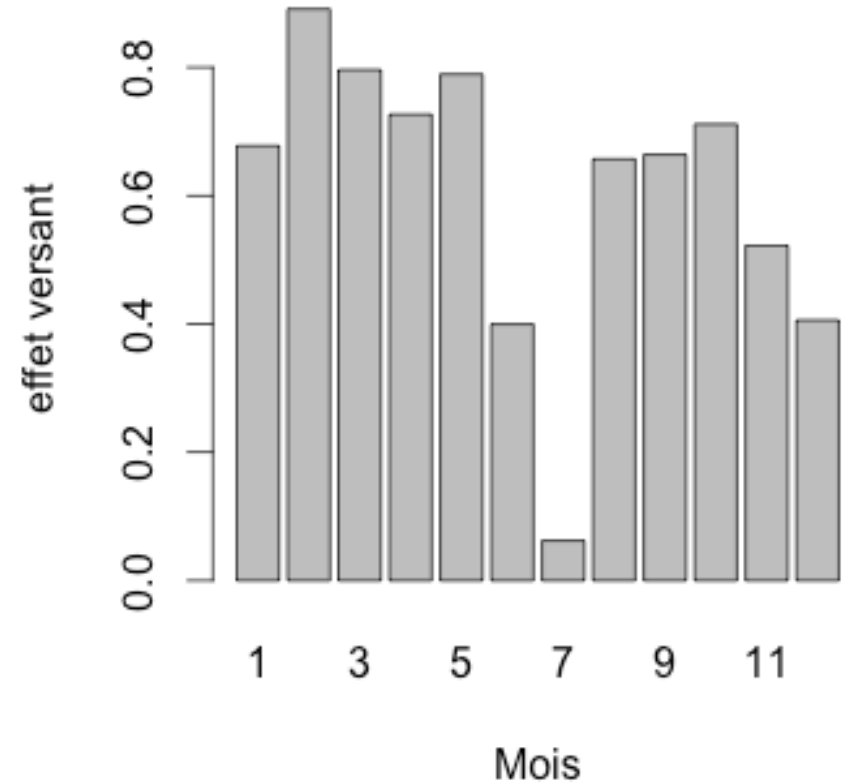
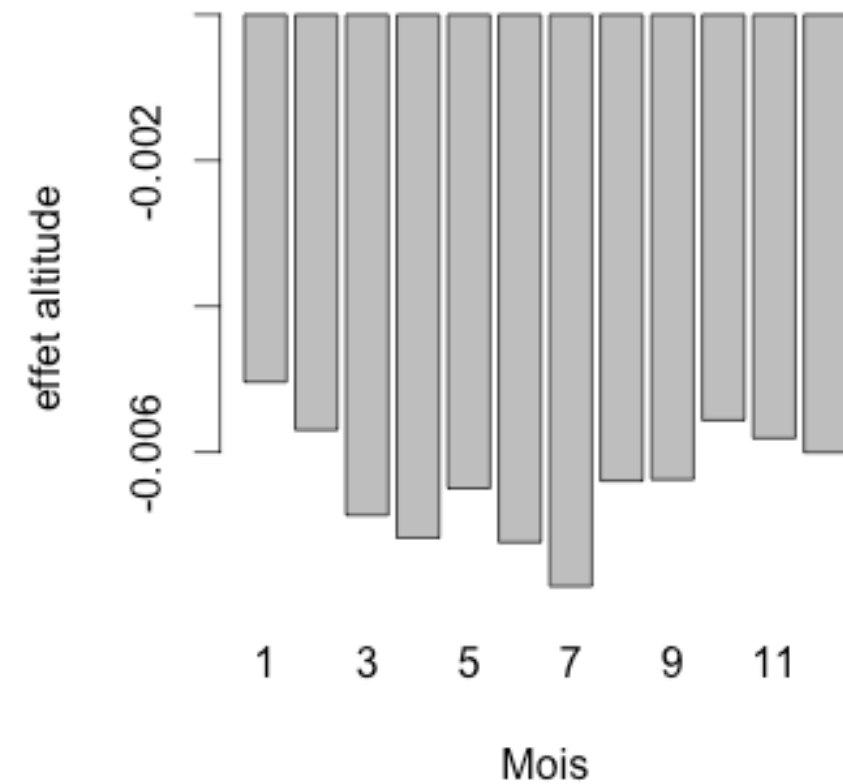
Le régimes des pluies à deux altitudes 1500 m versant Nord, 1100m versant sud



Effet de l'altitude sur la température



Effet de l'altitude et du versant sur la température



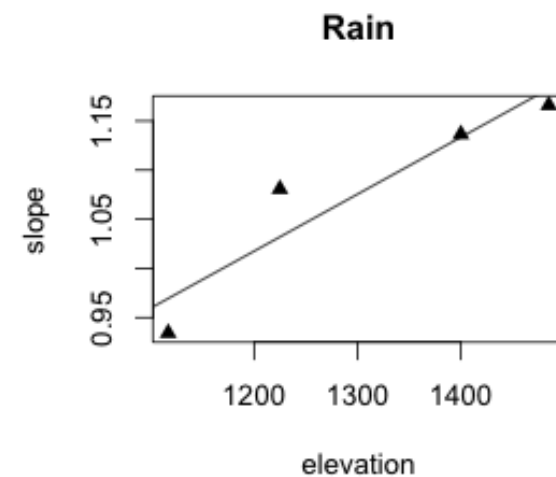
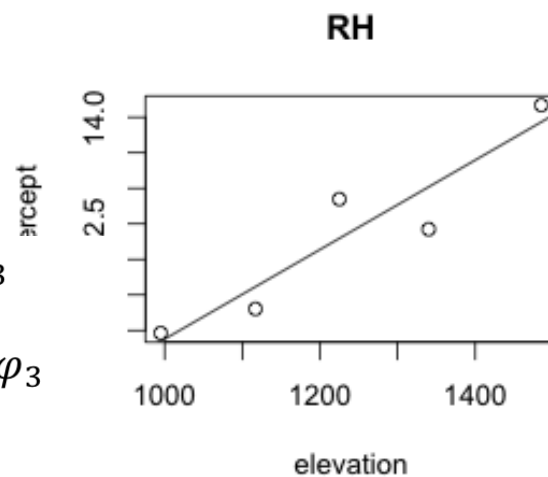
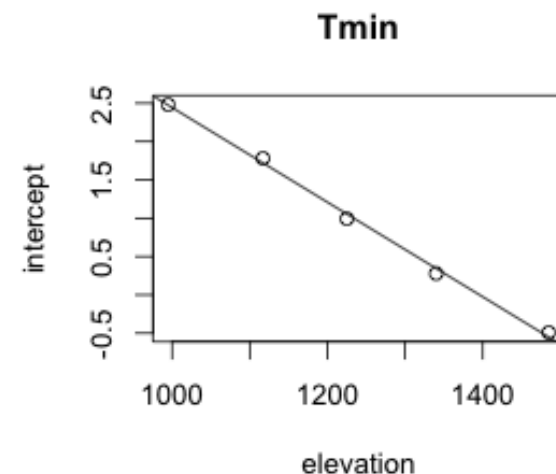
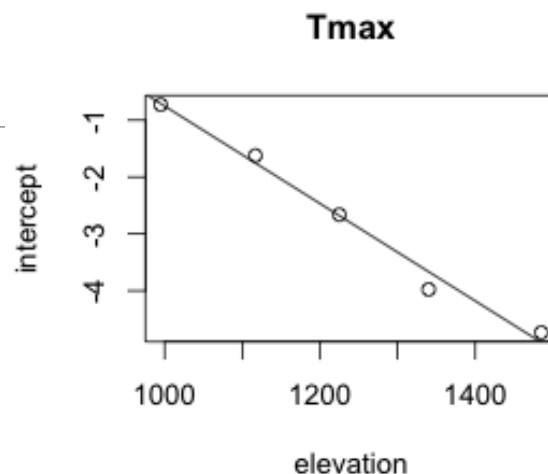
Relation climat-altitude

Tmax : 0.857°C/100m

Tmin: 0.617°C/100m

RH: 0.6%/100m

Pluie: 25mm/100m



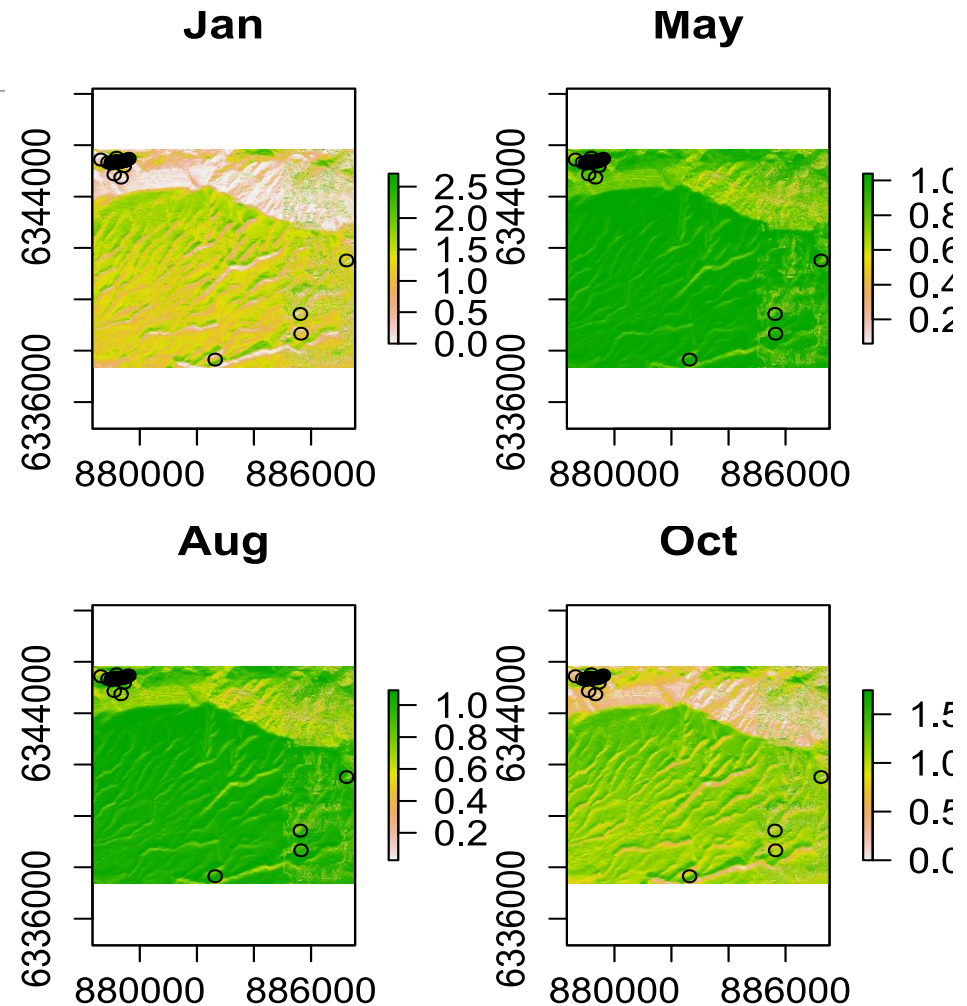
$$T(z) = \varphi_1 T_{SAFRAN} + \varphi_2 z + \varphi_3$$

$$RH(z) = \varphi_1 RH_{SAFRAN} + \varphi_2 z + \varphi_3$$

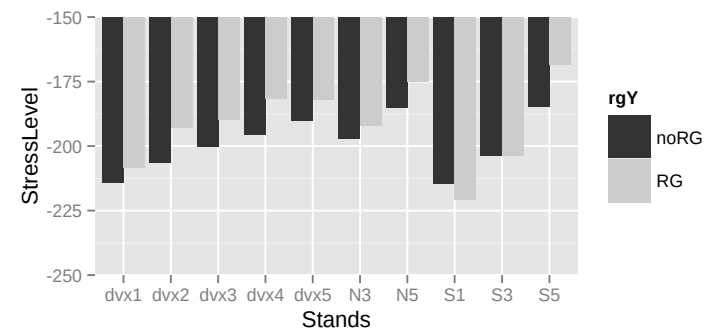
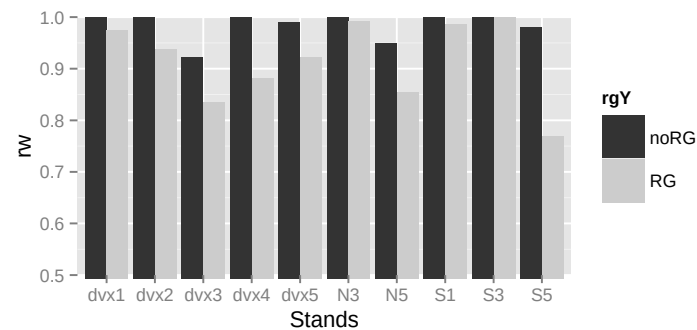
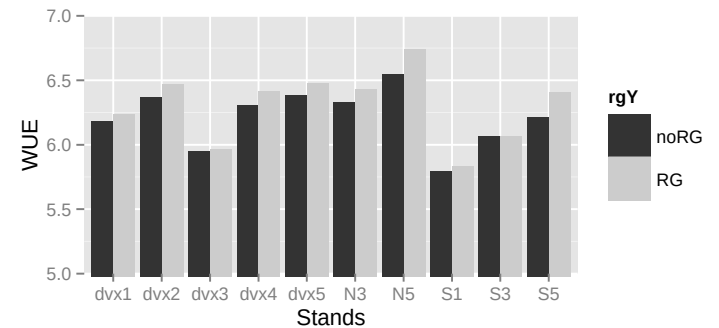
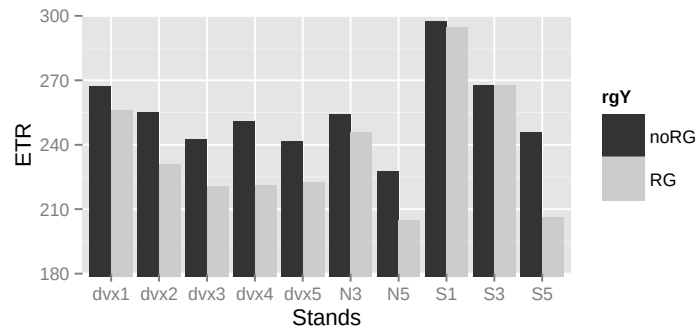
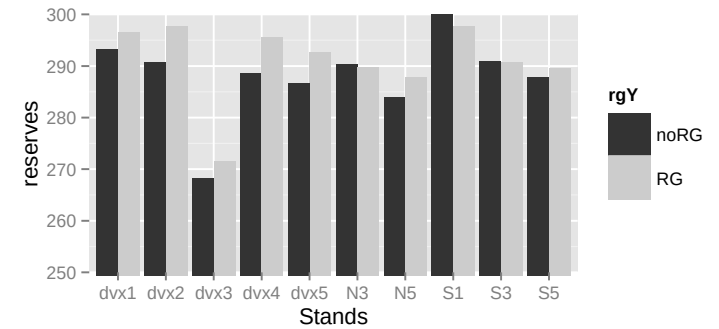
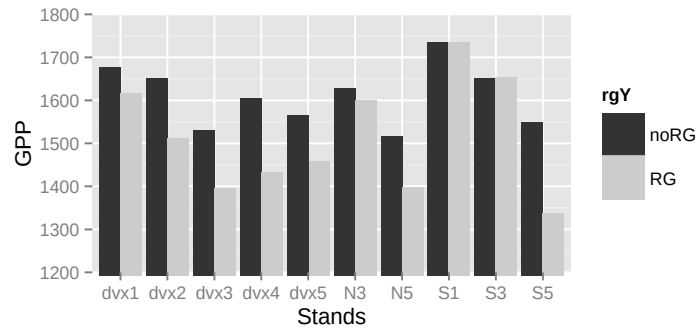
$$P(z) = (\psi_1 + \psi_2 z) P_{SAFRAN}$$

Effet du relief sur le climat

Calcul mois par mois du rayonnement global à partir du MNT (Nicolas Martin & Julien Ruffault)

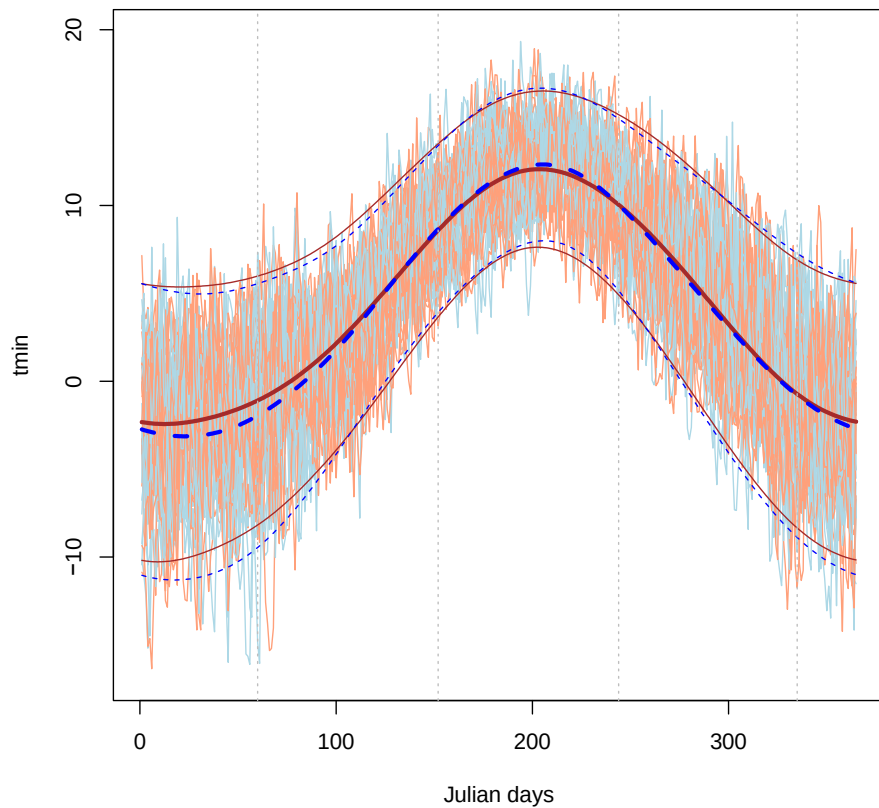


Effet du relief sur le climat

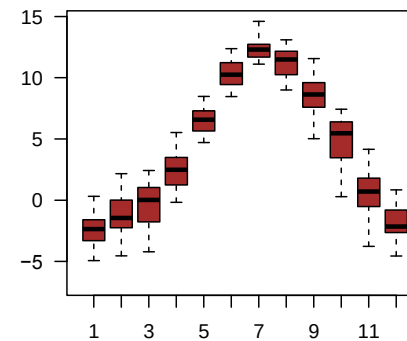


Générateur statistique de climat (Denis Allard BioSp)

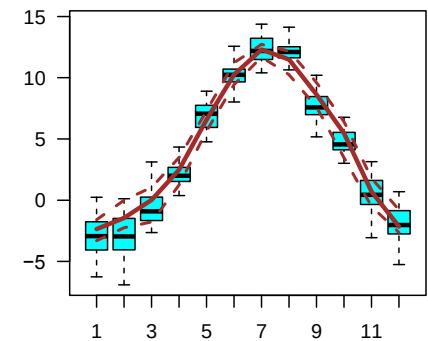
Observed 1 (brown) and Observed 2 (blue) tmin



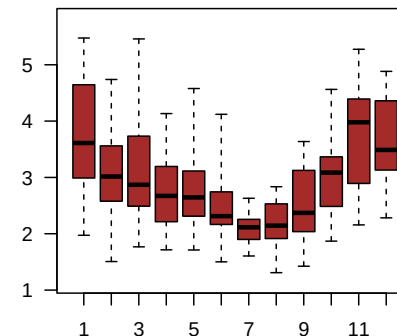
Observed 1 mean, tmin



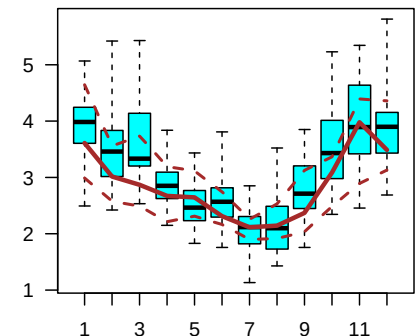
Observed 2 mean, tmin



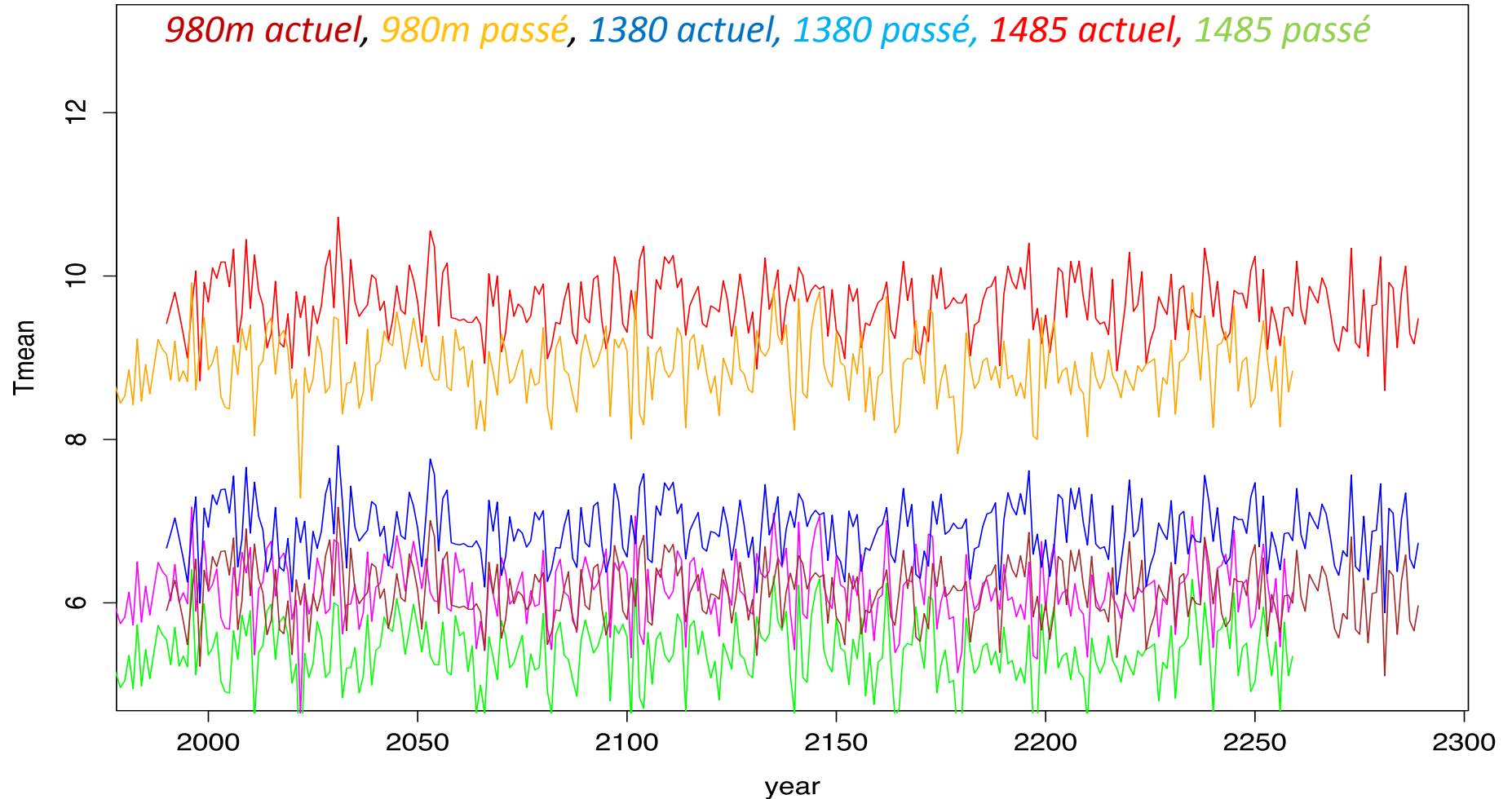
Observed 1 sd, tmin



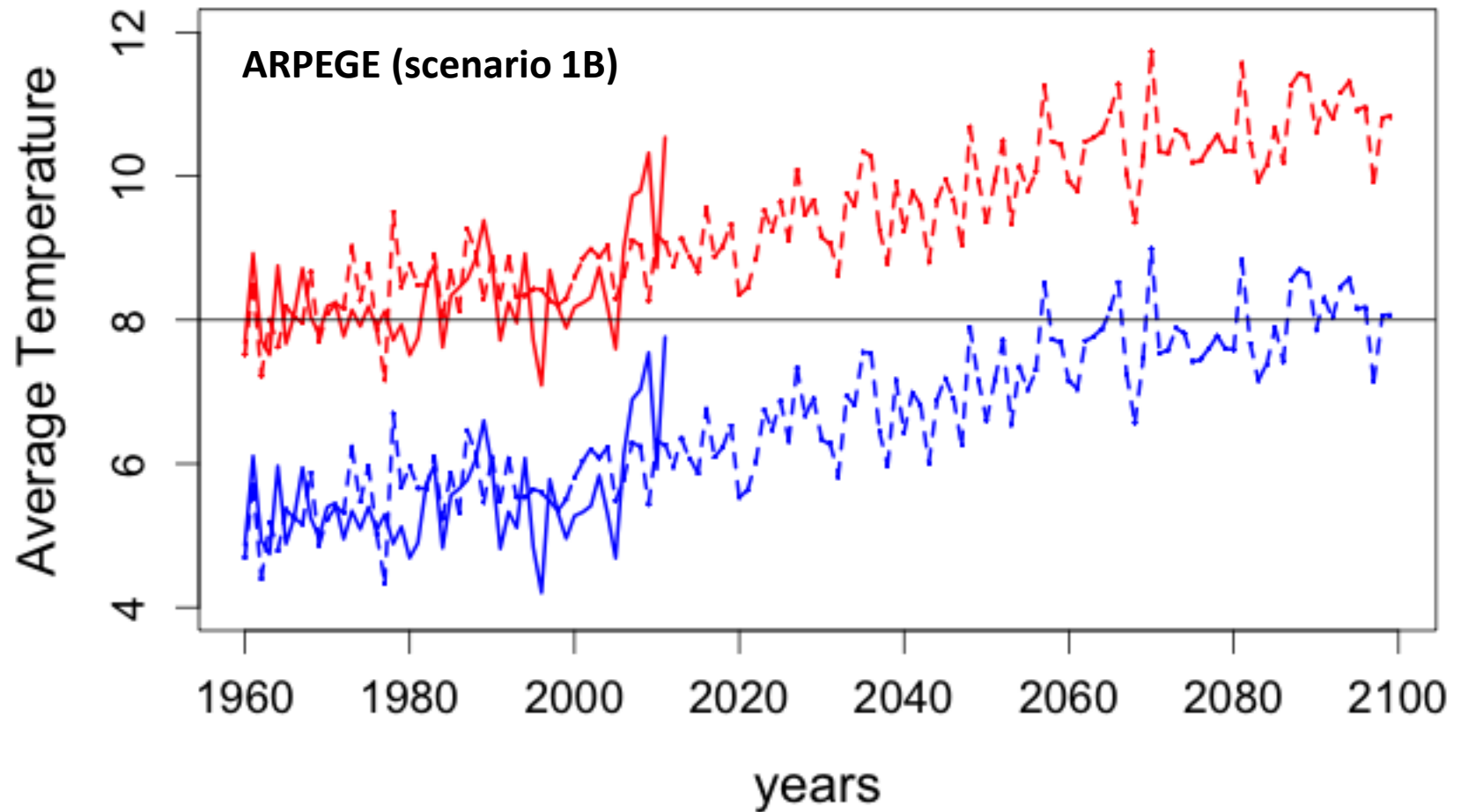
Observed 2 sd, tmin



Générateur statistique de climat (Denis Allard BioSp)



Future Climate



LOW: 950m

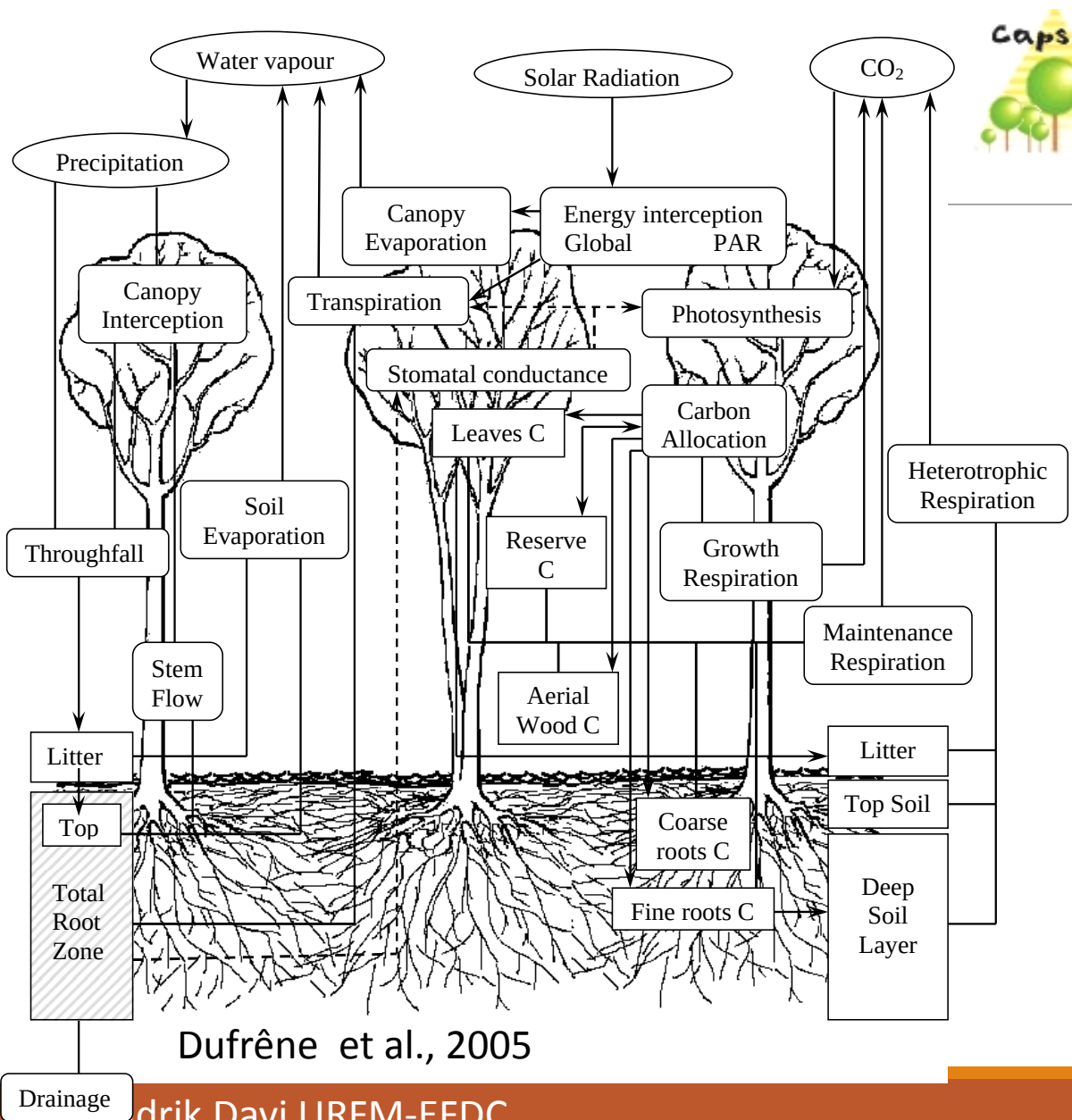
HIGH: 1350m

ELEVATIONS

Modélisation: modèle CASTANEA

Water Balance Model

Carbon Balance Model



Dufrêne et al., 2005



Photosynthèse

Farquhar et Ball & Berry

Respiration des feuilles

Q10, Azote, Biomasse

Respiration du bois

Q10, Azote, Bois vivany

Interception de l'eau

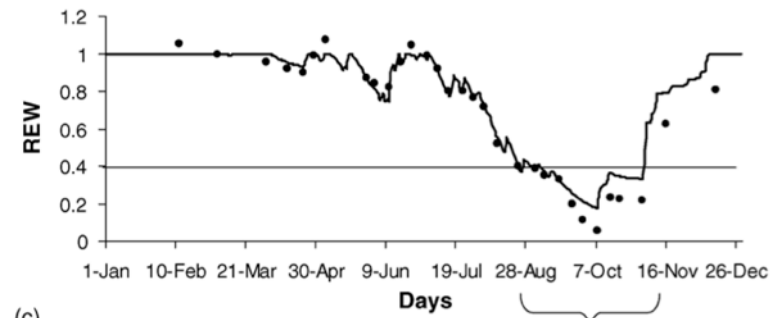
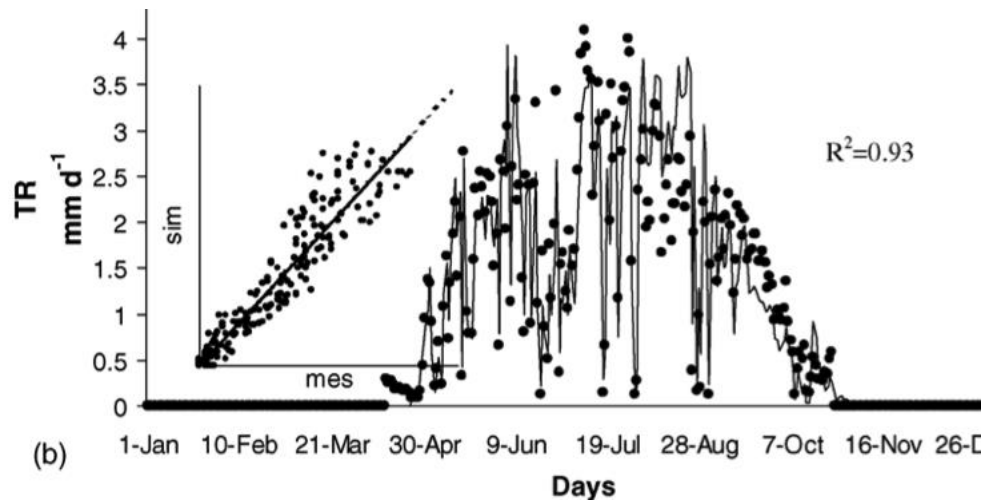
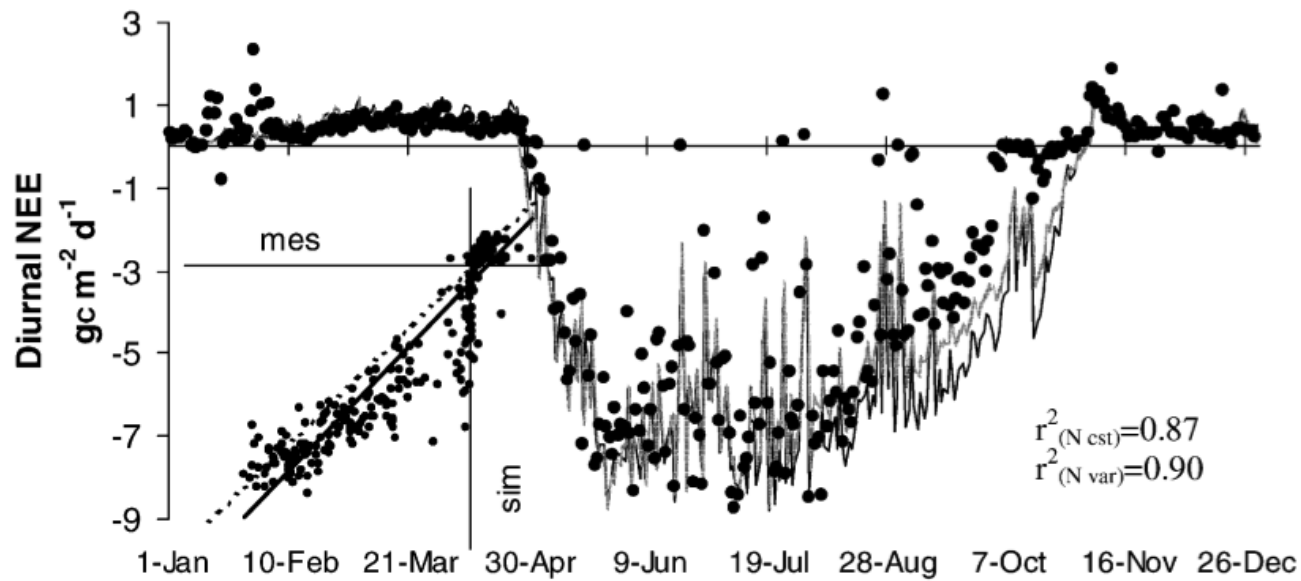
LAI, agregation, réserve des feuilles

Transpiration

Penman Monteith

Modélisation: modèle CASTANEA

Davi et al. 2005

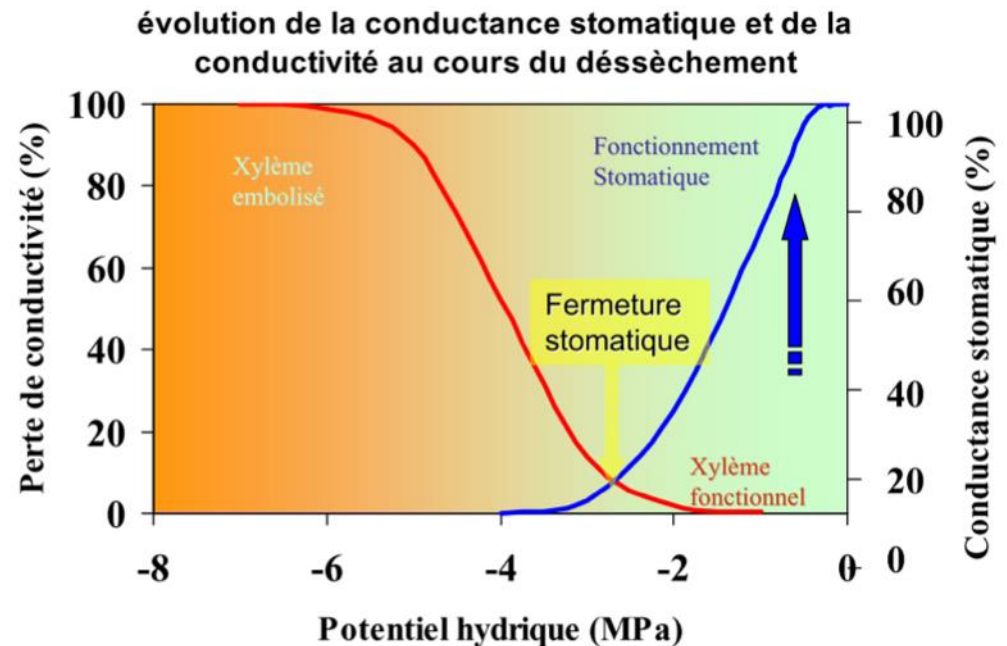


Les termes du bilan hydrique

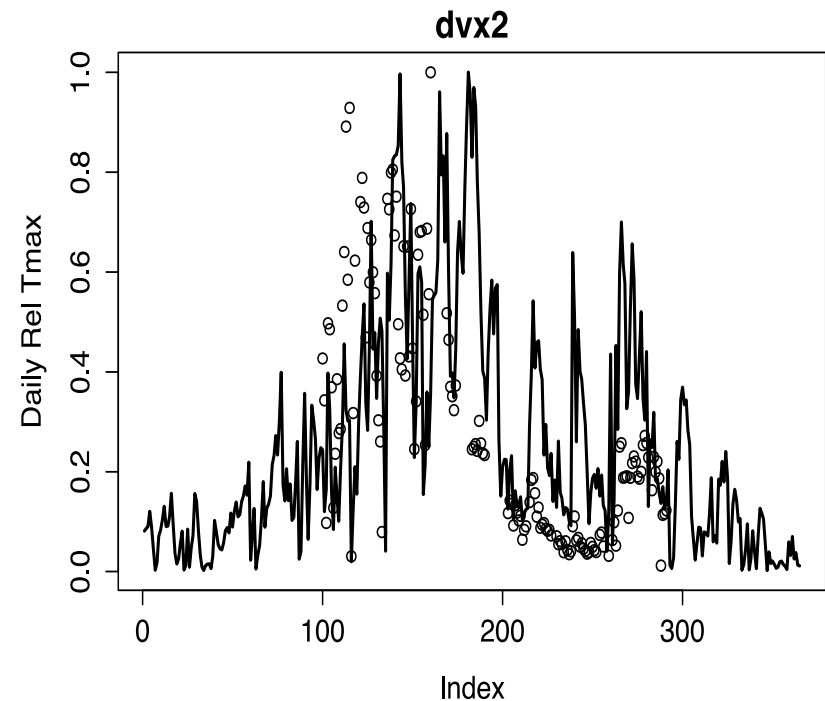
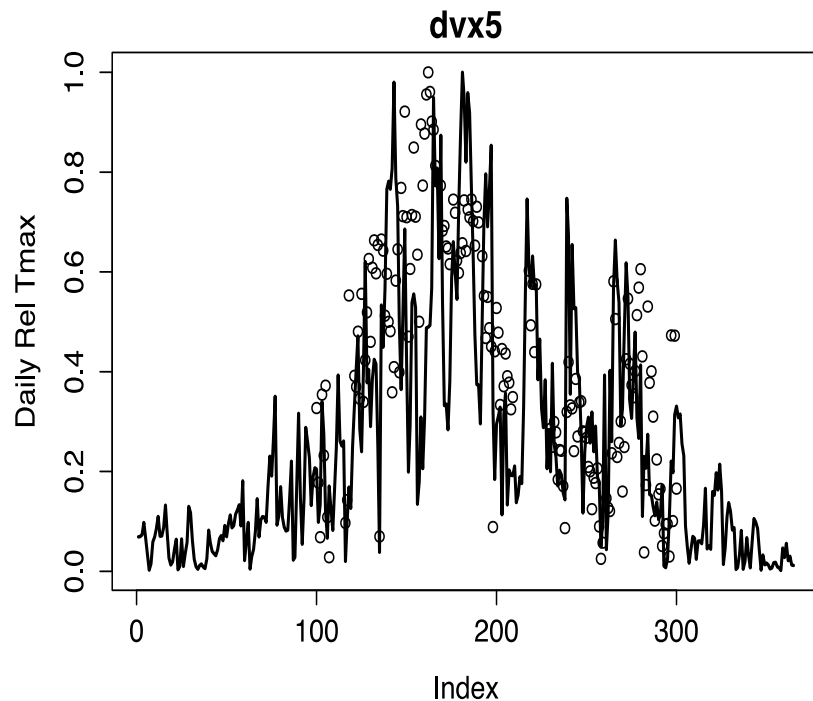
	Définition	Dépend
Psol	Pluies arrivant directement au sol	LAI, Pluies
Egt	Egouttement des feuilles	LAI, rétention en eau des feuilles, ETP après pluie
Ec	Ecoulement le long du tronc	Texture du tronc
Ev	Evaporation du feuillage après pluie	Demande evaporative au niveau des feuilles , rétention en eau des feuilles
TR	Transpiration de l'arbre	Demande evaporative au niveau des feuilles, conductance stomatique
Ev(sol)	Evaporation du sol	Demande evaporative au niveau du sol, contenu en eau du sol
DR	Drainage verticale	Réserve utile du sol, macroporosité, contenu en eau du sol
EI	Ecoulement latéraux	Pente, rugosité du sol

Quelles questions?

1. Quels sont les déterminants de la transpiration?
2. Comment varie le stress hydrique au cours de la saison?
3. Est ce que les arbres sont soumis à de l'embolie du xylème?
4. Jusqu'où les arbres puisent de l'eau?

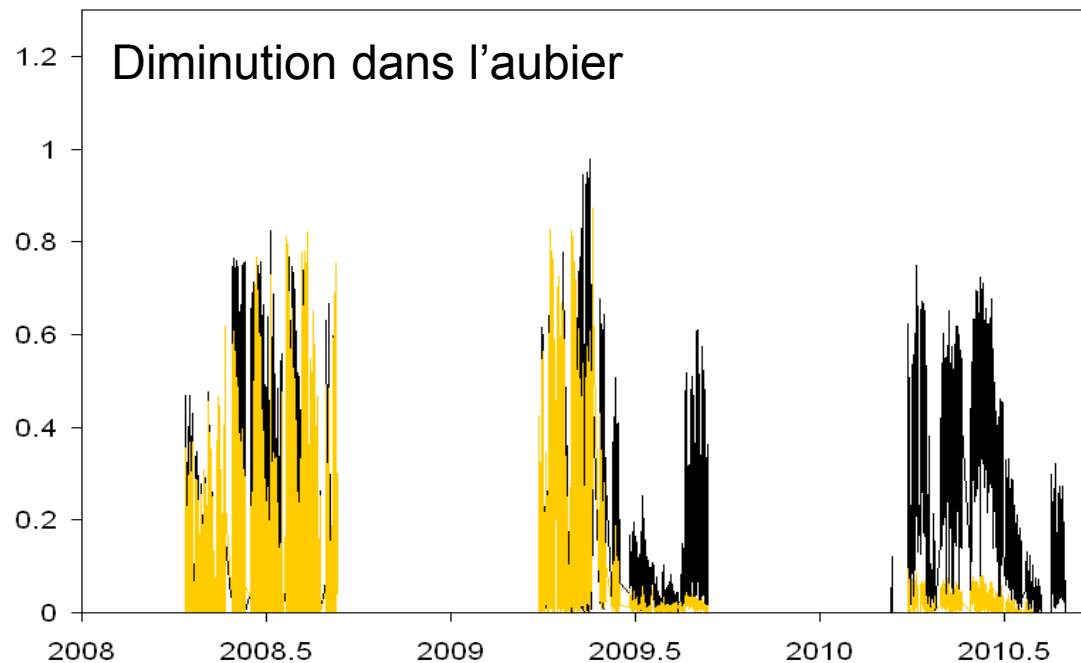


La transpiration: Thèse de M. Nourtier, collaboration EMMAH



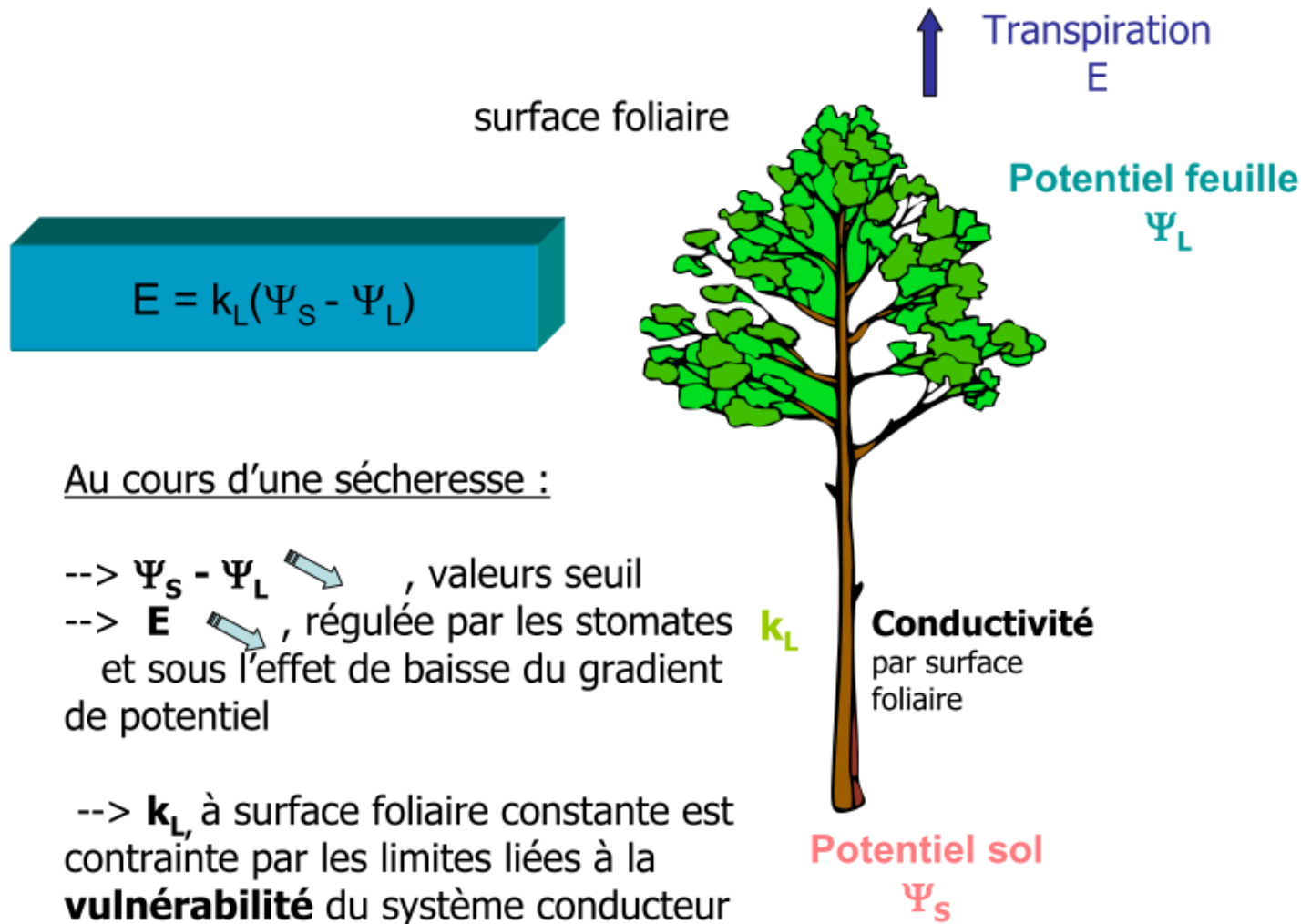
Transpiration $\searrow$ avec le VPD et la sécheresse du sol
Arrière effet de la sécheresse sur la transpiration des années suivantes

La transpiration: Thèse de M. Nourtier, collaboration EMMAH



Transpiration $\searrow$ avec le VPD et la sécheresse du sol
Arrière effet de la sécheresse sur la transpiration des années suivantes

Le fonctionnement hydraulique

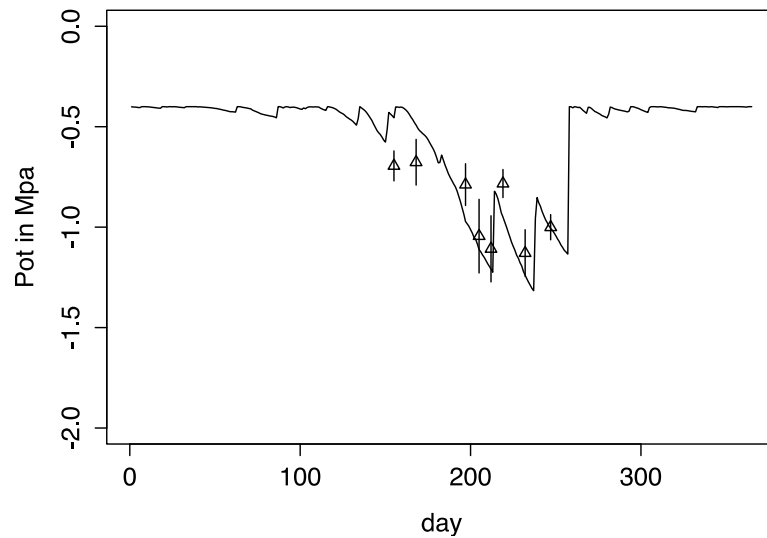


Le potentiel hydrique

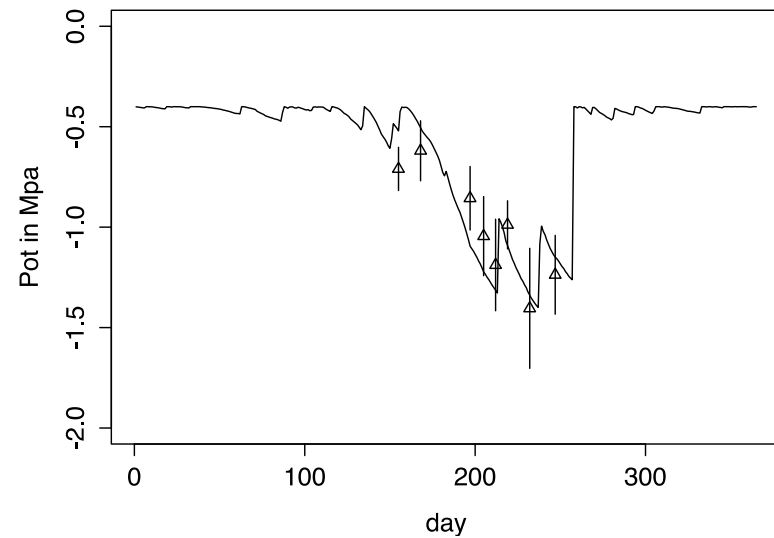


Le potentiel hydrique

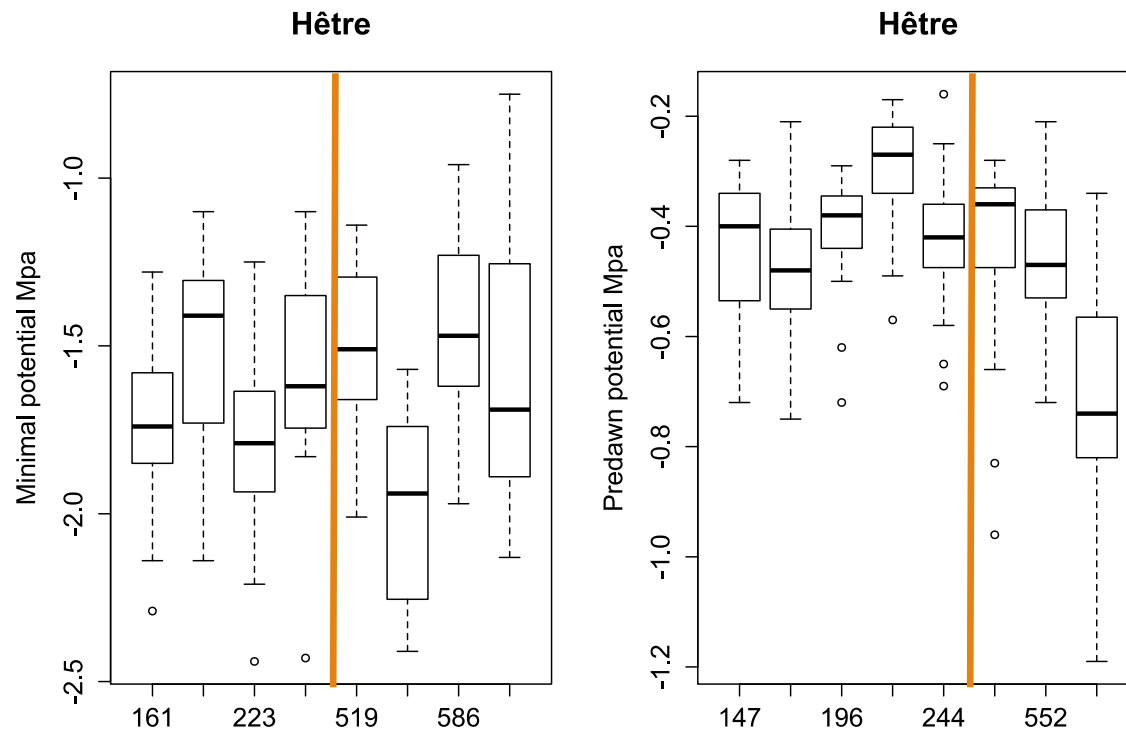
Dvx5



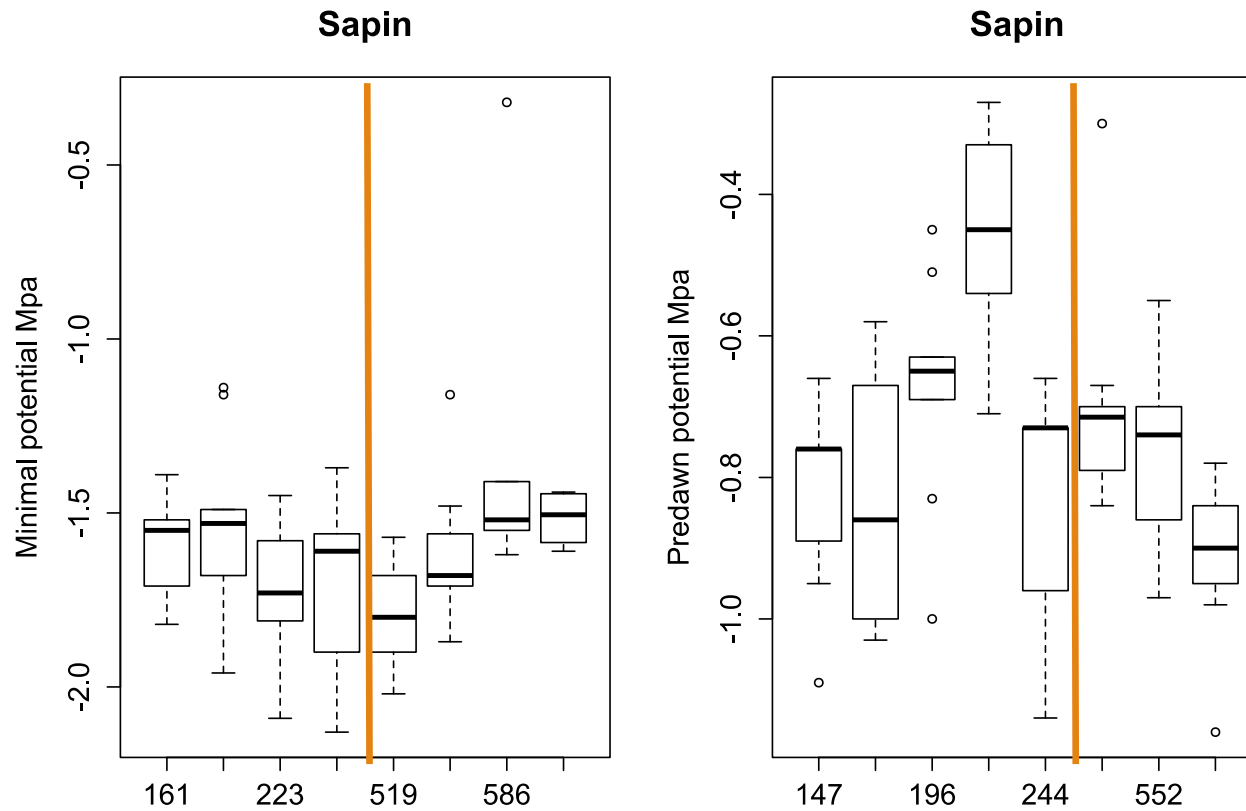
Dvx2



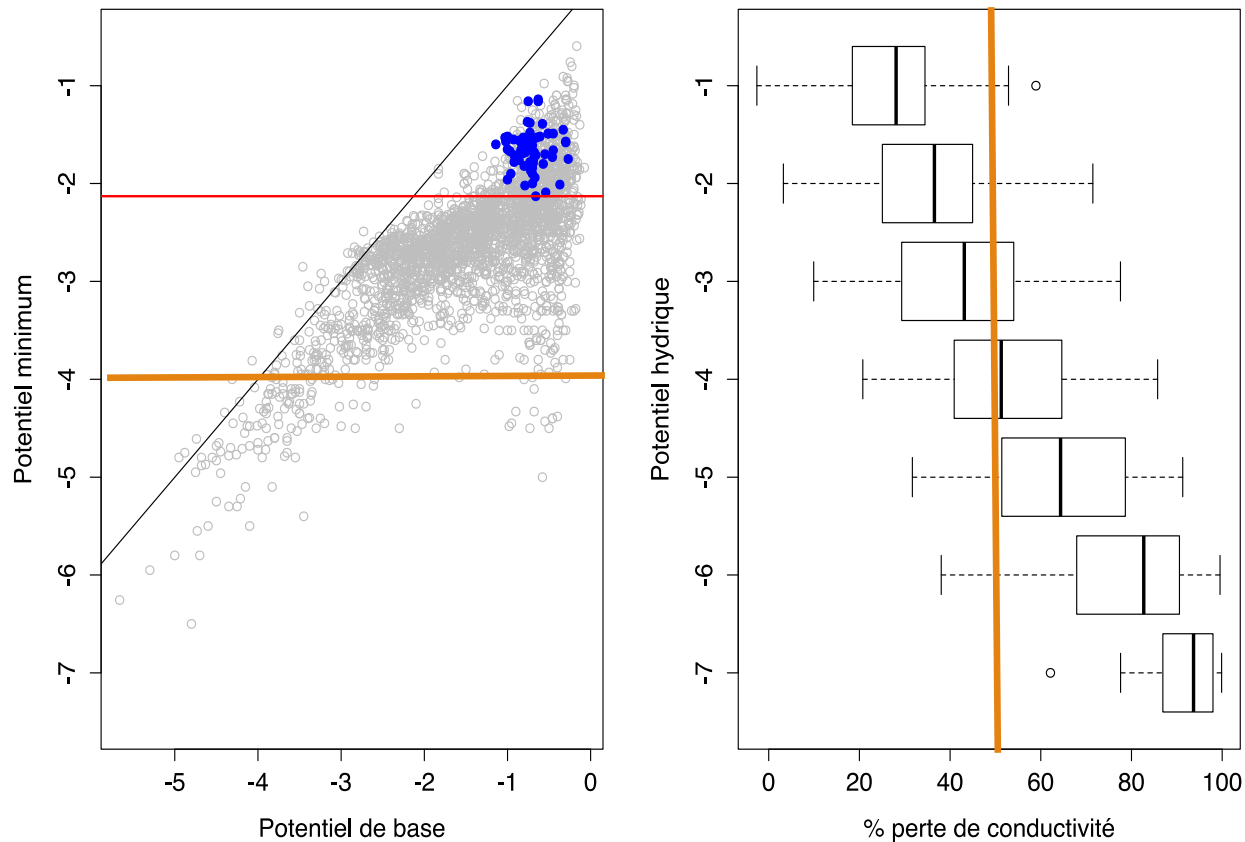
Le potentiel hydrique 2014-2015 Hêtre



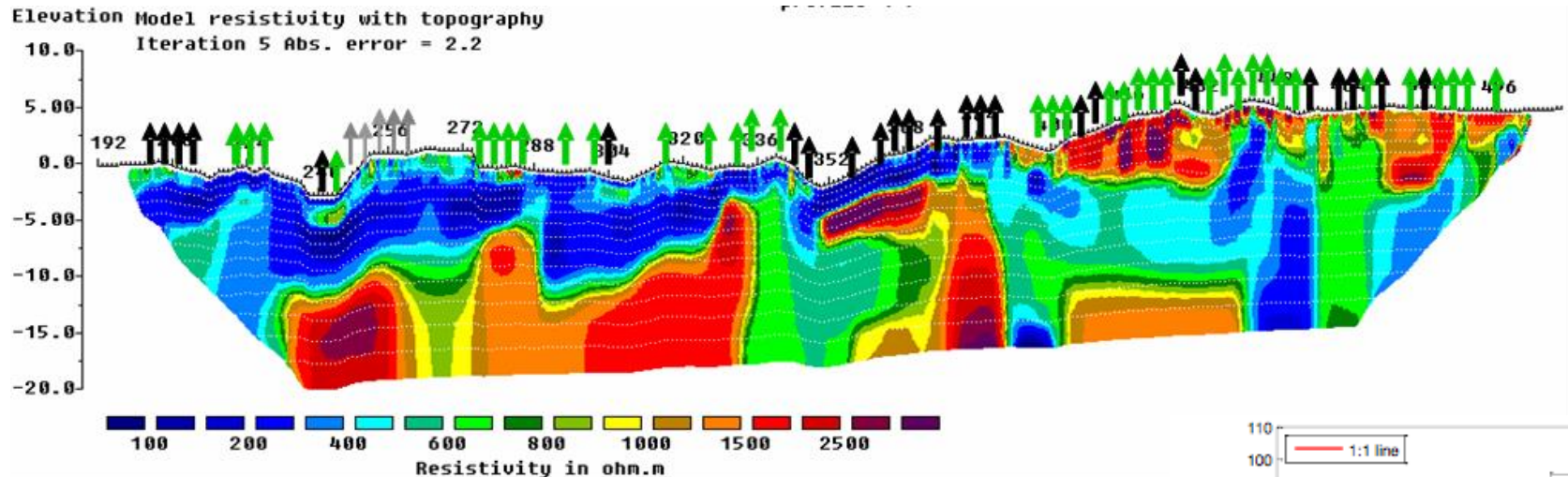
Le potentiel hydrique 2014-2015 Sapin



Le potentiel hydrique: espèce isohydrique

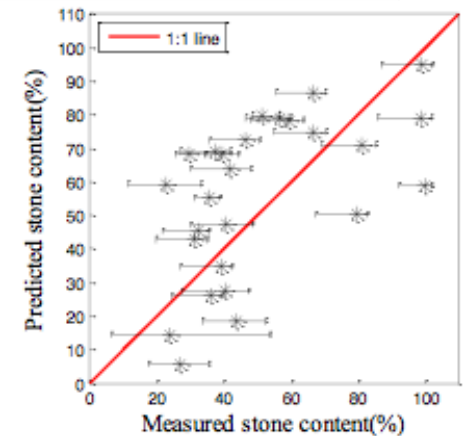


La géophysique (Thèse de Y. Xie, Collaboration EMMAH)



Résistivité

- ⇒ Teneur en éléments grossiers
- ⇒ Hauteur du sol
- ⇒ Présence d'eau dans l'épikarst

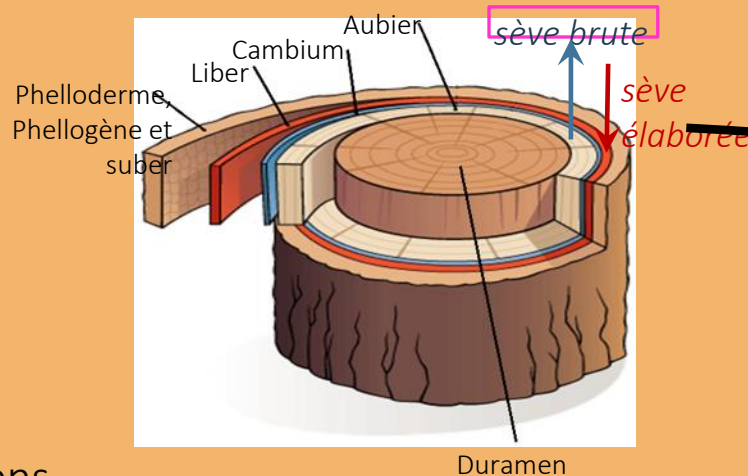


Les mesures isotopiques (Coffi Cakpo & Université d'Avignon)

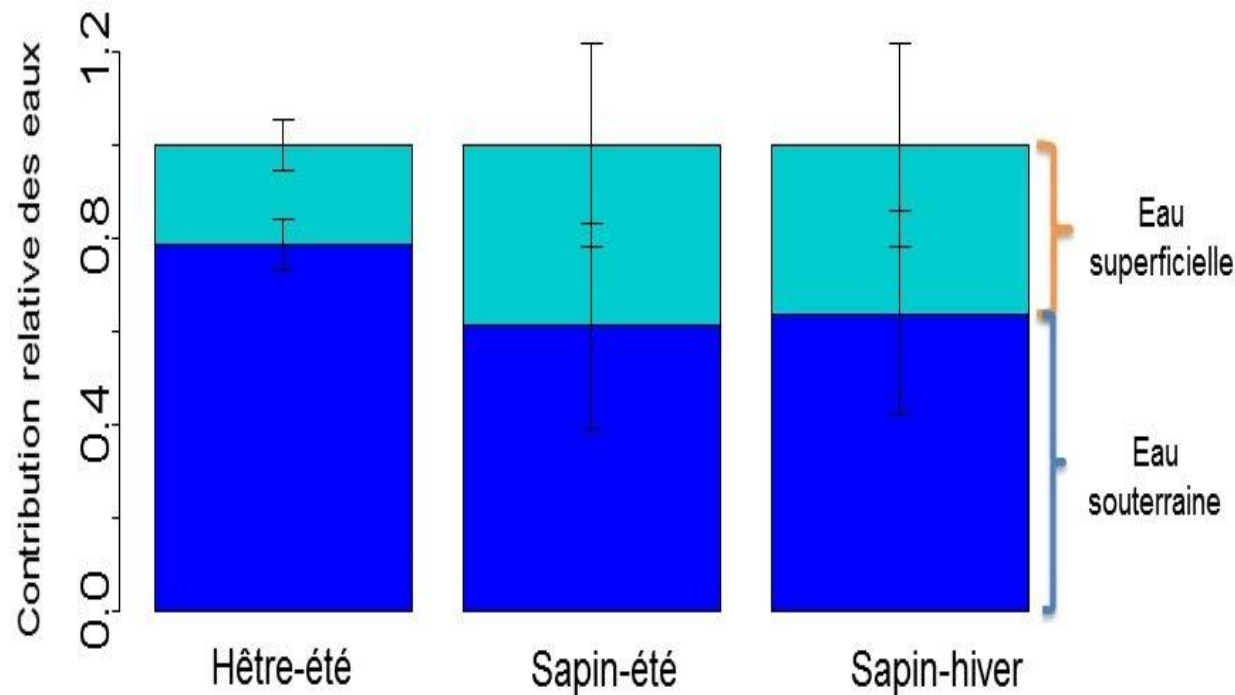
➤ $^{18}\text{O}/^2\text{H}$

➤ plusieurs points par sites :

- eau de pluie
- eau du sol (drainage)
- bois + tronc + terre = 162 extractions
- eaux souterraines (Ventoux- DVX5)
- eaux souterraines (Rustrel -LSBB)

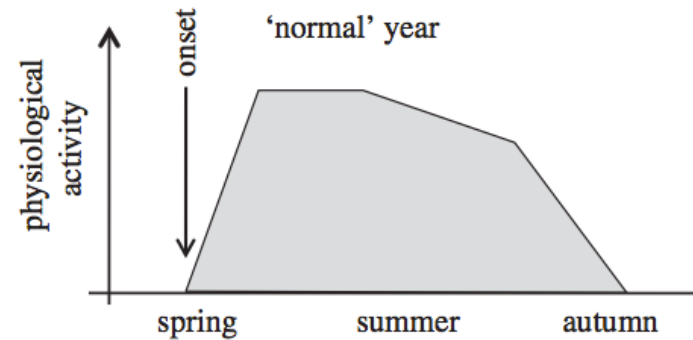


Les mesures isotopiques (Coffi Cakpo & Université d'Avignon)



- contribution en eau souterraine importante
- Hêtre été : (plus de 75%) > au Sapin (55%)
- **Cohérent à la plus grande sensibilité du Hêtre à la cavitation par rapport au Sapin**

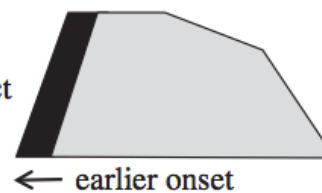
Importance de la phénologie



'early spring' year scenarios

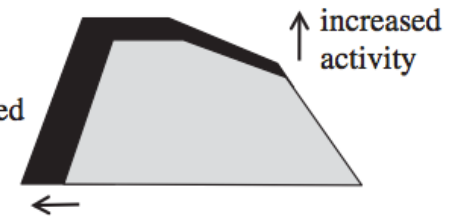
(a)

direct effect



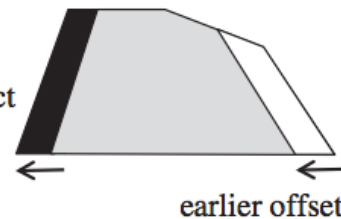
(b)

direct and positive lagged



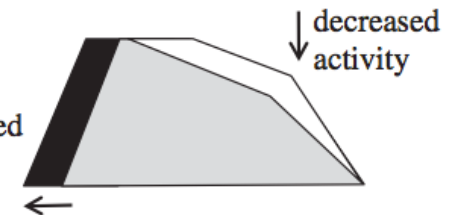
(c)

direct and negative indirect

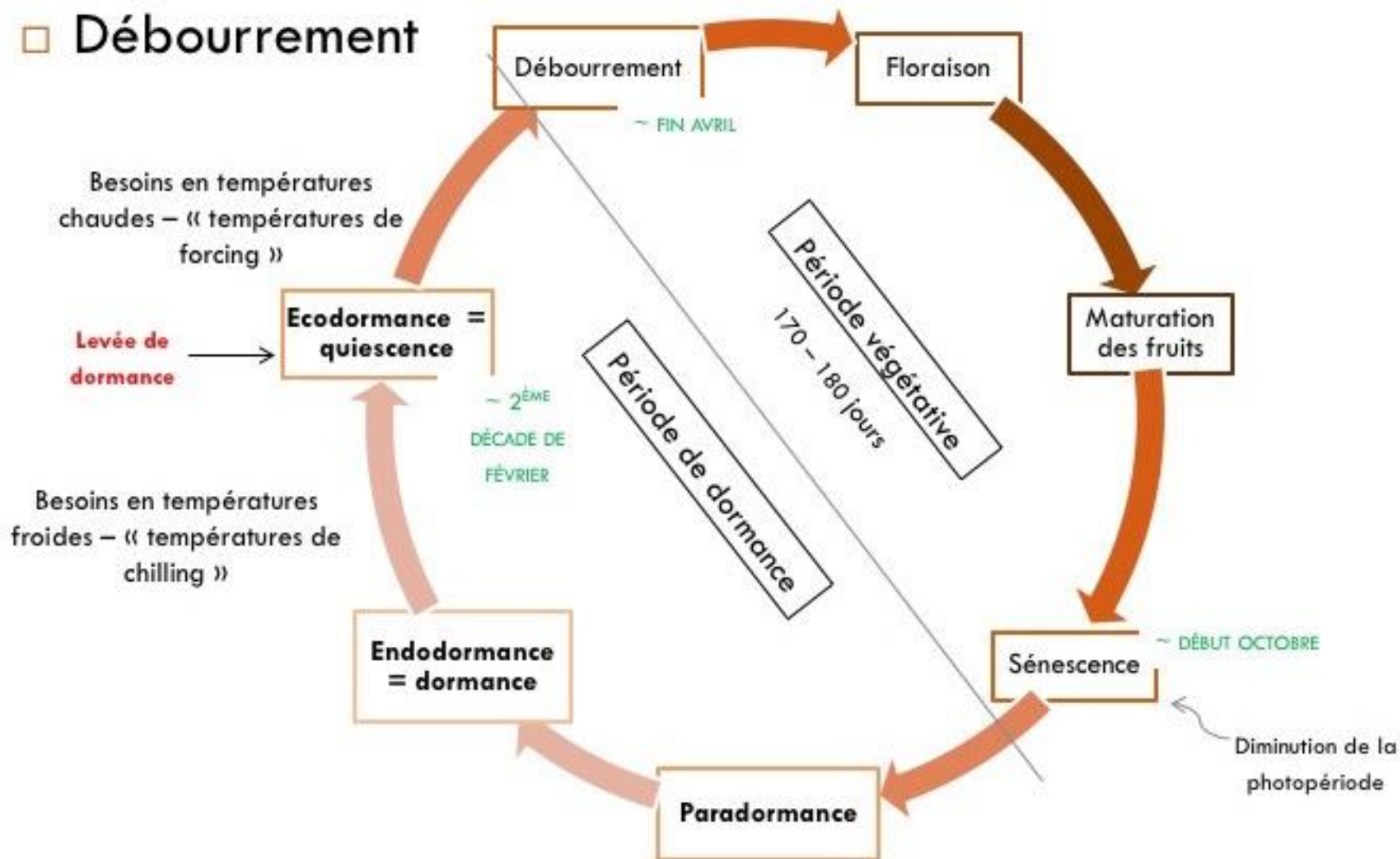


(d)

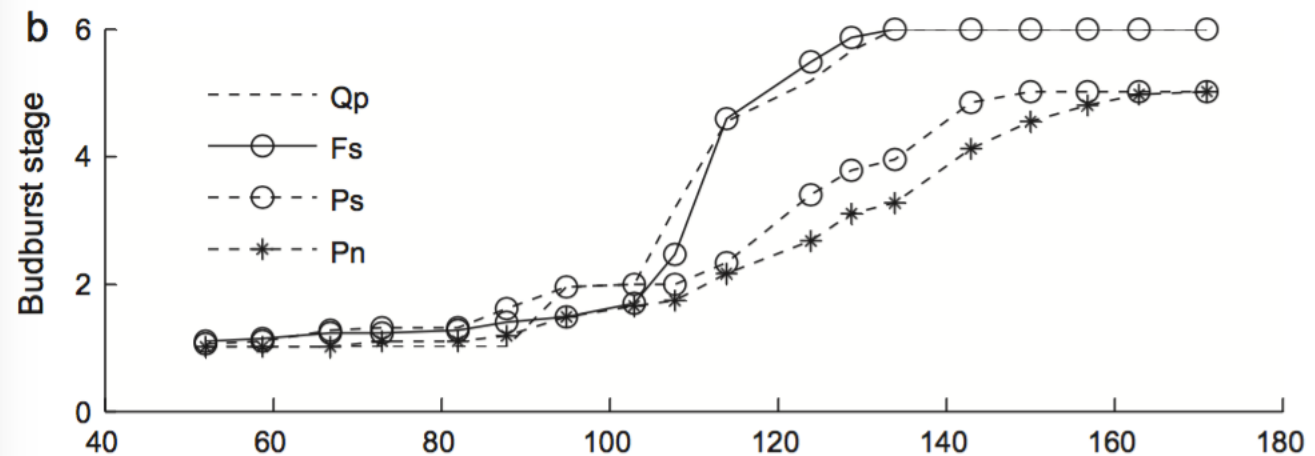
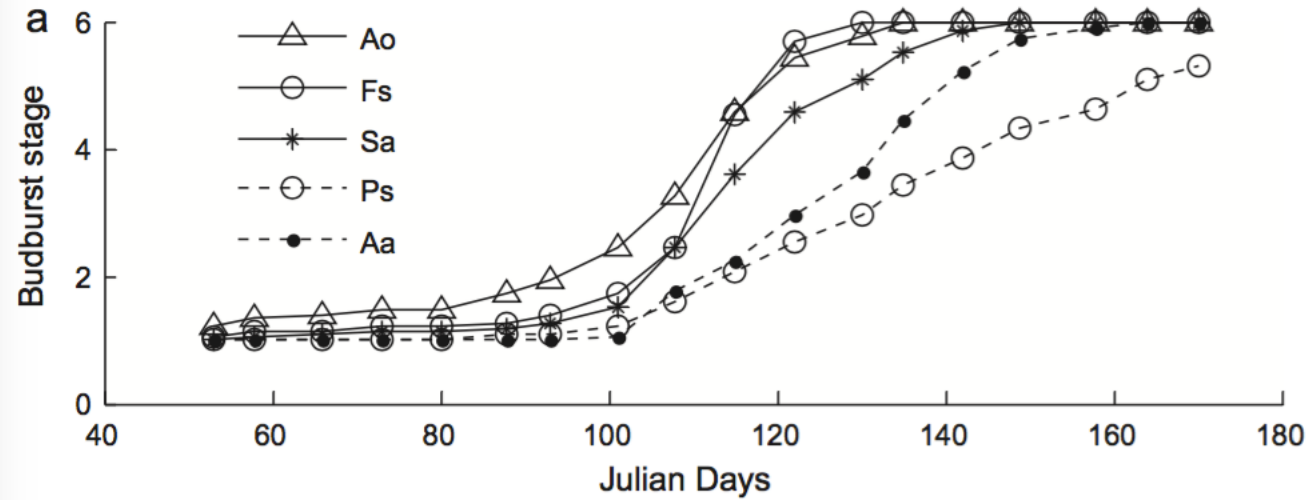
direct and negative lagged



□ Débourrement

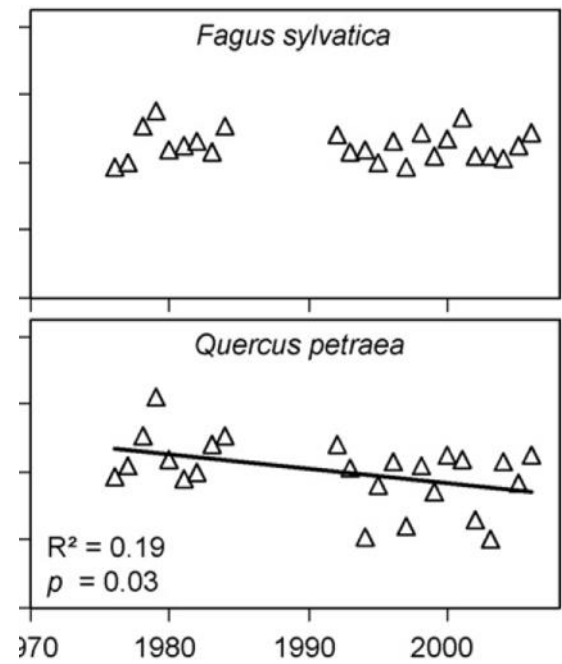


Débourrement des différentes espèces



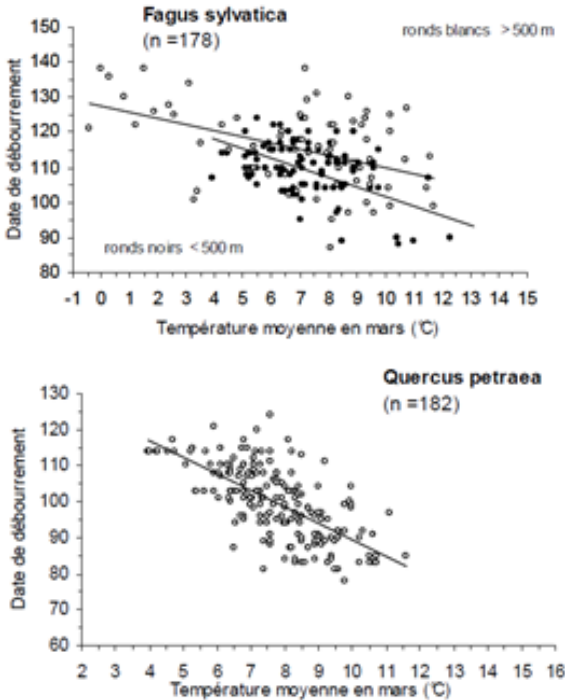
Le débourrement du Hêtre

Faible variation temporelle



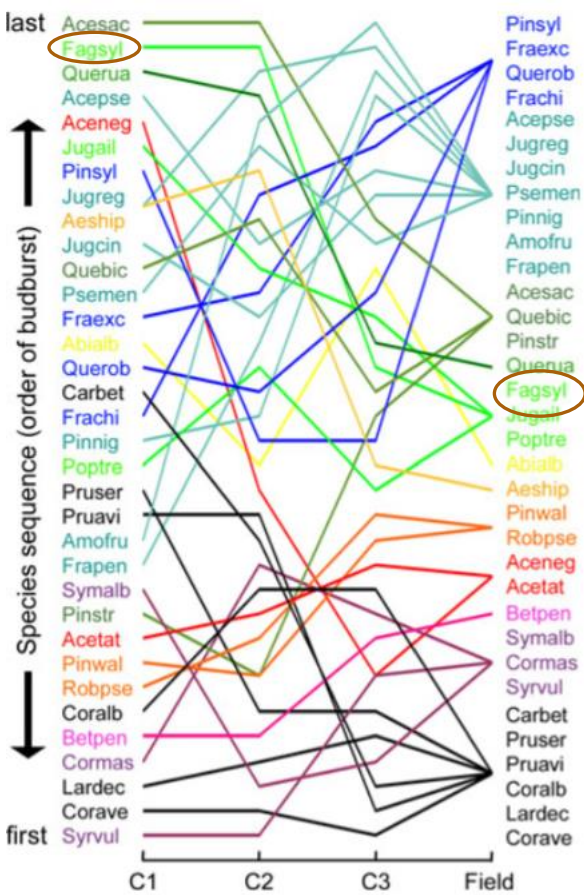
Vitasse et al., 2009

Moindre plasticité



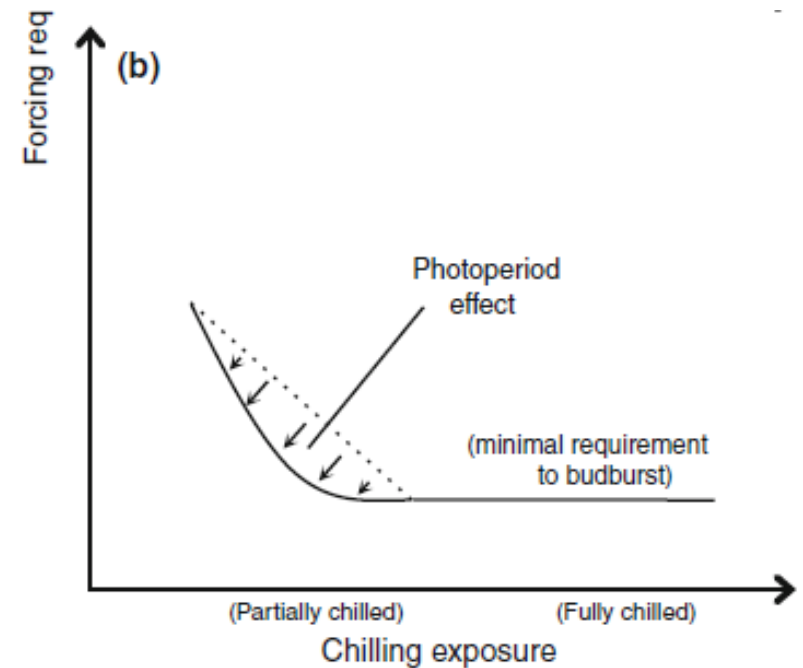
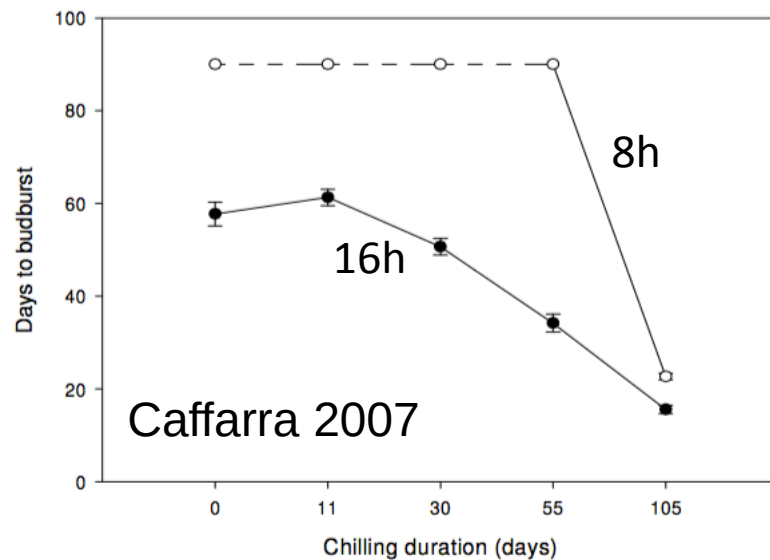
Lebourgeois et al., 2008

Rôle de la dormance

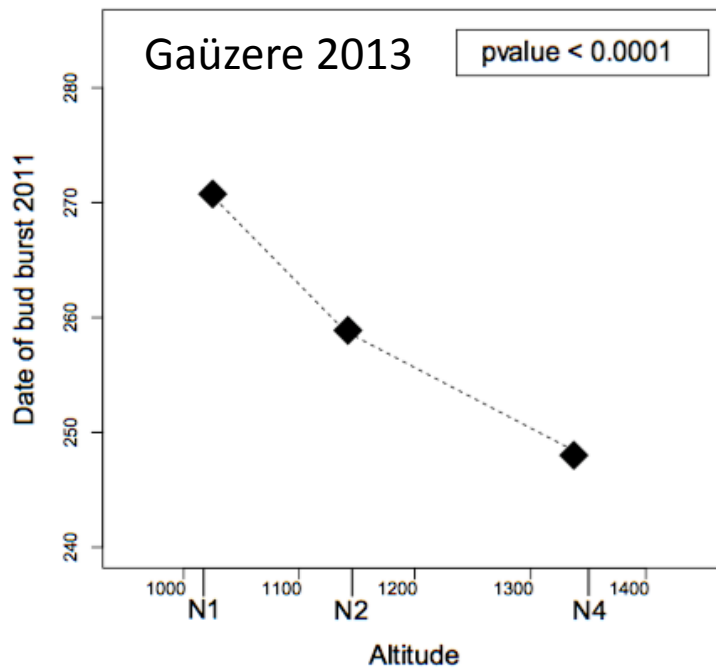


Laube et al., 2014

Le débourrement du Hêtre



Le débourrement du Hêtre (Thèse J. Gaüzere) ≠ génétique **entre altitudes**



Déterminer la levée de dormance



Prélèvement de novembre à mars de rameaux de hêtre



Recoupe des rameaux dans l'eau pour éviter l'embolie des vaisseaux conducteurs



Rassemblement dans un contenant unique des rameaux d'un même arbre



Identification précise de chaque échantillon prélevé

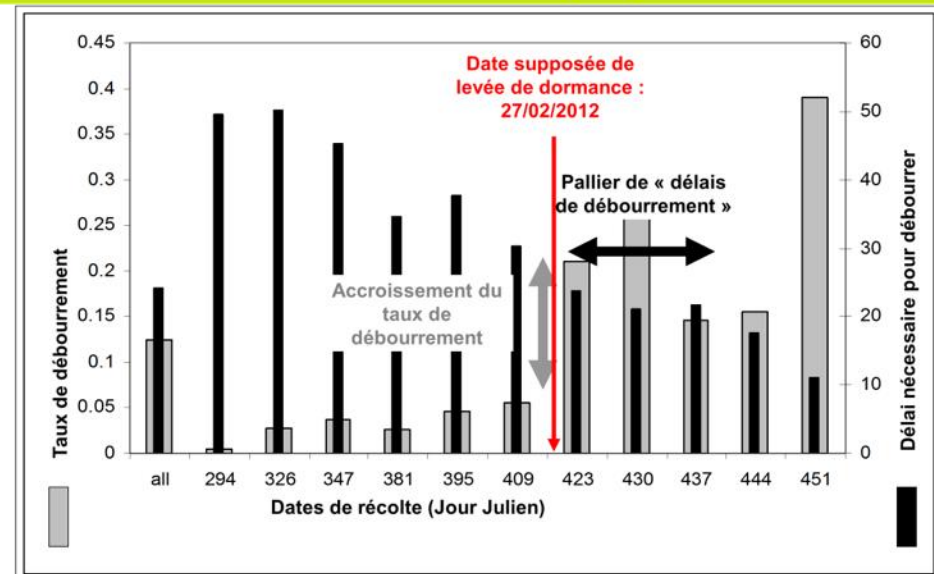


Suivi du débourrement de chaque rameau en chambre climatique (23°C 16 h de lumière)

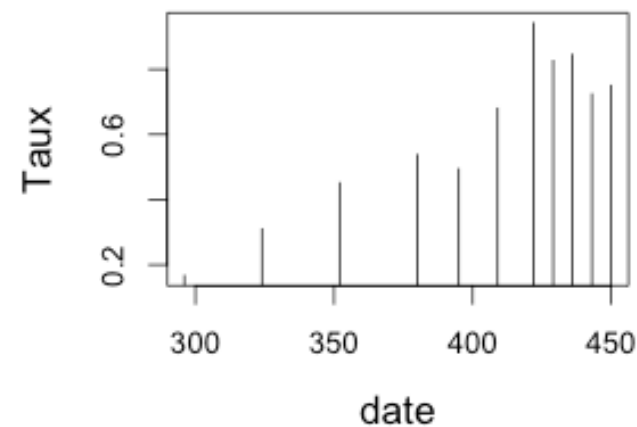
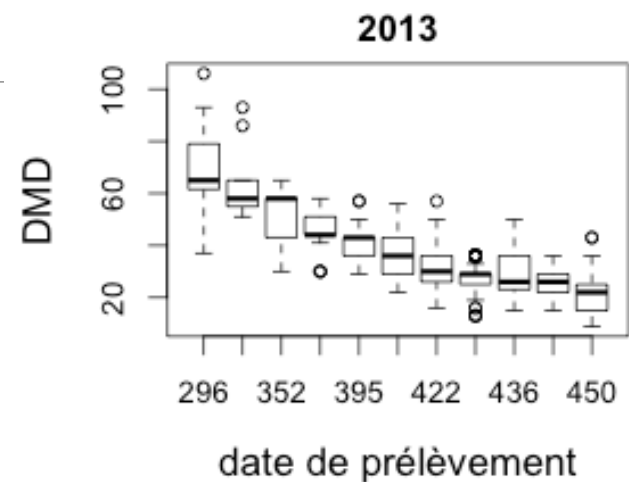
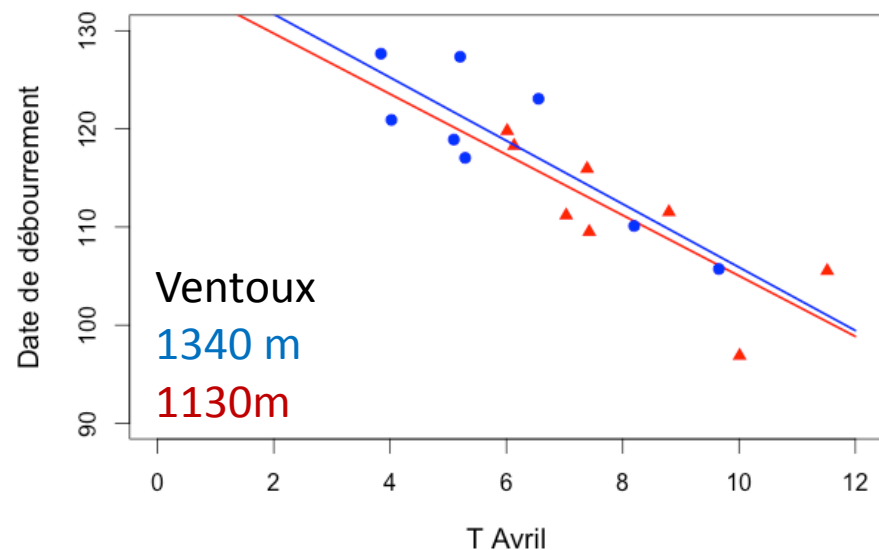
Résultats observés en 2012 sur le site atelier du Mont Ventoux (84)

Détermination de la date supposée de levée de dormance par :

- l'accroissement du taux de débourrement
- et
- la diminution du délais moyen de débourrement se stabilisant autour d'un premier pallier en conditions optimales de croissance

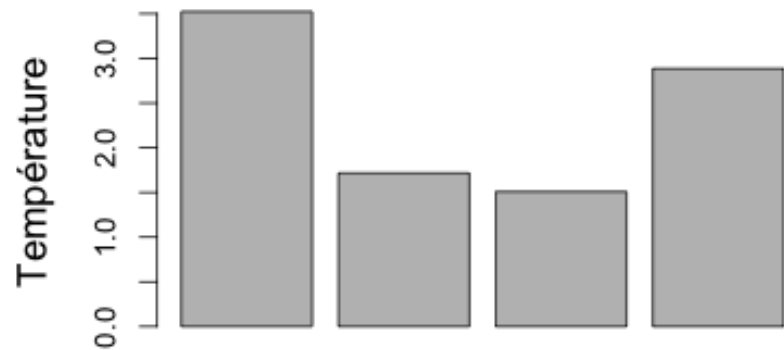


Résultats (M2 de F. Madon) collaboration CEFE et PIAF

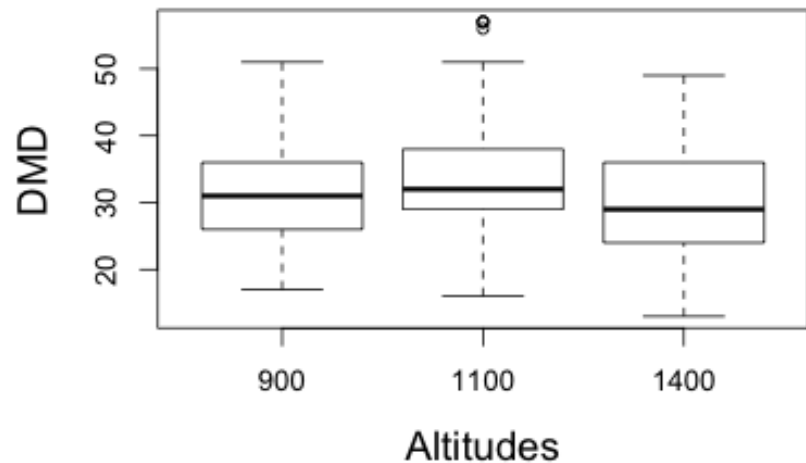
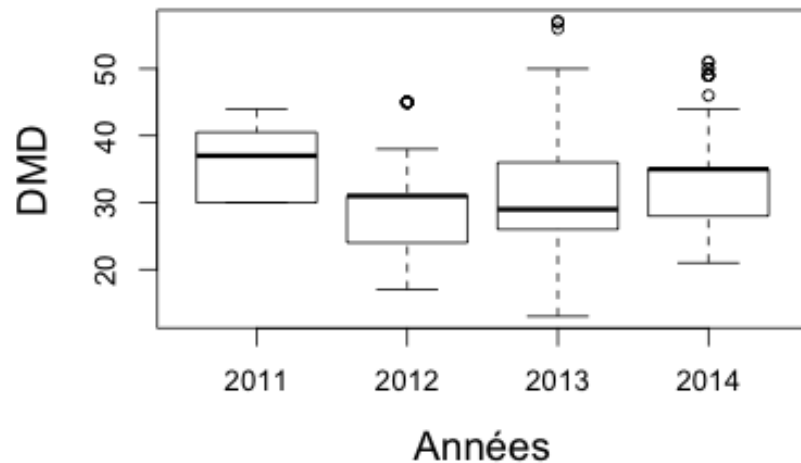
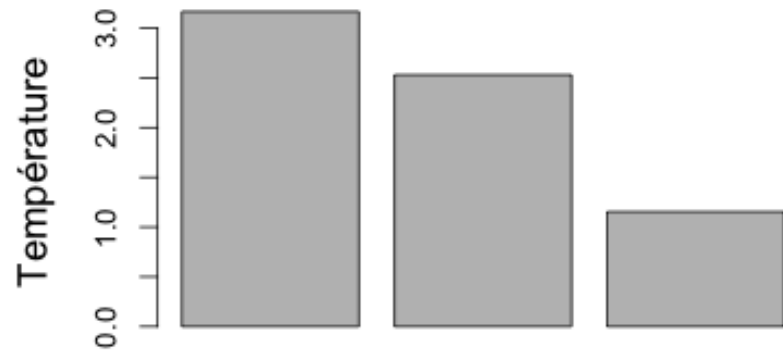


Résultats (M2 de F. Madon) collaboration CEFE et PIAF

Ventoux : effet année



Ventoux : effet altitude

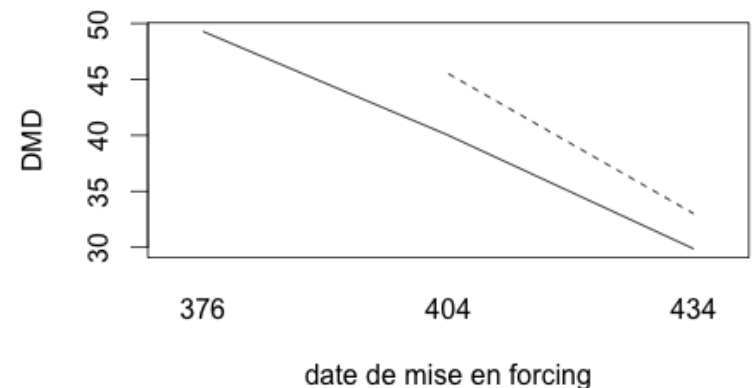
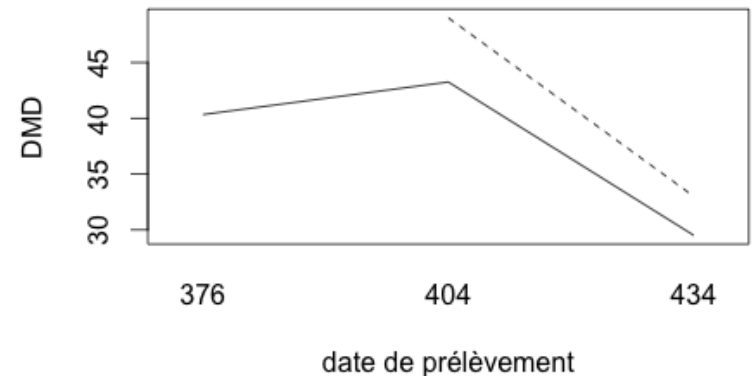
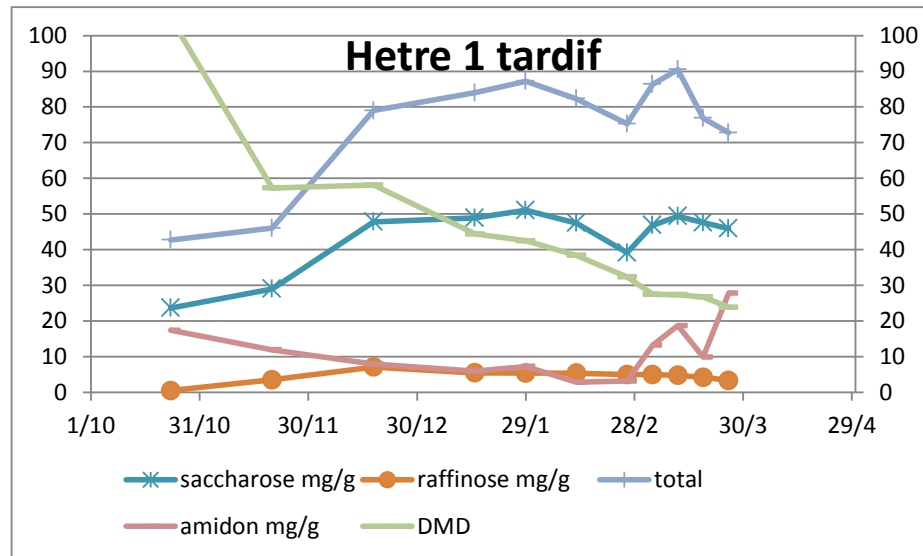


Résultats (M2 de F. Madon) collaboration CEFE et PIAF

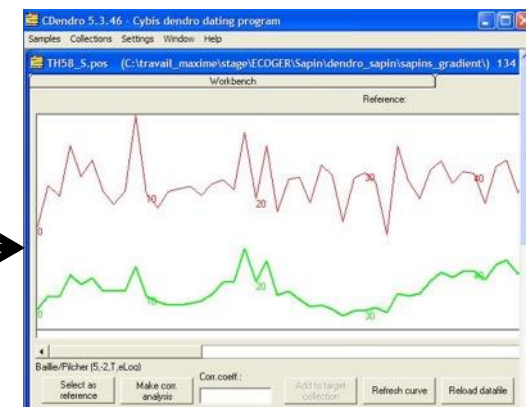
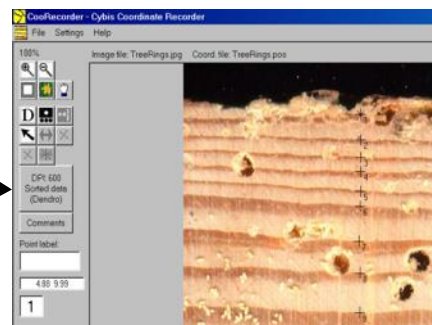
Ventoux 1400m 2014-2015

Accumulation de froid plus d'effet à
12h de photopériode

Signal glucidique



La dendrochronologie (M2 et Thèse de M. Cailleret)



CDendro 5.3 & CooRecorder 5.3
Larsson L.A. & al. 2006
Cybis Elektronik & Data AB
Sweden

Largeur de cernes

Dé-tendance les
chronologies

Analyse climat

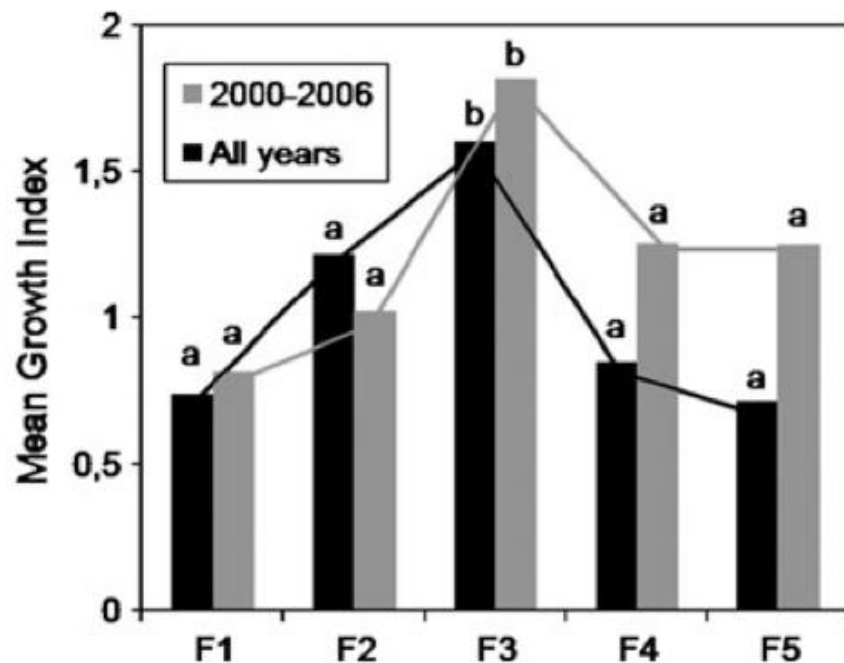
Δ Surface de cernes

RCS standardisation
Esper et al. 2003

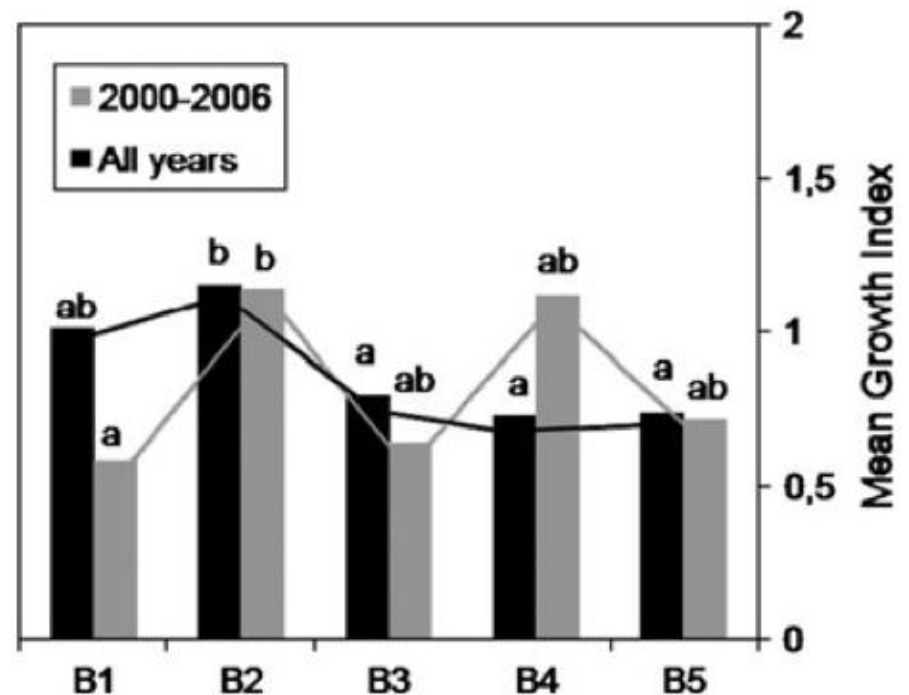
Analyse de croissance (BAI90)

Effet de l'altitude sur la croissance (M2 de M. Cailleret)

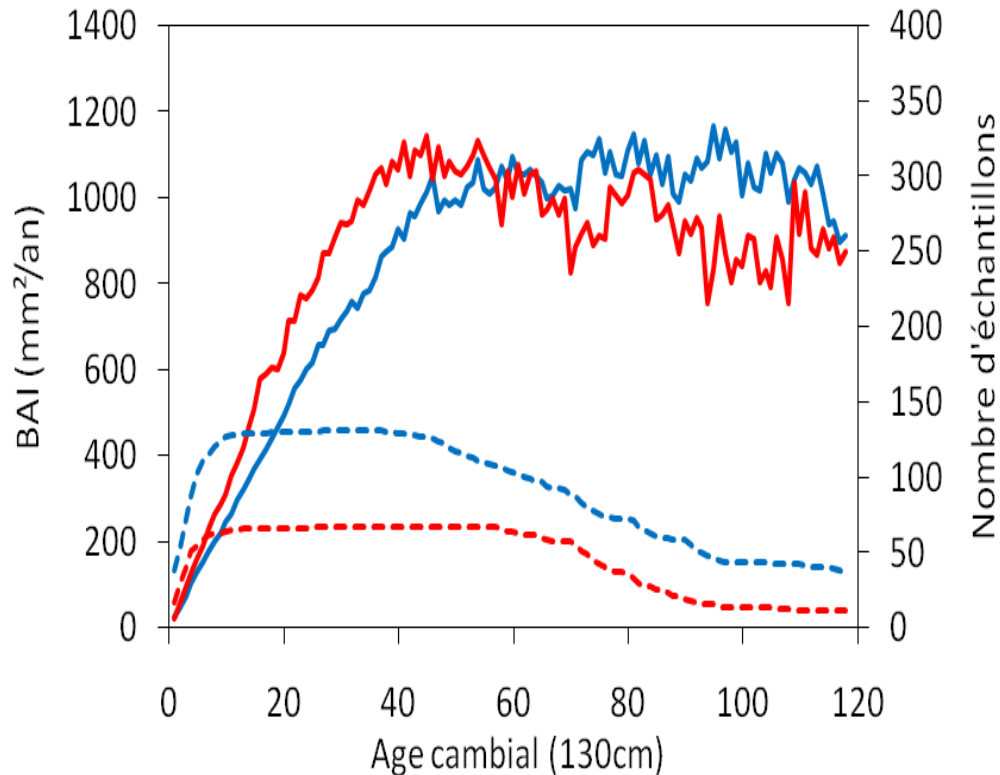
Abies alba



Fagus sylvatica

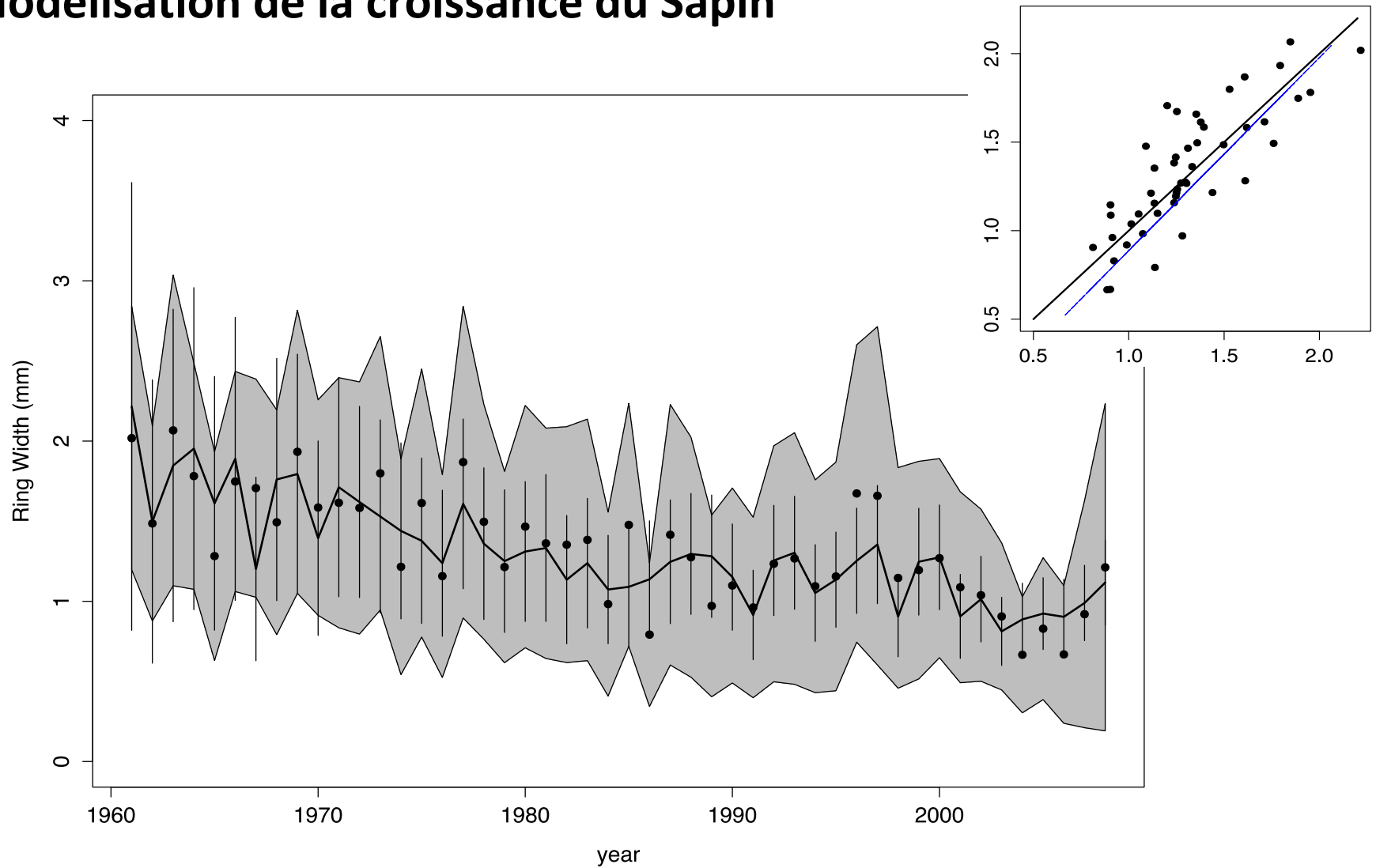


Croissance & Mortalité (M. Cailleret)

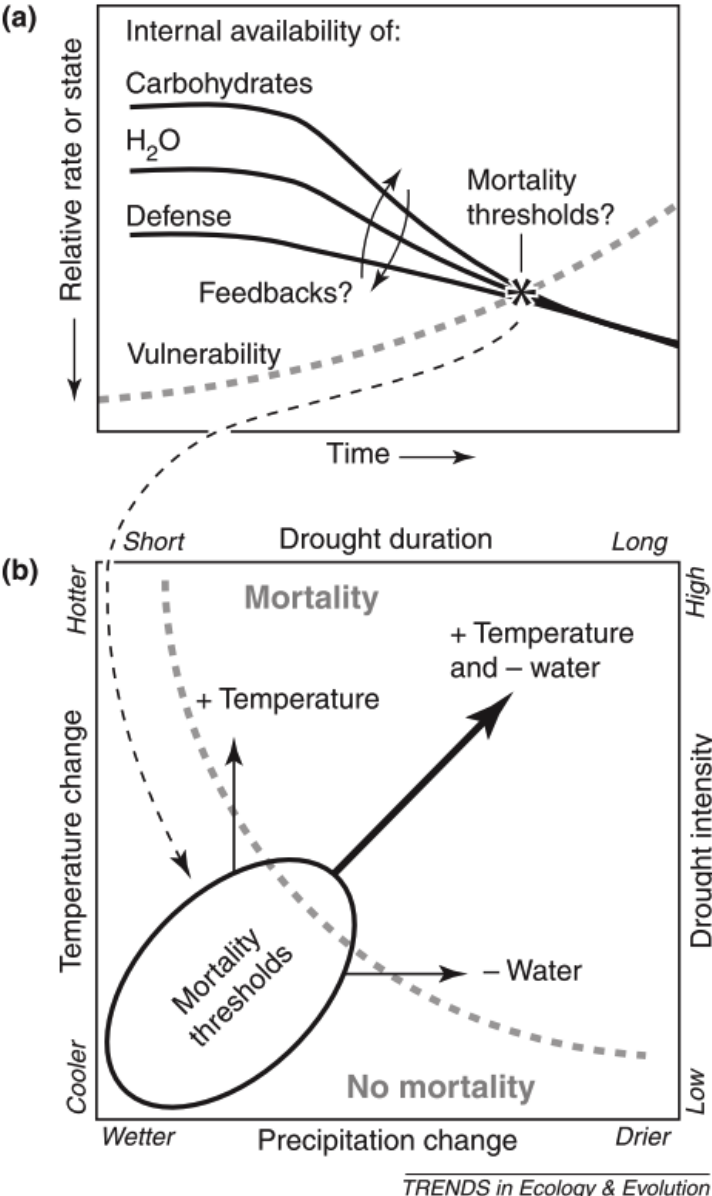


- Sapins morts ont une meilleure croissance que les sains dans les stades juvéniles
- Sensibilité au climat plus forte quand sol « plus favorable »
- Deux hypothèses: (1) plasticité racinaire, (2) croissance rapide => plus grande vulnérabilité

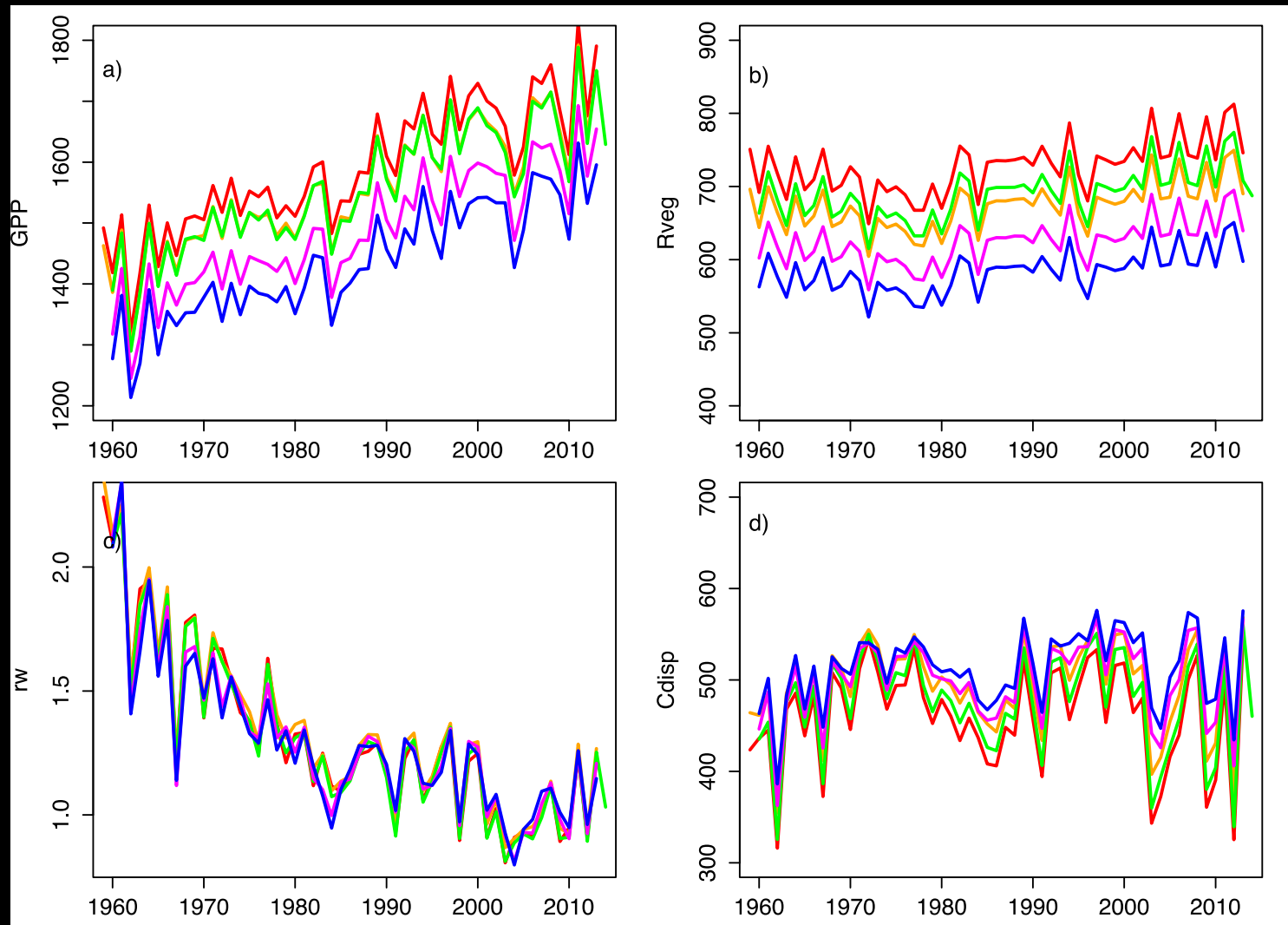
Modélisation de la croissance du Sapin



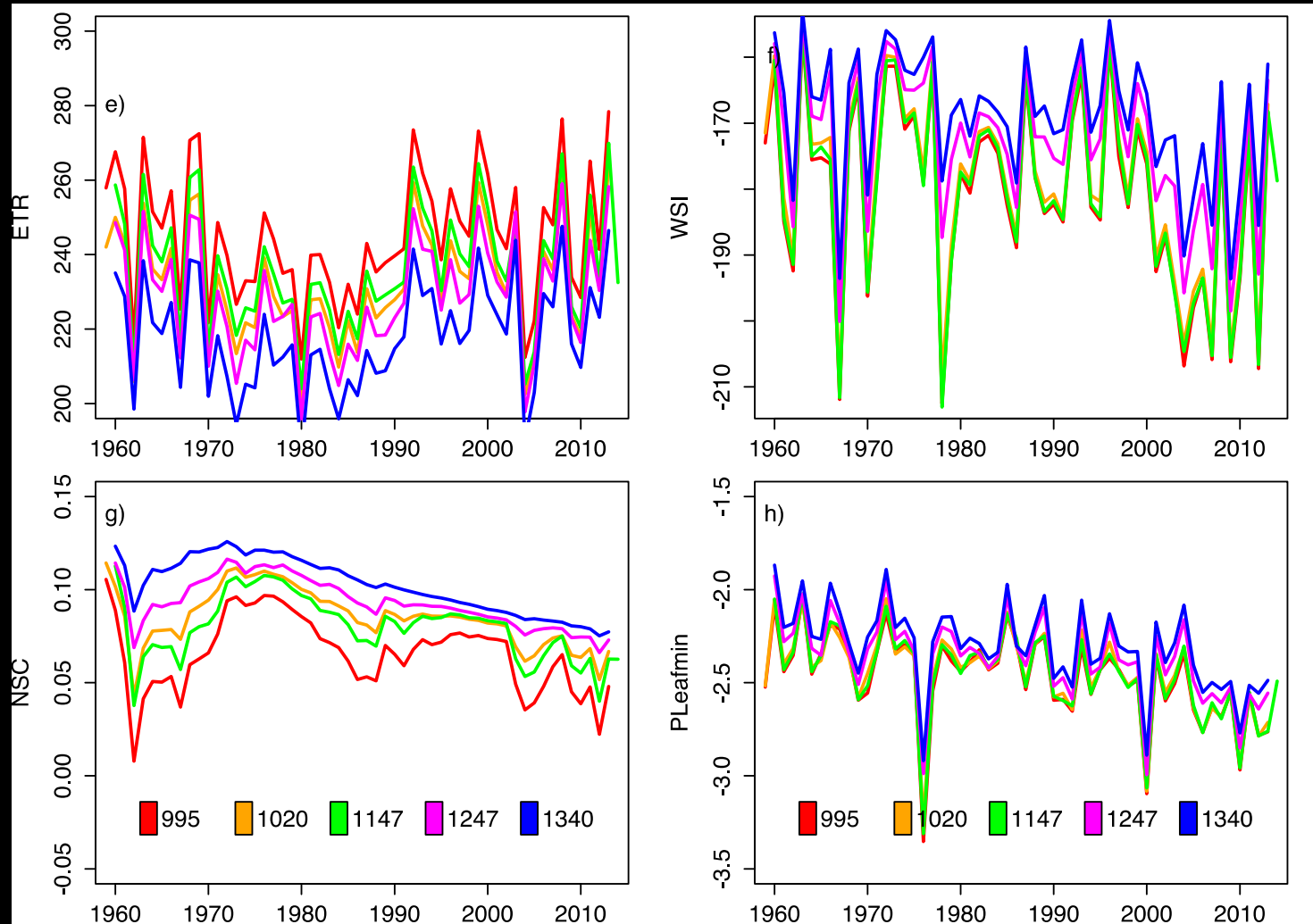
Mortalité



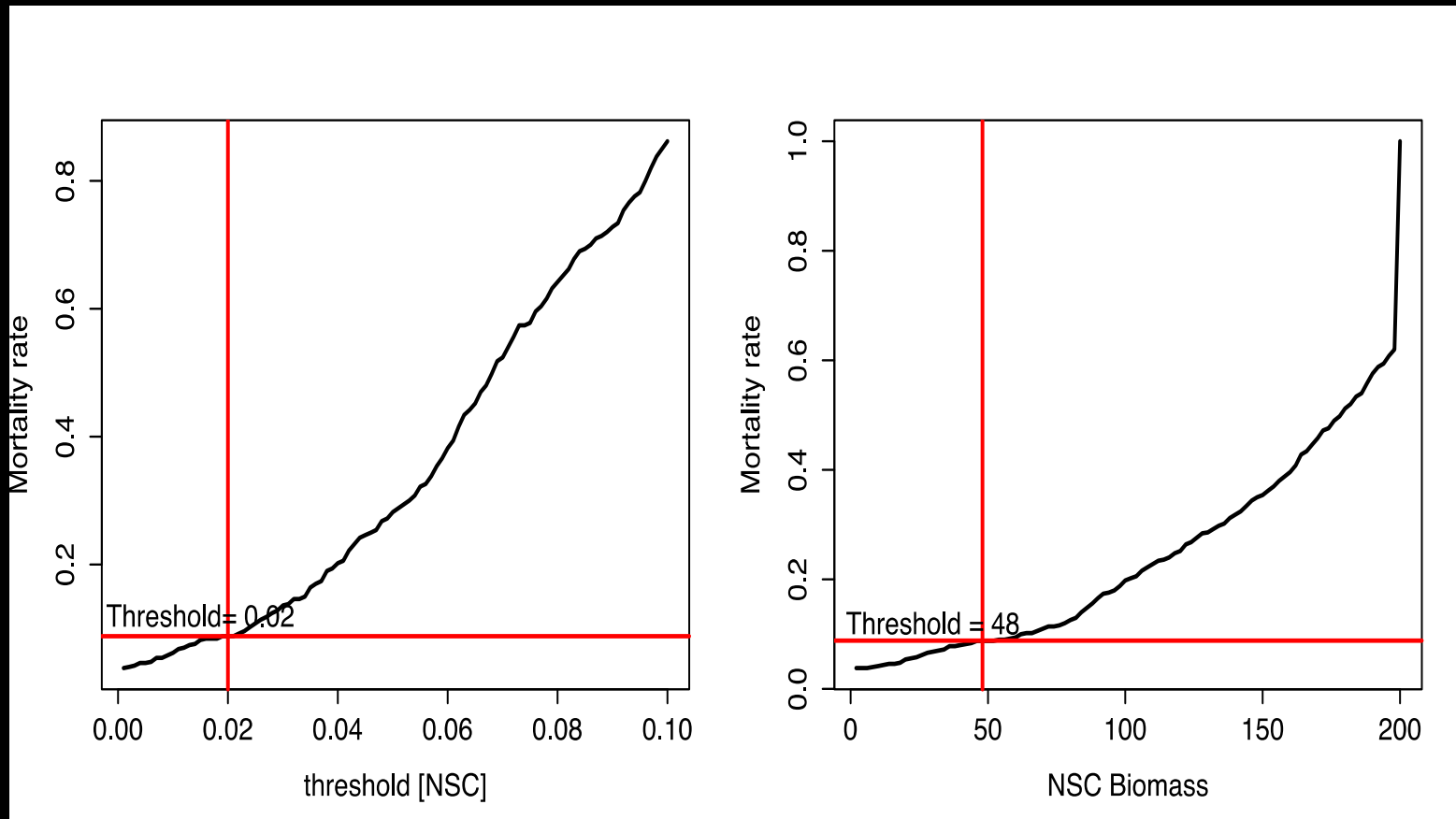
Modélisation du fonctionnement écophysiological du Sapin



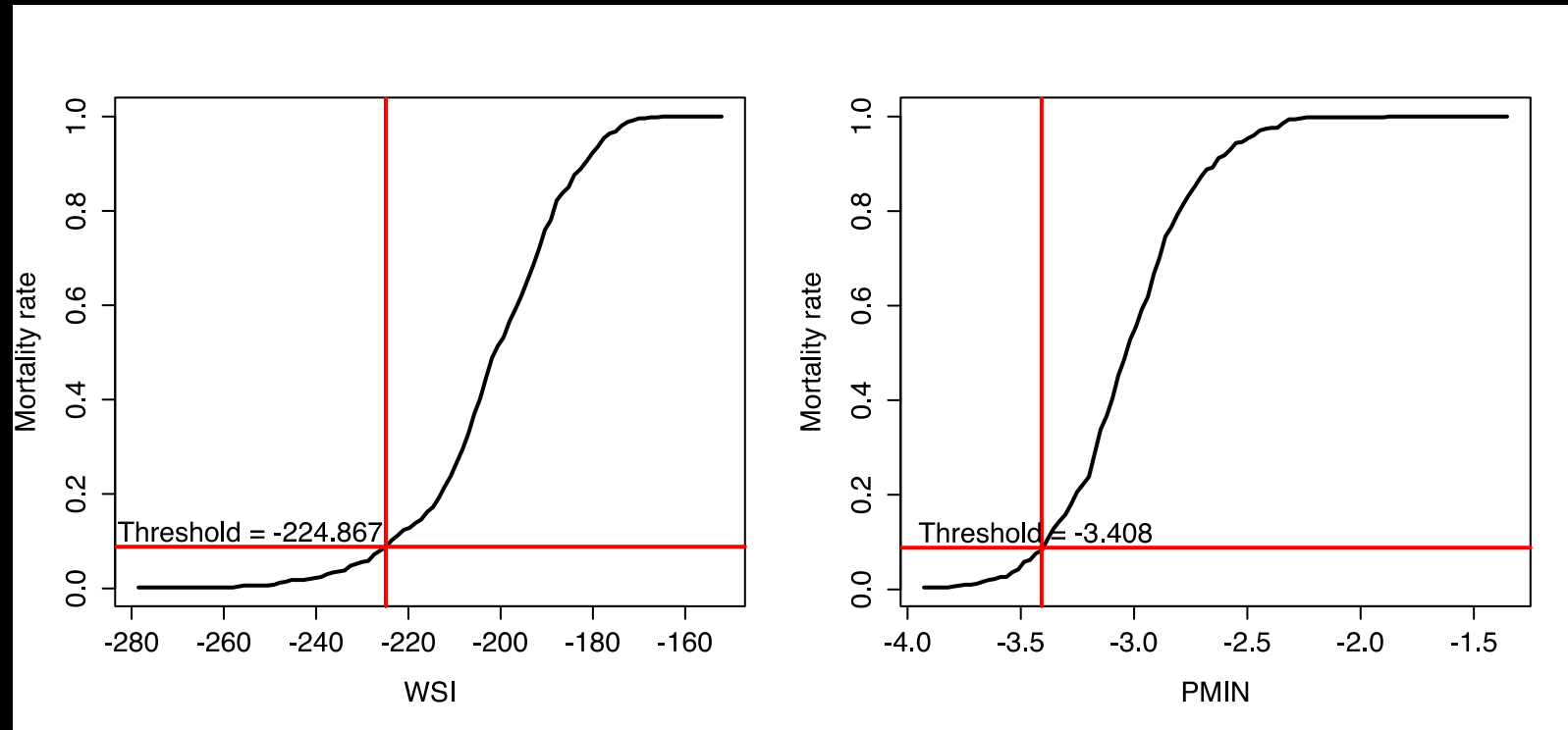
Modélisation du fonctionnement écophysiologique du Sapin



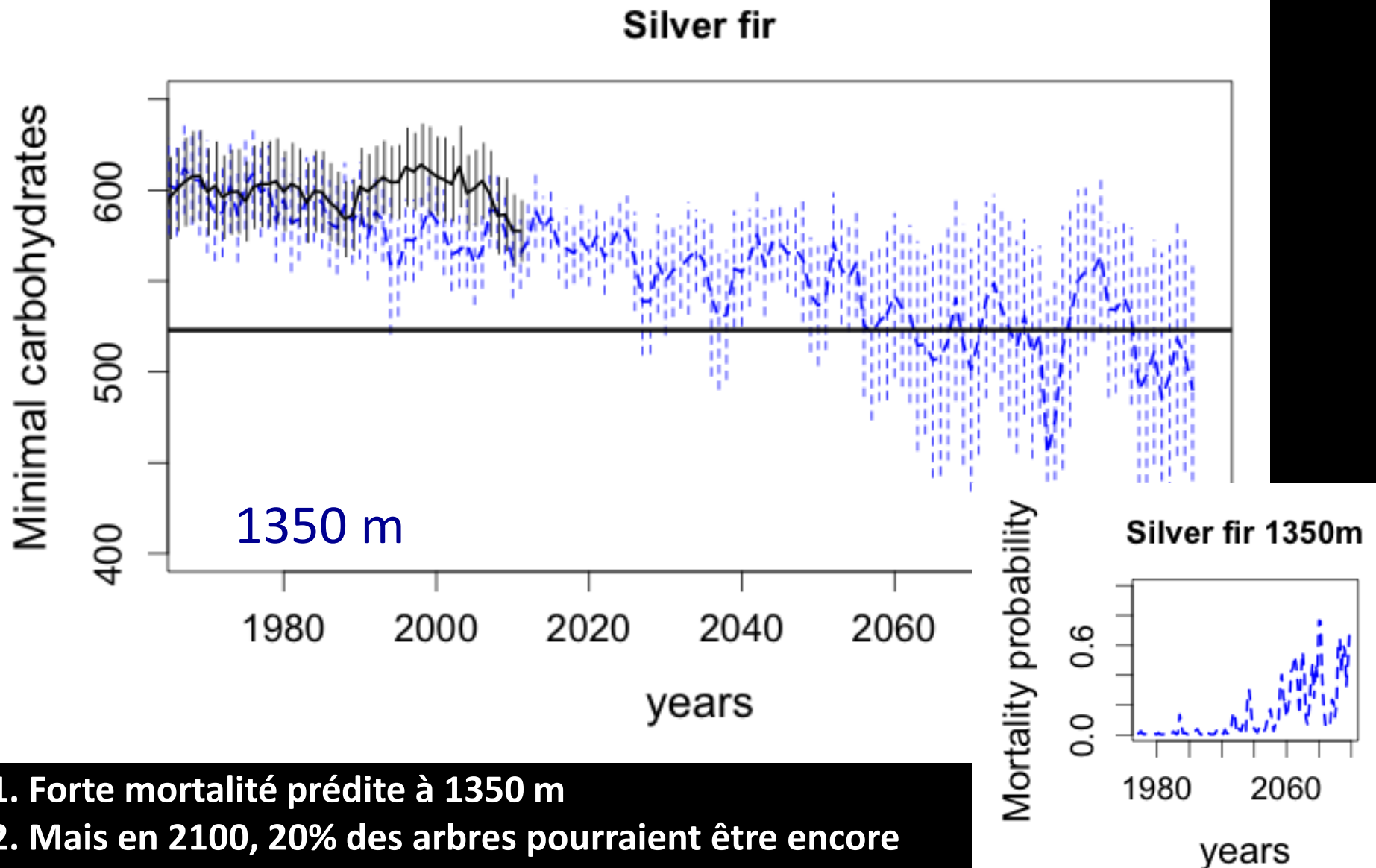
Détermination des seuils de mortalité



Détermination des seuils de mortalité



Indicateur de mortalité le plus fiable pour expliquer les patrons spatio-temporelles de mortalité
= teneur en réserves



1. Forte mortalité prédite à 1350 m
2. Mais en 2100, 20% des arbres pourraient être encore sur pied, notamment sur les sols profonds

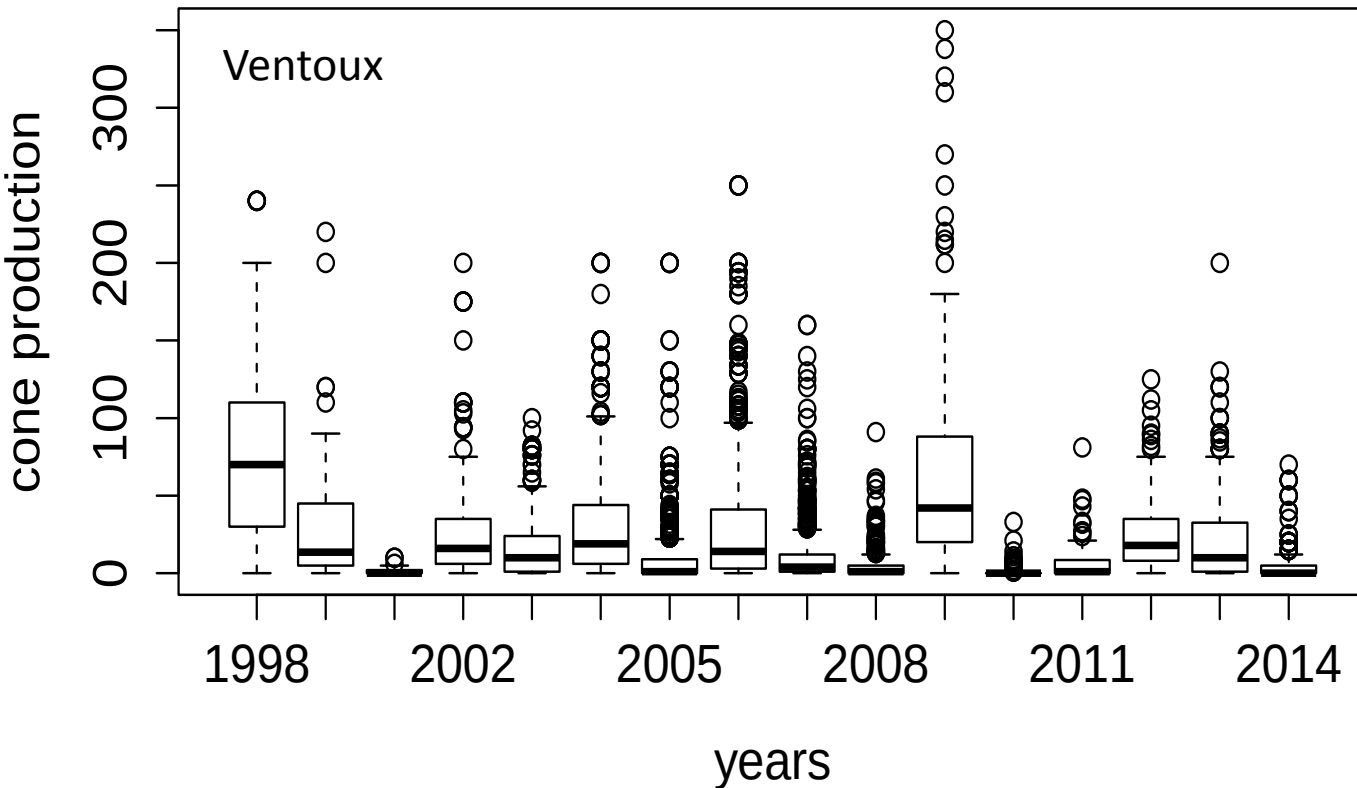
Reproduction

1. **Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.)**
 2. **Espèce monoïque**
 3. **Présence de masting**
-

1. **Bourgeons fructifères formés l'année n-1**
2. **Cônes peuvent avorter l'année n**
3. **Pollen émis au moment du débourrement végétatif**
4. **Cônes sont matures fin août**
5. **Mesure 13cm et pèse 13.2g, et contient 250 graines**



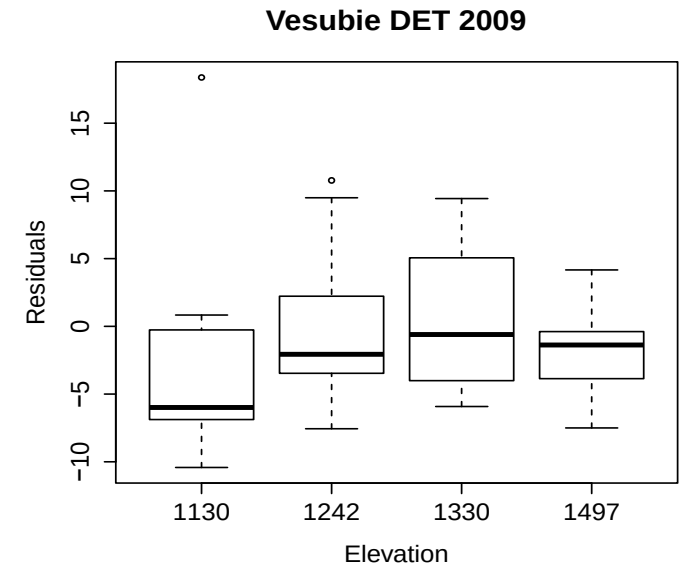
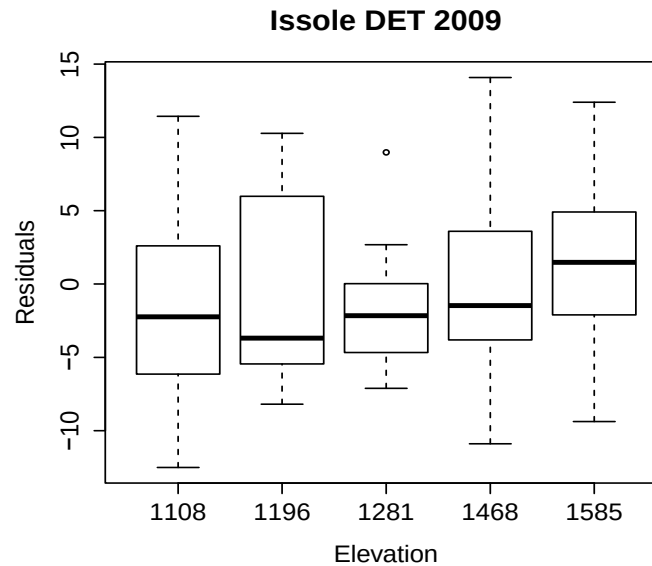
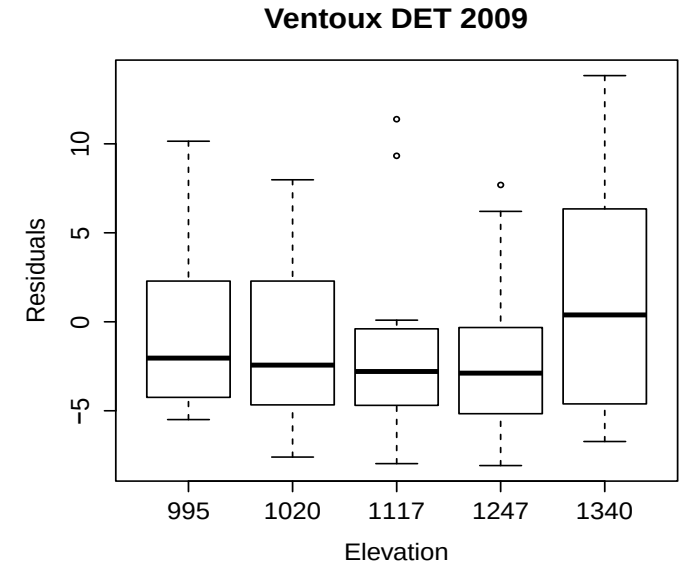
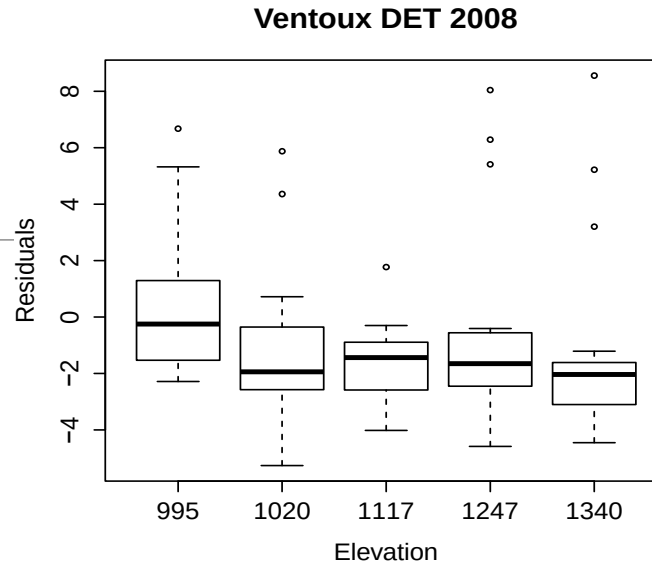
Effet année



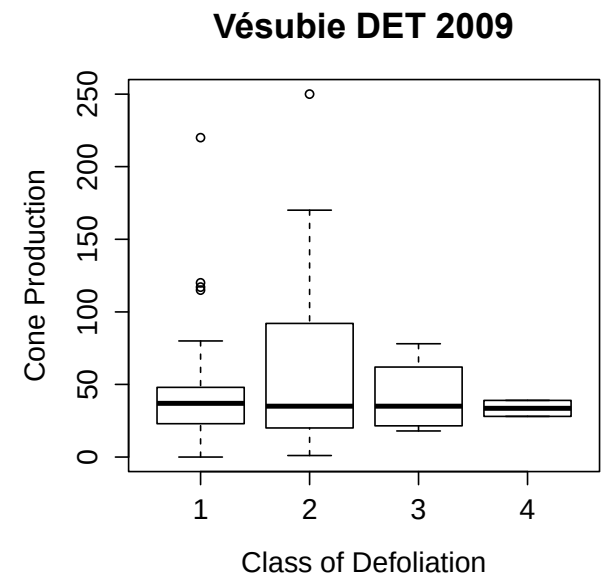
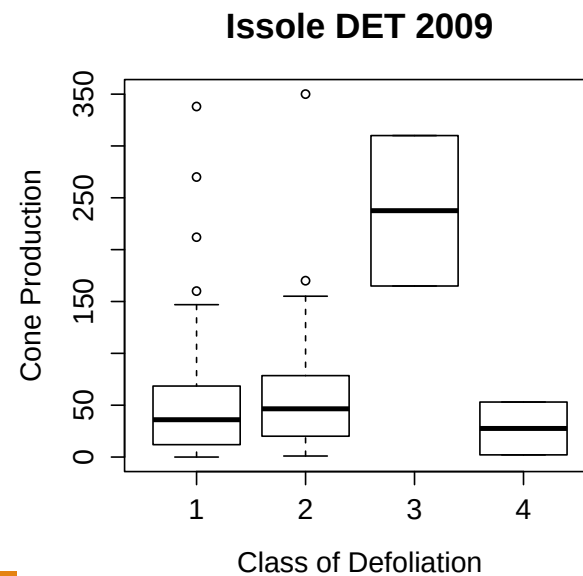
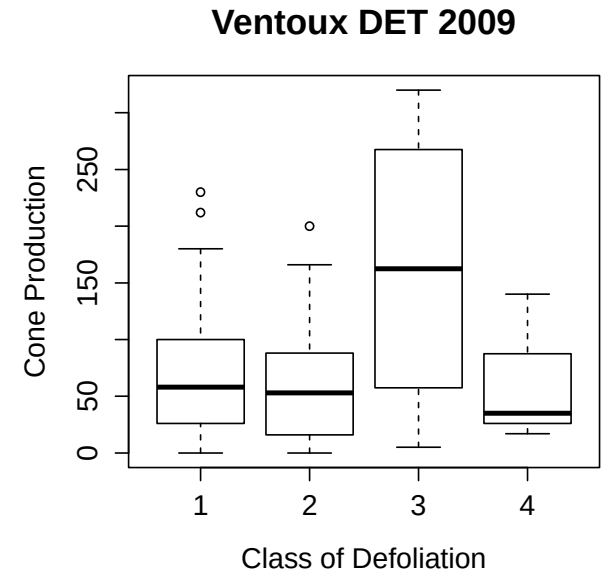
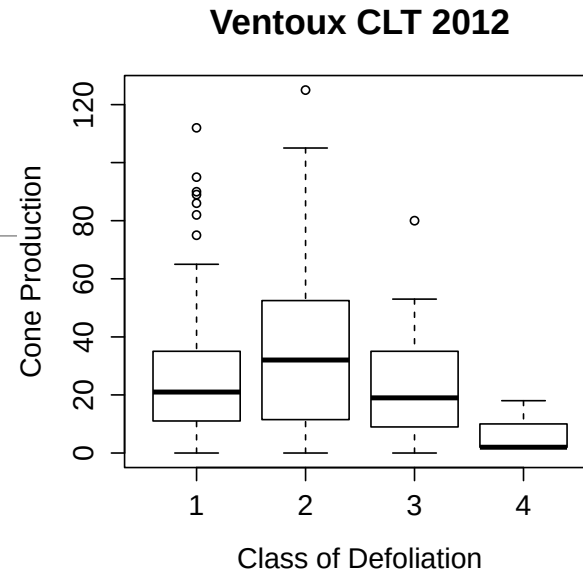
6829 mesures de
production de
cônes

- Moyenne: 20.6 cônes/arbre
- Médiane: 8 cônes/arbre
- CV: 160%

Effet altitude



Effet défoliation

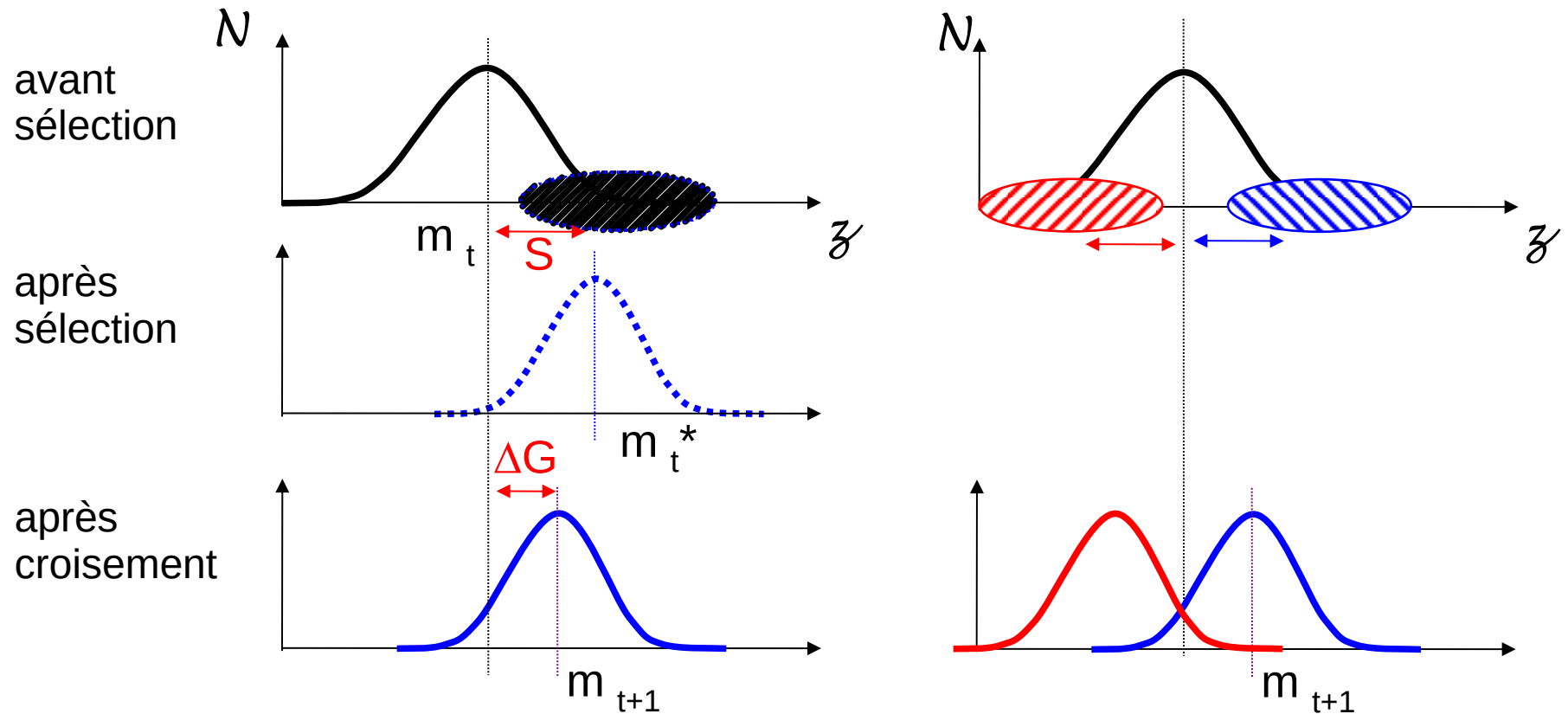


Les conditions d'une évolution génétiques

1. Existe des traits adaptatifs
2. Variabilité de ces traits au sein de la population
3. Une partie de cette variabilité est héritable (i.e déterminé génétiquement)
4. Sélection soit suffisamment forte par rapport à la dérive (population de petite taille ou la migration)



Evolution génétique



Fitness différentes: taux survie adultes, reproduction des adultes, survie des semis

PDG, a new hybrid model



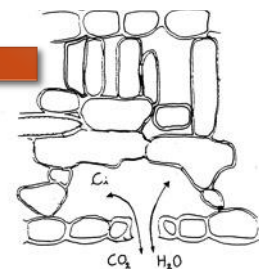
CASTANEA

Dufrêne et al. 2005

Fecundity = f(reserves)



ADULTS



Growth/ mortality

Ovules

Pollen

ADULTS

Date of
Budburst

Dispersal

-pollen dispersal kernel

Mating system

(2% selfing)

SEEDS



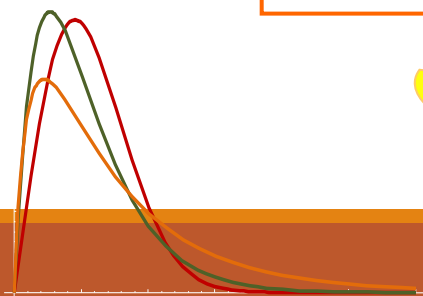
GENETICS

*Rate of empty seed,
germination, survival*

*Density-dependence
mortality*

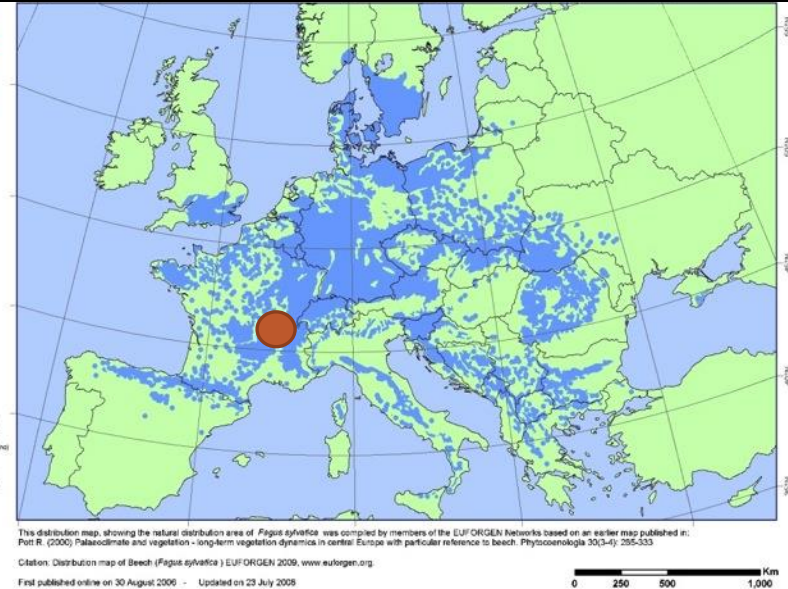
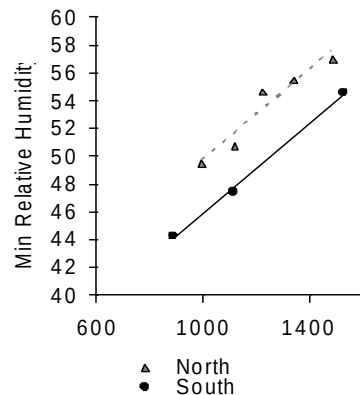
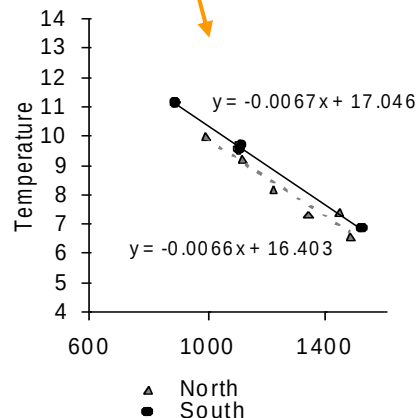
SEEDLINGS

Dispersal



Mécanismes naturels d'adaptation

Adaptation du débourrement sur le Ventoux



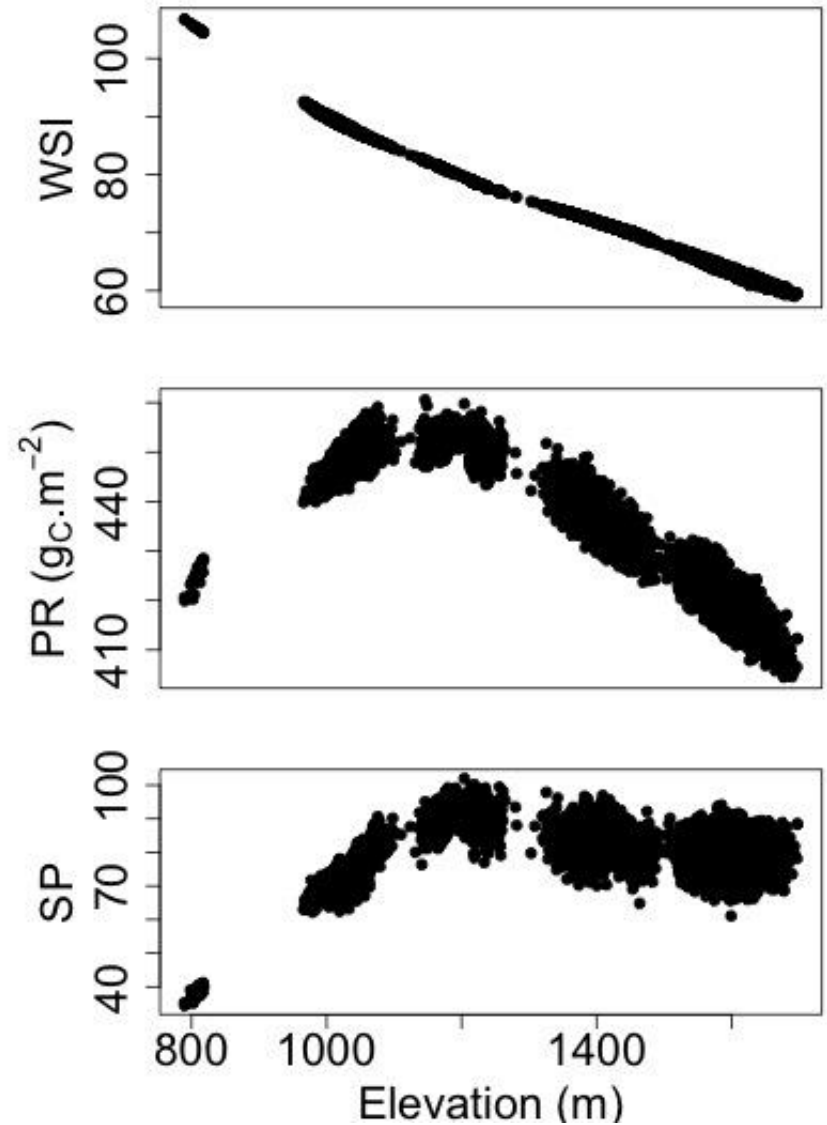
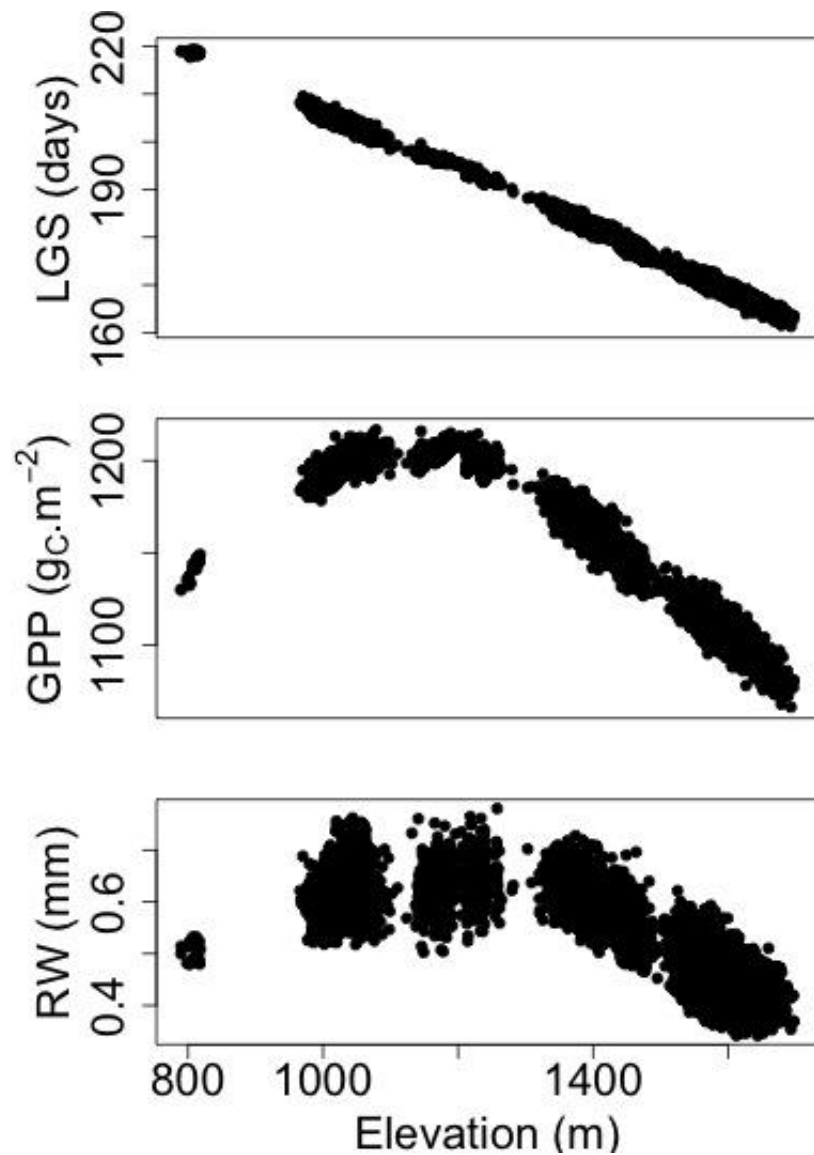
Populations de Hêtre:

- 750-1700 m sur le versant Nord
- 840 -1615 m sur le versant sud



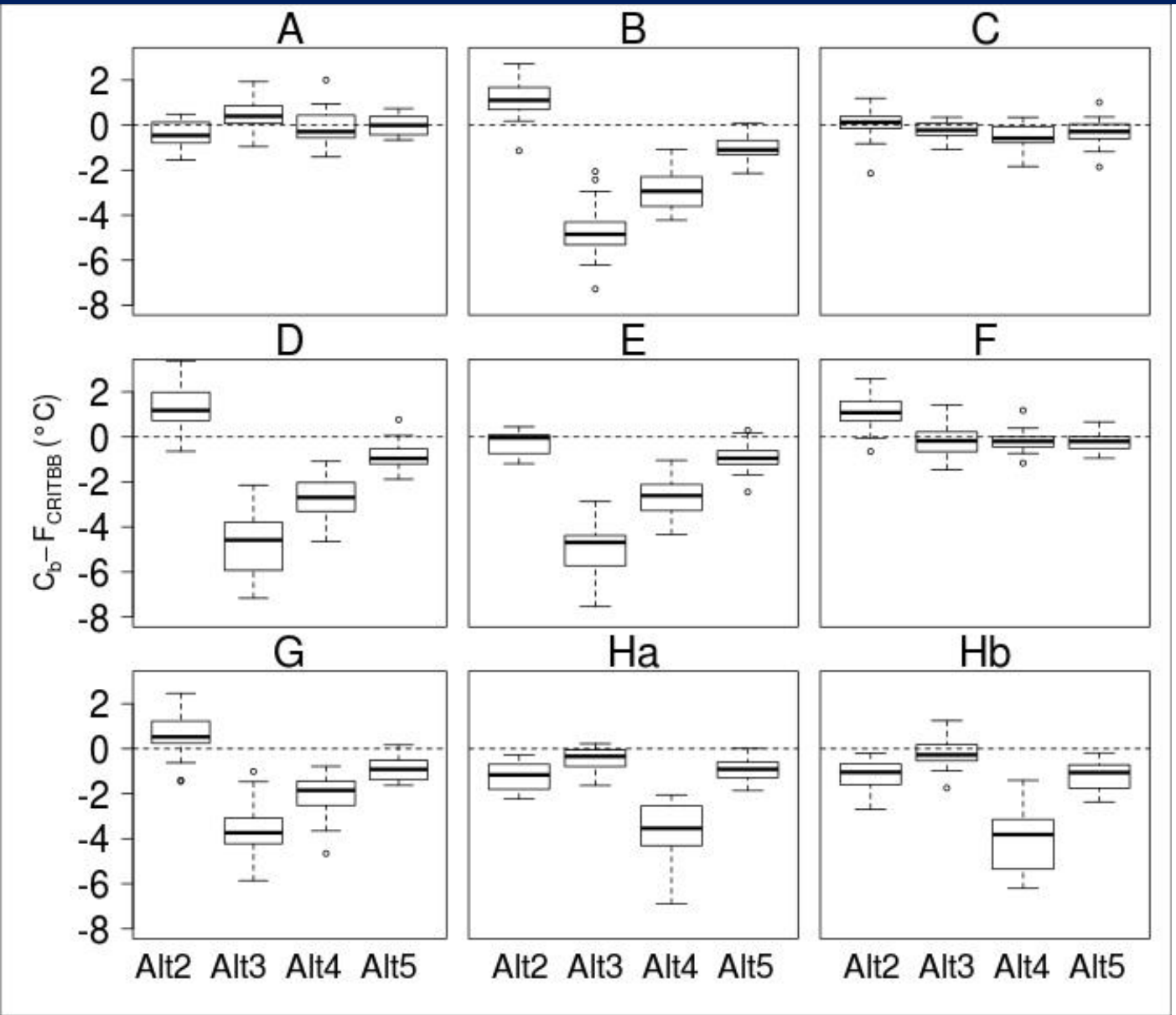
Comment l'adaptation génétique et la plasticité contribuent à la variation de phénologie le long d'un gradient?
Quelle est la vitesse d'adaptation génétique?

Evolution génétique



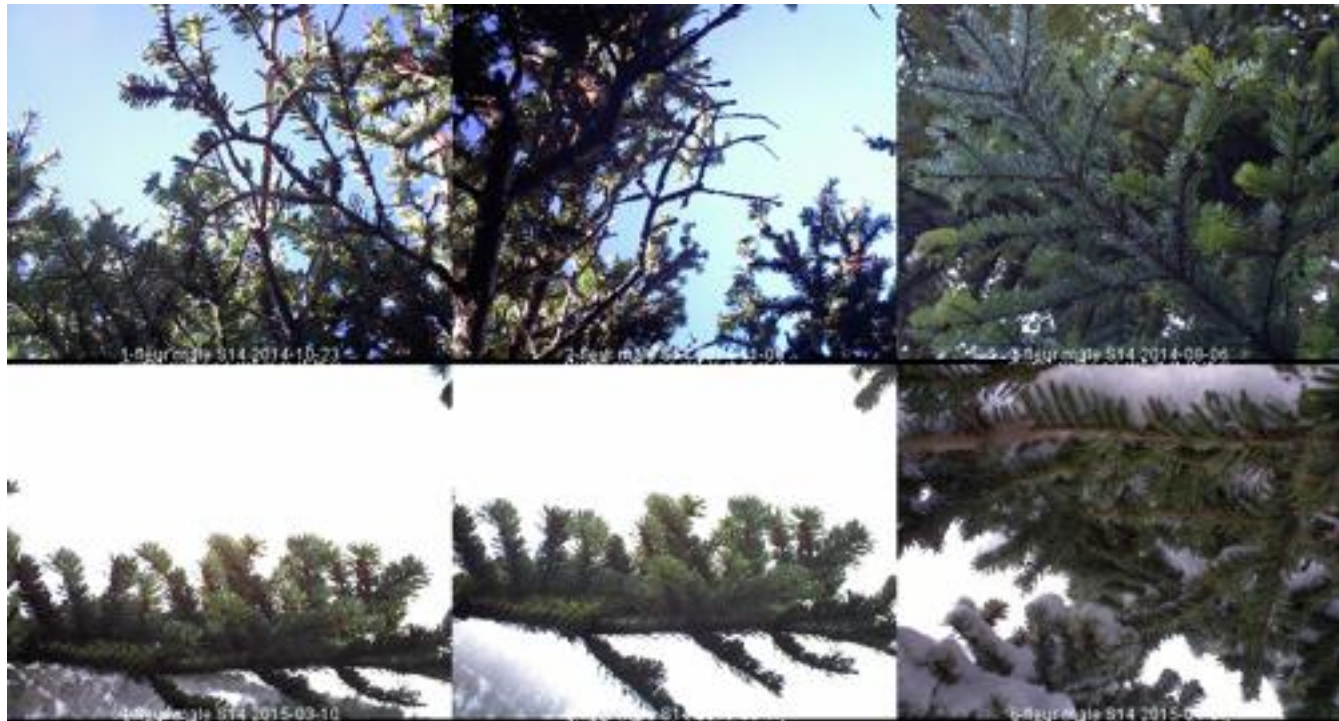
Evolution génétique

Taux d'évolution de G0 à G5



Quelques perspectives

1. De la parcelle au massif forestier
2. Approche pluri-spécifique et multi-traits
3. Evolution génétique du sapin
4. Modélisation de la reproduction



MERCI !!!!!

