



Adaptation des arbres forestiers au changement climatique, Contexte, stratégie de recherche, exemples...

Philippe Rozenberg

► To cite this version:

Philippe Rozenberg. Adaptation des arbres forestiers au changement climatique, Contexte, stratégie de recherche, exemples.... École thématique. France. 2019. hal-03552181

HAL Id: hal-03552181

<https://hal.inrae.fr/hal-03552181>

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

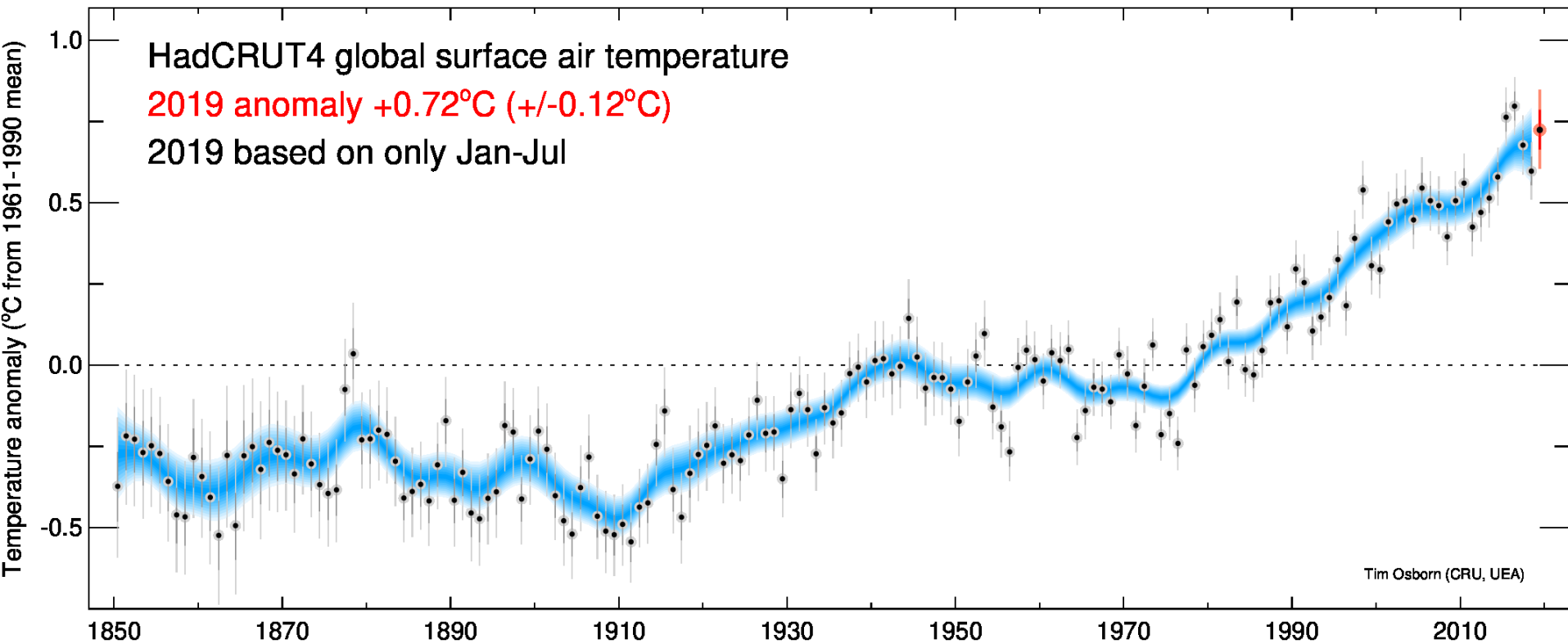
Contexte, stratégie de recherche, exemples...

Philippe Rozenberg,
INRA Val de Loire, Orléans



Changement climatique

- Réchauffement
- Autres variables



https://crudata.uea.ac.uk/~timo/diag/tempts_decadesmooth_global.png

Les manifestations les plus évidentes

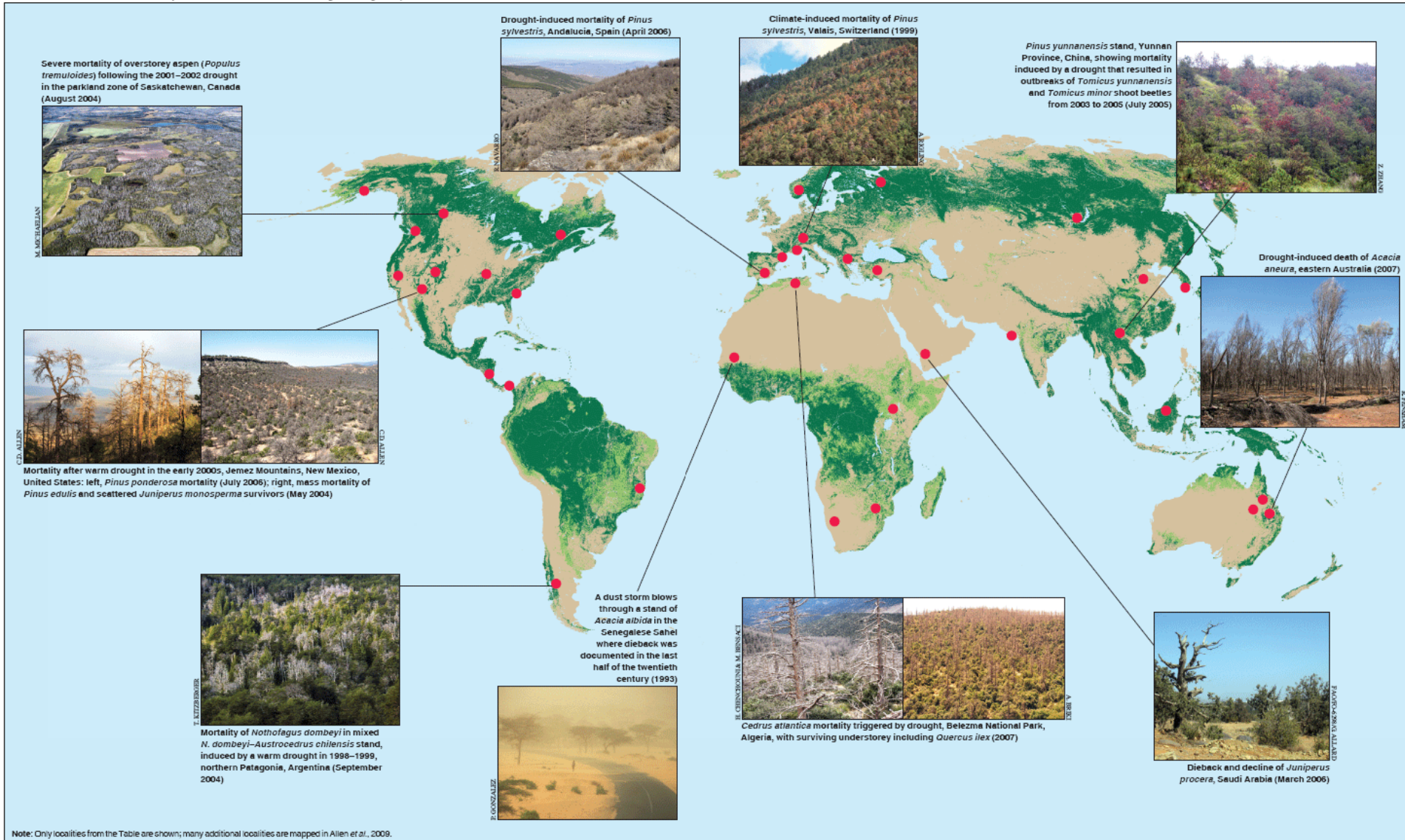
- dépérissements



Pinus ponderosa, Patagonia, Argentina, 2011

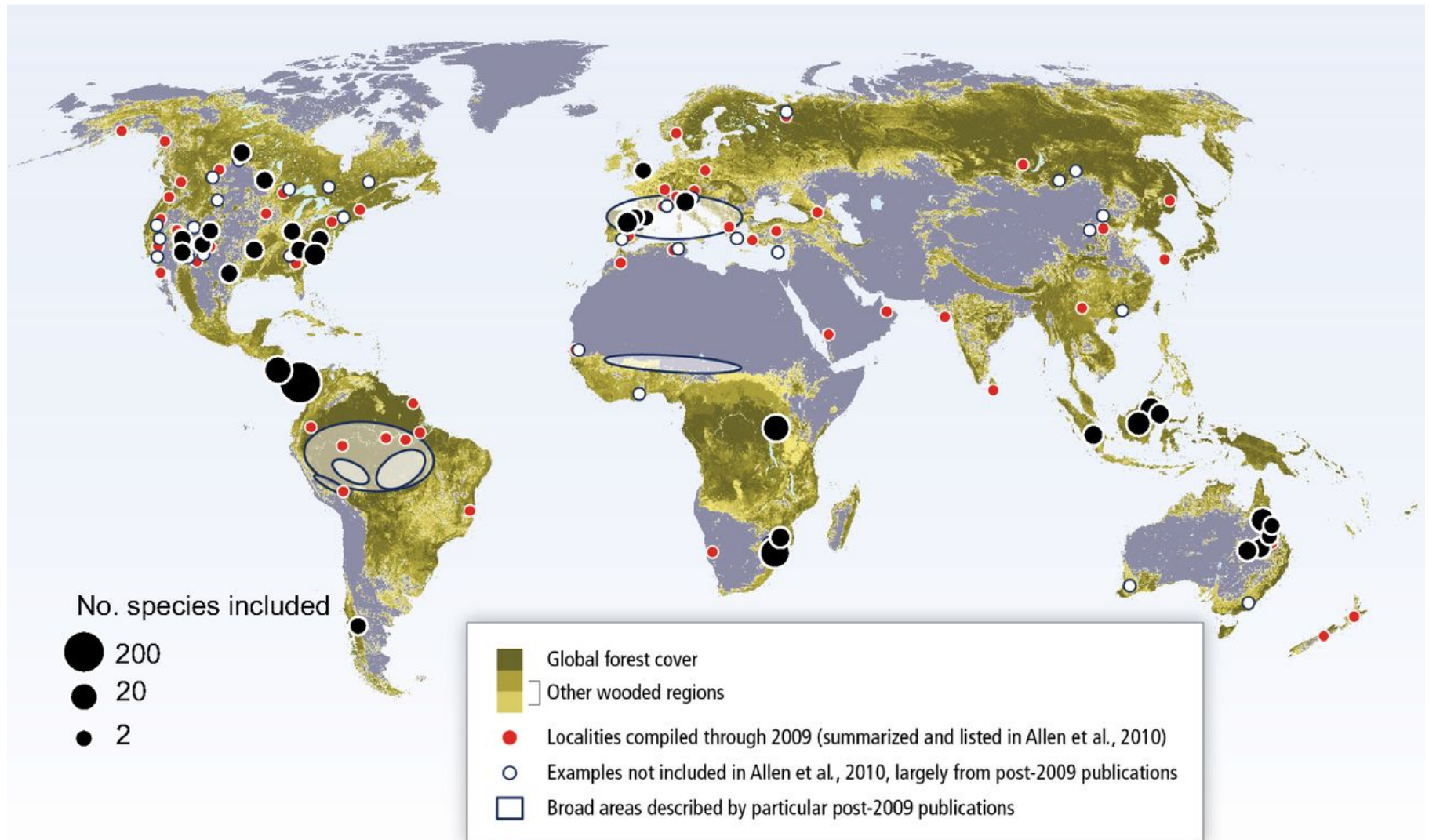
Dépérissements forestiers (synthèse 2010)

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



Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? C.D. Allen

Dépérissements forestiers (synthèse 2016)



Anderegg, Leander D. L., et Janneke HilleRisLambers. 2016. « Drought Stress Limits the Geographic Ranges of Two Tree Species via Different Physiological Mechanisms ». *Global Change Biology* 22 (3): 1029-45. doi:10.1111/gcb.13148.

Autres dépérissements récents et importants



Autres dépérissements récents et importants

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



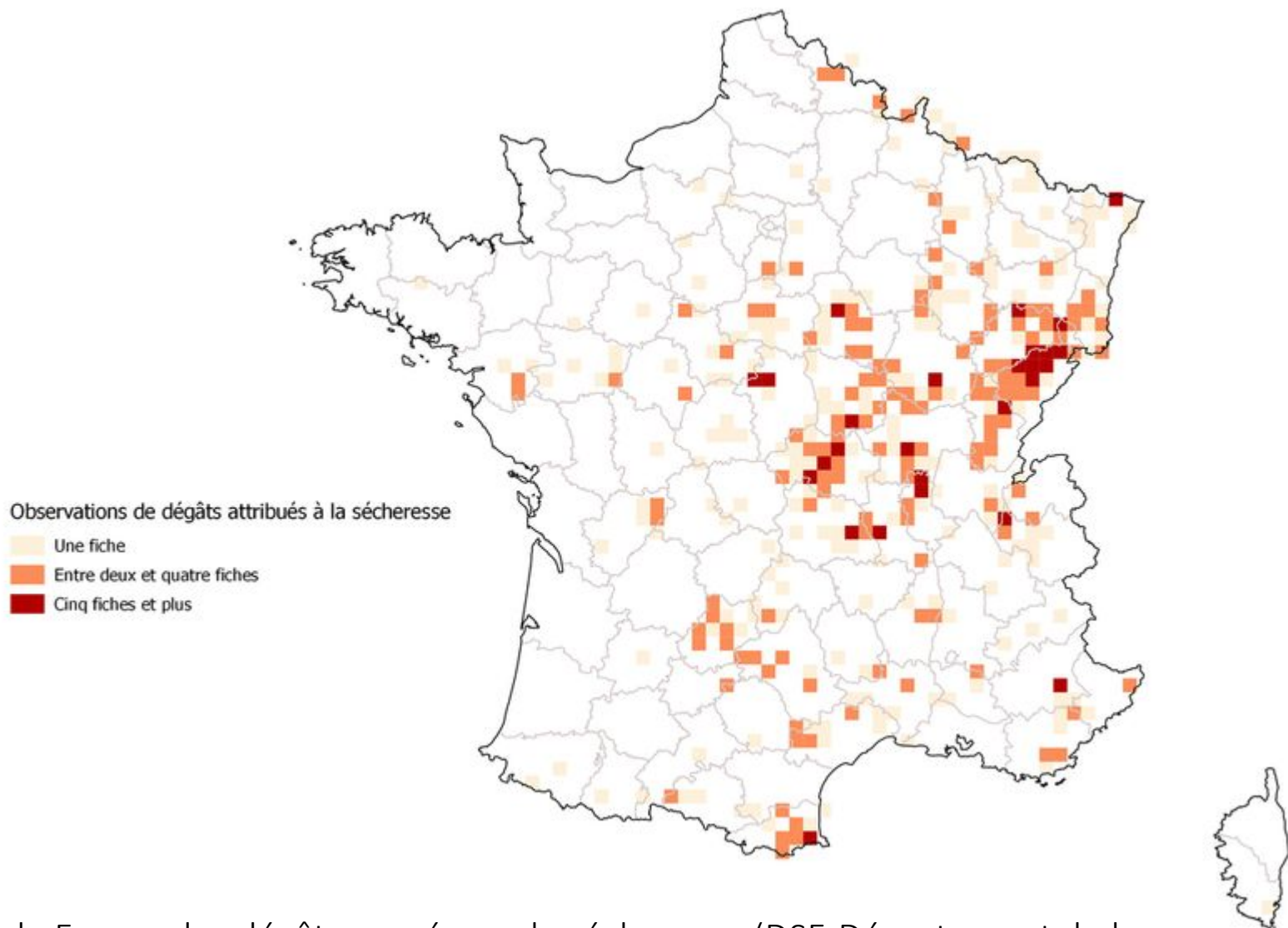
UGA1306003

Autres dépérissements récents et importants

« Sécheresse : les hêtres dépérissent dans les forêts de Haute-Saône » (20 août 2019 - [France Bleu Besançon](#))



Montage photo après/avant sécheresse sur une forêt de hêtres - DSF (Département de la Santé des Forêts)



Carte de France des dégâts causés par la sécheresse (DSF-Département de la Santé des Forêts, juillet 2019). Les essences les plus concernées par le dépérissement sont l'épicéa, le hêtre et le sapin, plus localement le pin sylvestre et le charme (ONF, septembre 2019)

Sécheresse, cause identifiée de dépérissements...

- ...de forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

Phillips, Oliver L., Geertje van der Heijden, Simon L. Lewis, Gabriela López-González, Luiz E. O. C. Aragão, Jon Lloyd, Yadvinder Malhi, et al. 2010. « Drought–mortality Relationships for Tropical Forests ». *New Phytologist* 187 (3): 631-46.

- ...de forêts boréales du Canada

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71.

- ...du cyprès de la cordillère en Patagonie

Mundo, Ignacio A., Verónica A. El Mujtar, Marcelo H. Perdomo, Leonardo A. Gallo, Ricardo Villalba, et Marcelo D. Barrera. 2010. « Austrocedrus Chilensis Growth Decline in Relation to Drought Events in Northern Patagonia, Argentina ». *Trees* 24 (3): 561-70.

- ...du bouleau en Sibérie

Kharuk, V. I., K. J. Ranson, P. A. Oskorbin, S. T. Im, et M. L. Dvinskaya. 2013. « Climate Induced Birch Mortality in Trans-Baikal Lake Region, Siberia. » *Forest Ecology and Management* 289. doi:10.1016/j.

- ...du douglas et du sapin en France...

Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, et Nathalie Bréda. « Douglas-fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites ». *Annals of Forest Science* (2012): 1-12.

Cailleret, Maxime, Marie Nourtier, Annabelle Amm, Marion Durand-Gillmann, et Hendrik Davi. 2013. « Drought-Induced Decline and Mortality of Silver Fir Differ among Three Sites in Southern France ». *Annals of Forest Science* 71 (6): 643-57.

Sécheresse, cause identifiée de dépérissements...

- ...de forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

Phillips, Oliver L., Geertje van der Heijden, Simon L. Lewis, Gabriela López-González, Luiz E. O. C. Aragão, Jon Lloyd, Yadvinder Malhi, et al. 2010. « Drought–mortality Relationships for Tropical Forests ». *New Phytologist* 187 (3): 631-46.

- ...de forêts boréales du Canada

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qiuhan Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71.

- ...du cyprès de la cordillère en Patagonie

Mundo, Ignacio A., Verónica A. El Mujtar, Marcelo H. Perdomo, Leonardo A. Gallo, Ricardo Villalba, et Marcelo D. Barrera. 2010. « Austrocedrus Chilensis Growth Decline in Relation to Drought Events in Northern Patagonia, Argentina ». *Trees* 24 (3): 561-70.

- ...du bouleau en Sibérie

Kharuk, V. I., K. J. Ranson, P. A. Oskorbin, S. T. Im, et M. L. Dvinskaya. 2013. « Climate Induced Birch Mortality in Trans-Baikal Lake Region, Siberia. » *Forest Ecology and Management* 289. doi:10.1016/j.

- ...du douglas et du sapin en France...

Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, et Nathalie Bréda. « Douglas-fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites ». *Annals of Forest Science* (2012): 1-12.

Cailleret, Maxime, Marie Nourtier, Annabelle Amm, Marion Durand-Gillmann, et Hendrik Davi. 2013. « Drought-Induced Decline and Mortality of Silver Fir Differ among Three Sites in Southern France ». *Annals of Forest Science* 71 (6): 643-57.

Sécheresse, cause identifiée de dépérissements...

- ...de forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

Phillips, Oliver L., Geertje van der Heijden, Simon L. Lewis, Gabriela López-González, Luiz E. O. C. Aragão, Jon Lloyd, Yadvinder Malhi, et al. 2010. « Drought–mortality Relationships for Tropical Forests ». *New Phytologist* 187 (3): 631-46.

- ...de forêts boréales du Canada

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71.

- ...du cyprès de la cordillère en Patagonie

Mundo, Ignacio A., Verónica A. El Mujtar, Marcelo H. Perdomo, Leonardo A. Gallo, Ricardo Villalba, et Marcelo D. Barrera. 2010. « Austrocedrus Chilensis Growth Decline in Relation to Drought Events in Northern Patagonia, Argentina ». *Trees* 24 (3): 561-70.

- ...du bouleau en Sibérie

Kharuk, V. I., K. J. Ranson, P. A. Oskorbin, S. T. Im, et M. L. Dvinskaya. 2013. « Climate Induced Birch Mortality in Trans-Baikal Lake Region, Siberia. » *Forest Ecology and Management* 289. doi:10.1016/j.

- ...du douglas et du sapin en France...

Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, et Nathalie Bréda. « Douglas-fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites ». *Annals of Forest Science* (2012): 1-12.

Cailleret, Maxime, Marie Nourtier, Annabelle Amm, Marion Durand-Gillmann, et Hendrik Davi. 2013. « Drought-Induced Decline and Mortality of Silver Fir Differ among Three Sites in Southern France ». *Annals of Forest Science* 71 (6): 643-57.

Sécheresse, cause identifiée de dépérissements...

- ...de forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

Phillips, Oliver L., Geertje van der Heijden, Simon L. Lewis, Gabriela López-González, Luiz E. O. C. Aragão, Jon Lloyd, Yadvinder Malhi, et al. 2010. « Drought–mortality Relationships for Tropical Forests ». *New Phytologist* 187 (3): 631-46.

- ...de forêts boréales du Canada

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71.

- ...du cyprès de la cordillère en Patagonie

Mundo, Ignacio A., Verónica A. El Mujtar, Marcelo H. Perdomo, Leonardo A. Gallo, Ricardo Villalba, et Marcelo D. Barrera. 2010. « Austrocedrus Chilensis Growth Decline in Relation to Drought Events in Northern Patagonia, Argentina ». *Trees* 24 (3): 561-70.

- ...du bouleau en Sibérie

Kharuk, V. I., K. J. Ranson, P. A. Oskorbin, S. T. Im, et M. L. Dvinskaya. 2013. « Climate Induced Birch Mortality in Trans-Baikal Lake Region, Siberia. » *Forest Ecology and Management* 289. doi:10.1016/j.

- ...du douglas et du sapin en France...

Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, et Nathalie Bréda. « Douglas-fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites ». *Annals of Forest Science* (2012): 1-12.

Cailleret, Maxime, Marie Nourtier, Annabelle Amm, Marion Durand-Gillmann, et Hendrik Davi. 2013. « Drought-Induced Decline and Mortality of Silver Fir Differ among Three Sites in Southern France ». *Annals of Forest Science* 71 (6): 643-57.

Sécheresse, cause identifiée de dépérissements...

- ...de forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

Phillips, Oliver L., Geertje van der Heijden, Simon L. Lewis, Gabriela López-González, Luiz E. O. C. Aragão, Jon Lloyd, Yadvinder Malhi, et al. 2010. « Drought–mortality Relationships for Tropical Forests ». *New Phytologist* 187 (3): 631-46.

- ...de forêts boréales du Canada

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qiuhan Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71.

- ...du cyprès de la cordillère en Patagonie

Mundo, Ignacio A., Verónica A. El Mujtar, Marcelo H. Perdomo, Leonardo A. Gallo, Ricardo Villalba, et Marcelo D. Barrera. 2010. « Austrocedrus Chilensis Growth Decline in Relation to Drought Events in Northern Patagonia, Argentina ». *Trees* 24 (3): 561-70.

- ...du bouleau en Sibérie

Kharuk, V. I., K. J. Ranson, P. A. Oskorbin, S. T. Im, et M. L. Dvinskaya. 2013. « Climate Induced Birch Mortality in Trans-Baikal Lake Region, Siberia. » *Forest Ecology and Management* 289. doi:10.1016/j.

- ...du douglas et du sapin en France...

Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, et Nathalie Bréda. « Douglas-fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites ». *Annals of Forest Science* (2012): 1-12.

Cailleret, Maxime, Marie Nourtier, Annabelle Amm, Marion Durand-Gillmann, et Hendrik Davi. 2013. « Drought-Induced Decline and Mortality of Silver Fir Differ among Three Sites in Southern France ». *Annals of Forest Science* 71 (6): 643-57.

...du pin maritime en Espagne

- “(...) maritime pine decline seems to be mainly driven by a combination of predisposing and inciting abiotic factors (microenvironment and drought stress) and biotic factors (mistletoe). (...) our results strongly suggest that **water stress plays a major role** in the decline process of the dominant species on an ecosystem with strong land-use legacies.”
- Gea-Izquierdo, G., Ferriz, M., García-Garrido, S., Aguín, O., Elvira-Recuenco, M., Hernandez-Escribano, L., Martin-Benito, D., and Raposo, R. (2019). Synergistic abiotic and biotic stressors explain widespread decline of *Pinus pinaster* in a mixed forest. *Science of The Total Environment* 685, 963–975.

...du pin ponderosa aux Etats-Unis

- “48.9% of trees died. *Pinus ponderosa* exhibited the highest levels of mortality (89.6%) (...) Mortality of *P. ponderosa* was (...) attributed mostly to *Dendroctonus brevicomis*.”
- Fettig, C.J., Mortenson, L.A., Bulaon, B.M., and Foulk, P.B. (2019). Tree mortality following drought in the central and southern Sierra Nevada, California, U.S. *Forest Ecology and Management* 432, 164–178.

...du tremble en Amérique du Nord

- "...Sudden aspen decline is a novel decline disease complex induced by drought and exacerbated by a variety of factors..."
- Singer, J.A., Turnbull, R., Foster, M., Bettigole, C., Frey, B.R., Downey, M.C., Covey, K.R., and Ashton, M.S. (2019). Sudden Aspen Decline: A Review of Pattern and Process in a Changing Climate. *Forests* 10, 671.

Augmentation globale de la *mortalité* due à la sécheresse ?

- Oui dans l'ouest des Etats-Unis

Van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, et al. 2009. « Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States ». *Science* 323 (5913): 521-24. doi:10.1126/science.1165000.

- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71. doi:10.1038/nclimate1293.

- Globalement, oui également, mais faiblement et plutôt en climats secs

Steinkamp, Jörg, et Thomas Hickler. 2015. « Is Drought-Induced Forest Dieback Globally Increasing? ». *Journal of Ecology* 103 (1): 31-43. doi:10.1111/1365-2745.12335.

Augmentation globale de la *mortalité* due à la sécheresse ?

- Oui dans l'ouest des Etats-Unis

Van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, et al. 2009. « Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States ». *Science* 323 (5913): 521-24. doi:10.1126/science.1165000.

- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qiuhan Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71. doi:10.1038/nclimate1293.

- Globalement, oui également, mais faiblement et plutôt en climats secs

Steinkamp, Jörg, et Thomas Hickler. 2015. « Is Drought-Induced Forest Dieback Globally Increasing? ». *Journal of Ecology* 103 (1): 31-43. doi:10.1111/1365-2745.12335.

Augmentation globale de la *mortalité* due à la sécheresse ?

- Oui dans l'ouest des Etats-Unis

Van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, et al. 2009. « Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States ». *Science* 323 (5913): 521-24. doi:10.1126/science.1165000.

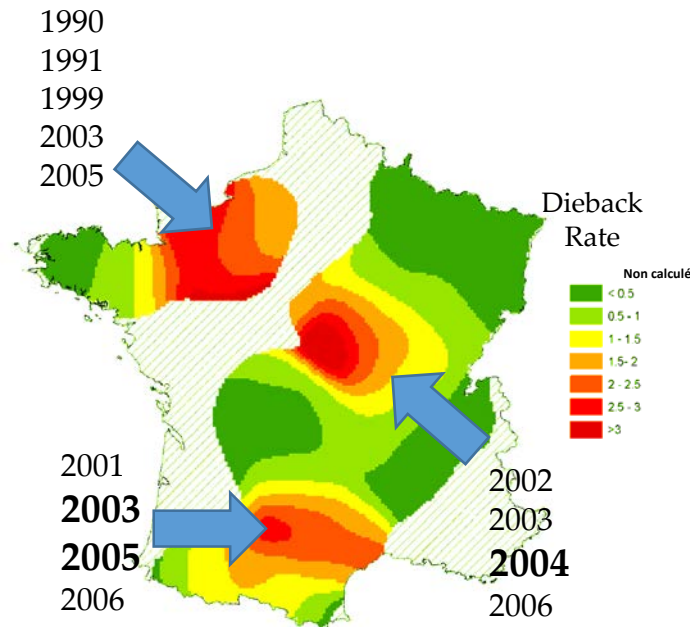
- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71. doi:10.1038/nclimate1293.

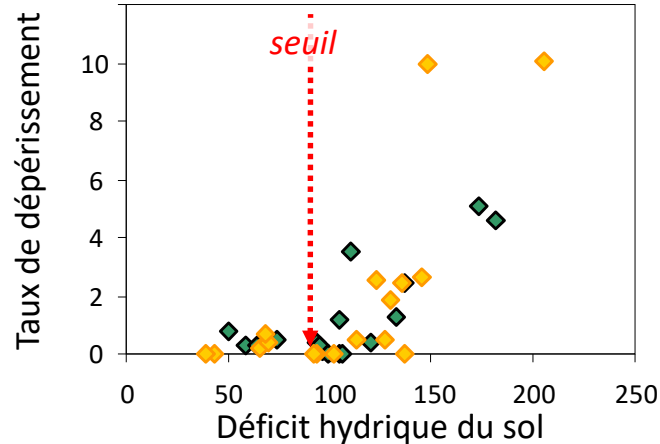
- Globalement : oui également, encore faiblement et plutôt en climats secs

Steinkamp, Jörg, et Thomas Hickler. 2015. « Is Drought-Induced Forest Dieback Globally Increasing? ». *Journal of Ecology* 103 (1): 31-43. doi:10.1111/1365-2745.12335.

Le cas du douglas en France



- Déficit hydrique du sol



Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, Nathalie Bréda 2012 « Douglas-Fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites », *Annals of Forest Science*, 1-12.

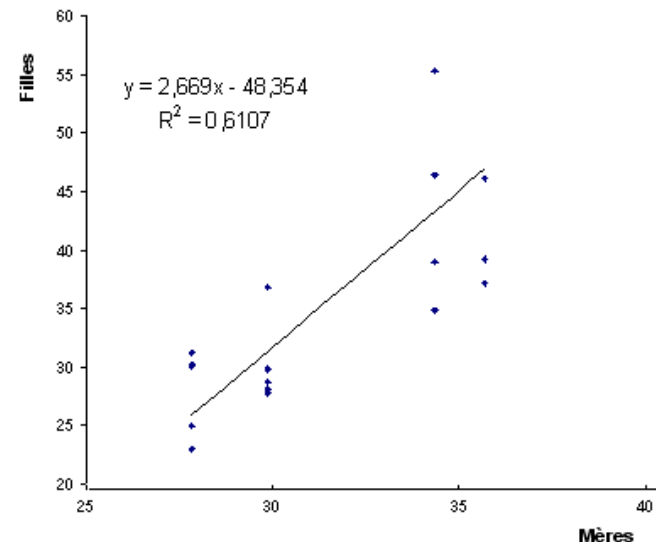
Caractéristiques des épisodes de mortalité

- **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**



Potentiel d'adaptation : adaptation *évolutive* (génétique)

- Possible ?
 - Variation *phénotypique*
 - Déterminisme génétique
 - Variation *génétique*
 - *Héritabilité* (potentiel de transmission)



Caractères adaptatifs

- Caractères *adaptatifs pertinents* ?

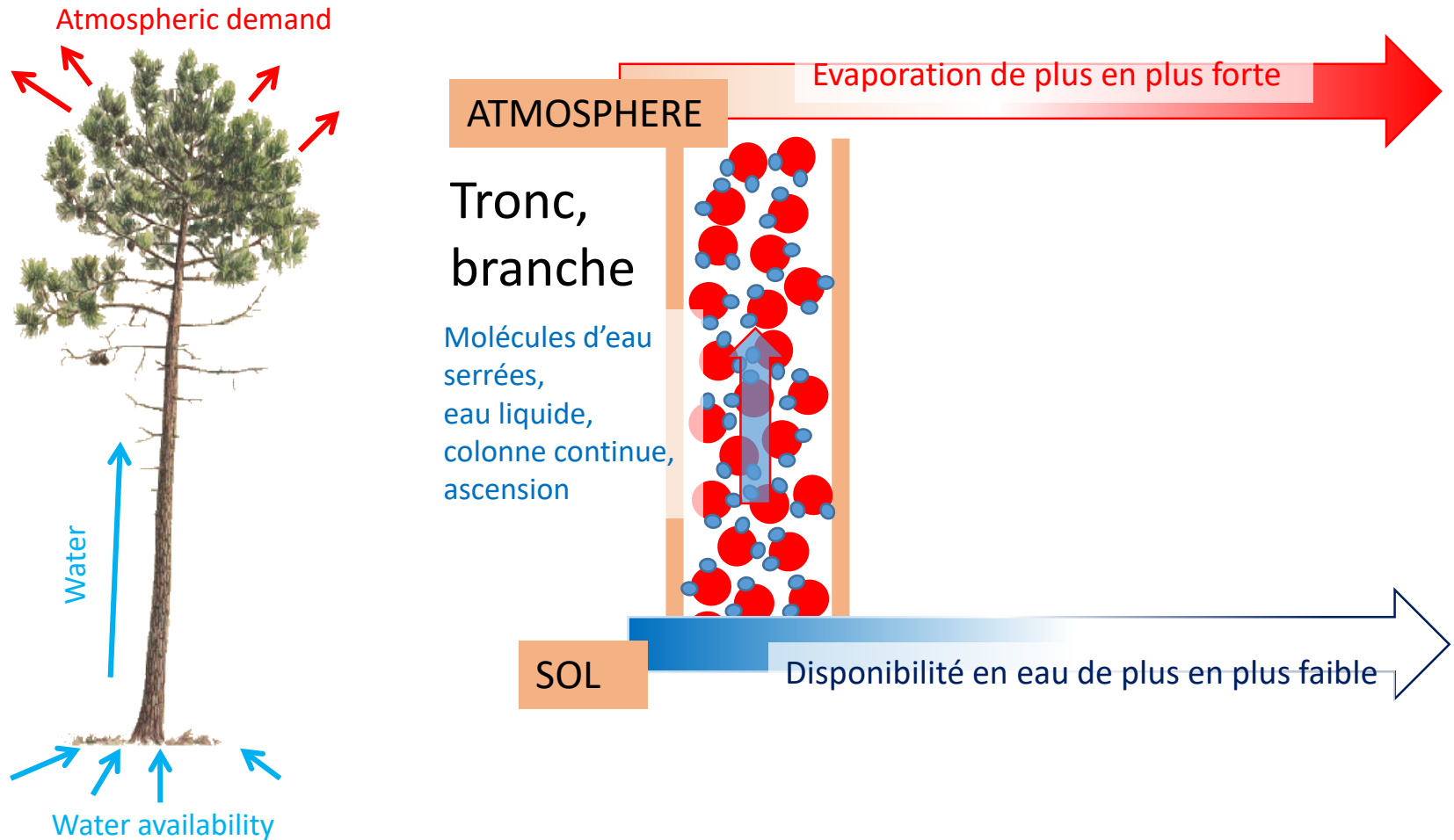
1. *adaptatifs* ?

- Relation avec la *fitness* (= valeur adaptative = succès reproducteur global)
- succès reproducteur global = potentiel de reproduction + survie

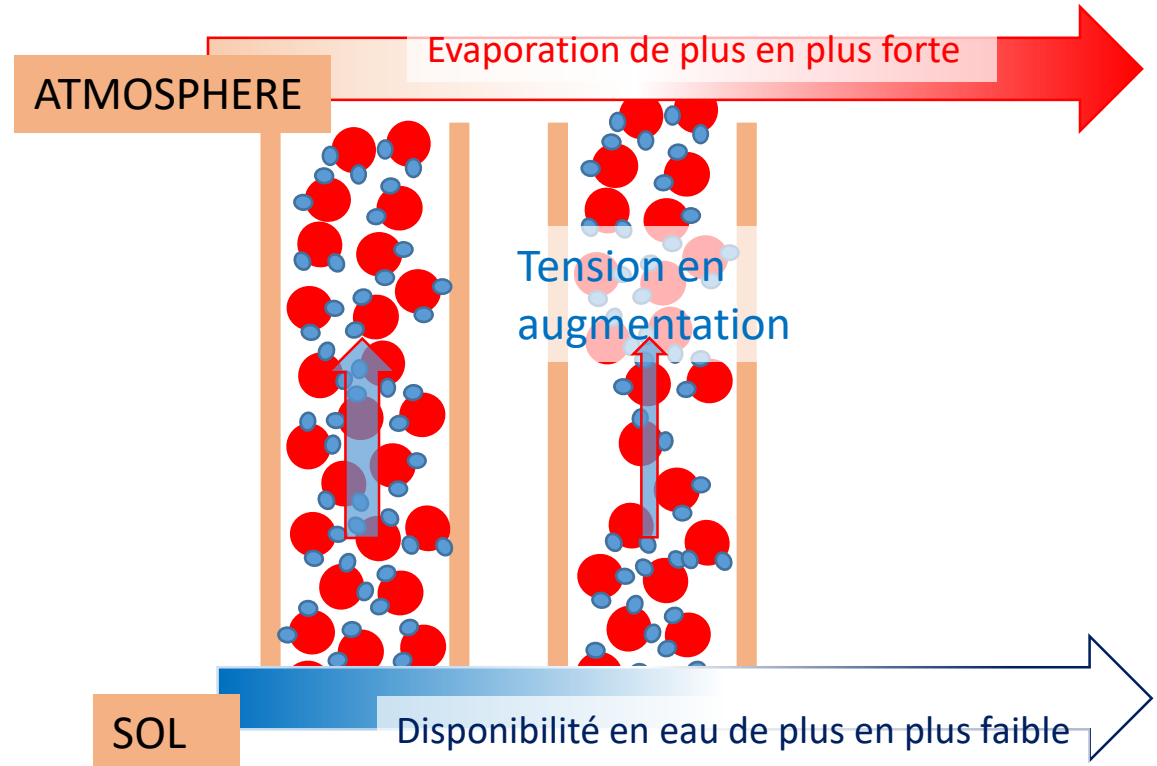
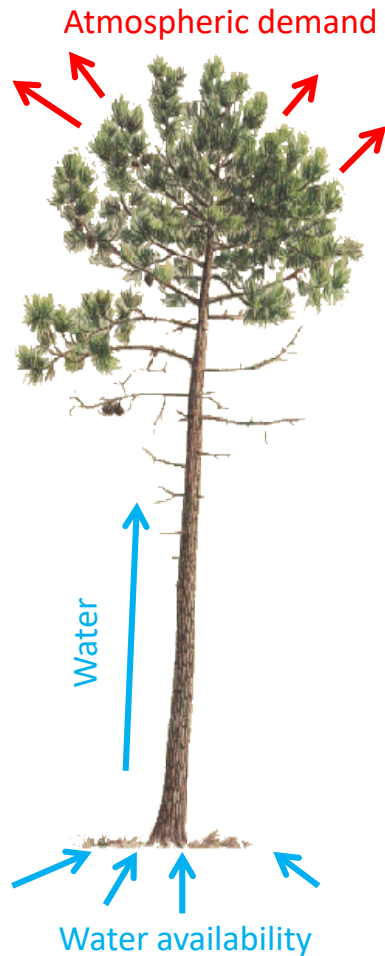
2. *pertinents* ?

- sécheresses -> résistance à la sécheresse – caractères *fonctionnels*

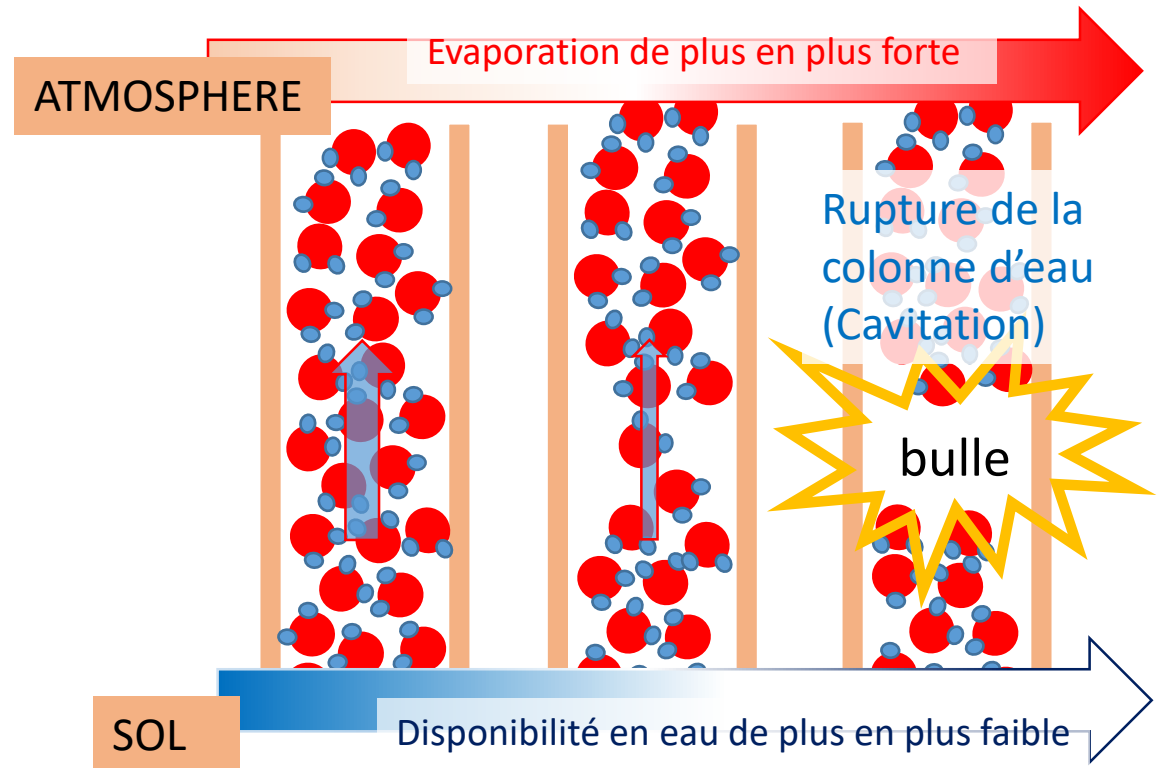
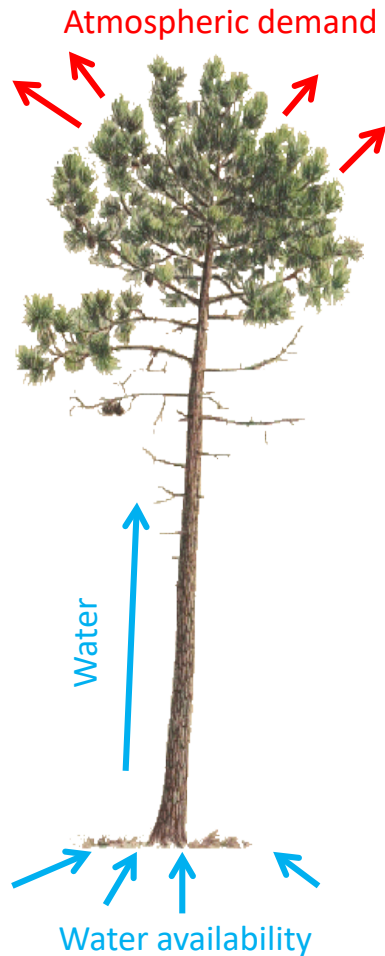
Sécheresse et déficience hydraulique



Sécheresse et déficience hydraulique



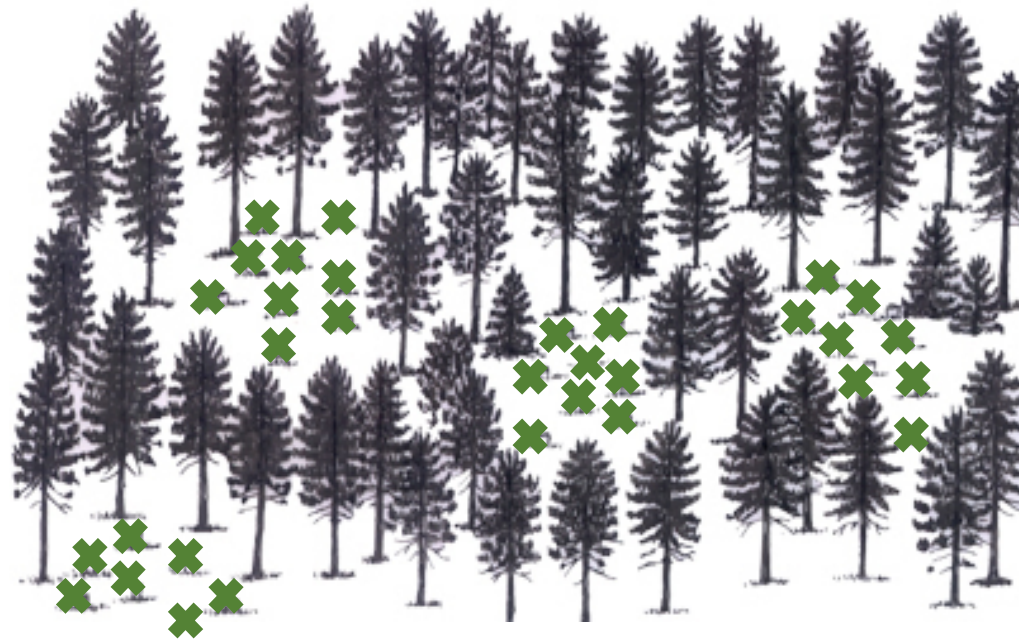
Sécheresse et déficience hydraulique



Cavitation (embolie)

Dépérissements et évolution

- Échecs de systèmes de production... *et mécanisme évolutif de sélection naturelle*
- Nombre de survivants
- Survivants plus résistants

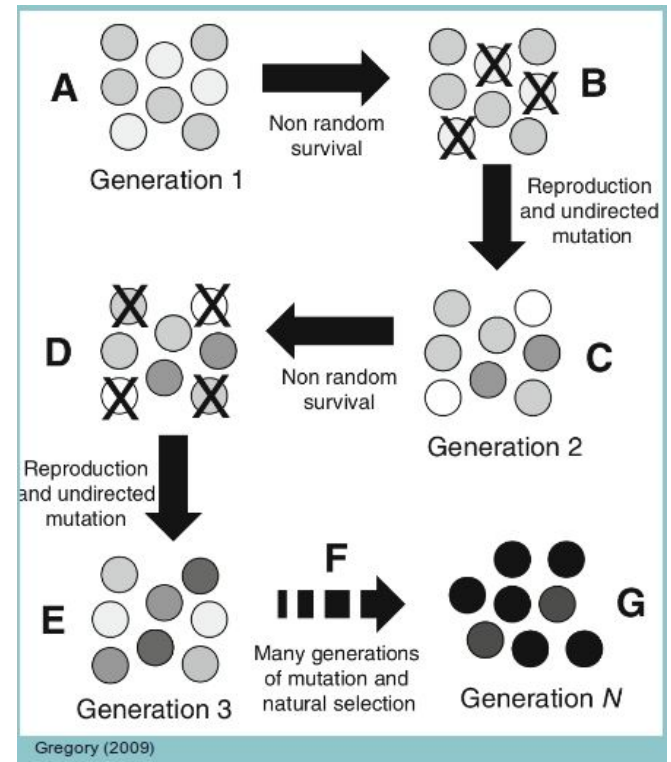


En général... dépérissements et évolution

En fonction...

- Du taux de sélection ;
 - De la variation phénotypique ;
 - De la variation génétique ;
 - De l'héritabilité
- ...des caractères *adaptatifs* pertinents,
 - On peut *profiter des dépérissements pour favoriser et accélérer la sélection naturelle*

<https://bioteaching.files.wordpress.com/2012/03/img19.jpg>



Exemple du douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en France



- Existe-t-il un potentiel d'adaptation génétique à la sécheresse ?

Caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse

- Caractères adaptatif et *fitness (succès reproducteur global)*
 - Potentiel de reproduction



Caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse

- Caractères adaptatif et *fitness (succès reproducteur global)*
 - Potentiel de reproduction



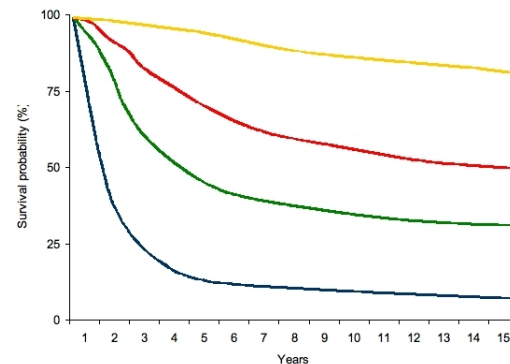
- Très difficile à mesurer chez les arbres

Caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse

- Caractères adaptatif et *fitness (succès reproducteur global)*
 - Potentiel de reproduction



- Survie : comparer morts et survivants



Comparer arbres morts et survivants

- Quels caractères ?

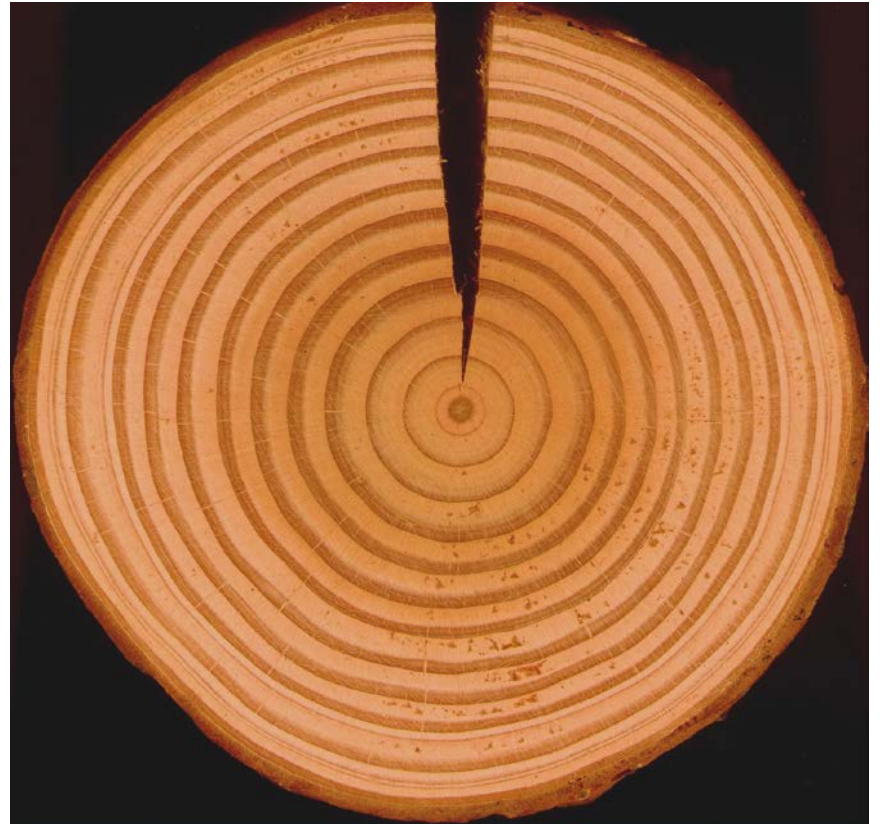
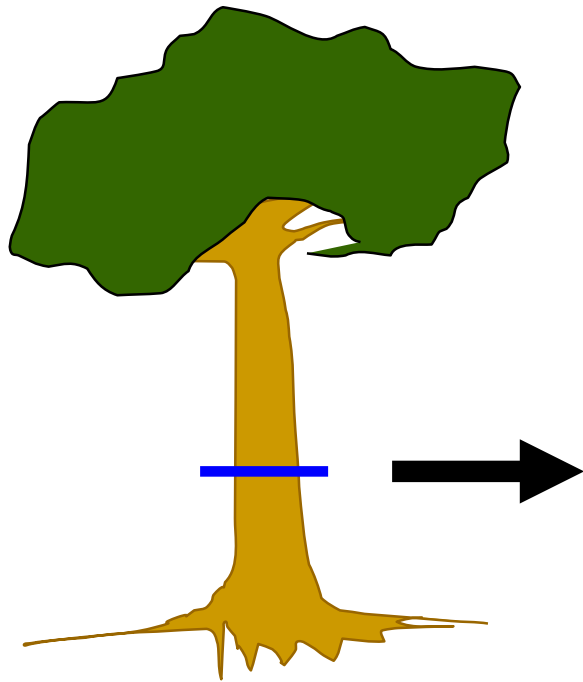


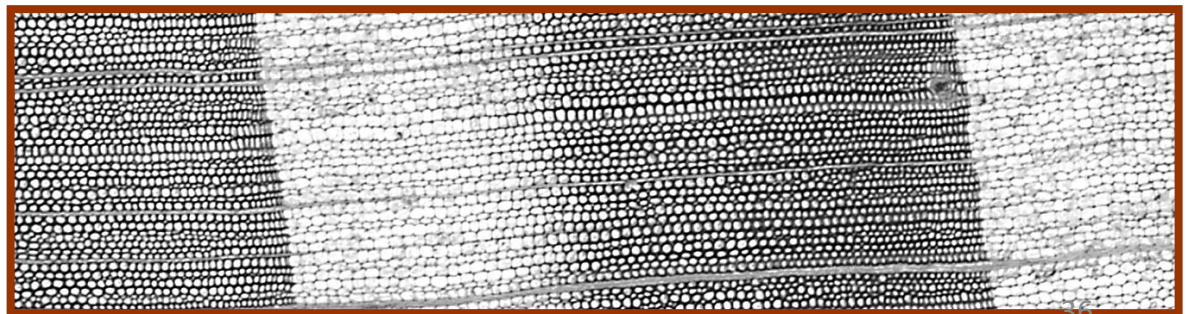
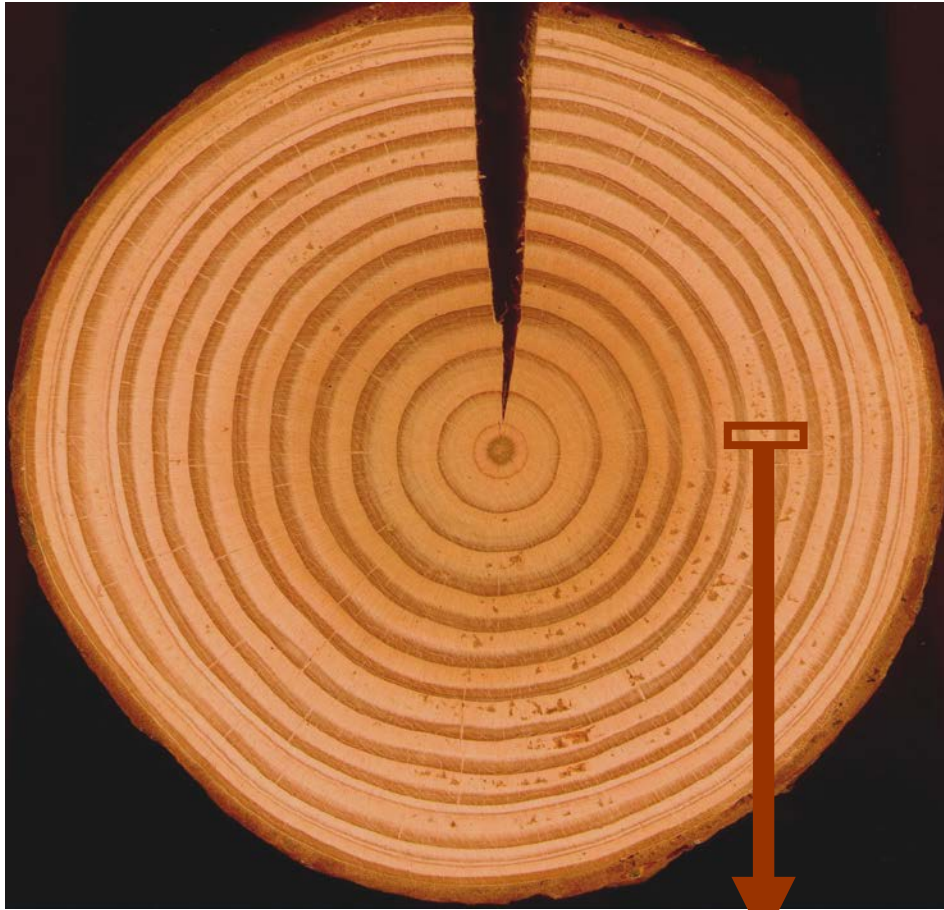
Problème méthodologique :

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

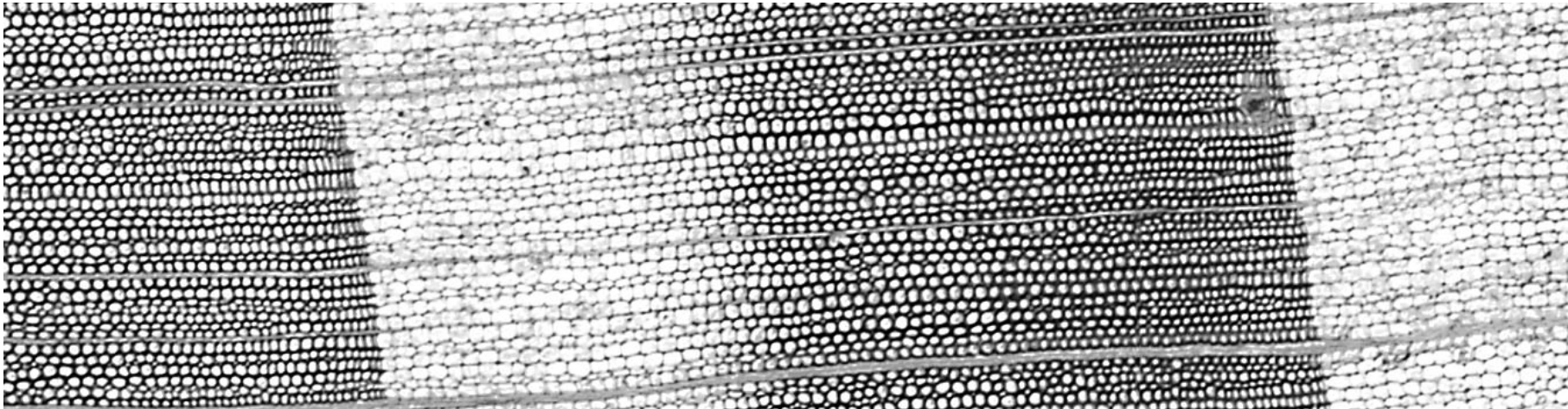
Comparer arbres morts et survivants

- Le bois





Cerne



Bois
initial

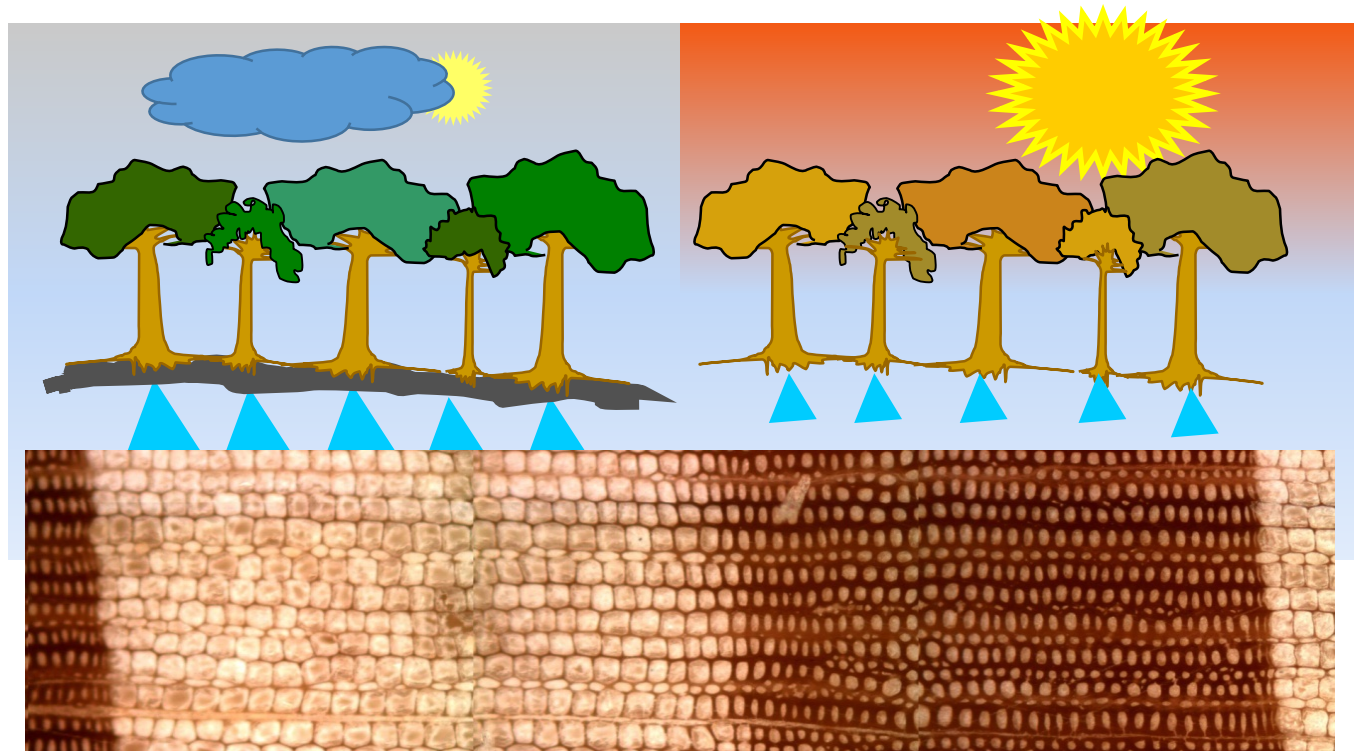
(transition)

Bois
final

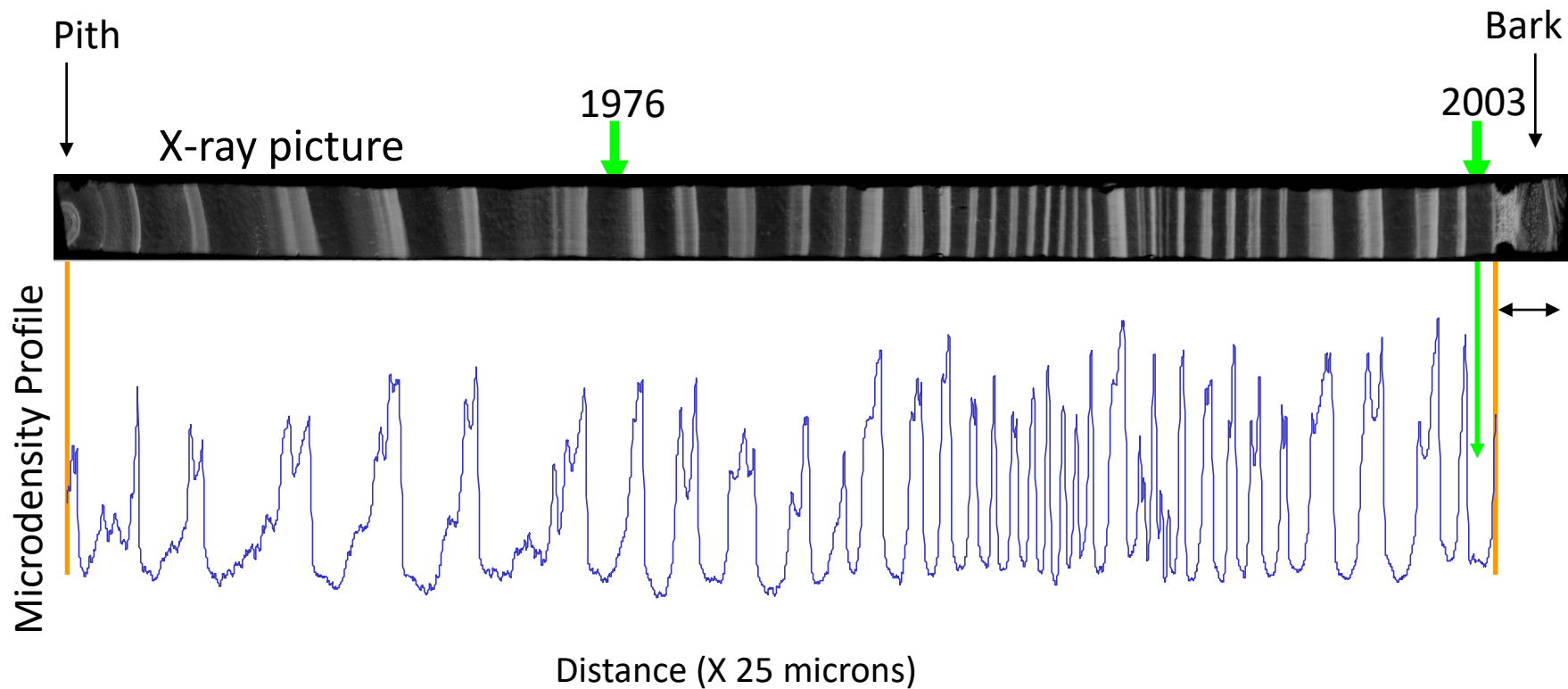
Pseudotsuga menziesii

Les cernes

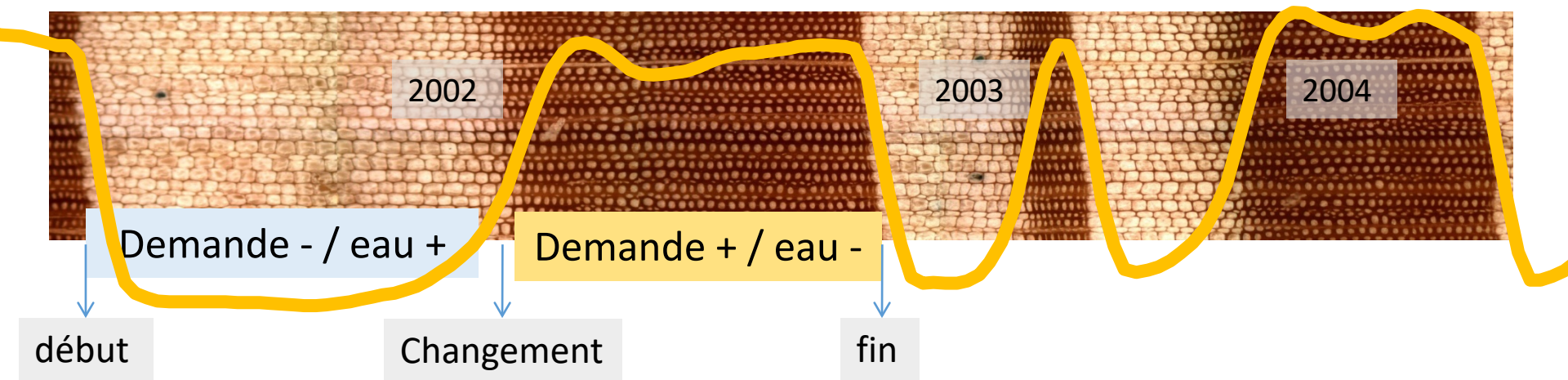
- Un cerne = un an = une saison de végétation
- Fonctions
 - Support
 - Réserves
 - Conduction
- Accès
rétrospectif



Microdensité indirecte aux rayons X



Microdensité

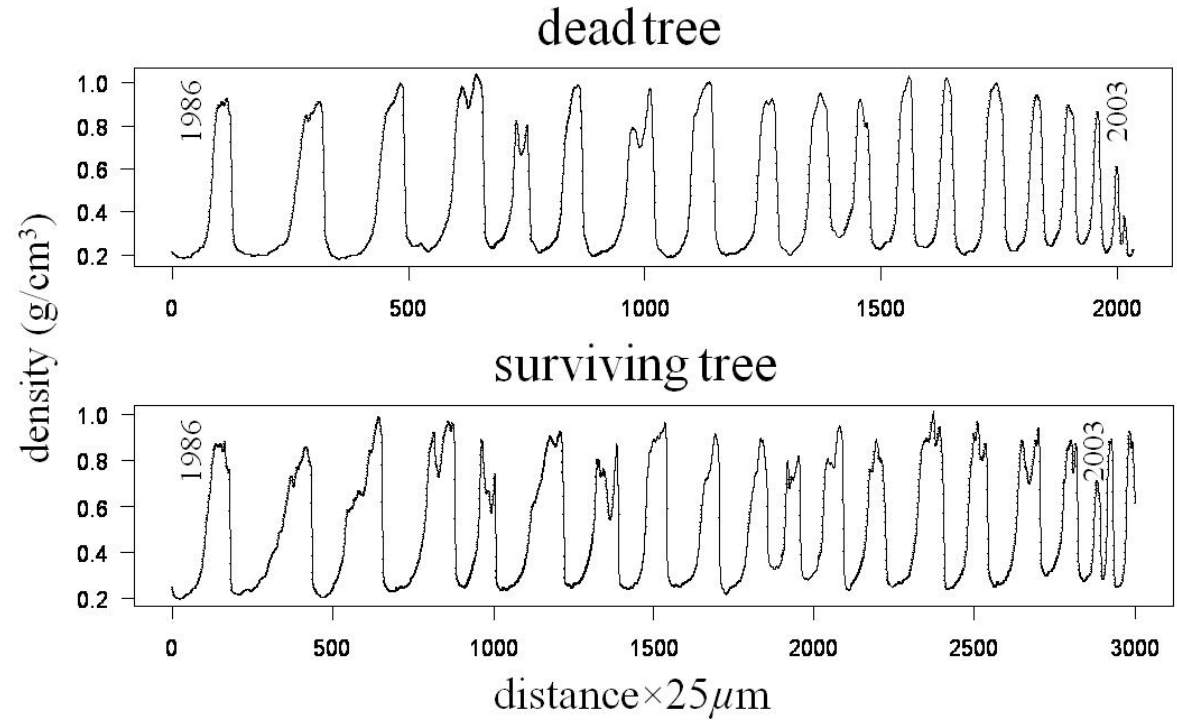


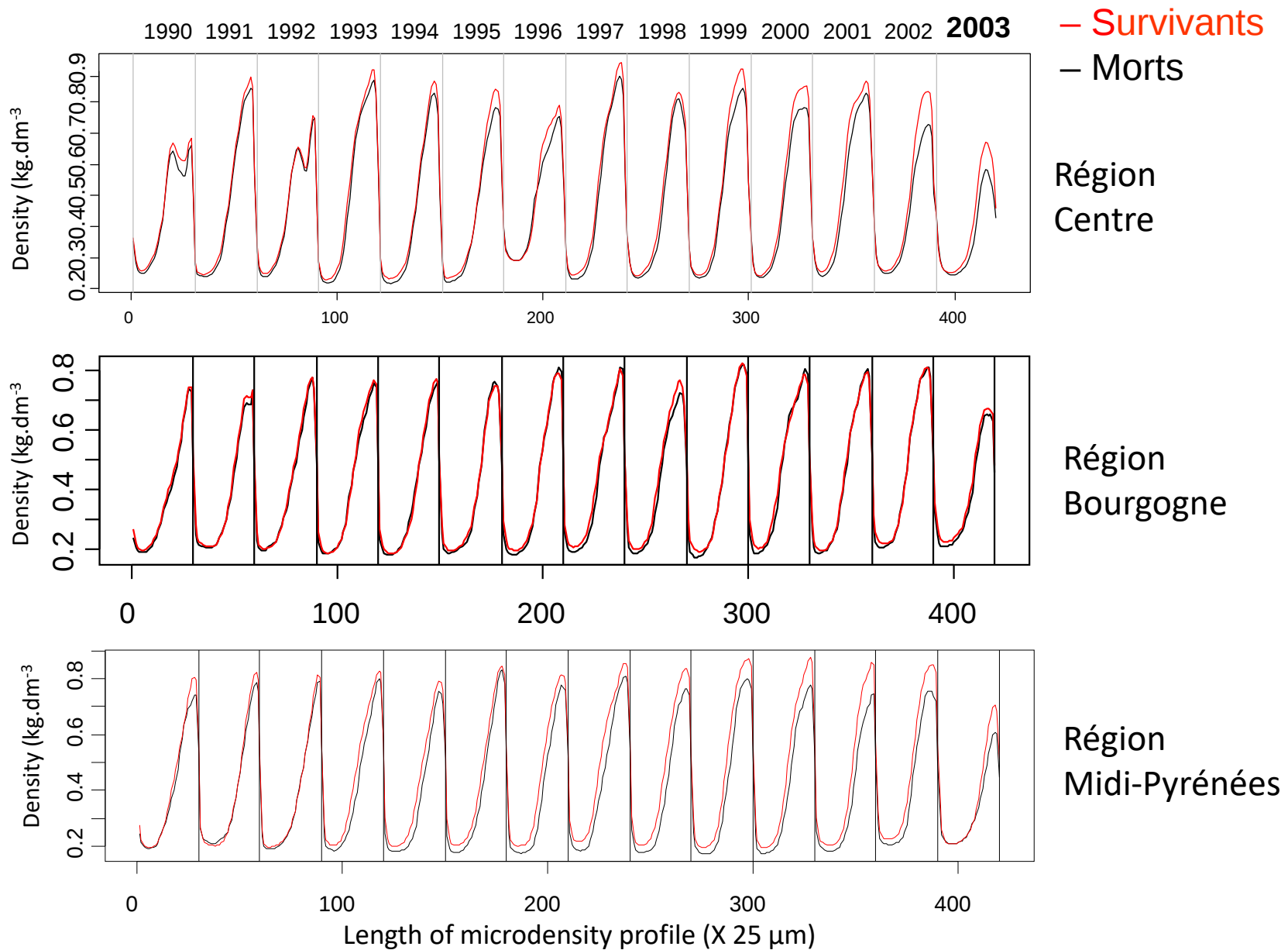
Carottes



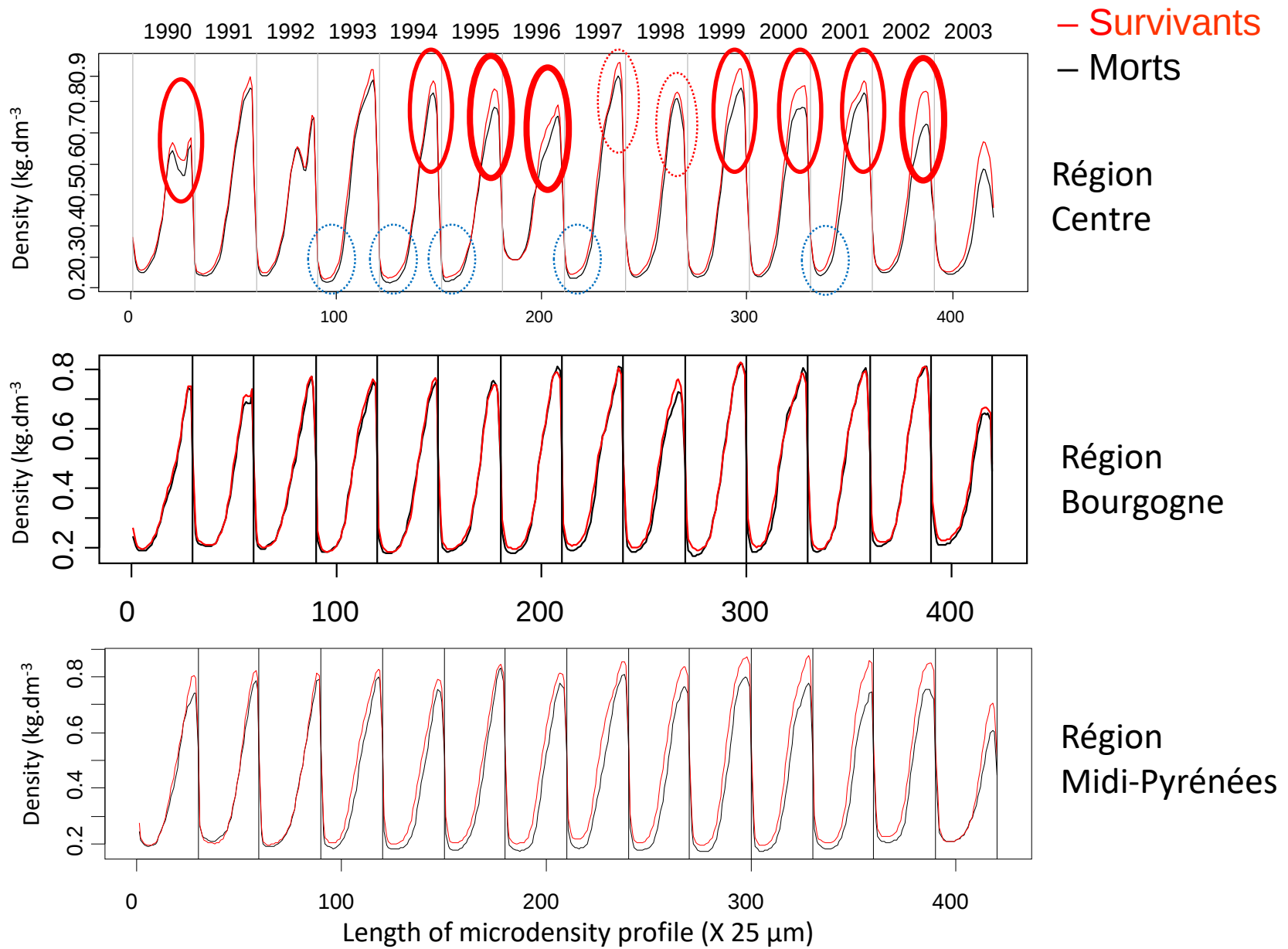
Profils d'arbres morts et survivants

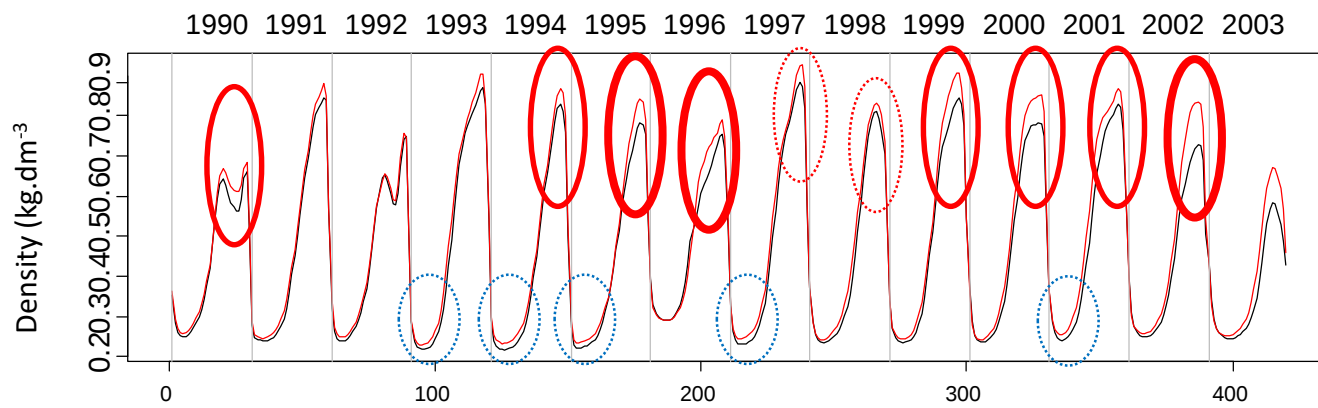
Martinez-Meier, A., L. Sanchez, M. Pastorino, L. Gallo, et P. Rozenberg.
« What Is Hot in Tree Rings? the Wood Density of Surviving Douglas-firs to the 2003 Drought and Heat Wave. » *Forest Ecology and Management* 256, n° 4 (2008).





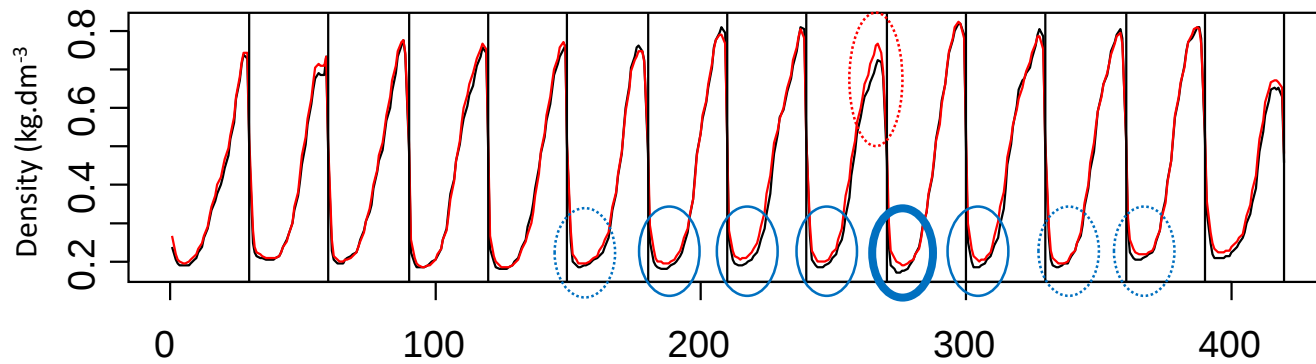
Ruiz Diaz Britez, Manuela, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, et Philippe Rozenberg. « Wood density proxies of adaptive traits linked with resistance to drought in douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) ». *Trees*, s. d., 1-16.



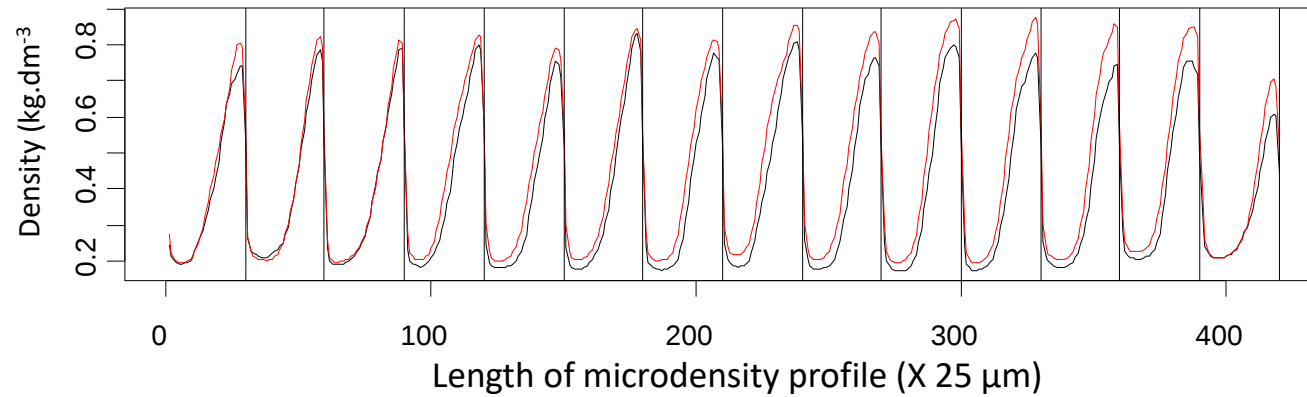


– Survivants
– Morts

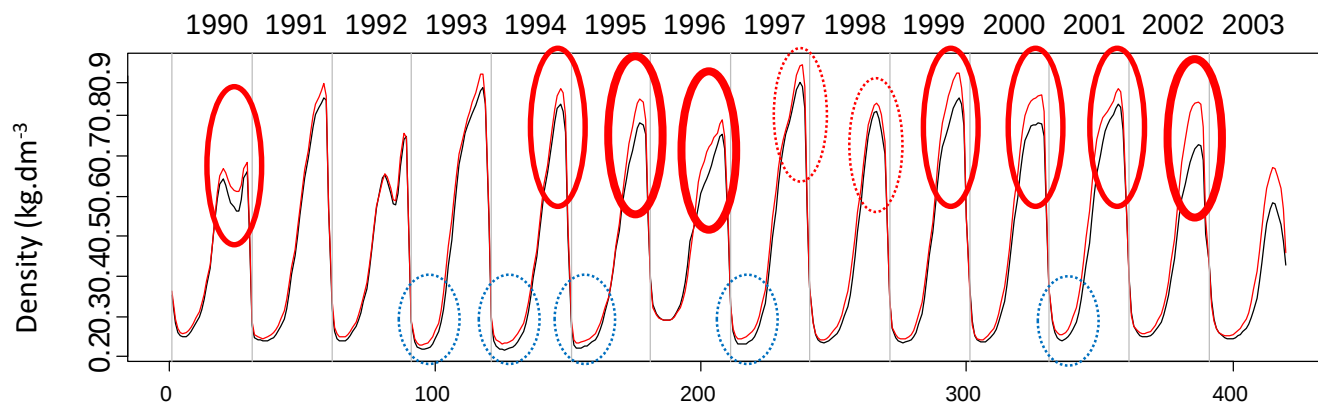
Région
Centre



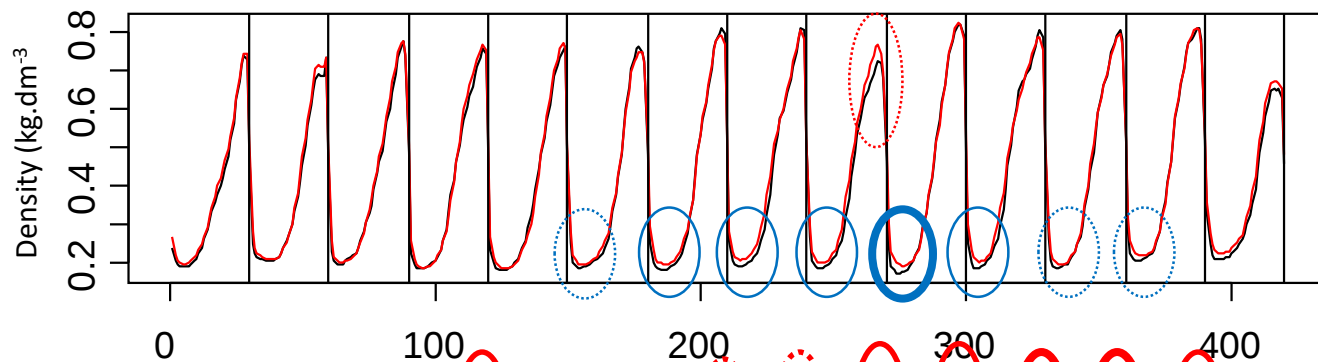
Région
Bourgogne



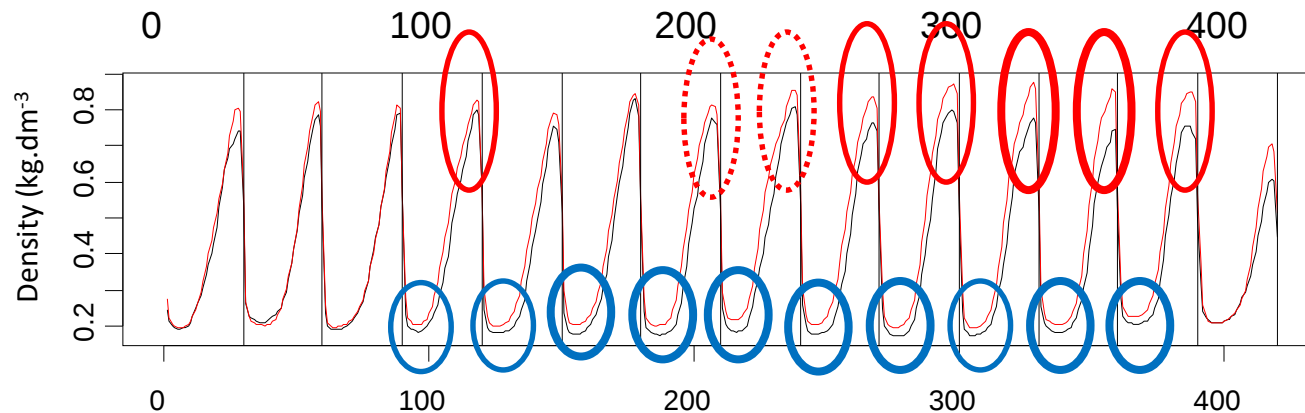
Région
Midi-Pyrénées



Région
Centre

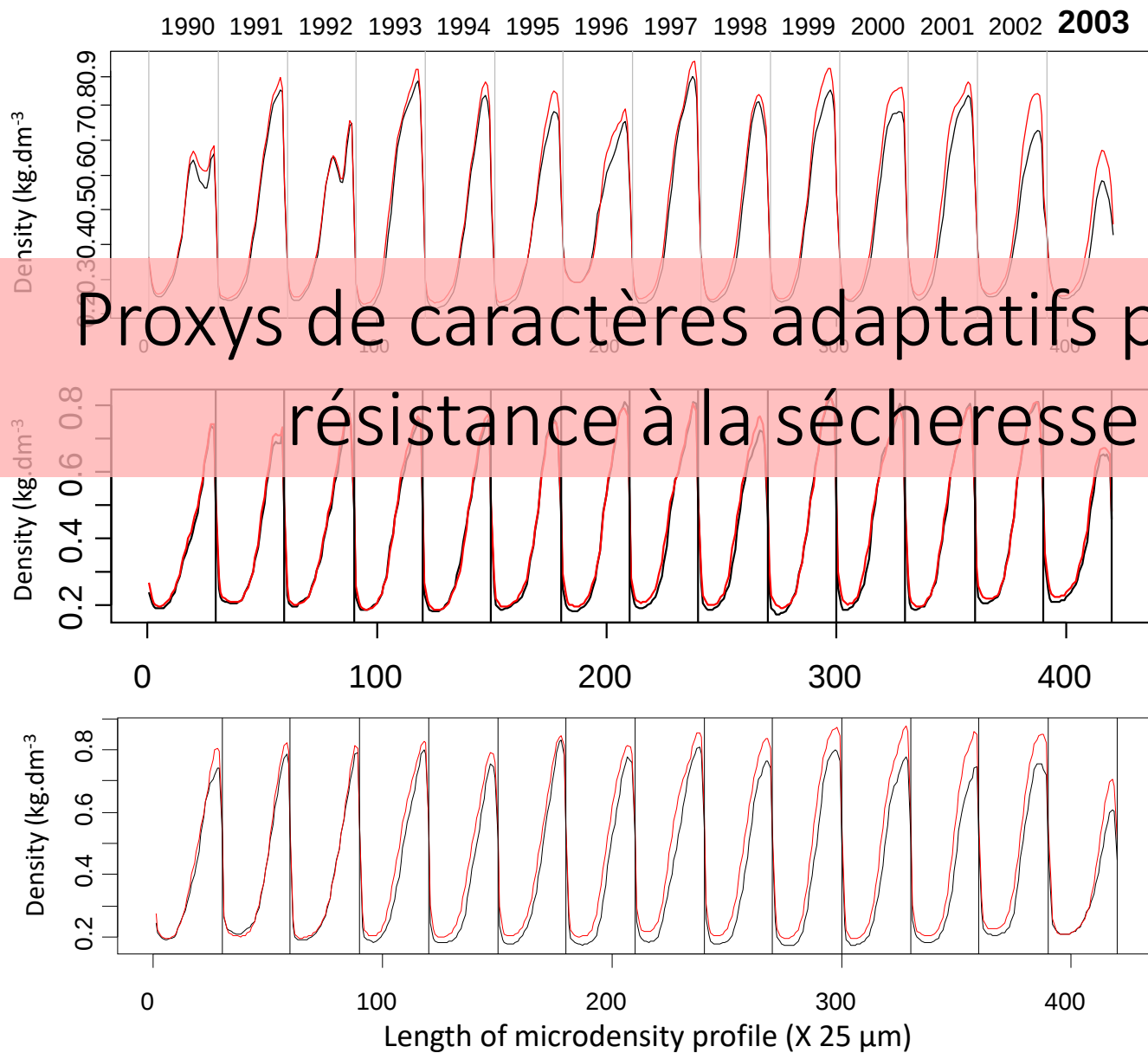


Région
Bourgogne



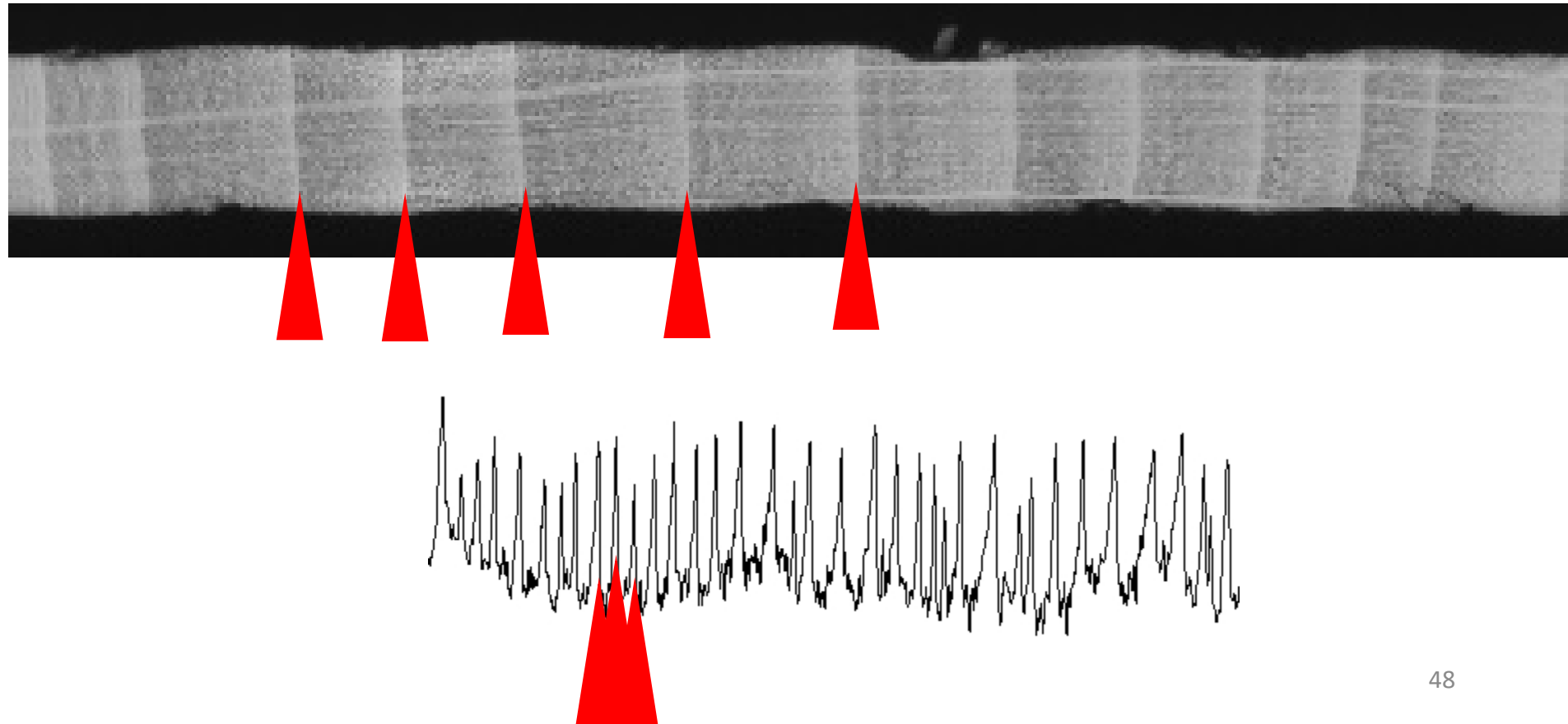
Région
Midi-Pyrénées

Length of microdensity profile ($\times 25 \mu\text{m}$)



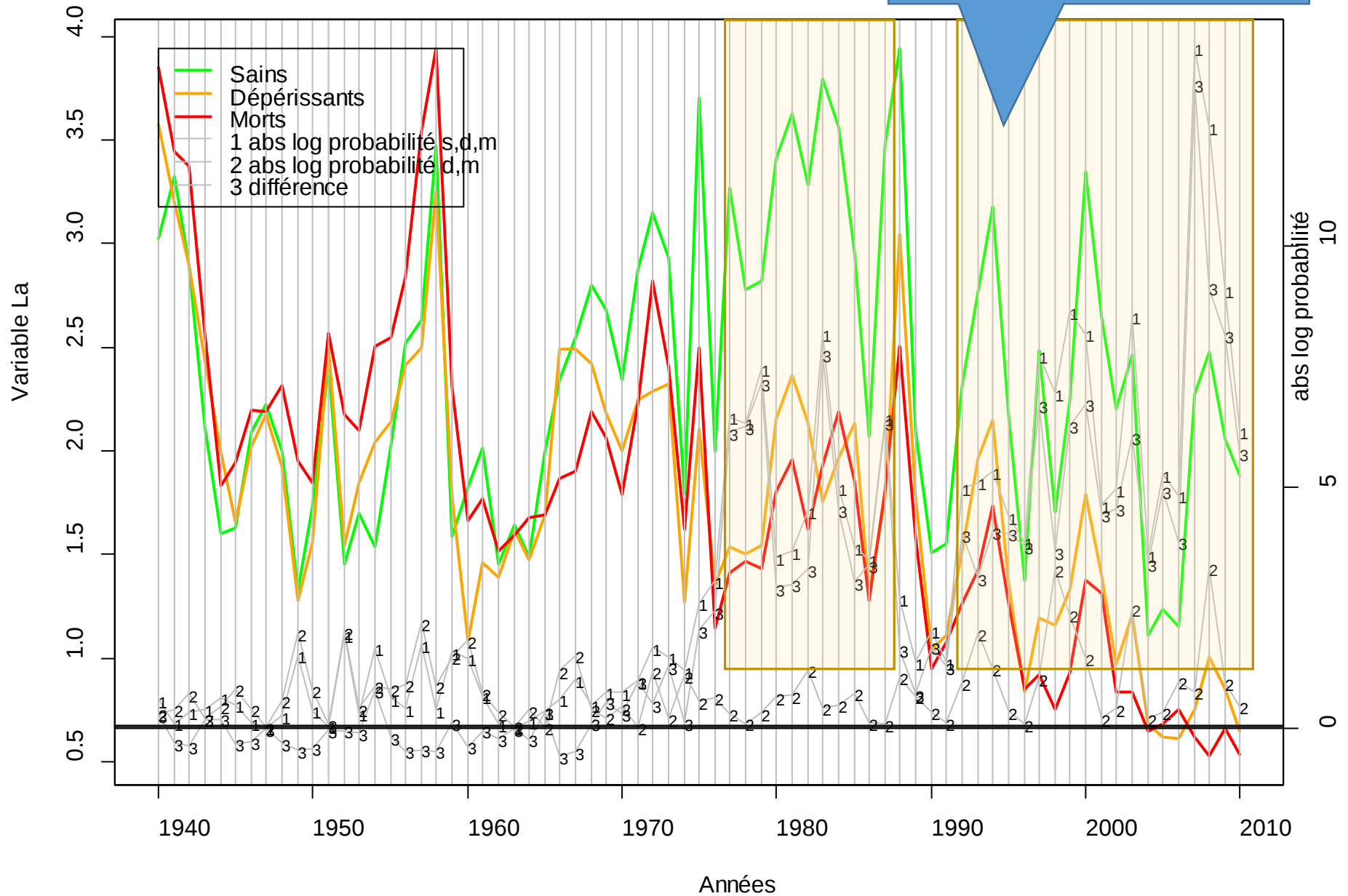
Hêtre (Fontainbleau)

- Comparaison des cernes annuels de hêtres sains, dépérissant et morts



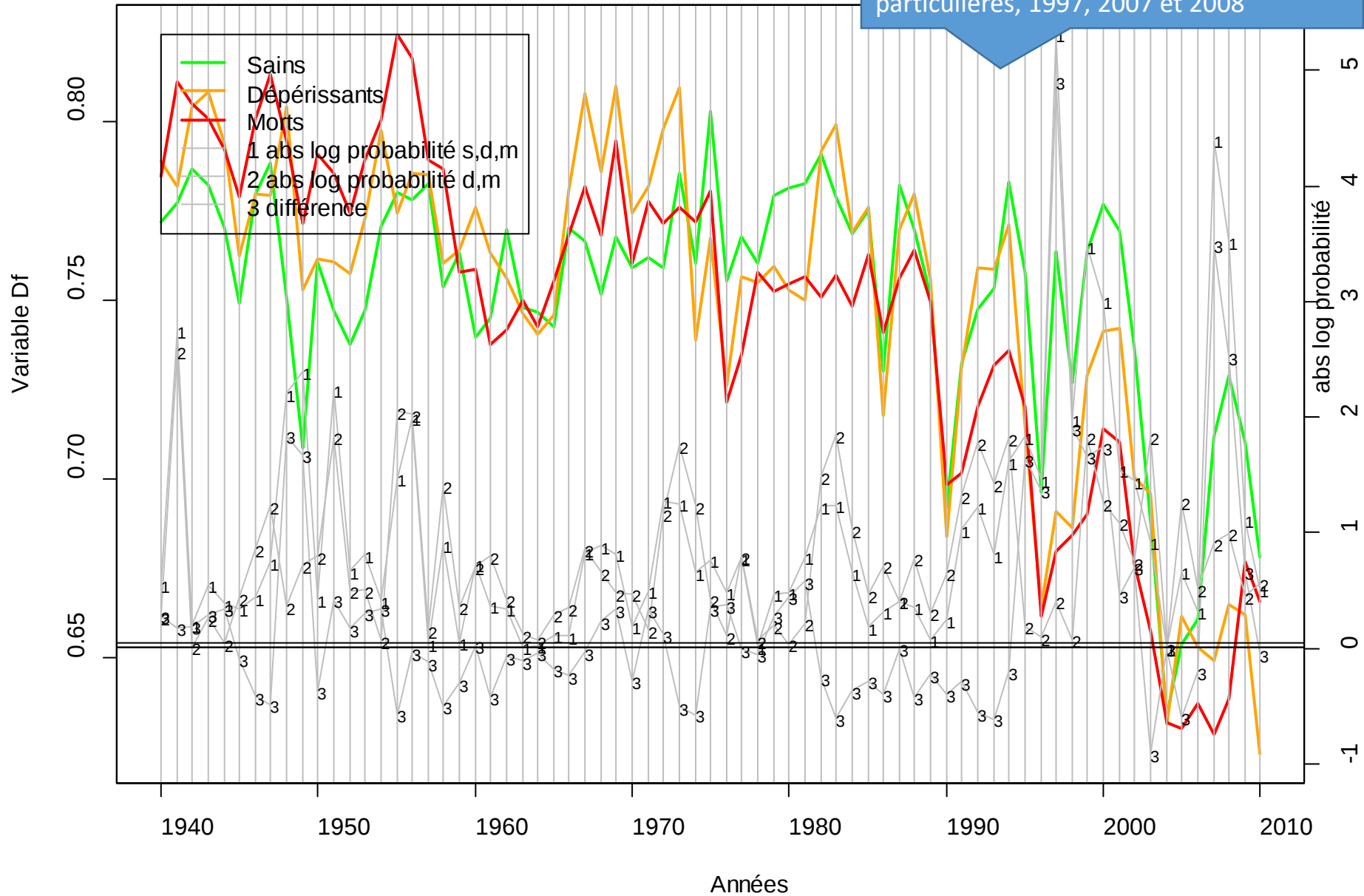
Variable mdm

Croissance significativement et
fortement supérieure des S durant
ces deux périodes

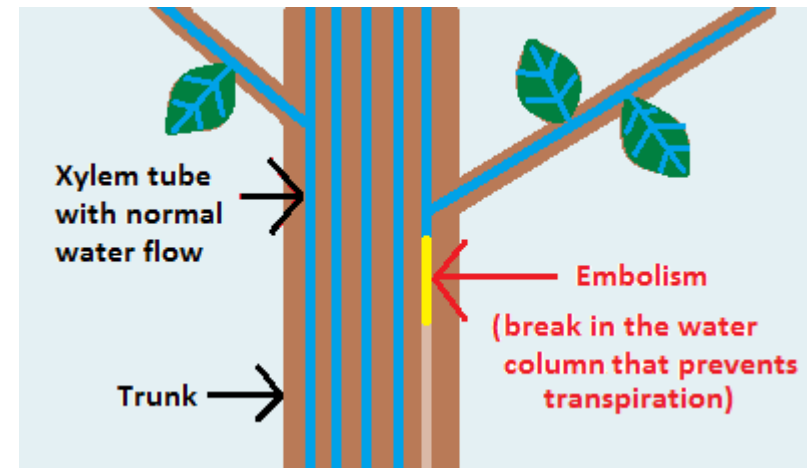
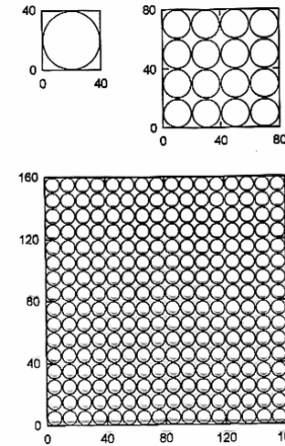
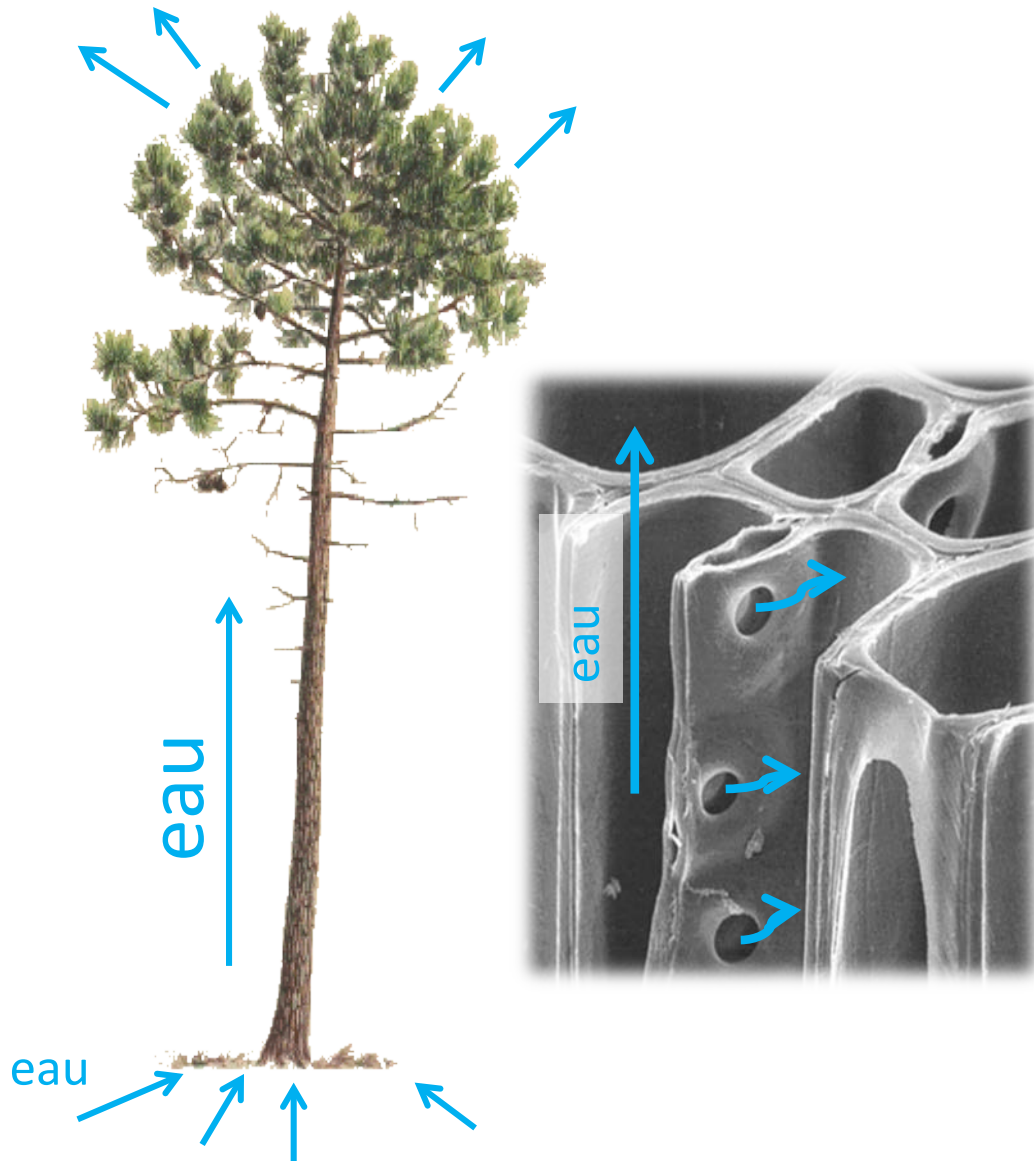


Variable m

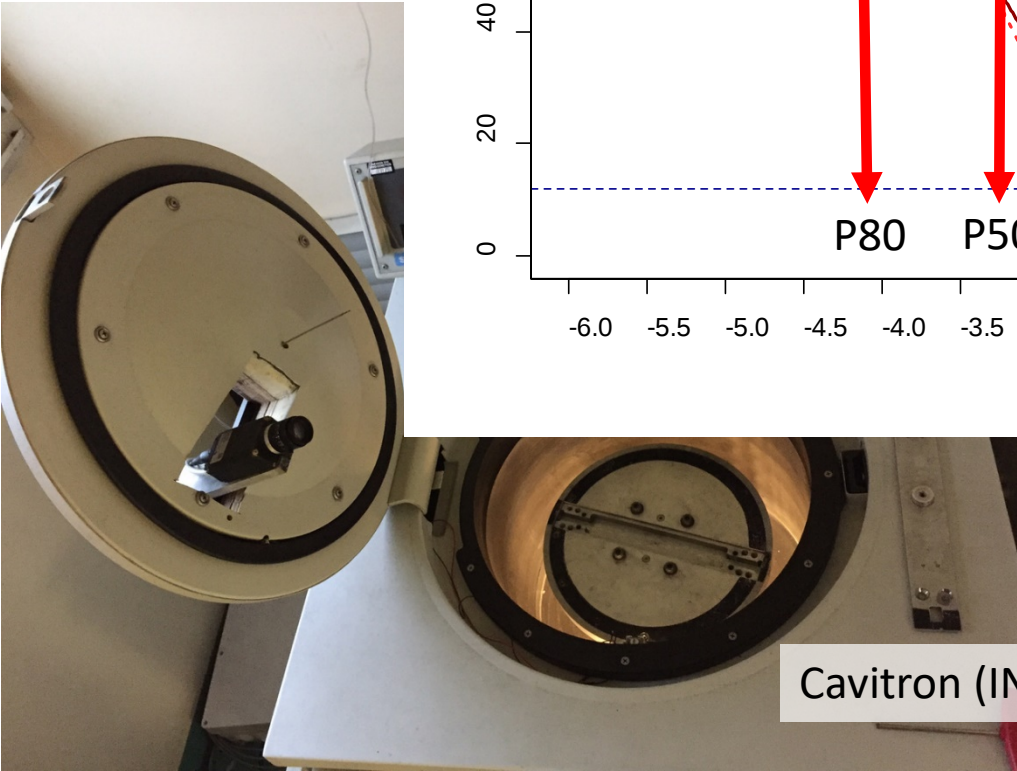
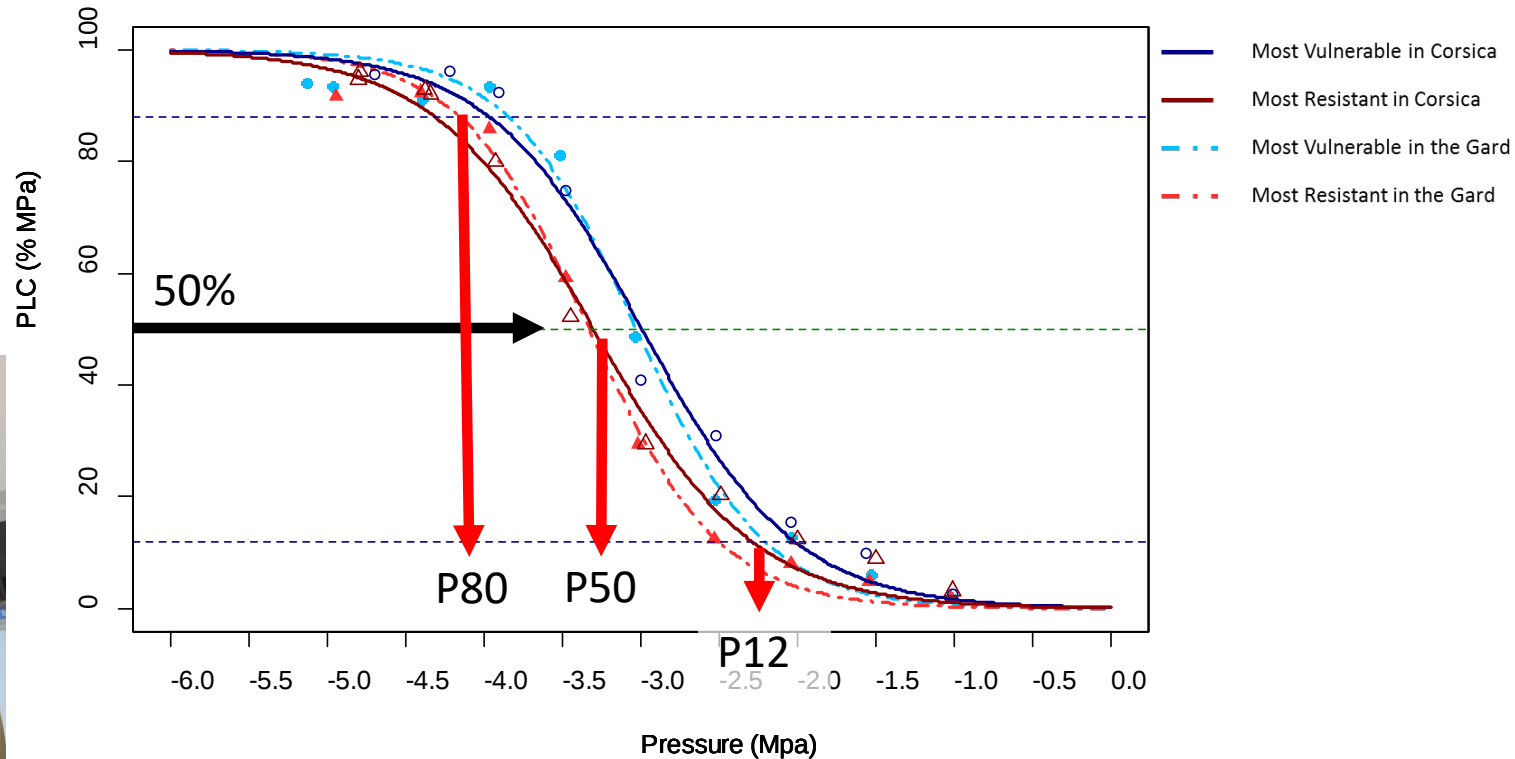
Un peu comme Do mais avec des différences plus marquées et apparaissant plus tôt, avec deux ou trois années particulières, 1997, 2007 et 2008



Survivants : densité plus élevée



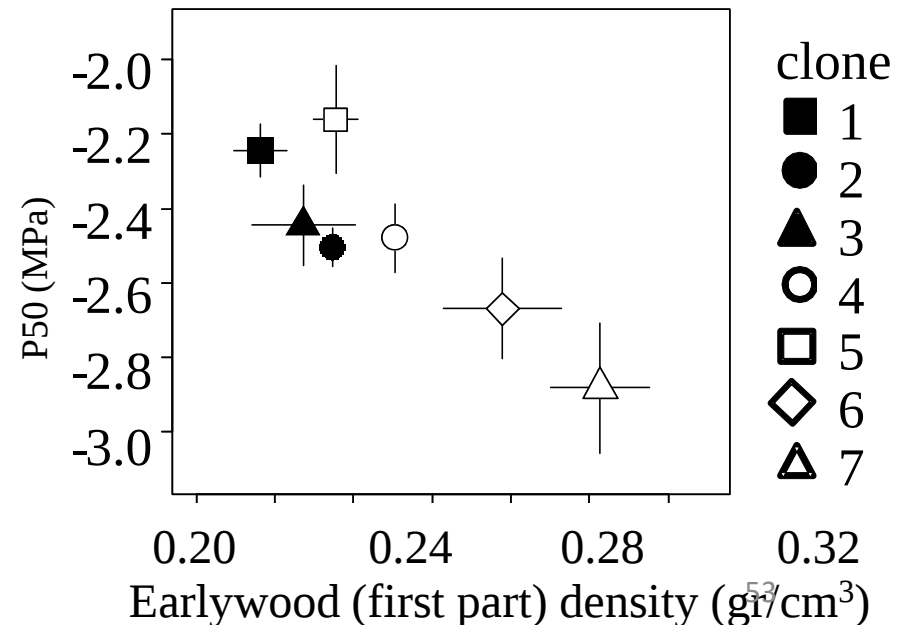
Résistance à la cavitation



Cavitron (INRA PIAF Clermont-Ferrand)

Variables de microdensité et résistance à la cavitation

level \ microdensity	P12		P50		P88	
	tree	clonal	tree	Clonal	tree	clonal
Mean Ring Density			-0.56	-0.76	-0.70	-0.84
Minimum Density			-0.57	-0.76	-0.71	-0.89
Earlywood Density			-0.57	-0.77	-0.73	-0.85
Earlywood (first part) density			-0.71	-0.85	-0.84	-0.97
Maximum Density	-0.65	-0.85				
Latewood Density	-0.54	-0.78				



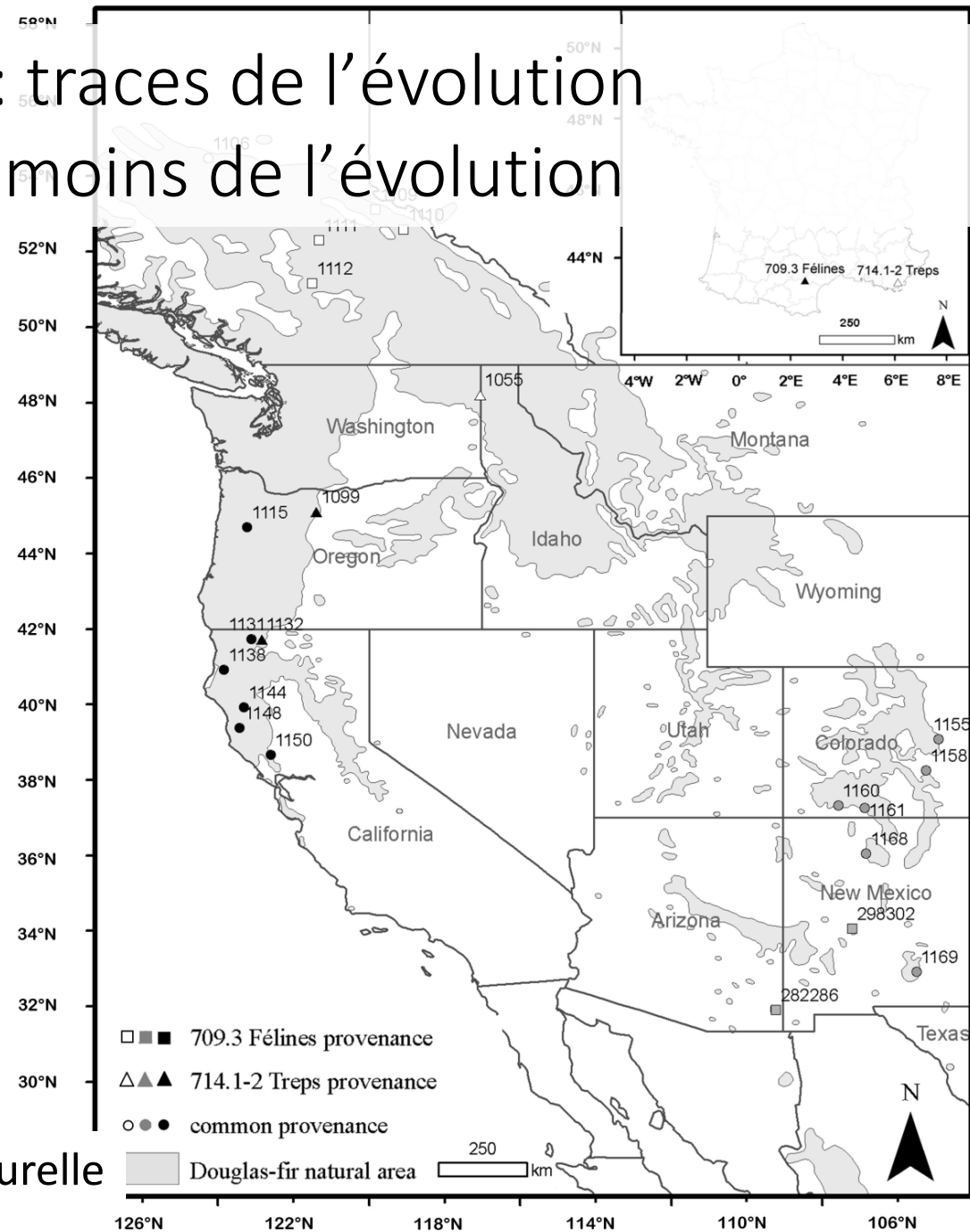
Dalla-Salda, G., A. Martinez-Meier, H. Cochard, et P. Rozenberg. 2011. « Genetic Variation of Xylem Hydraulic Properties Shows That Wood Density Is Involved in Adaptation to Drought in Douglas-Fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.)). » *Annals of Forest Science* 68 (4).

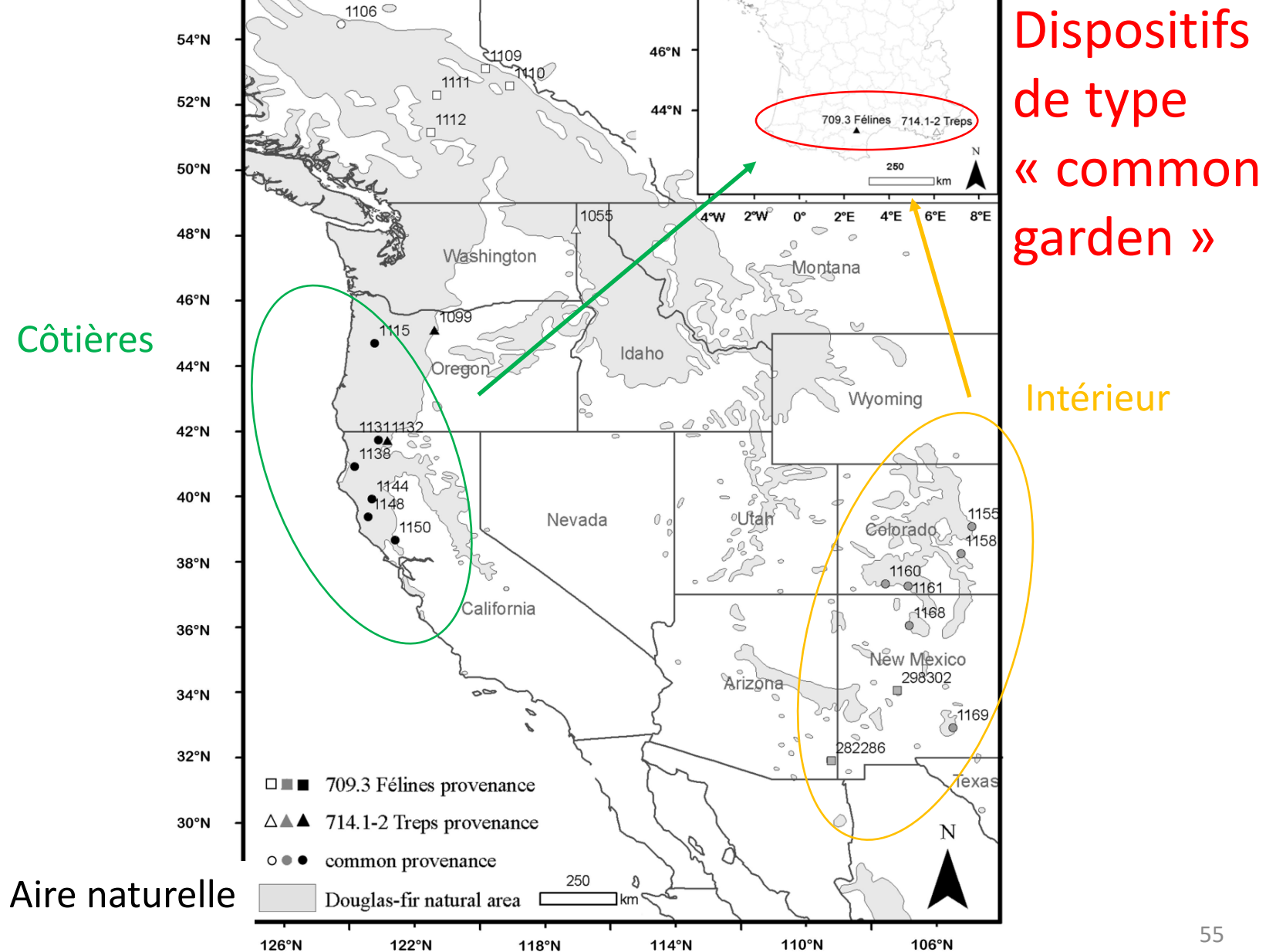
Autre stratégie : traces de l'évolution

Provenances, témoins de l'évolution

Anne-Sophie Sergent et al,
Coastal and interior Douglas-
fir provenances differ in
growth performance and
response to drought episodes,
Annals of Forest Science
DOI 10.1007/s13595-014-
0393-1

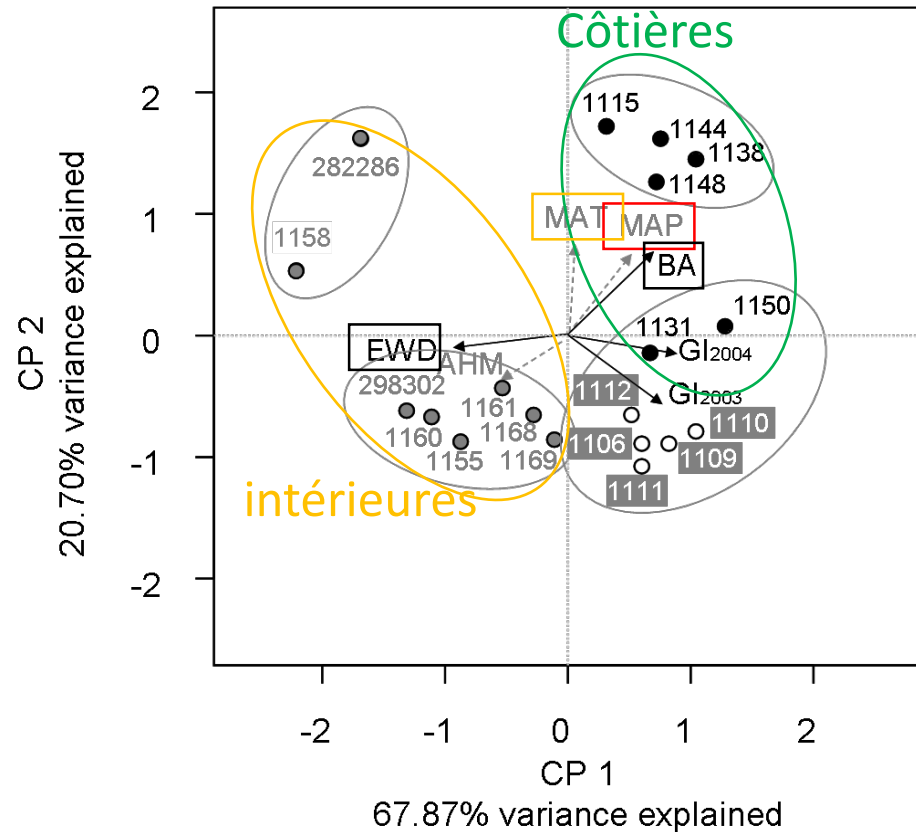
Aire naturelle



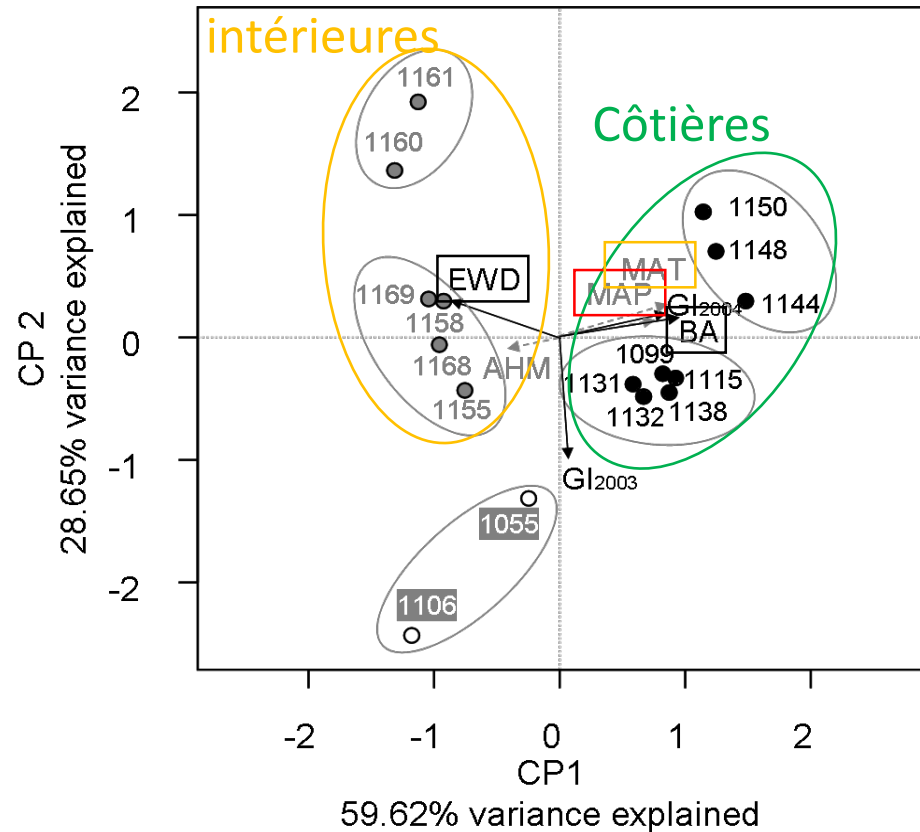


Analyse multivariable densité croissance

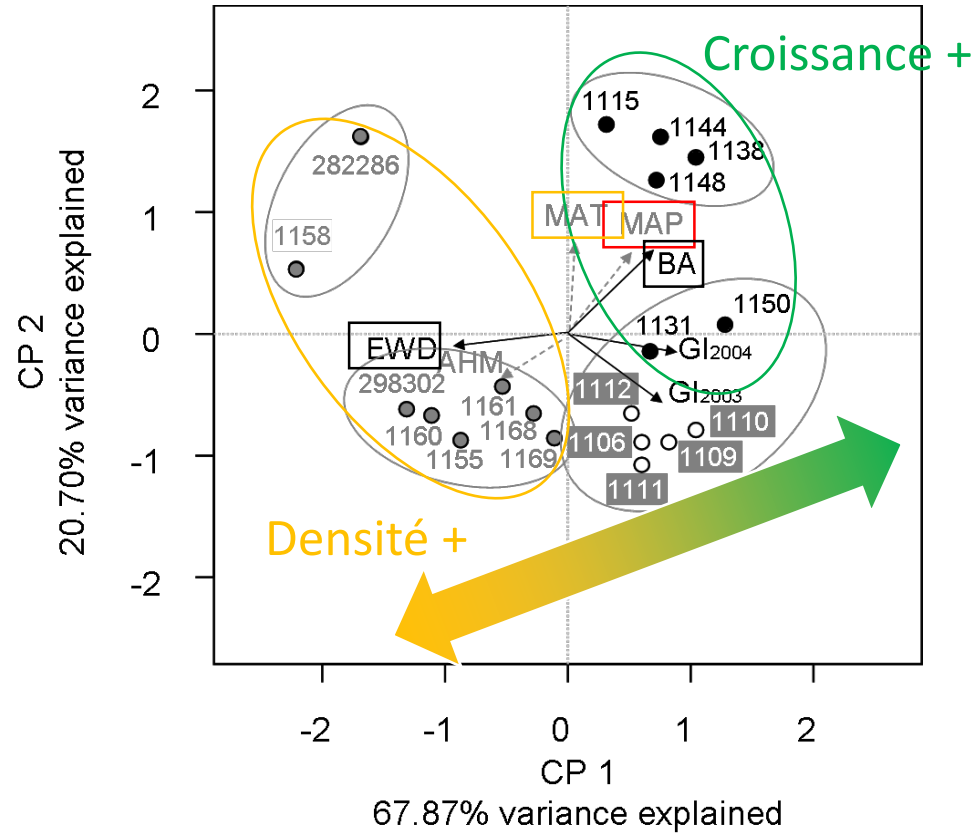
a. Félines



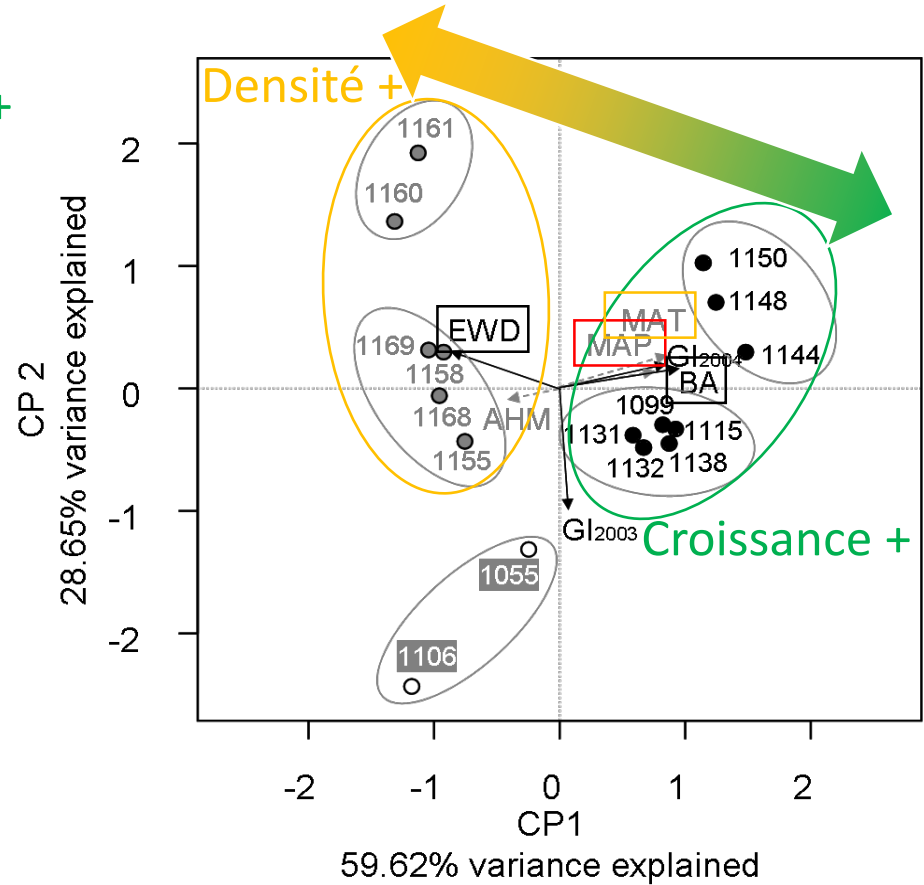
b. Le Treps



a. Félines



b. Le Trepas



Structuration adaptative ?

Mais... provenances intérieures...

- Croissance lente
- sensibles à *Rhabdocline* spp. & *Phaeocryptopus gaeumannii*



Image: Andrej Kunca, National Forest Centre - Slovakia, Bugwood.org - See more at: <http://www.insectimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=1415168> #sthash.dowlPVrH.dpuf

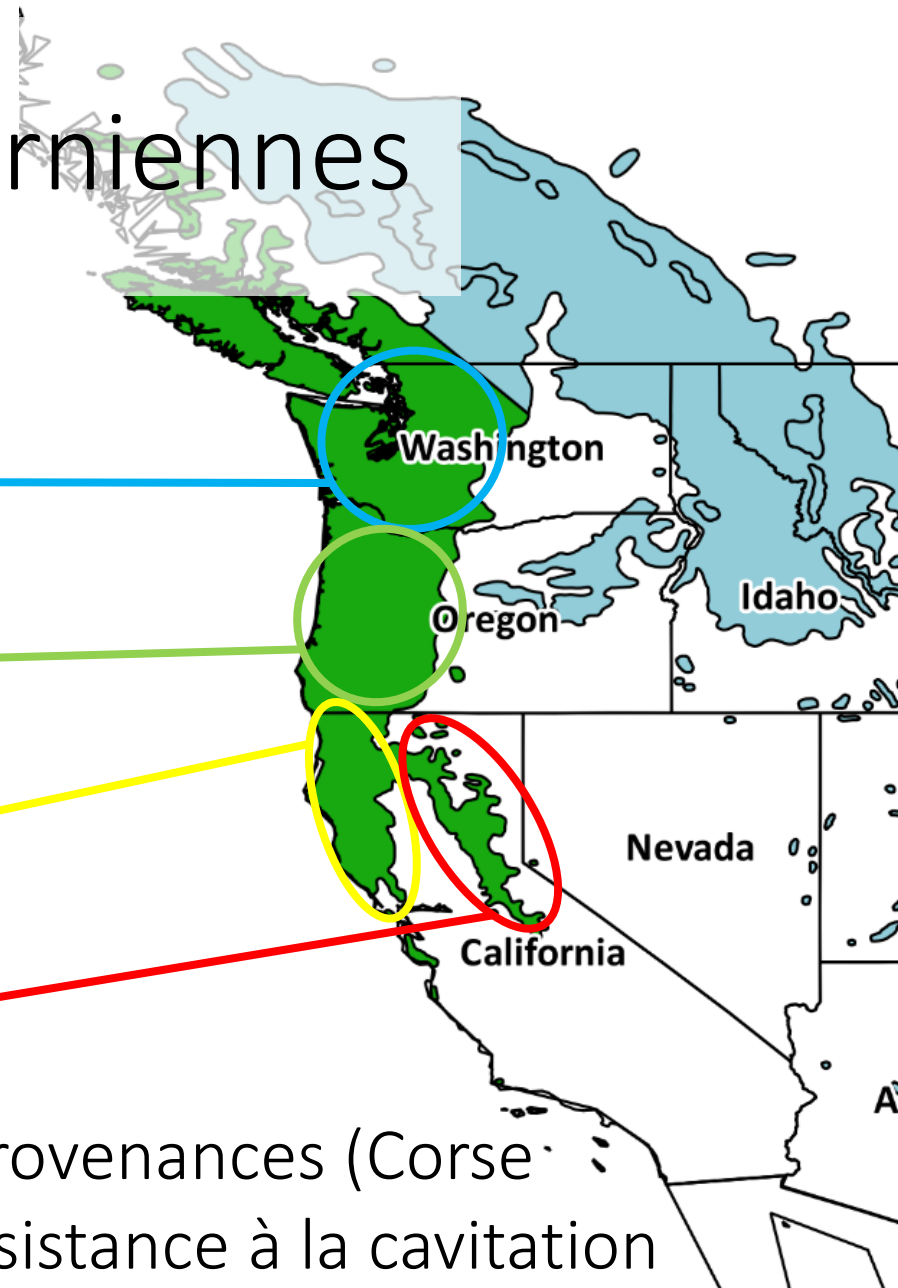
Côtières...?

- Plantations actuelles : vergers à graines d'origines Washington-Orégon
 - *Quel potentiel d'adaptation à la sécheresse dans cette zone (thèse Manuela Ruiz-Diaz) ?*
- Autres zones côtières : Californie (plus chaude)
 - Résistance à la cavitation
 - *Quelle structuration génétique de l'adaptation à la sécheresse dans cette zone ? (thèse Thibaud Chauvin)*

Provenances californiennes

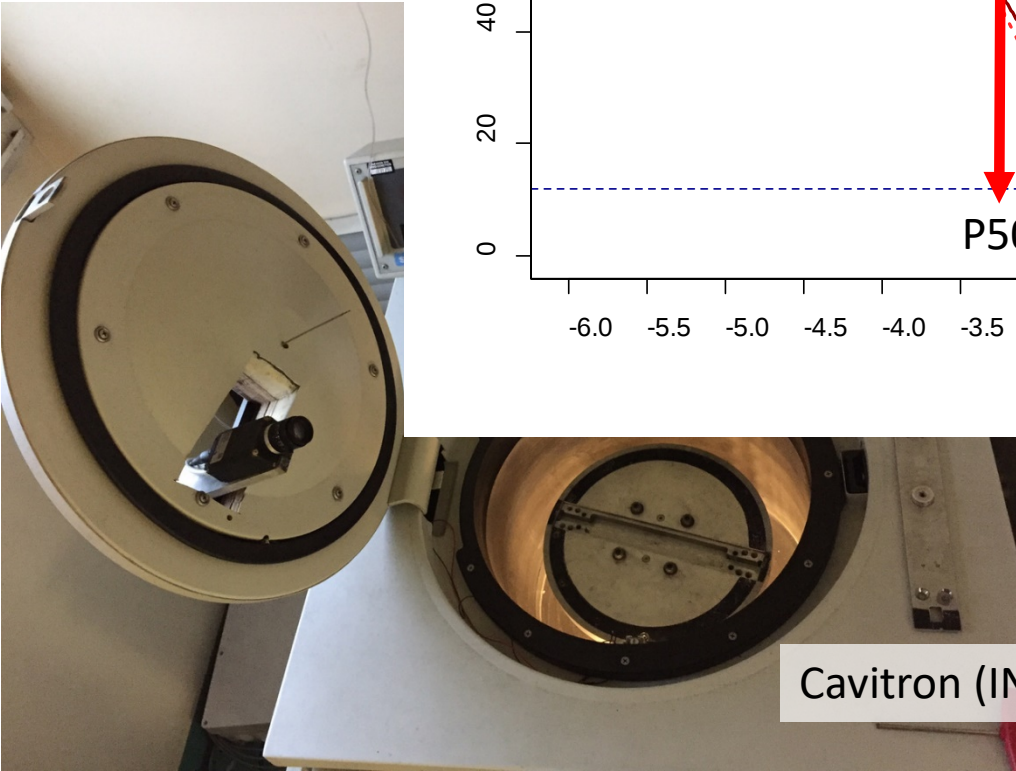
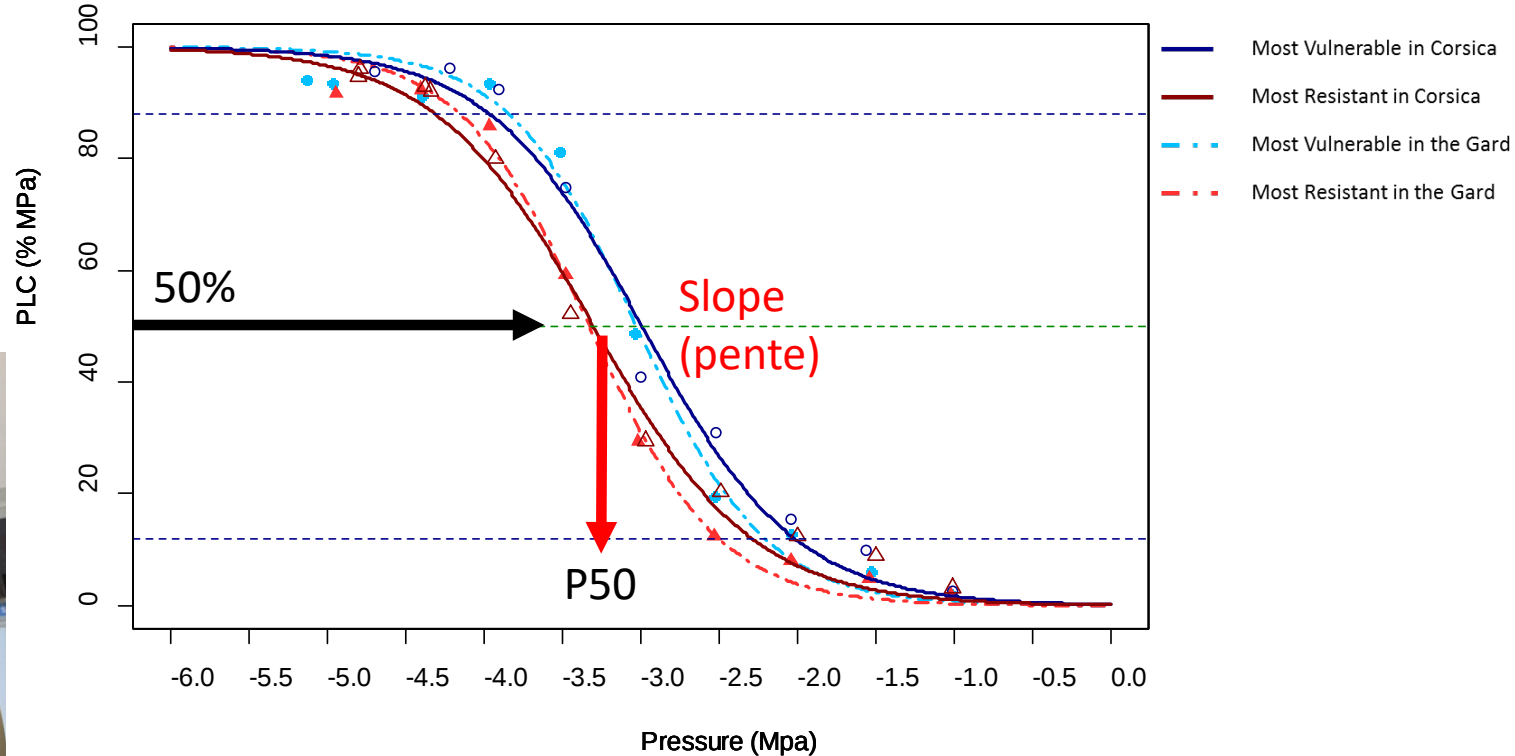
28 provenances :

- 4 de Washington (WA)
- 4 d'Oregon (OR)
- 10 de Californie côtière (COCA)
- 8 de Californie intérieure (INCA)



Deux tests de comparaison de provenances (Corse et Gard), mesures directes de résistance à la cavitation

Mesures directes de résistance à la cavitation



Cavatron (INRA PIAF Clermont-Ferrand)

Caractère fonctionnel et fitness

Relation avec la survie :

En Corse, les provenances qui survivent :

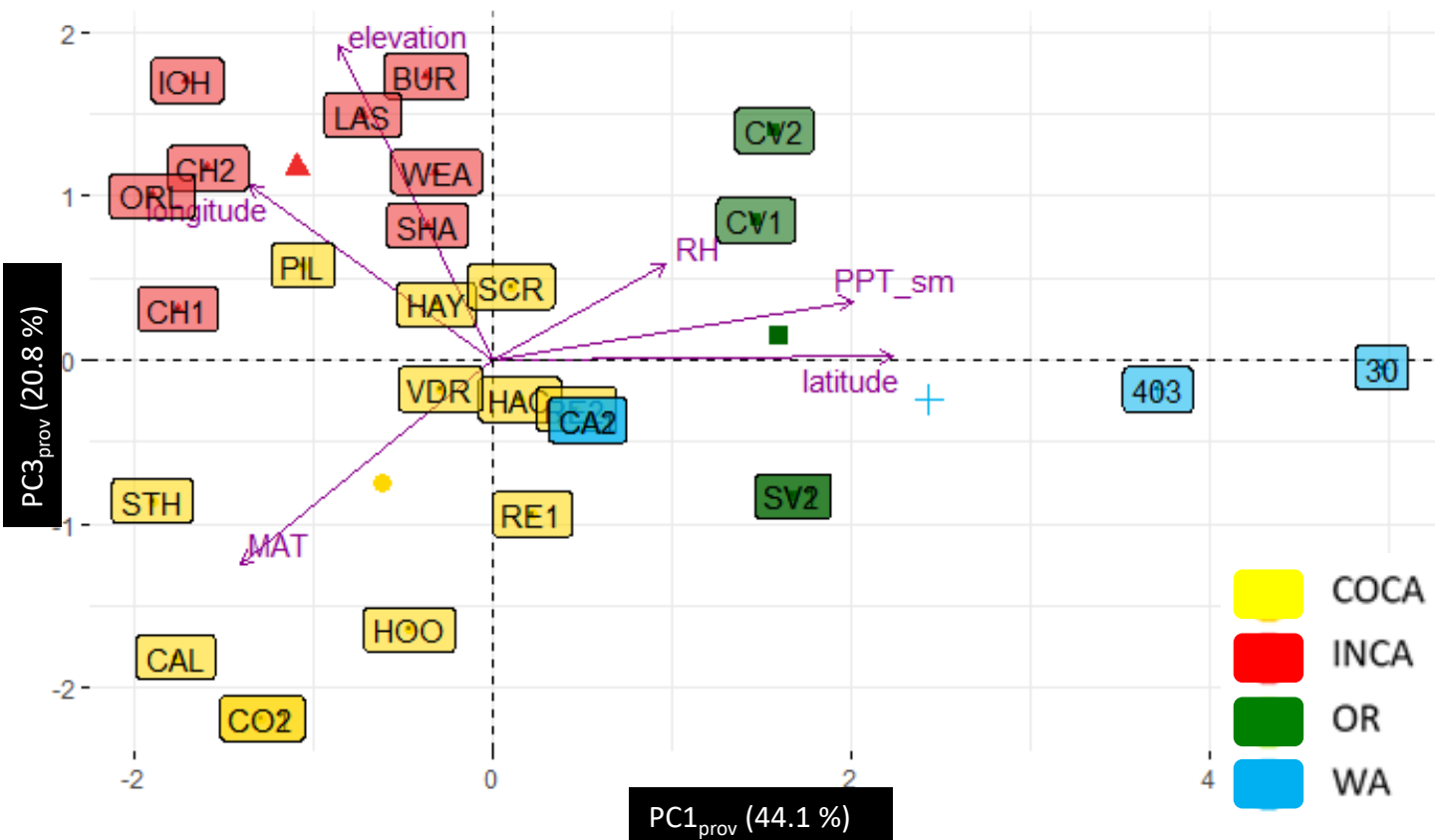
- conduisent plus efficacement l'eau
- ont un bois plus dense

Dans le Gard, les provenances qui survivent ont :

- une meilleure résistance à la cavitation
- un bois plus dense

Les caractères fonctionnels étudiés et la densité du bois sont bien des caractères (ou proxys de...) adaptatifs

Adaptation évolutive : structuration adaptative des provenances

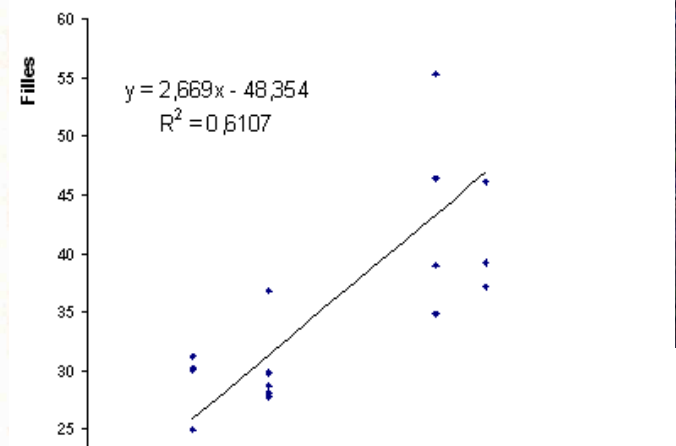
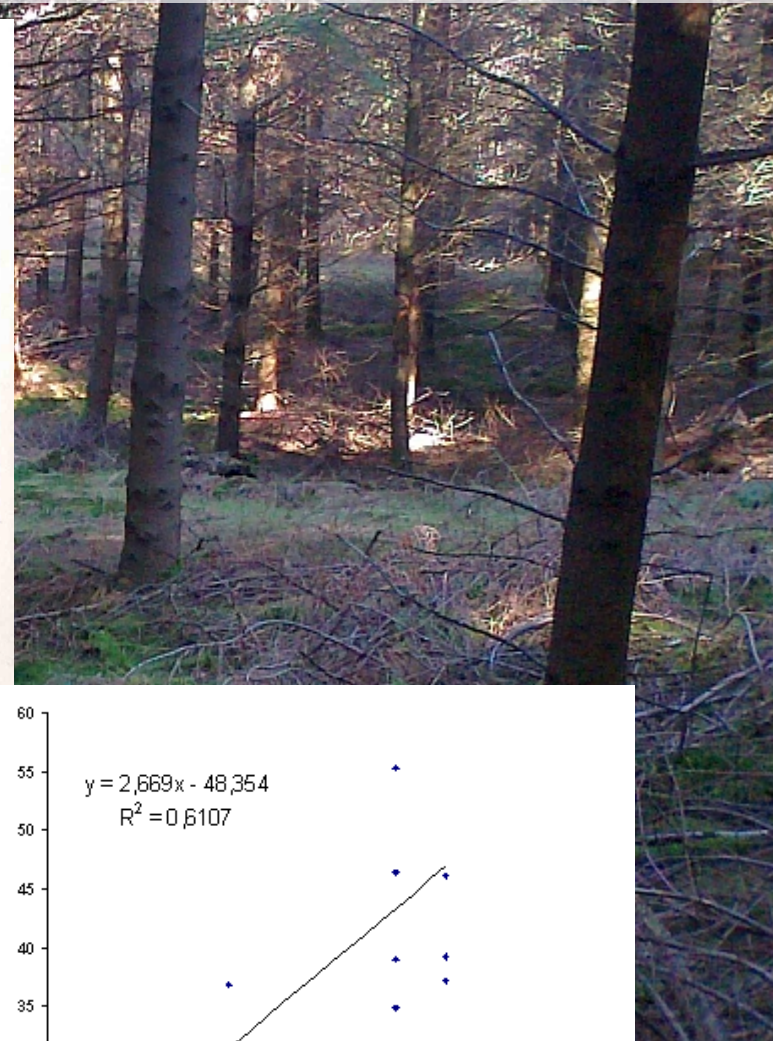
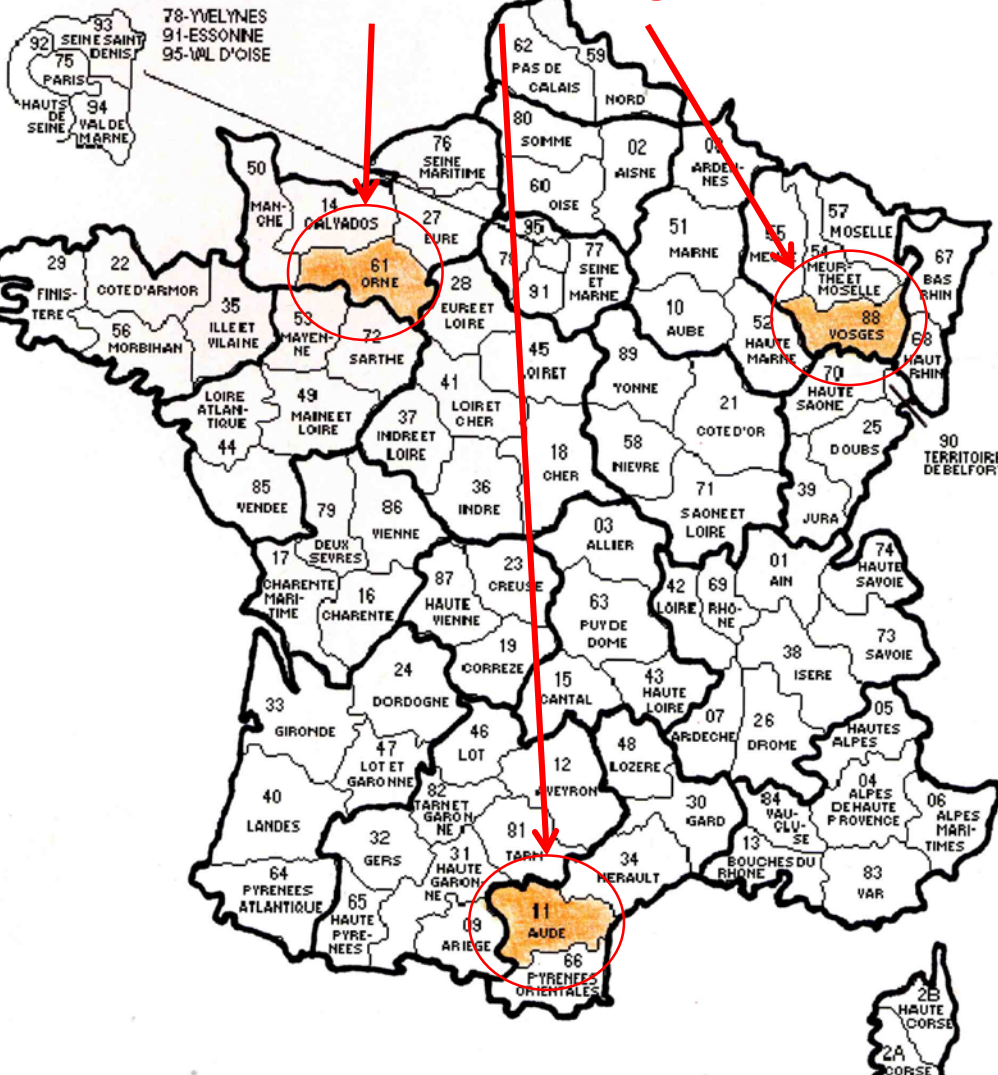


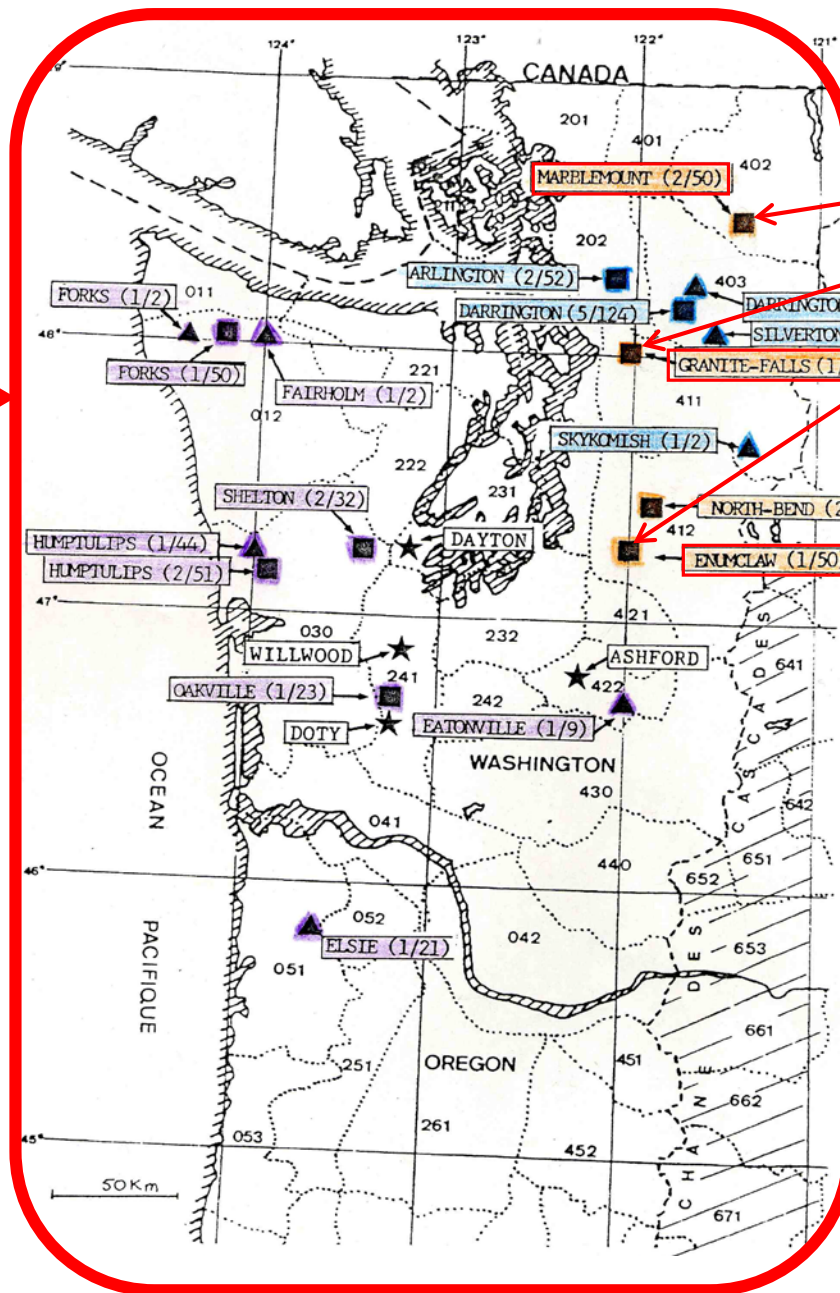
Structure adaptative de caractères de résistance à la sécheresse, s'exprimant différemment en fonction des conditions rencontrées

Quel déterminisme génétique ?

Familles (Thèse M. Ruiz-Diaz)

Orne, Aude, Vosges





Marblemount
Granite-Falls
Enumclaw

56 familles

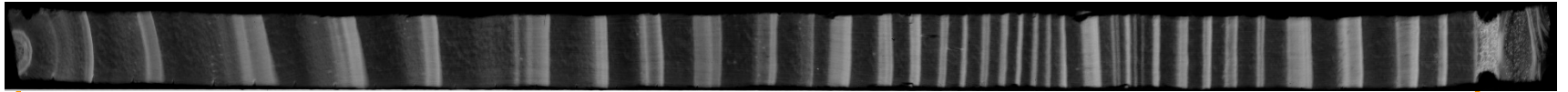
1600 carottes



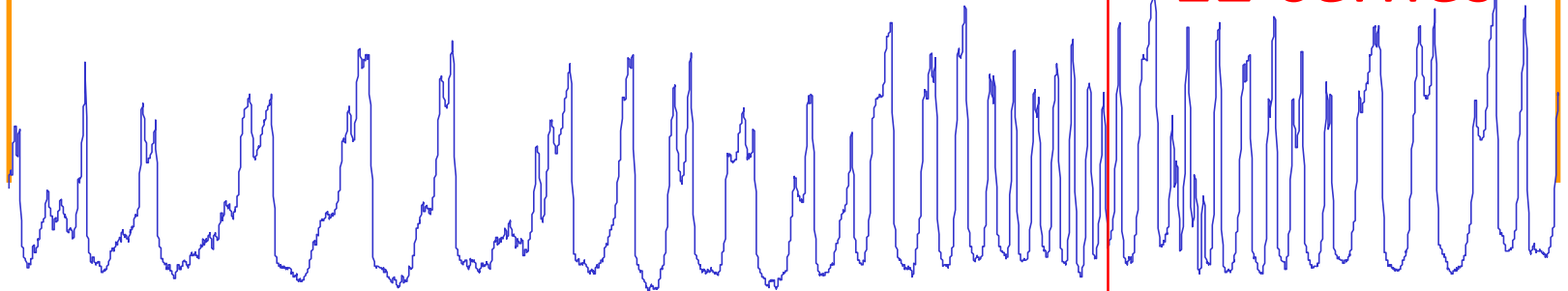
1600 profils



Image rayons X



Microdensité



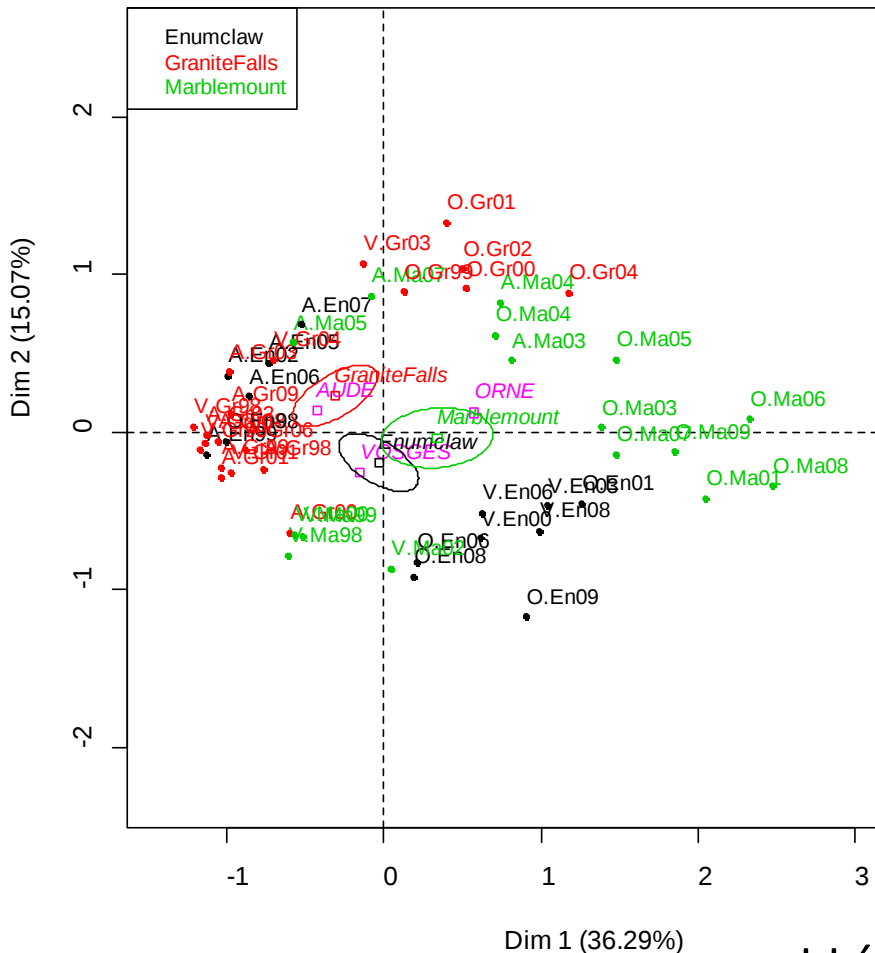
Distance (X 25 microns)

12 cernes

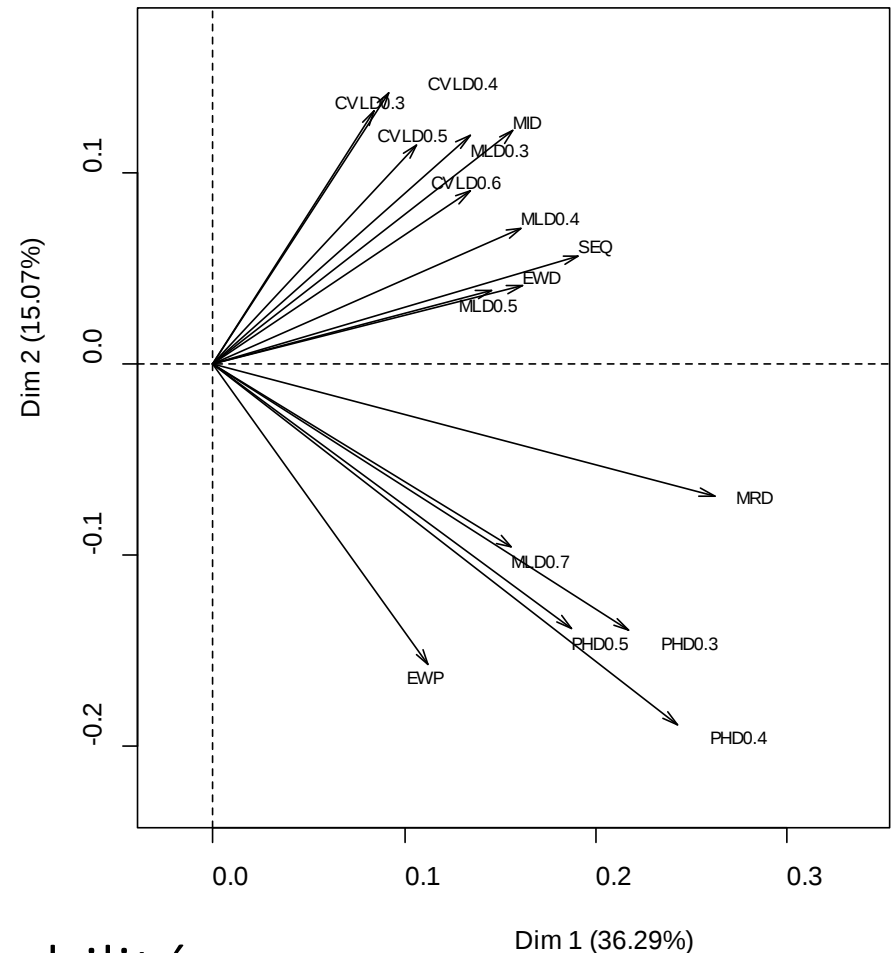
12 années

Résultats : déterminisme génétique de proxys de caractères de résistance à la sécheresse (morts/ vivants)

Individuals factor map (PCA)



Variables factor map (PCA)

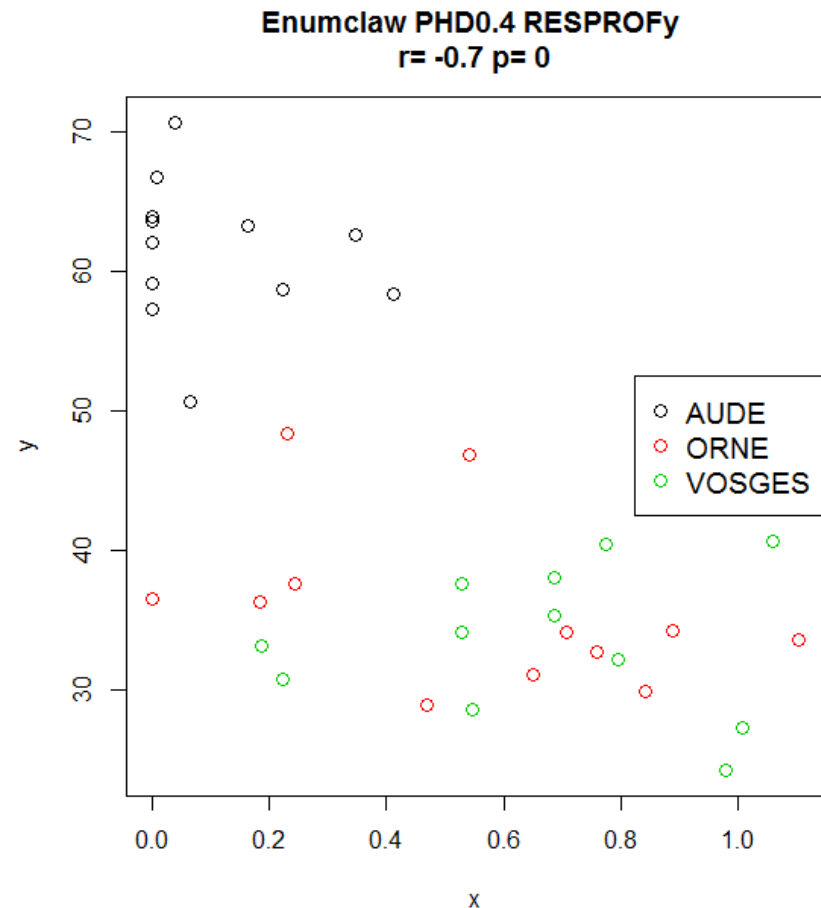


Héritabilité

Tendances, héritabilité et variation

- Des estimations d' h^2 et d'AGCV variables

- En fonction des caractères
- En fonction des origines
- En fonction de l'environnement
 - Lien avec le climat



Traces de l'évolution

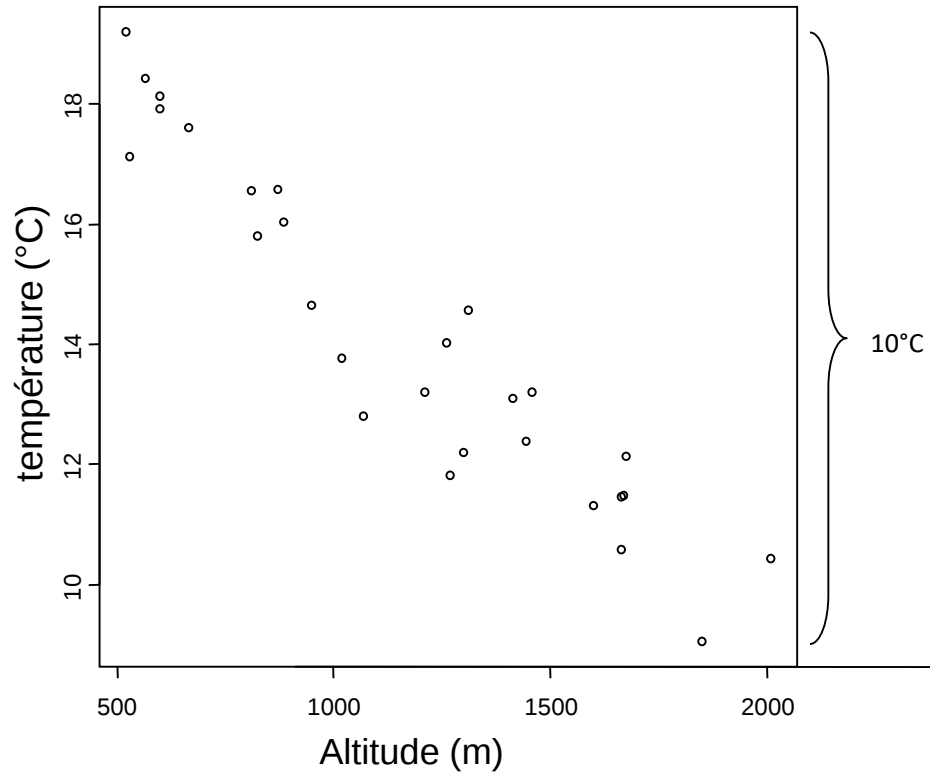
En conditions naturelles

- Traces phénotypiques et génétiques d'adaptations locales le long de gradients environnementaux courts
 - *Courts* : diminuer le poids des mécanismes évolutifs non sélectifs (dérive, effet fondation...)
- Dans le contexte du réchauffement, les gradients de températures sont intéressants.
- Approches génétiques in-situ (basées sur l'utilisation de marqueurs moléculaires)

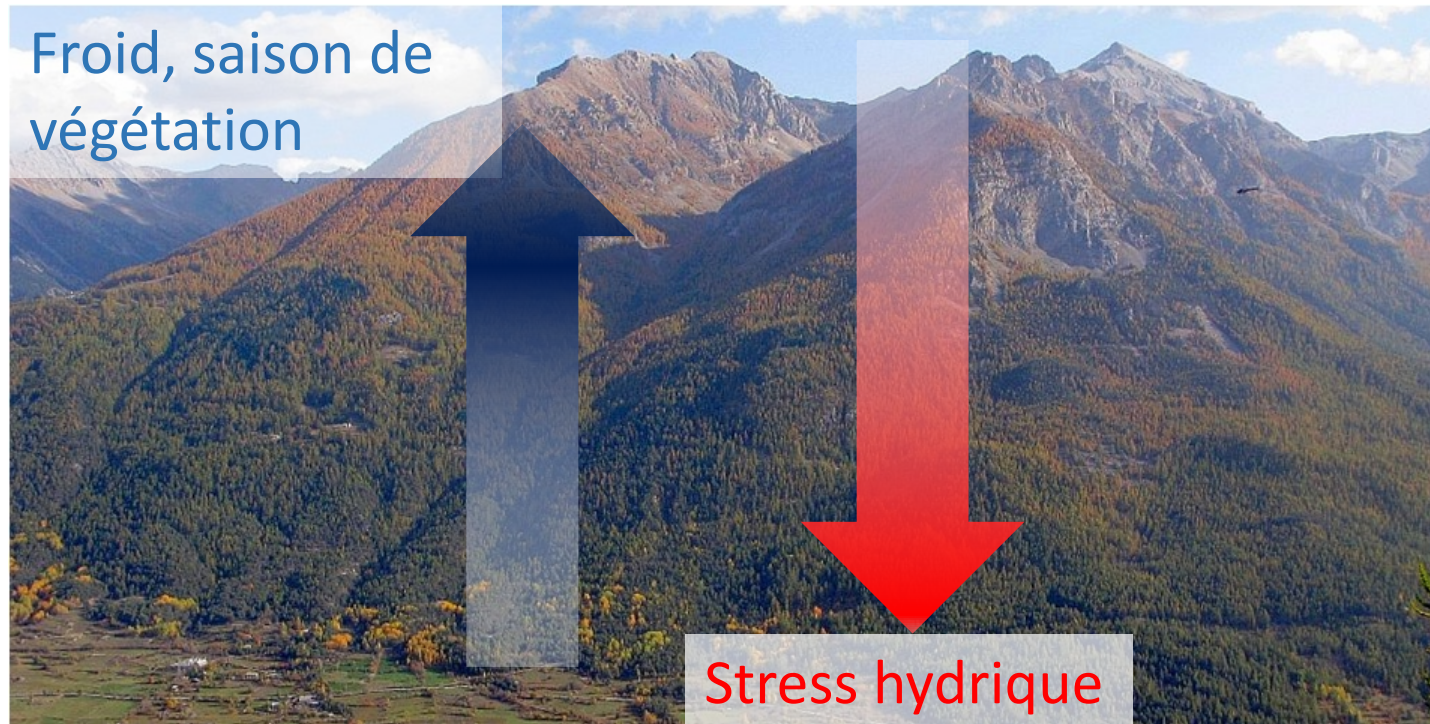
Gradients altitudinaux = gradients de température

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

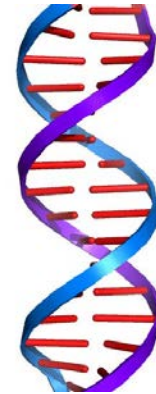
+ 10°C sur 1500 m



Pressions de sélection



Génétique moléculaire



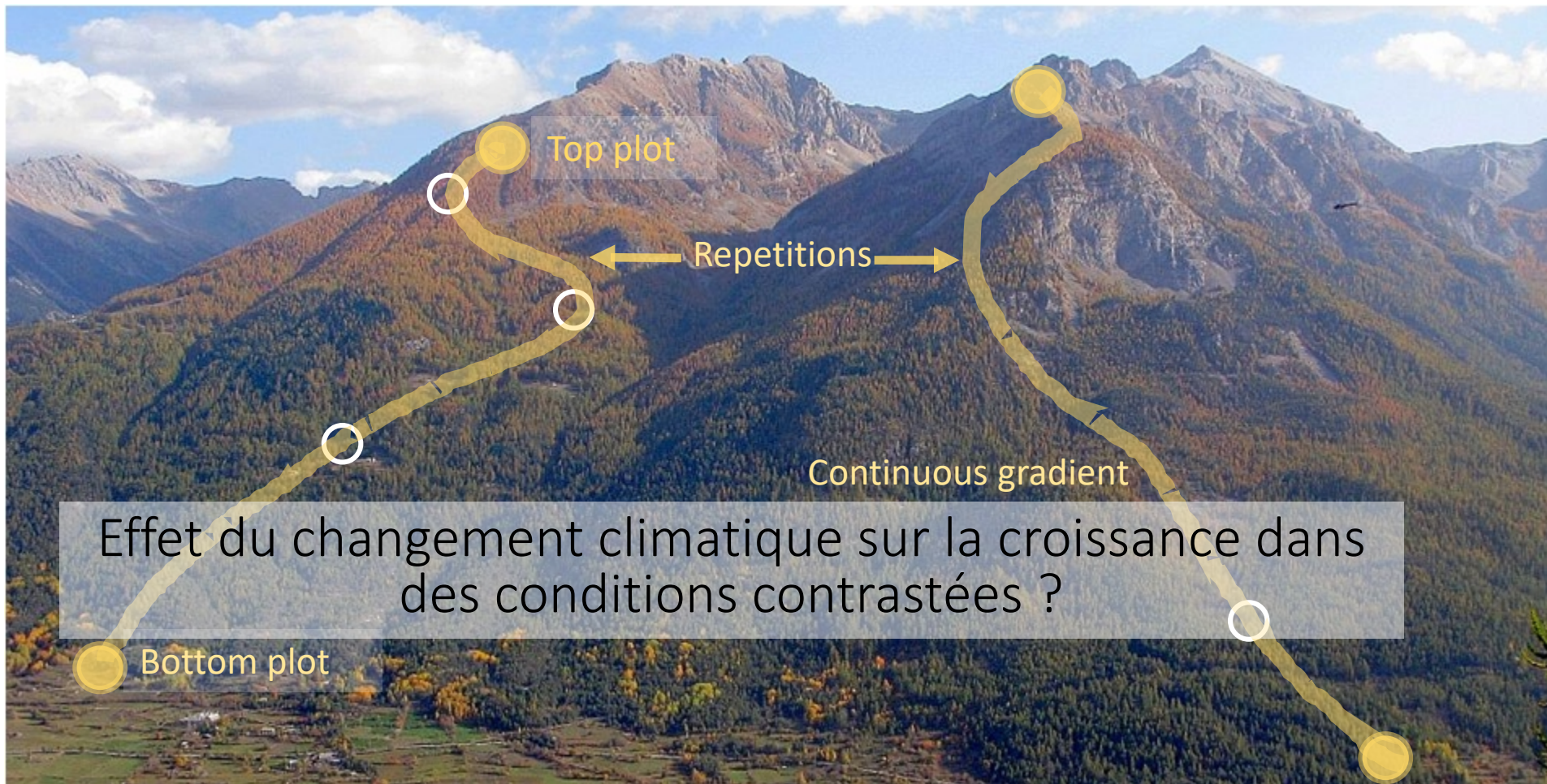
CSawyer 2011 ©

- Perspectives :
 - Marqueurs moléculaires et estimation du déterminisme génétique in situ

Bessegga, C., B. O Saidman, M. R Darquier, M. Ewens, L. Sanchez, P. Rozenberg, et J. C Vilardi. 2009.
« Consistency Between Marker- And Genealogy-Based Heritability Estimates In An Experimental Stand Of
Prosopis Alba (Leguminosae). » *American Journal Of Botany* 96 (2): 458-65.



Gradients altitudinaux



Effets contrastés sur la croissance

- Forêts boréales du Canada
 - Augmentation de la croissance aux hautes latitudes (températures plus élevées = conditions de croissance améliorées)
 - Peu de modifications aux latitudes plus basses (températures plus élevées = selon les moments et les endroits, conditions de croissance améliorées ou sécheresse accentuée)

Huang, Jian-Guo, Yves Bergeron, Frank Berninger, Lihong Zhai, Jacques C. Tardif, et Bernhard Denneler. 2013. « Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest ». *Plos One* 8 (2) (février 28). doi:10.1371/journal.pone.0056758.

- Sapin en Europe ; régions tempérées : croissance augmentée, sud-ouest de l'Europe : croissance diminuée,

Gazol, Antonio, J. Julio Camarero, Emilia Gutiérrez, Ionel Popa, Laia Andreu-Hayles, Renzo Motta, Paola Nola, et al. 2015. « Distinct Effects of Climate Warming on Populations of Silver Fir (*Abies Alba*) across Europe ». *Journal of Biogeography* 42 (6): 1150-62. doi:10.1111/jbi.12512.

Effets sur la croissance

- Forêts boréales du Canada
 - Augmentation de la croissance aux hautes latitudes (températures plus élevées = conditions de croissance améliorées)
 - Peu de modifications aux latitudes plus basses (températures plus élevées = selon les moments et les endroits, conditions de croissance améliorées ou sécheresse accentuée)

Huang, Jian-Guo, Yves Bergeron, Frank Berninger, Lihong Zhai, Jacques C. Tardif, et Bernhard Denneler. 2013. « Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest ». *Plos One* 8 (2) (février 28). doi:10.1371/journal.pone.0056758.

- Sapin en Europe ; régions tempérées : croissance augmentée, sud-ouest de l'Europe : croissance diminuée,

Gazol, Antonio, J. Julio Camarero, Emilia Gutiérrez, Ionel Popa, Laia Andreu-Hayles, Renzo Motta, Paola Nola, et al. 2015. « Distinct Effects of Climate Warming on Populations of Silver Fir (*Abies Alba*) across Europe ». *Journal of Biogeography* 42 (6): 1150-62. doi:10.1111/jbi.12512.

Effets contrastés sur la croissance

- Forêts mélangées de conifères dans les Cascades en Amérique du Nord : croissance augmentée par des hivers plus doux, survie diminuée par l'augmentation de l'intensité des incendies

Bigelow, Seth W., Michael J. Papaik, Caroline Caum, et Malcolm P. North. 2014. « Faster Growth in Warmer Winters for Large Trees in a Mediterranean-Climate Ecosystem ». *Climatic Change* 123 (2): 215-24. doi:10.1007/s10584-014-1060-0.

- Forêts boréales de Finlande : augmentation significative surtout depuis 1990. Une augmentation supplémentaire due à d'autres raisons (sylviculture, déport d'azote et/ou concentration en CO₂)

Kauppi, Pekka E., Maximilian Posch, et Pentti Pirinen. 2014. « Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960 ». *Plos One* 9 (11): e111340. doi:10.1371/journal.pone.0111340.

Effets sur la croissance

- Forêts mélangées de conifères dans les Cascades en Amérique du Nord : croissance augmentée par des hivers plus doux, survie diminuée par l'augmentation de l'intensité des incendies

Bigelow, Seth W., Michael J. Papaik, Caroline Caum, et Malcolm P. North. 2014. « Faster Growth in Warmer Winters for Large Trees in a Mediterranean-Climate Ecosystem ». *Climatic Change* 123 (2): 215-24. doi:10.1007/s10584-014-1060-0.

- Forêts boréales de Finlande : augmentation significative surtout depuis 1990. Une augmentation supplémentaire due à d'autres raisons (sylviculture, apport d'azote et/ou concentration en CO₂)

Kauppi, Pekka E., Maximilian Posch, et Pentti Pirinen. 2014. « Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960 ». *Plos One* 9 (11): e111340. doi:10.1371/journal.pone.0111340.

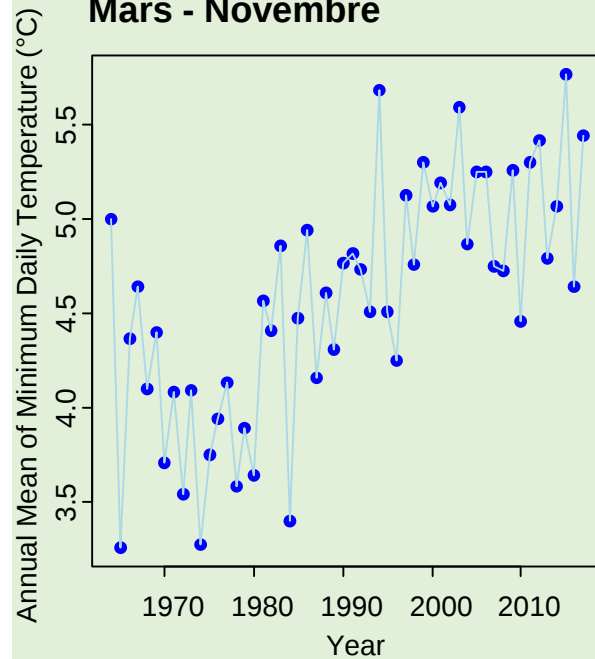
Croissance du mélèze et changement climatique dans le Briançonnais

- Température minimum
- Température maximum
- Précipitation
- Périodes 1966-2017
- Données Météo-France Briançon et Villard St Pancrace

Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

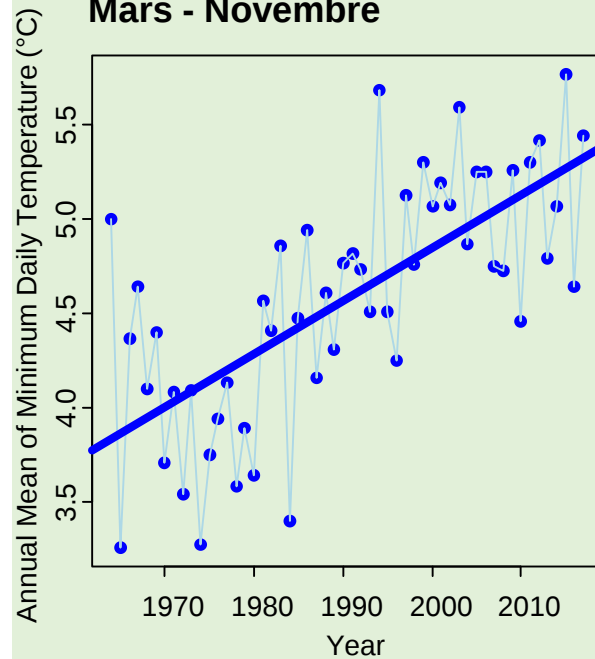
Température Minimum
Mars - Novembre



Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

Température Minimum
Mars - Novembre



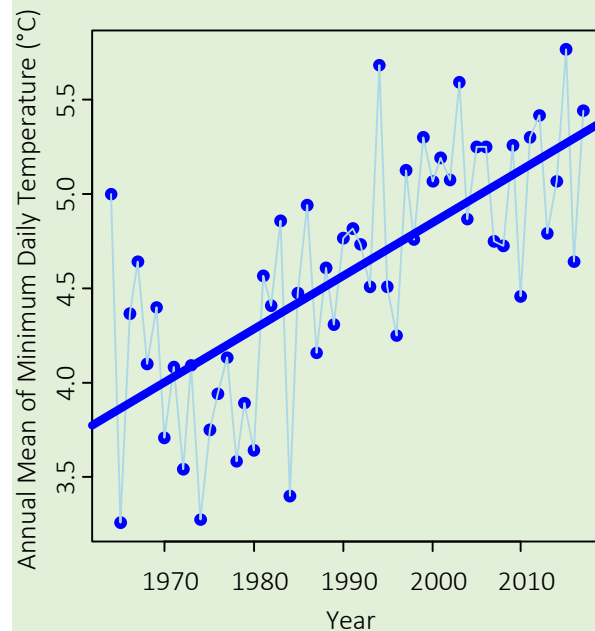
$$Y = -51.35 + 0.0281 X$$

$$R^2 = 0.48$$

Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

Température Minimum
Mars - Novembre



$$Y = -51.35 + 0.0281 X$$

$$R^2 = 0.48$$

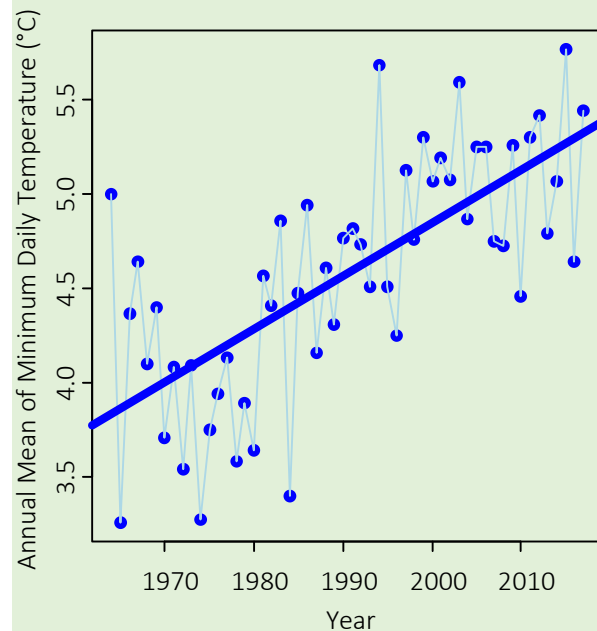
Augmentation de près de **0,03 °C** par an

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

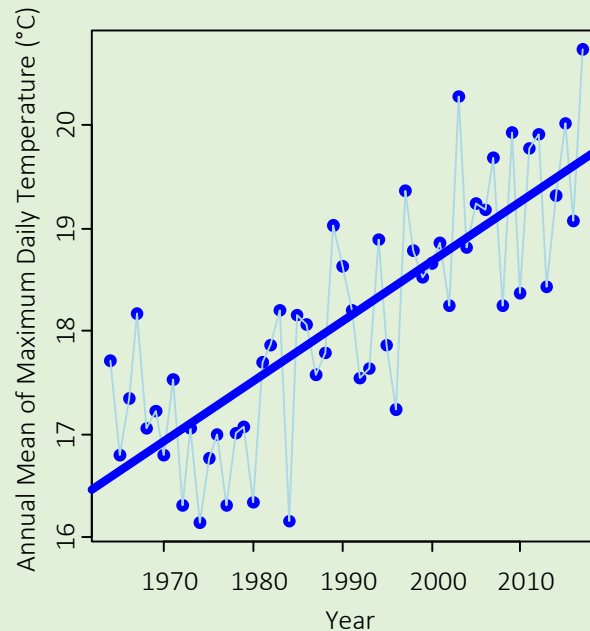
Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

Température Minimum
Mars - Novembre



Température Maximum
Mars - Octobre



$$Y = -97.41 + 0.058 X$$

$$R^2 = 0.63$$

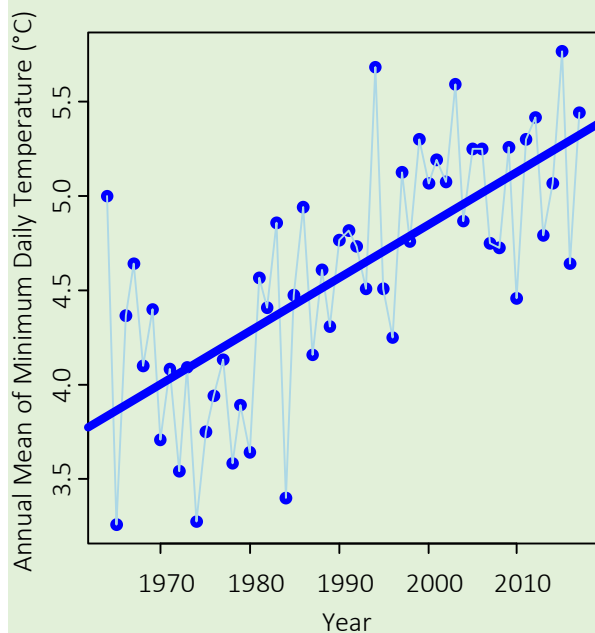
Augmentation de près
de **0,06 °C** par an

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

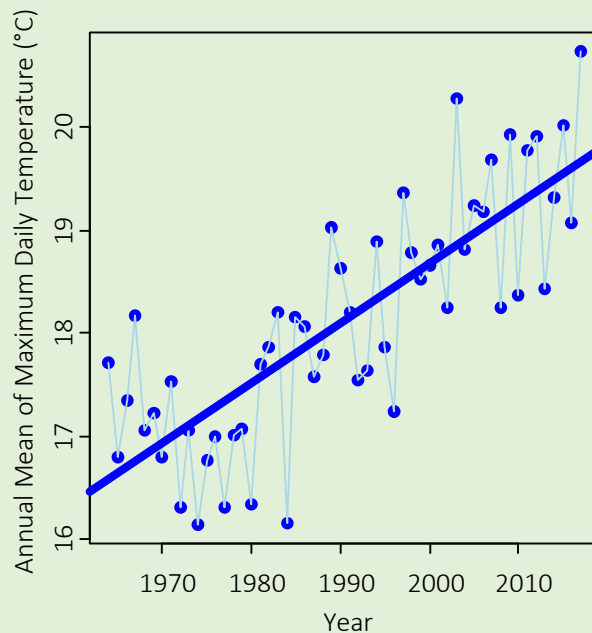
Changement climatique de 1966 à 2017

Périodes annuelles

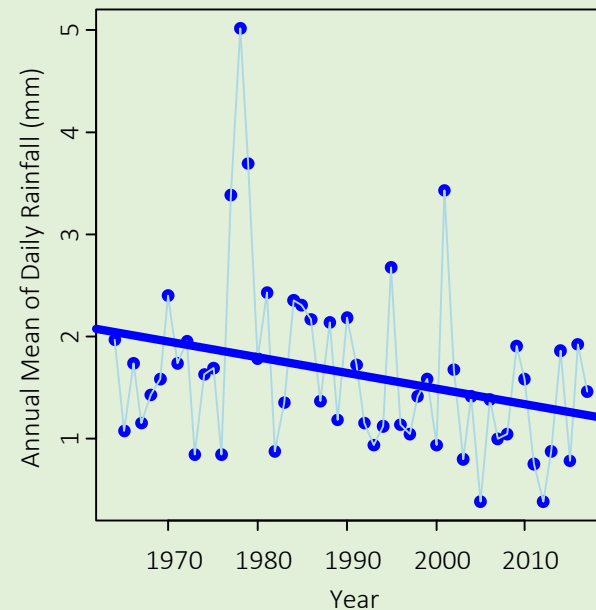
Température Minimum
Mars - Novembre



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)

Quel impact sur la croissance du

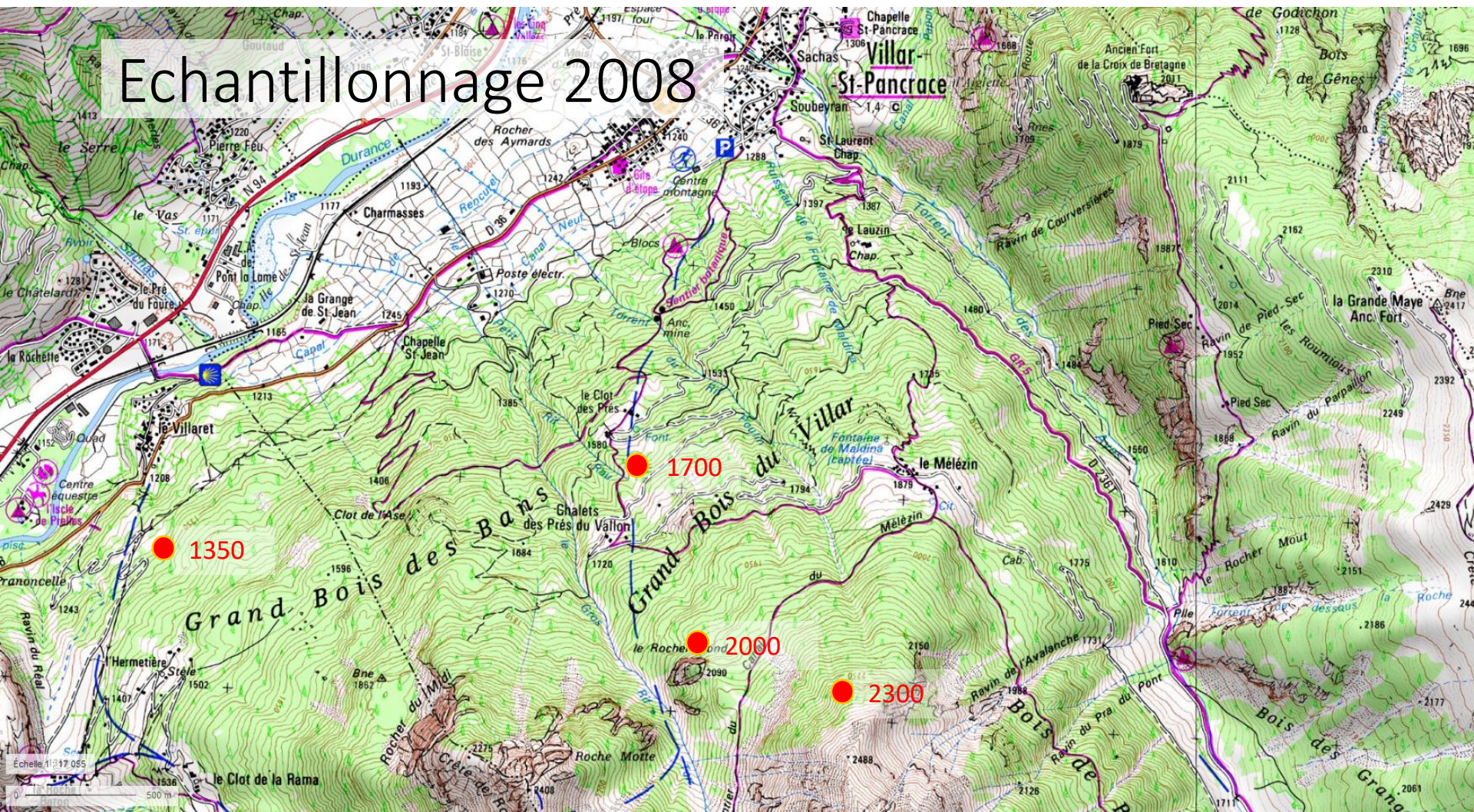
- Pas (ou très peu) de changement de précipitations

mélèze ?

Approche Analyse de cernes

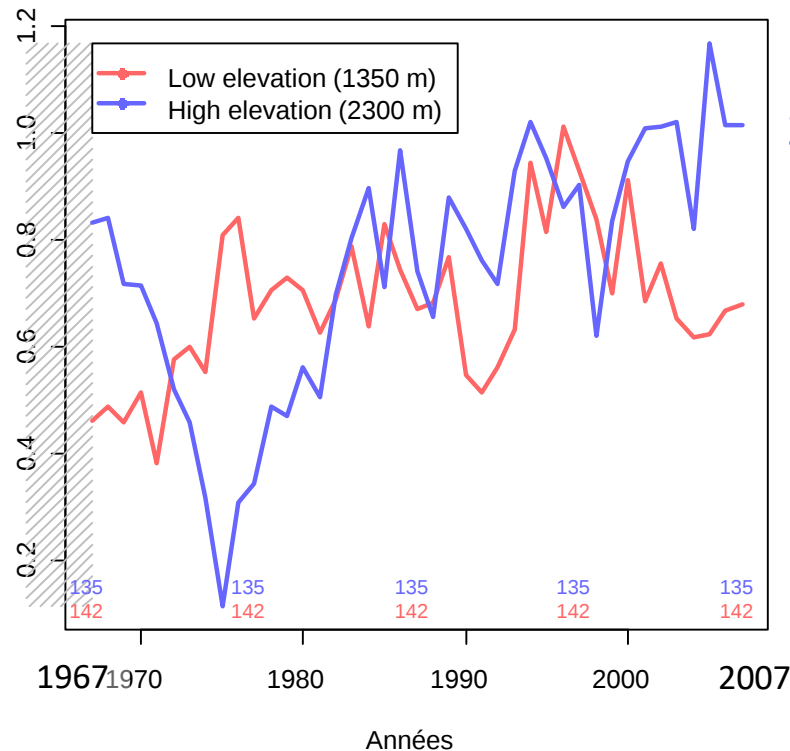


Echantillonnage 2008



Echantillonnage 2008 : courbes de croissance

Variations de la largeur de cerne (mm)



Âges moyens

2300 m : 100 ans environ

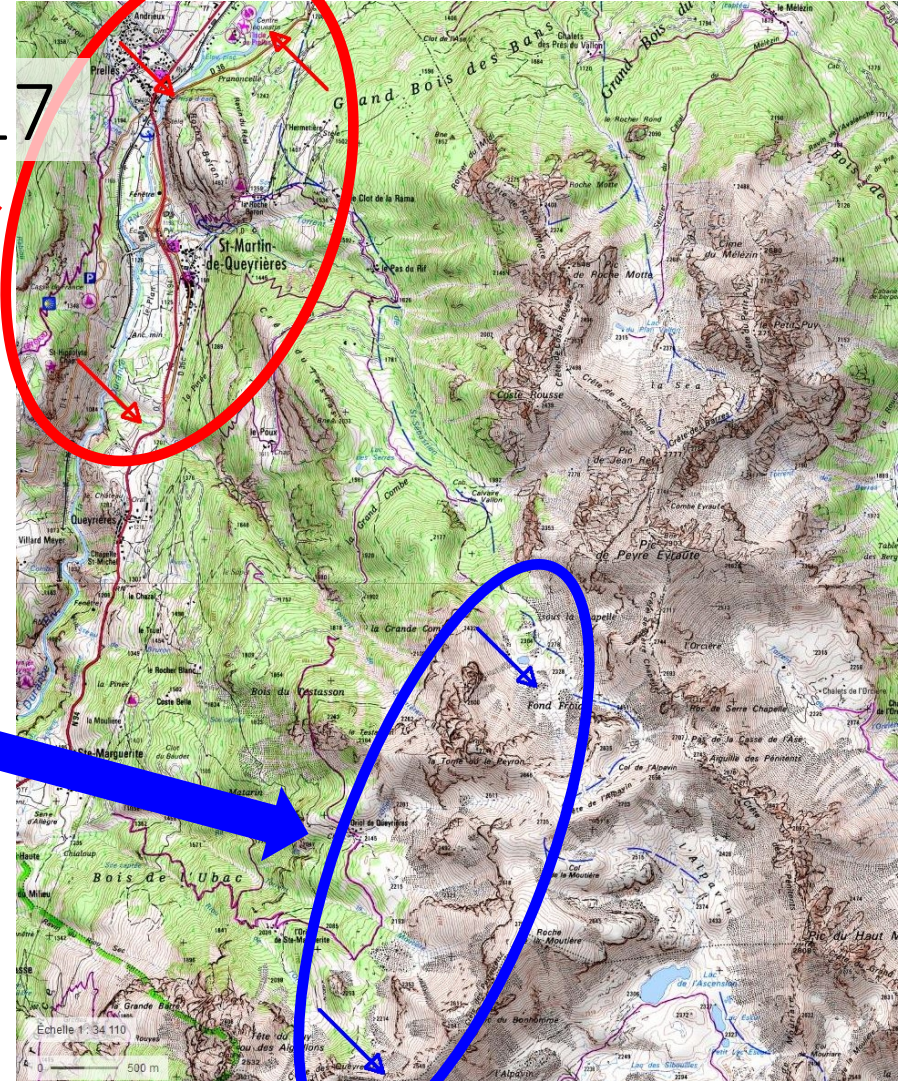
1350 m : 150 ans environ

Echantillonnage 2017

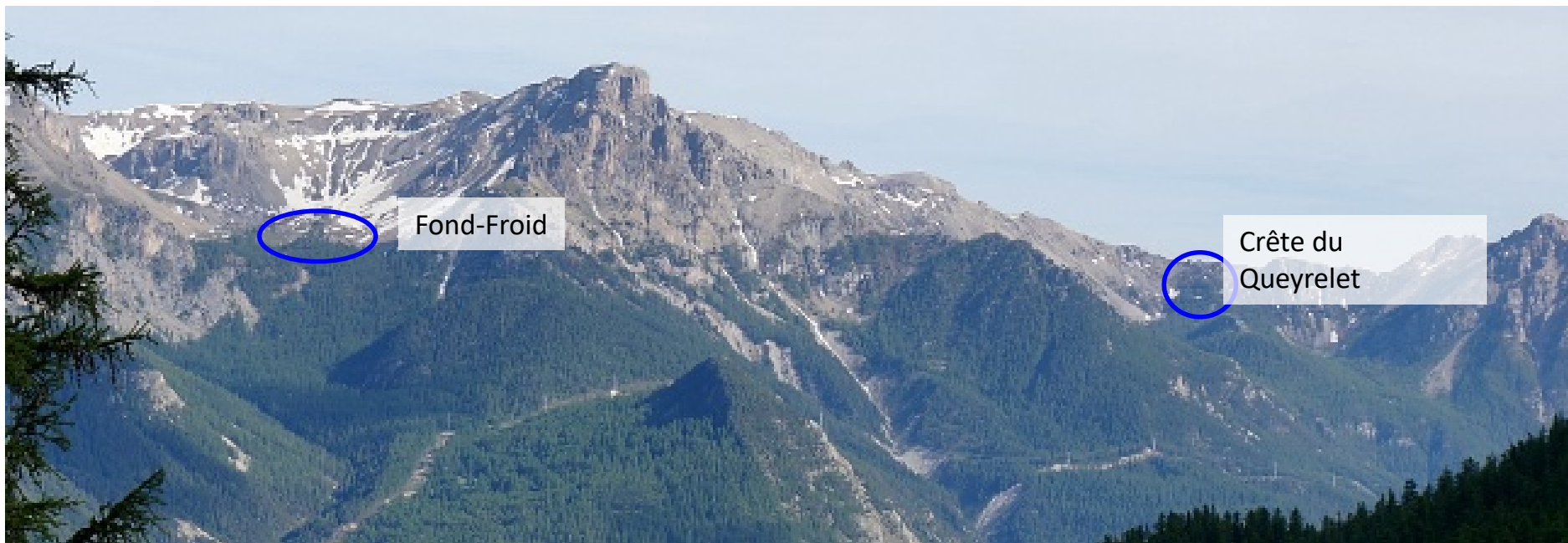
- 1200 m



- 2300-2400 m



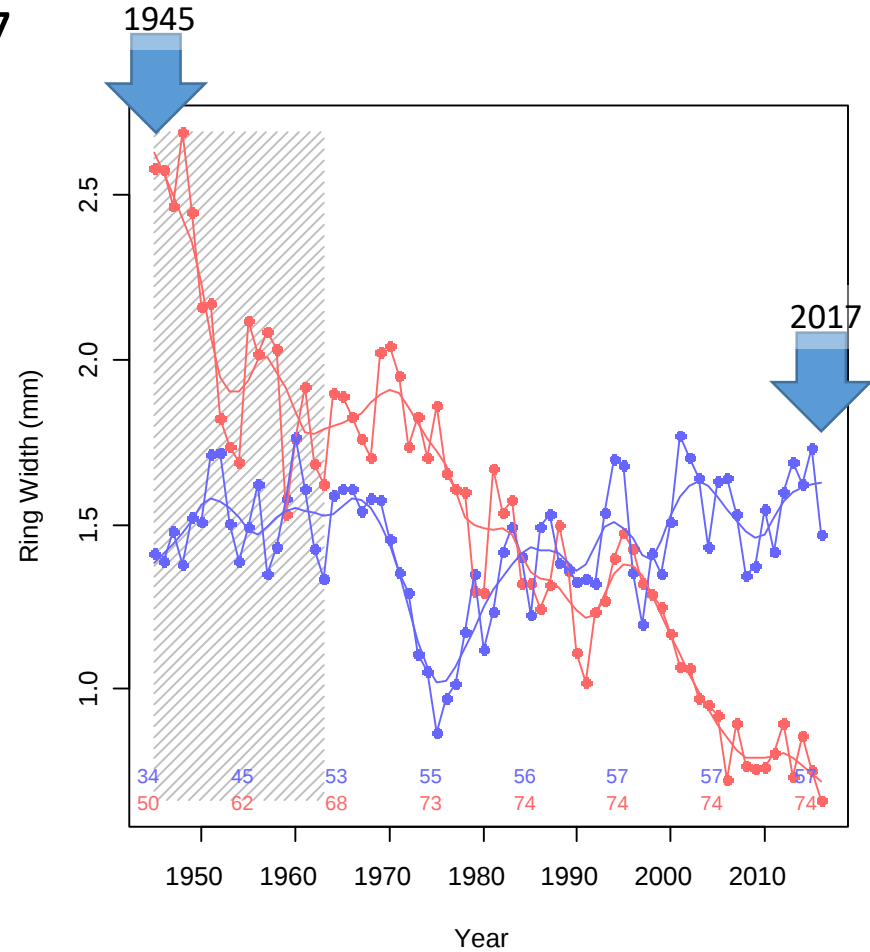
Les deux secteurs de haute altitude



Echantillonnage 2017

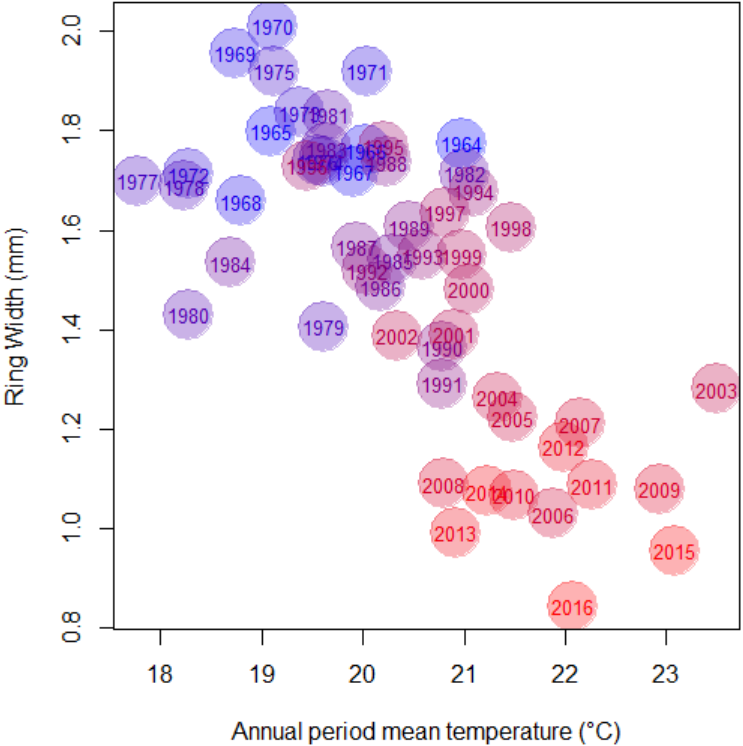
- Haute altitude (2320-2400 m)
- Basse altitude (1140-1200 m)

**Courbes de
croissance :
variations de la
largeur de cerne (mm)**

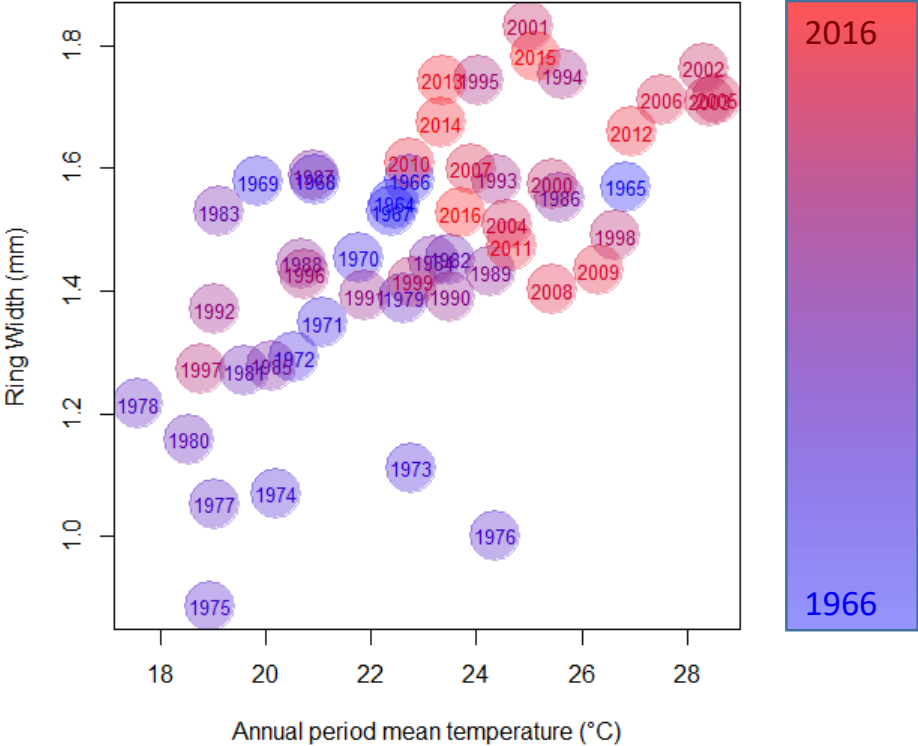


Relations avec la température

Basse altitude

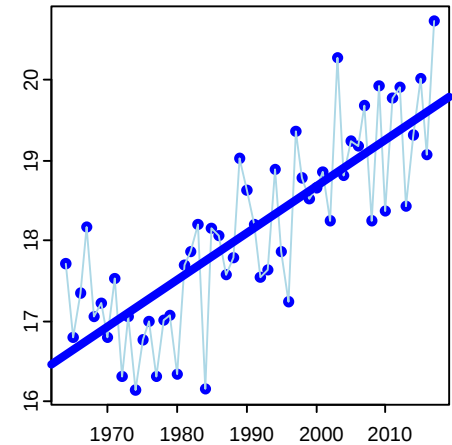


Haute altitude



Largeur de cerne

Effet
réchauffement
+
Autres
variations



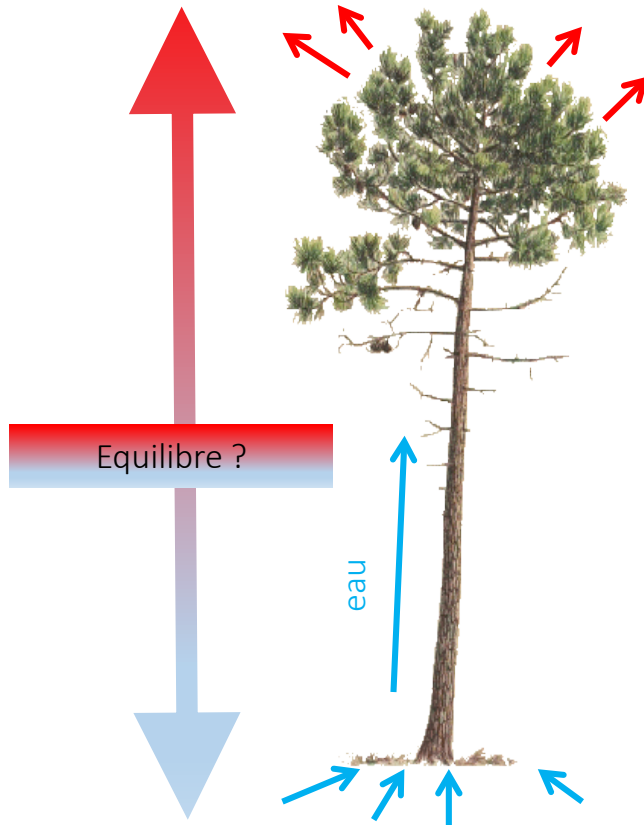
- Décomposition de la relation avec la température

Altitude	Basse			Haute		
Effets	Effet réchauffement	Autres variations de température	% total de variation expliquée	Effet réchauffement	Autres variations de température	% total de variation expliquée
% expliqué	73%	0%	74%	24%	18%	42%

Conclusions...

- Forte diminution de croissance en grosseur à très basse altitude
 - totalement liée au réchauffement
- 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)



Equilibre ?

eau

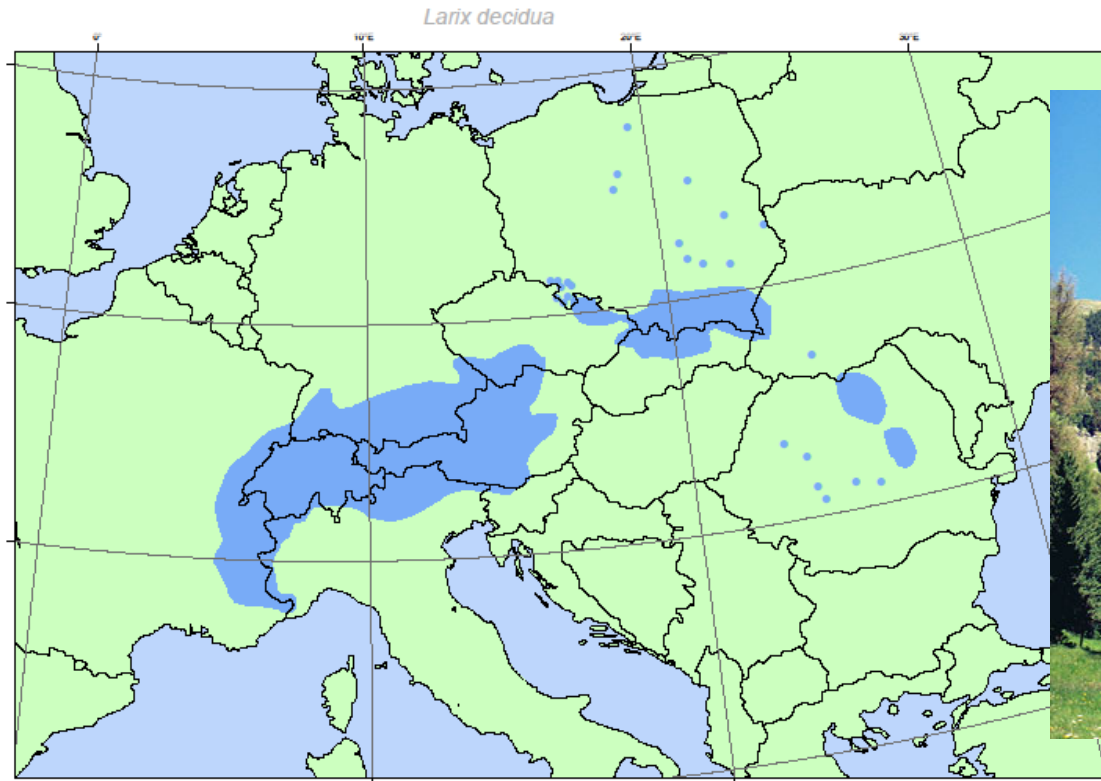
Disponibilité en eau (précipitations, sol)

Pourquoi peut-on
s'attendre à des
dépérissements à
basse altitude ?

- *Zeiraphera griseana*: defol insect



- *Larix decidua*: host tree
- Periodic outbreaks in the Alps



EUFORGEN Secretariat
c/o Bioversity International
Via del Tre Dinar, 472/a
00057 Maccarese (Fiumicino)
Rome, Italy
Tel: (+39)066118251
Fax: (+39)0661079961
euf_secretariat@euforgen.org
More information
and other maps at:
www.euforgen.org

This distribution map, showing the present natural distribution range of *Larix decidua*, was compiled by members of the EUFORGEN Networks

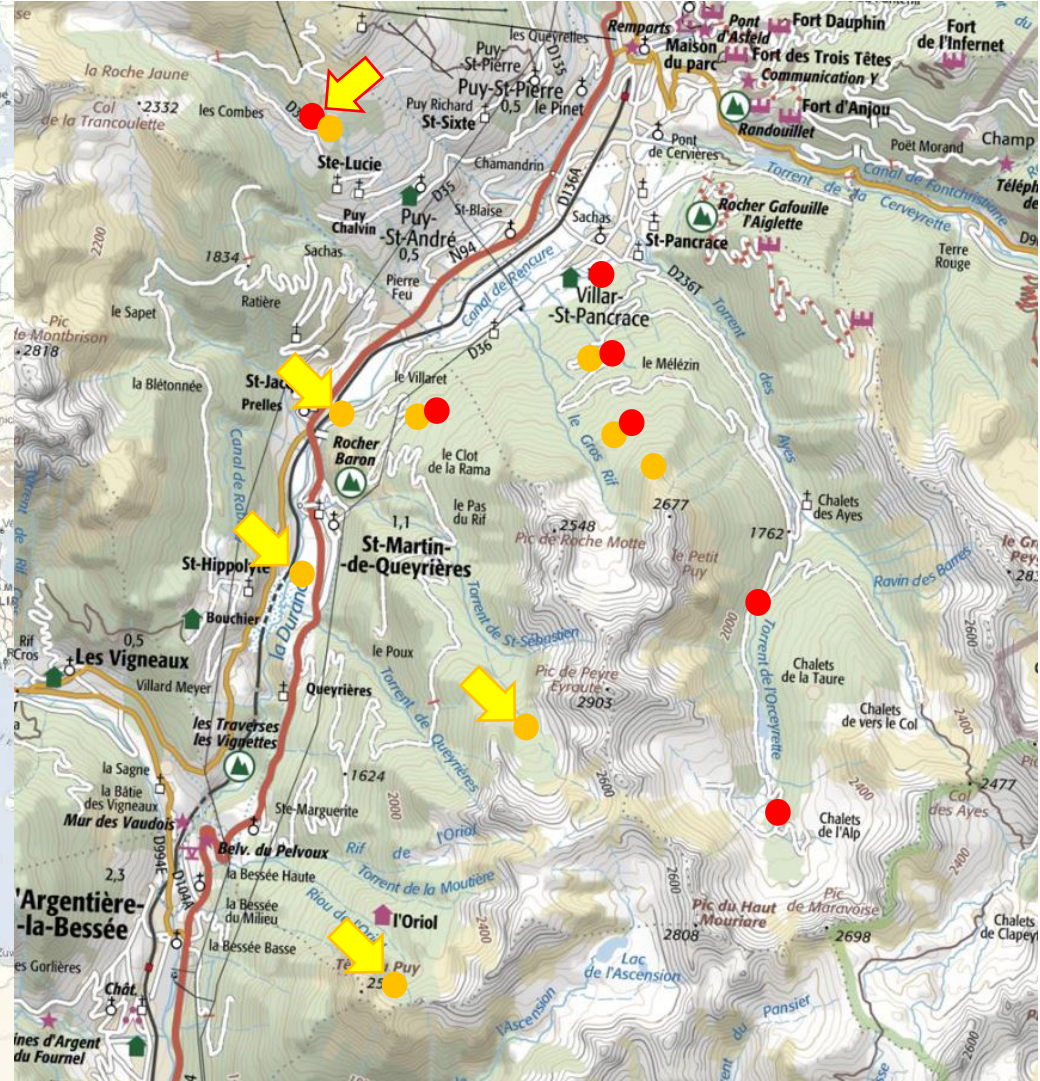
Citation: Distribution map of European larch (*Larix decidua*). EUFORGEN 2009, www.euforgen.org.

First published online on November 2009

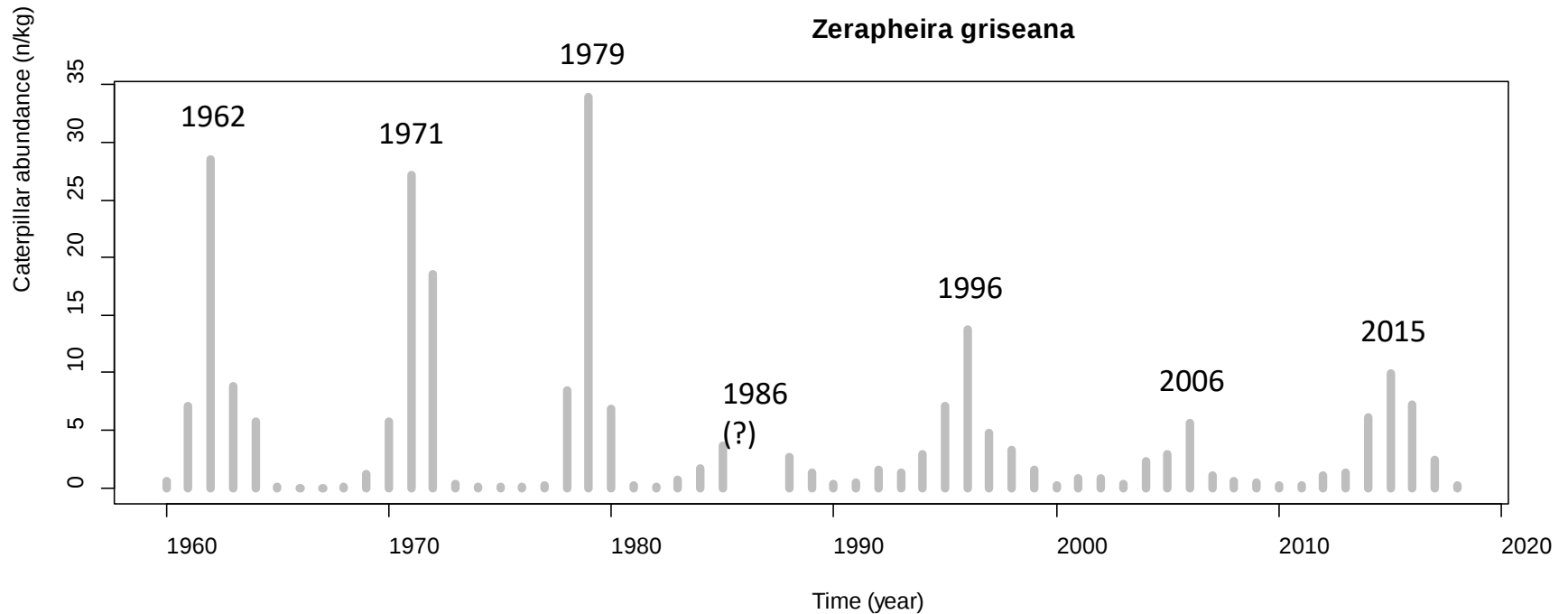
0 125 250 500 Km

Site d'étude

- Insect time-series
 - 1960-2018 (59 years) at 1800 m
 - 2009-2018 (9 years) at 6 elevations
- Tree-rings time-series
 - 1967-2007 (41 years) at four elevations
 - 1960-2016 (57 years) at two elevations

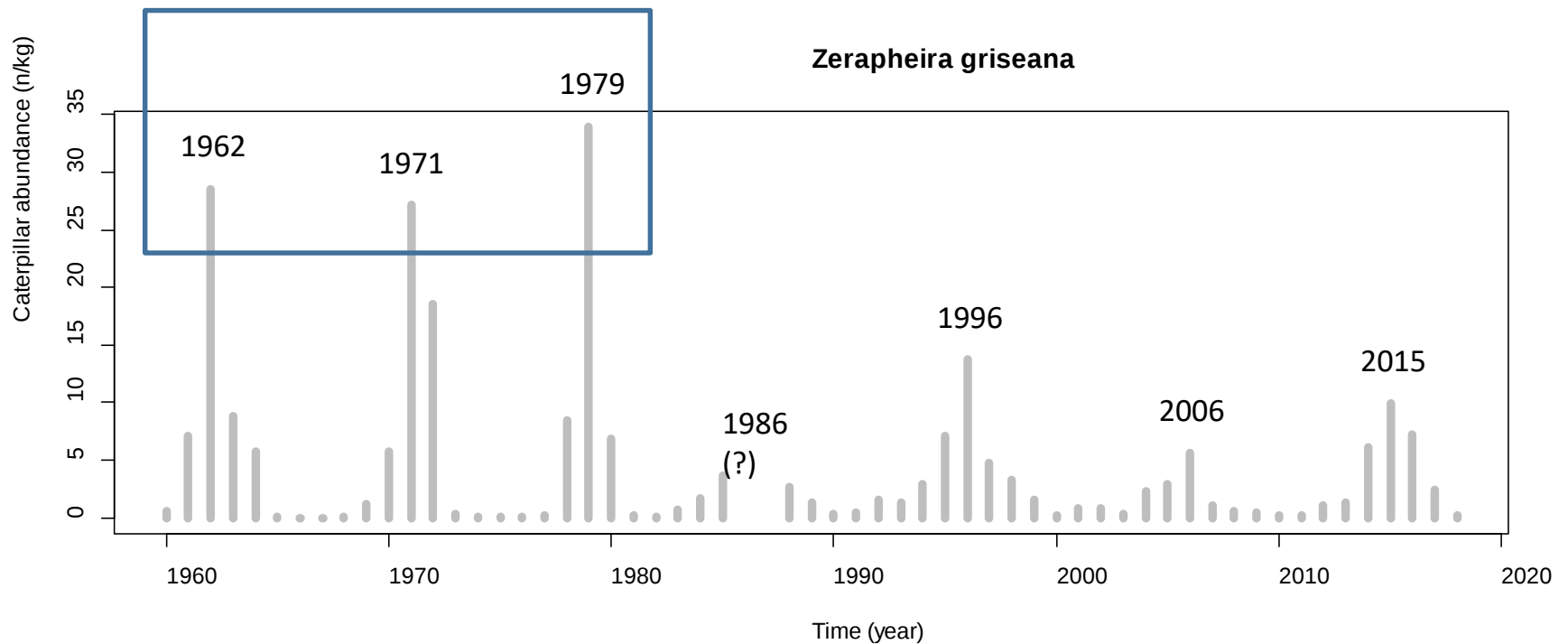


59 années d'observations, Les Combes (1800 m, Hautes-Alpes, France)

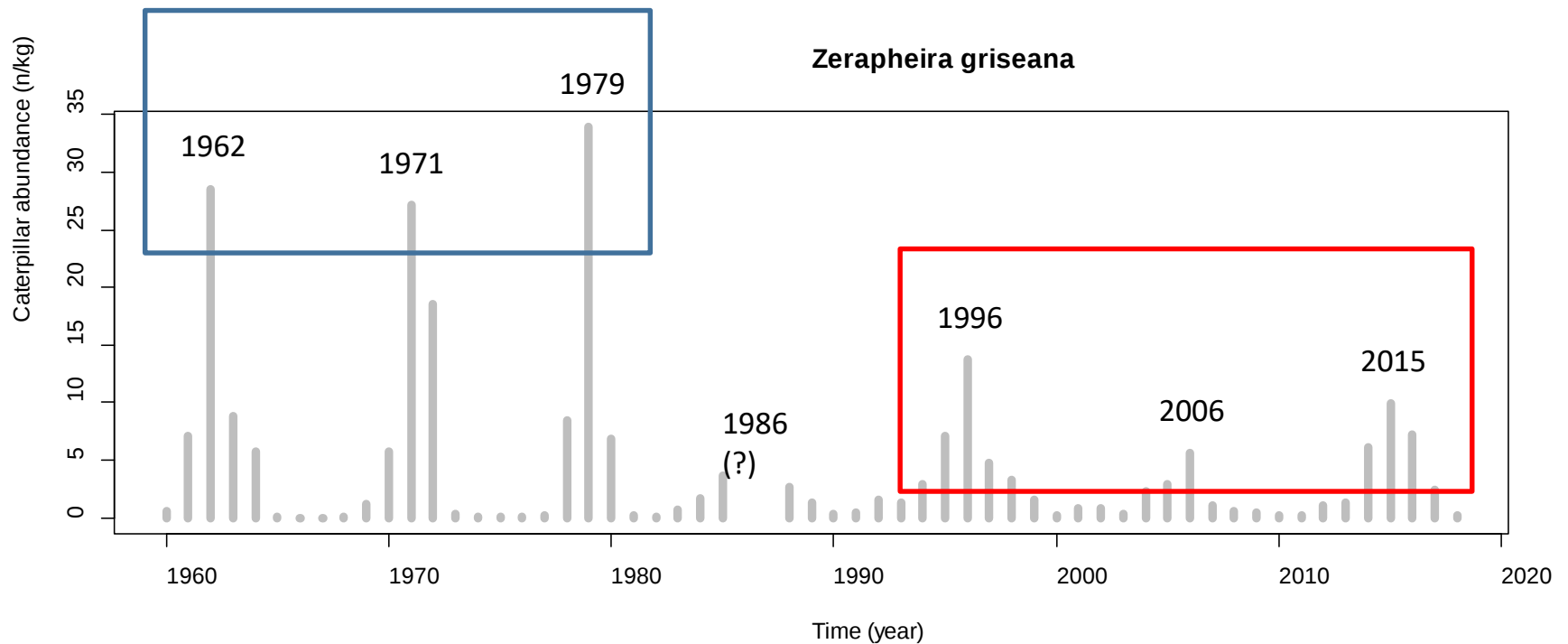


Données unité de recherche en zoologie forestière, INRA Orléans

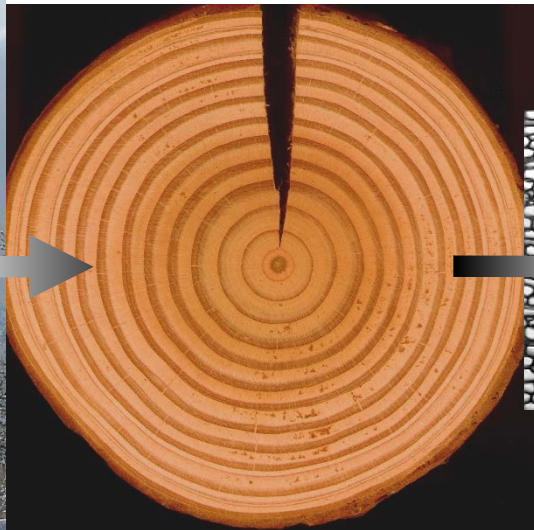
59 années d'observations, Les Combes (1800 m, Hautes-Alpes, France)



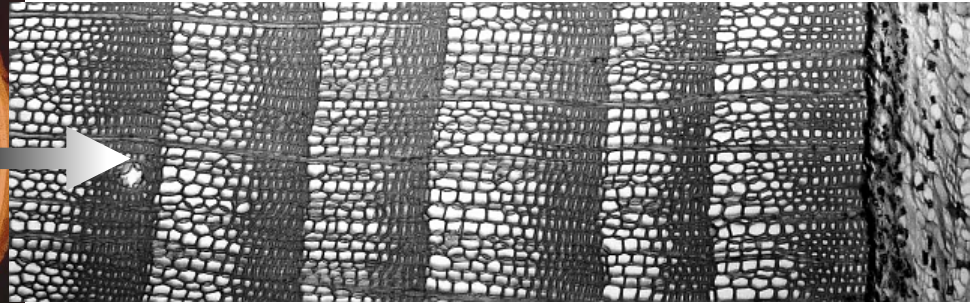
59 années d'observations, Les Combes (1800 m, Hautes-Alpes, France)



Analyse de cernes des défoliations



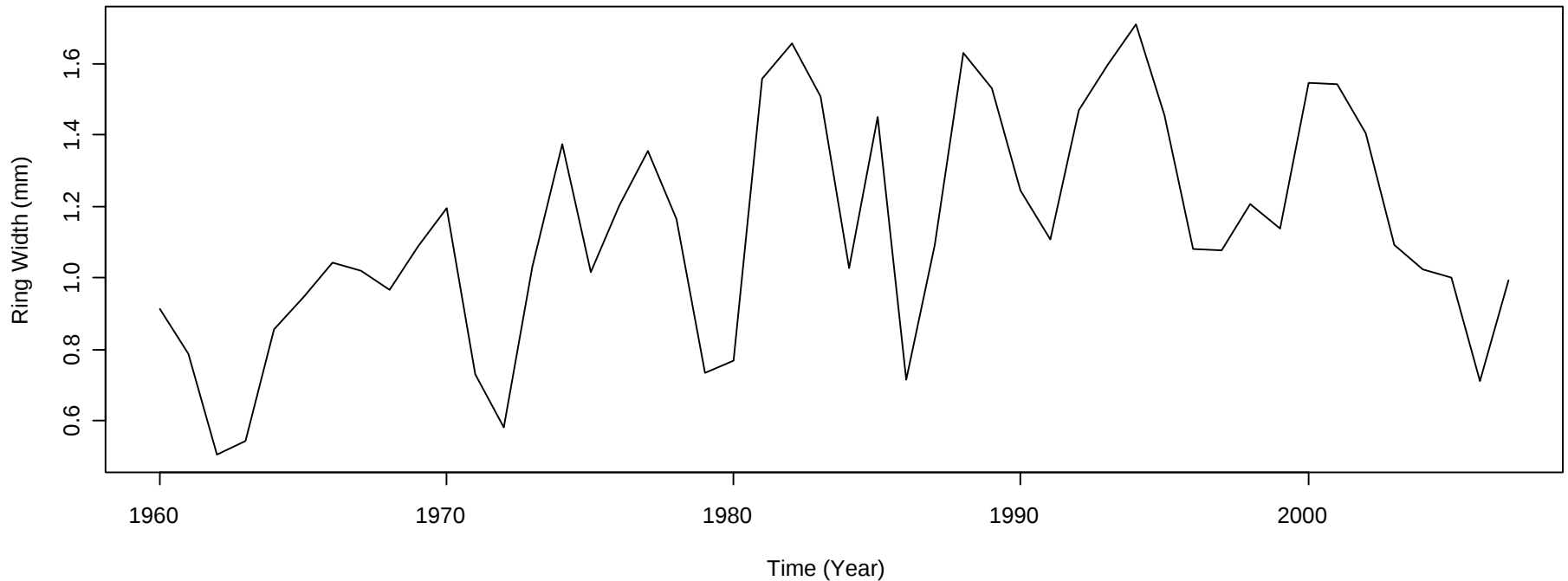
Ring-width decreases
in case of defoliation



Confusion with other
factors (climate)

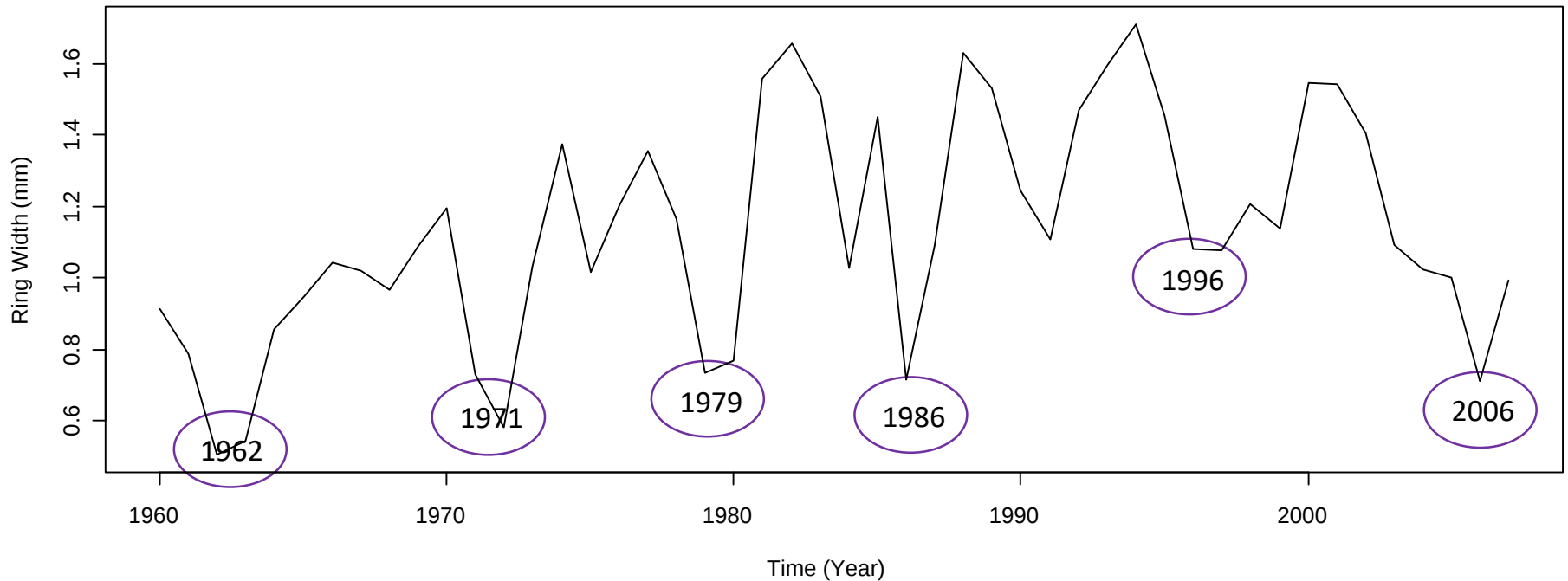
Séries temporelles associées

- Mean ring width of 10 larch trees at les Combes increment core collection in 2008



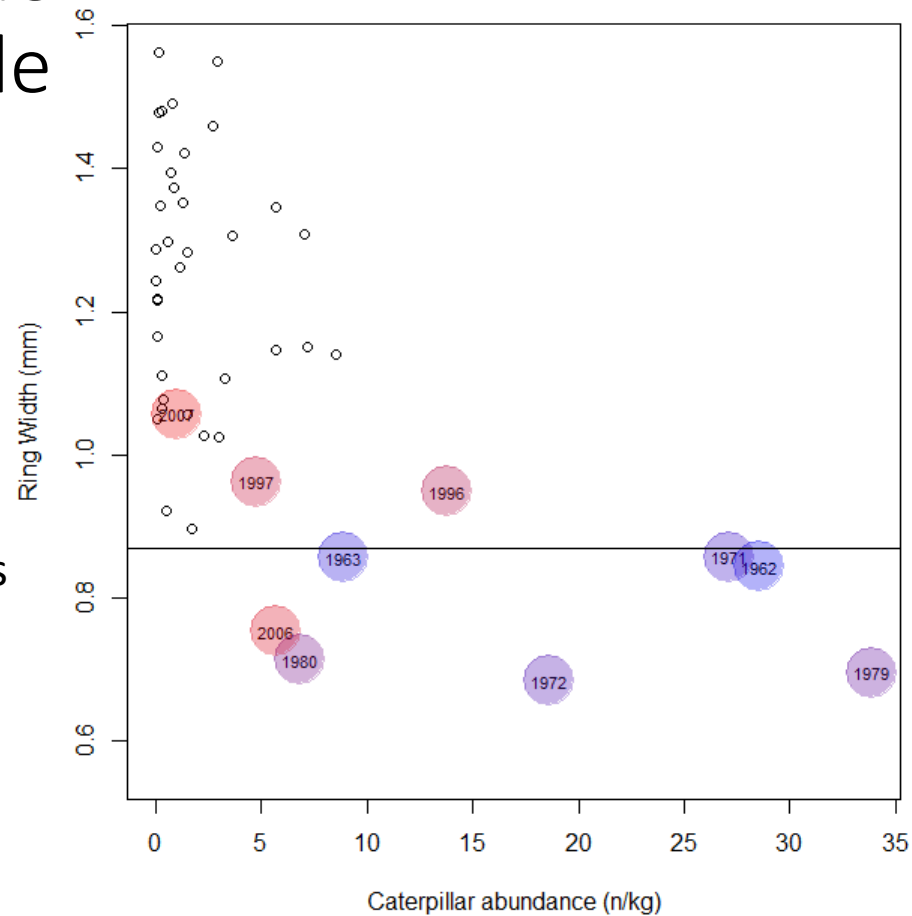
Séries temporelles associées

Ring width decreases when the trees are defoliated by ZG



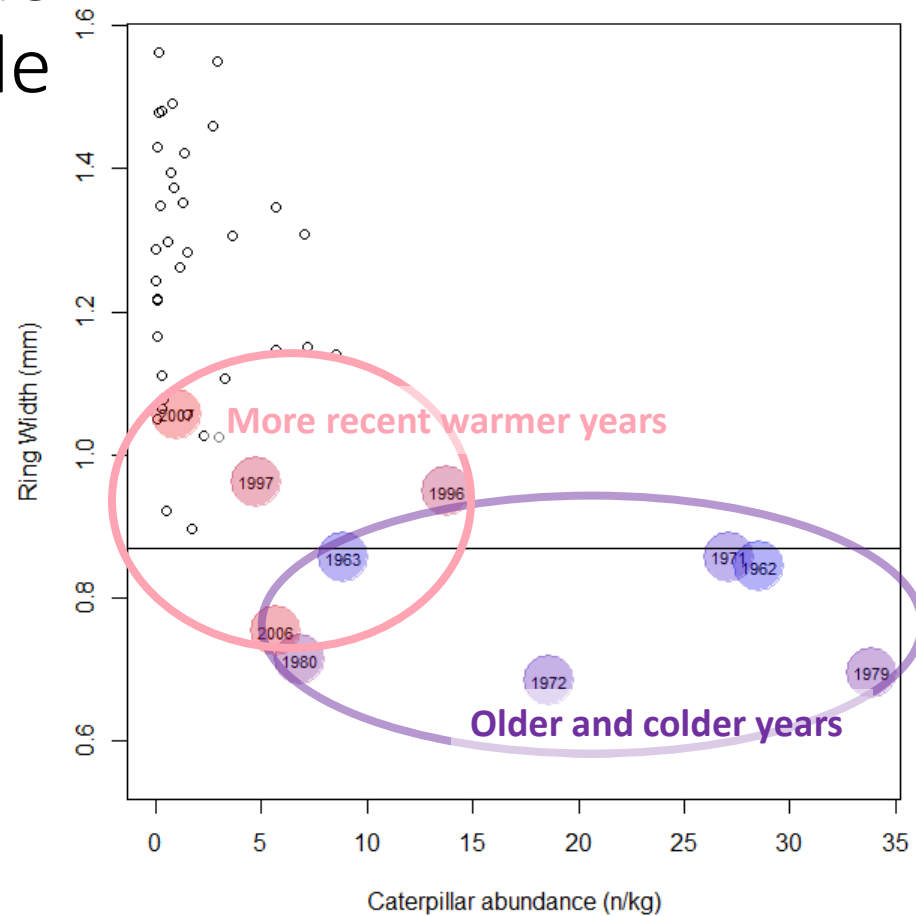
Largeur de cerne et abondance de l'insecte, Les Combes 1800 m

Ring width strongly decreases
with budmoth outbreaks



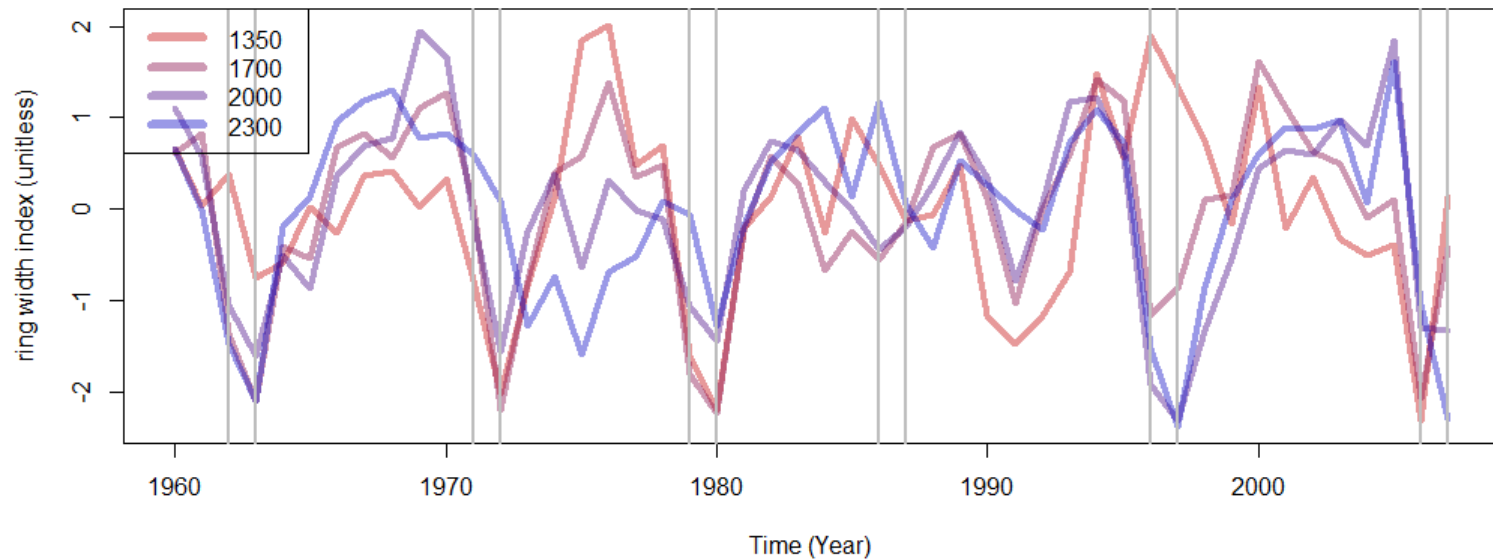
Largeur de cerne et abondance de l'insecte, Les Combes 1800 m

The relationship is changing
with time



1967-2007 séries temporelles à 4 altitudes

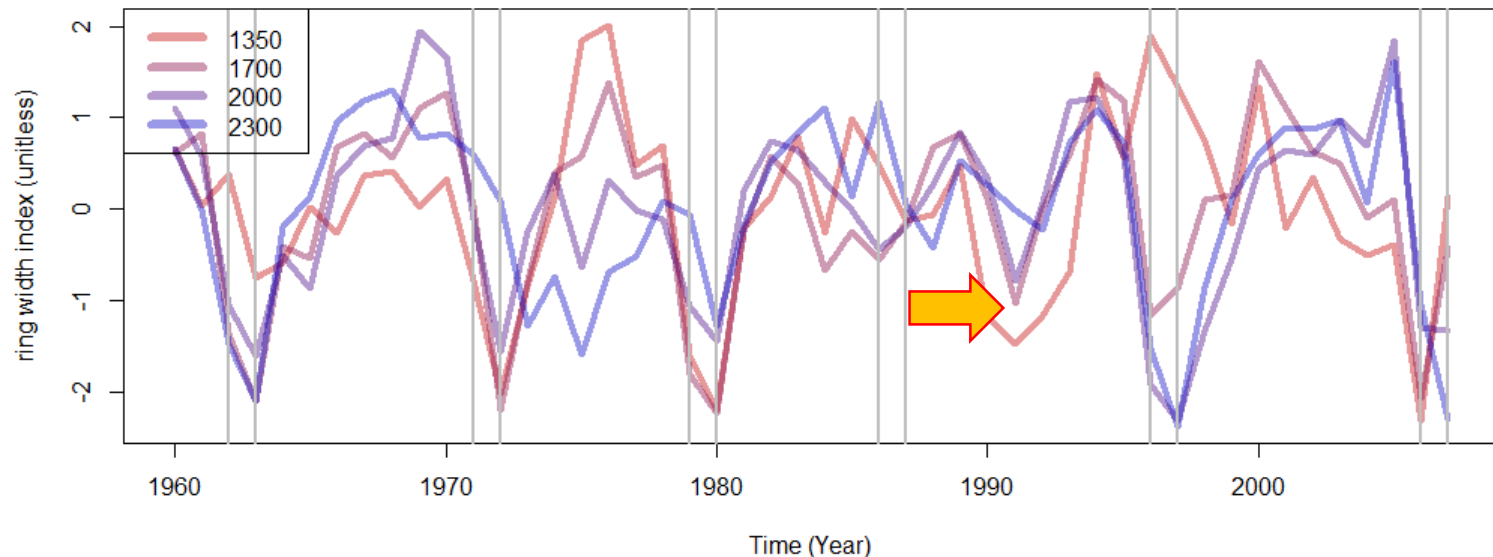
Detrended, scaled ring-width time series at four elevations, outbreak years



Vertical lines: “Les Combes” outbreaks

1967-2007 séries temporelles à 4 altitudes

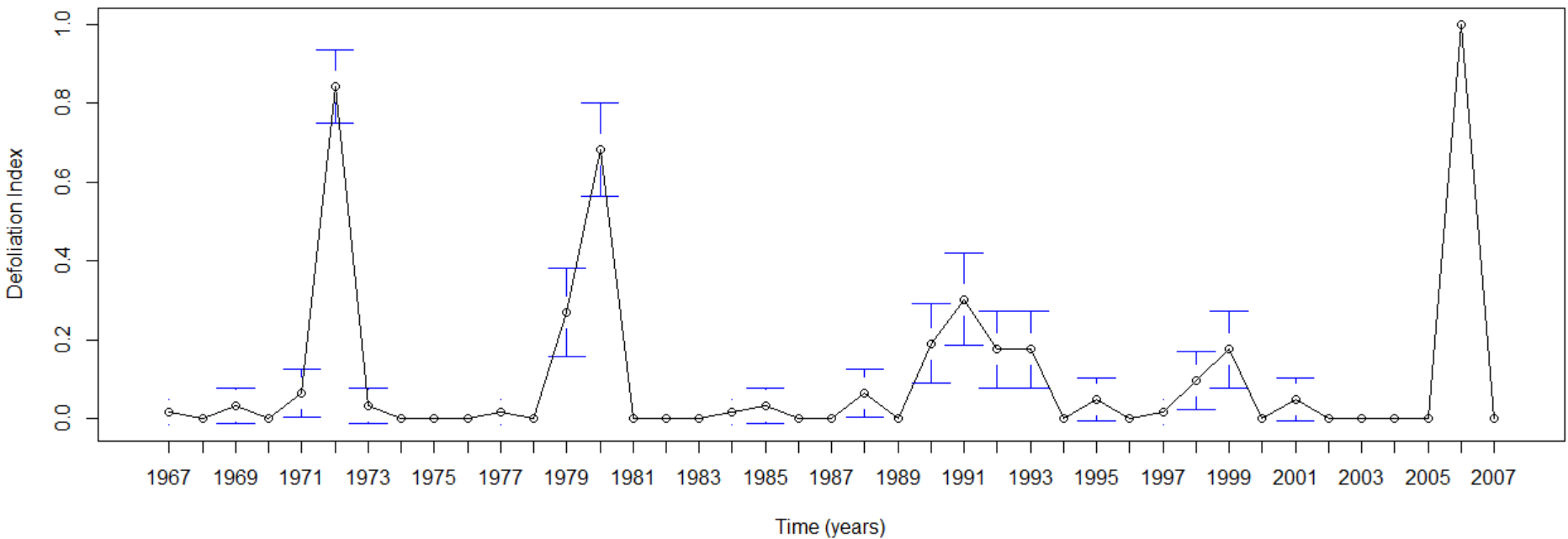
Most “Les Combes” outbreaks are visible



Sometimes with a temporal shift

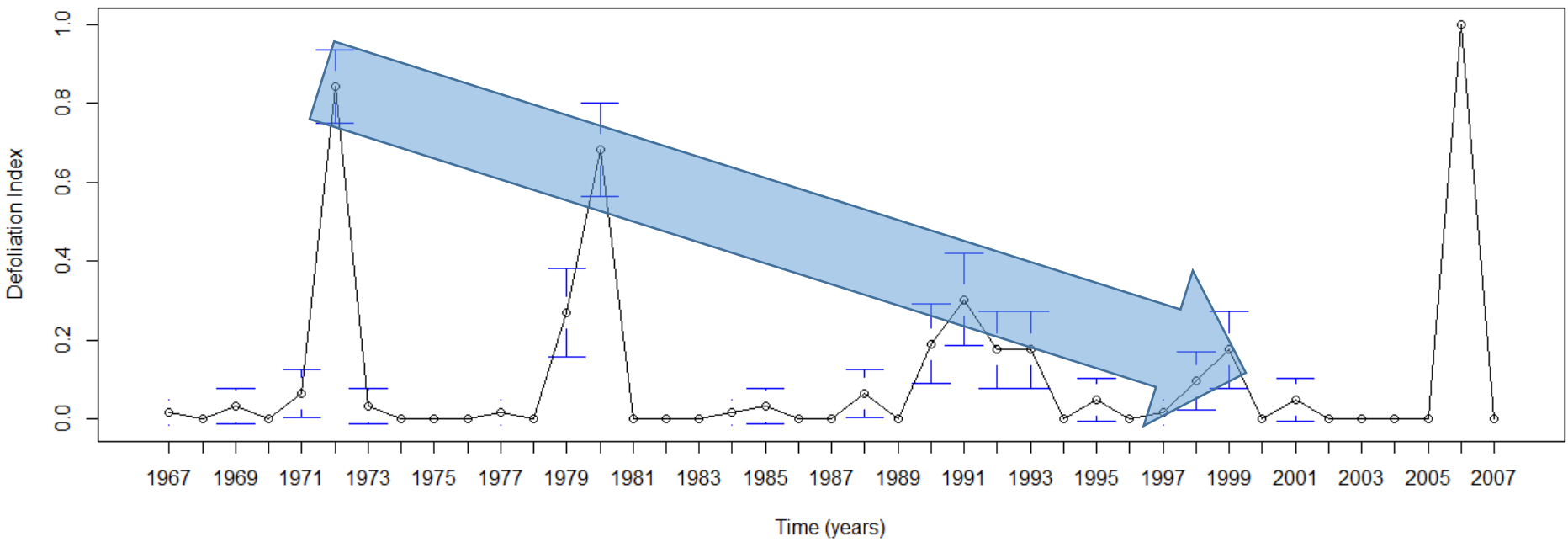
Tree-ring defoliation index (Büntgen et al 2008) per altitudinal plot

Altitude 1350 m



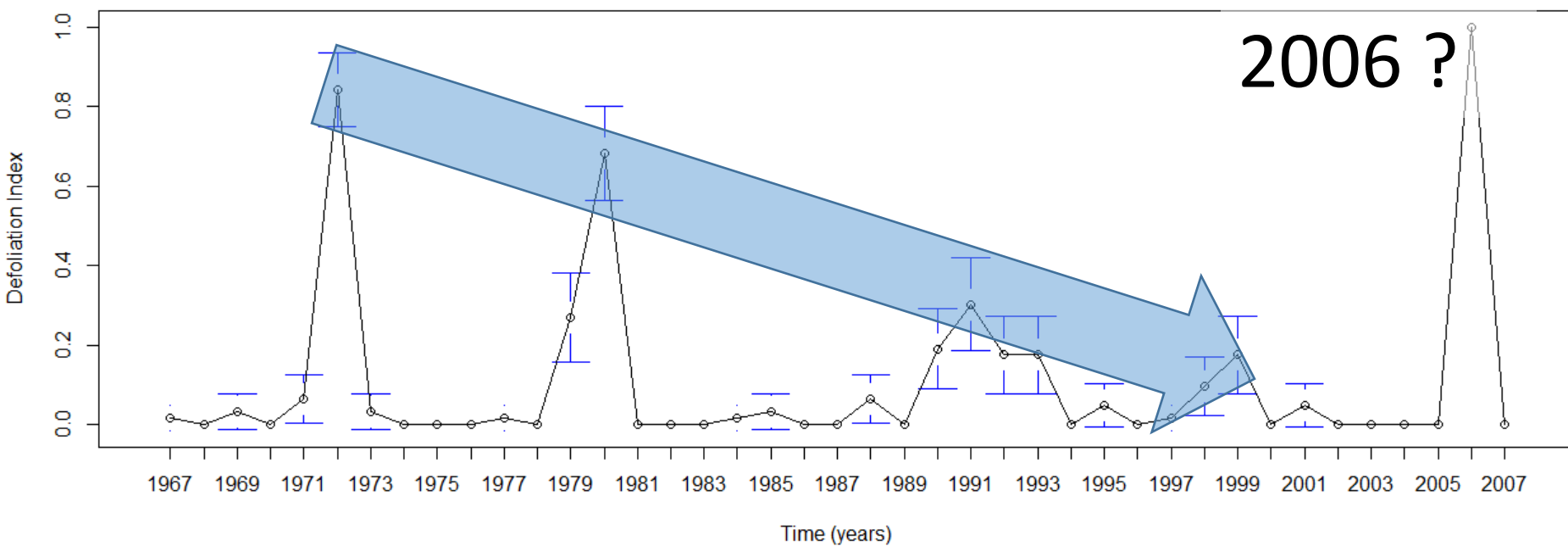
1350 m

Altitude 1350 m



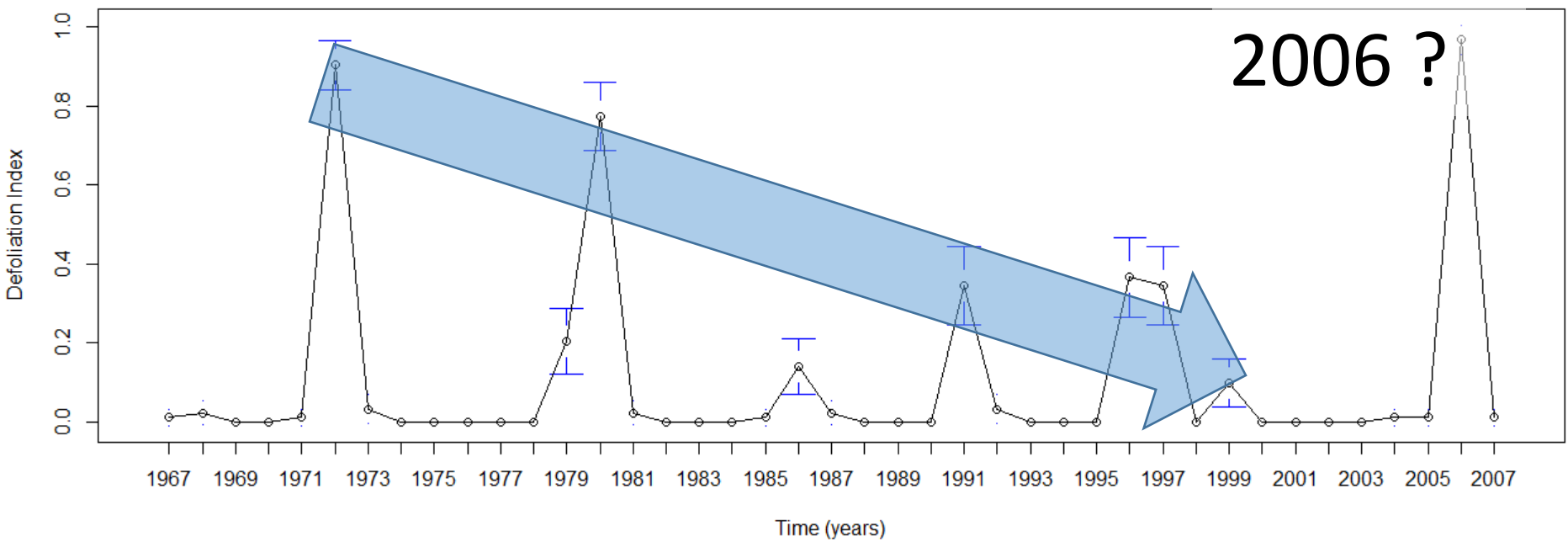
1350 m

Altitude 1350 m

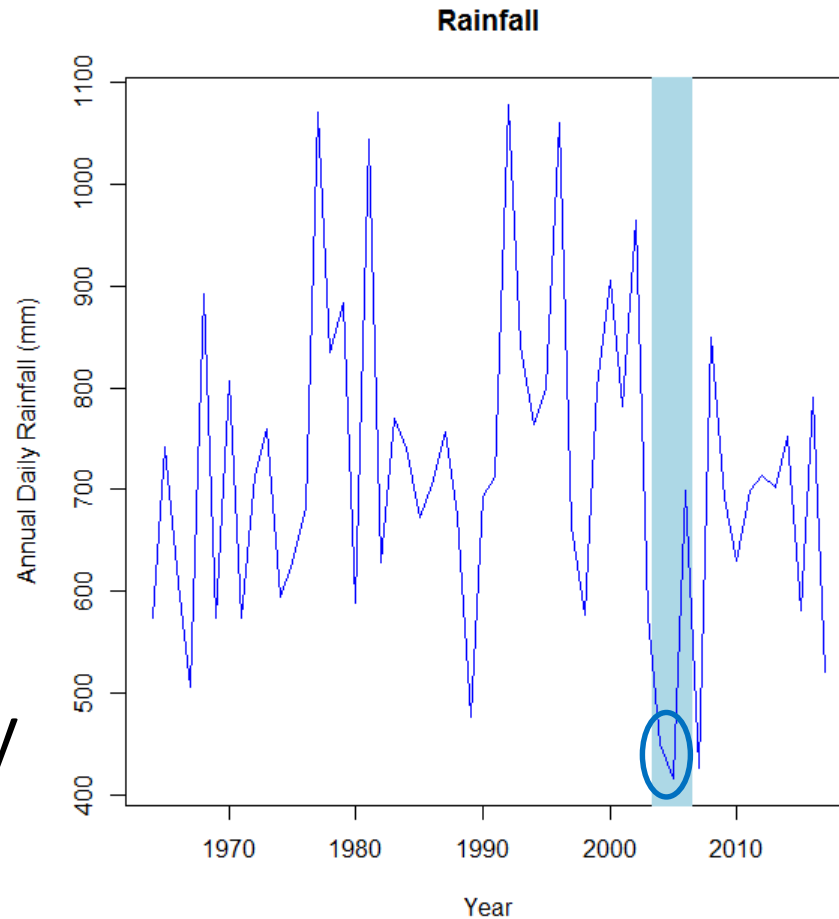


1700 m

Altitude 1700 m

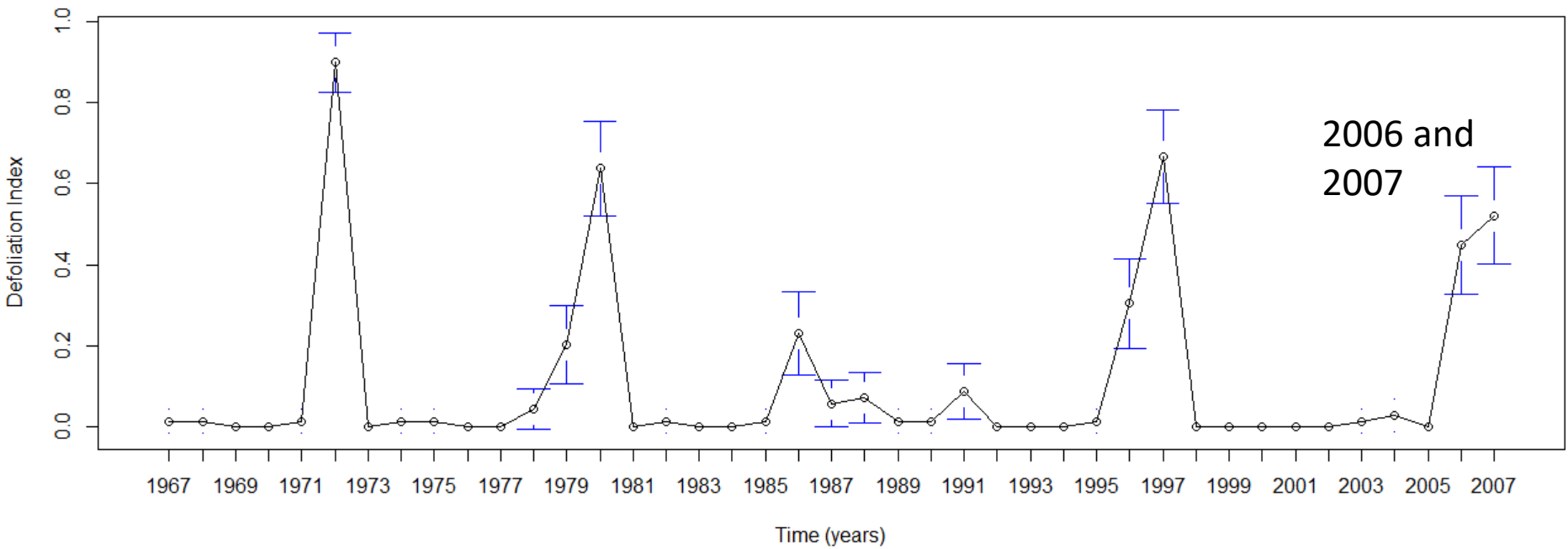


2004 and
2005 are dry
years

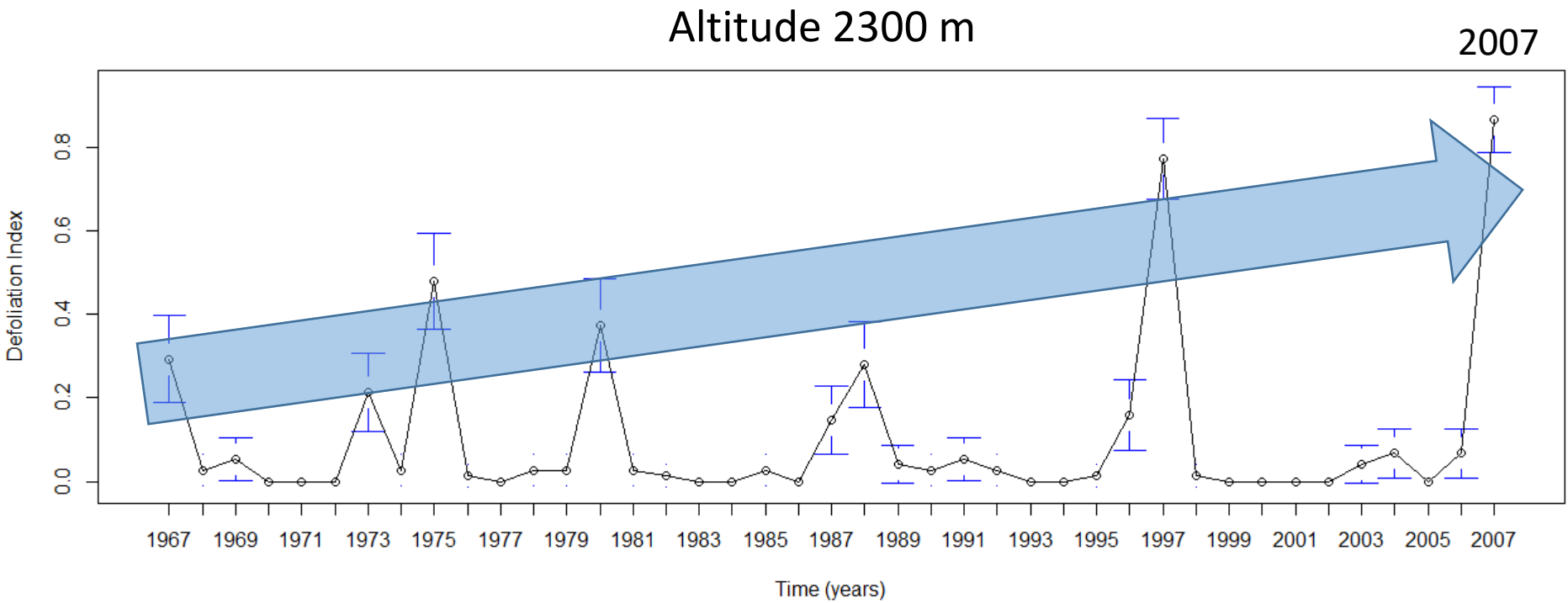


2000 m

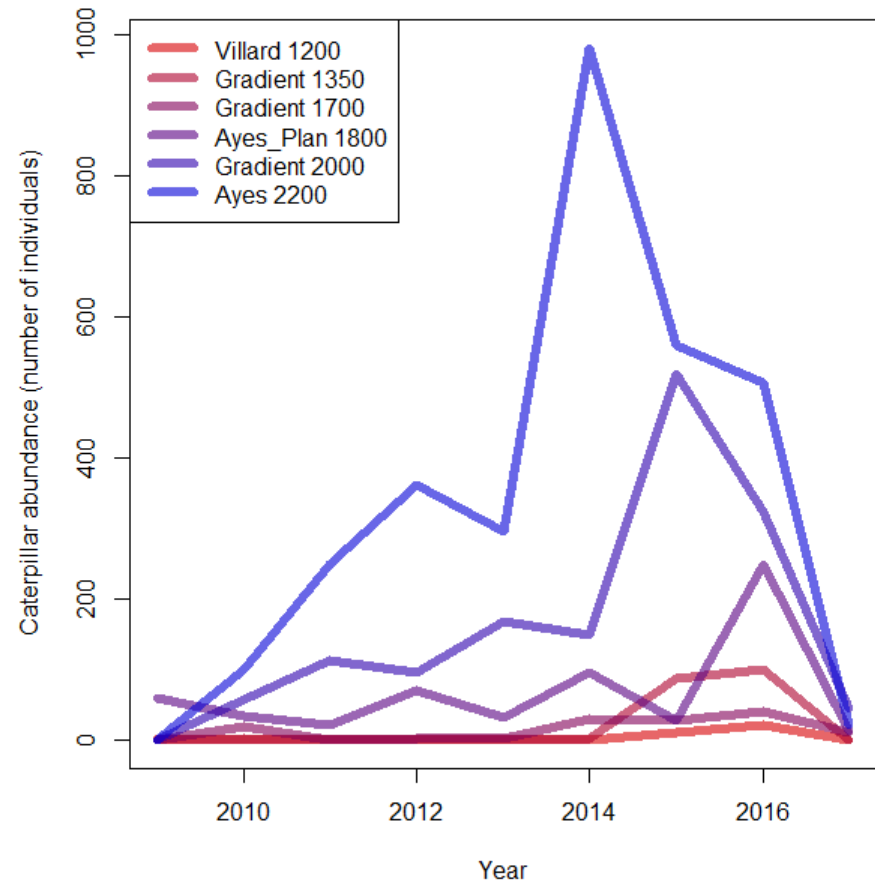
Altitude 2000 m



2300 m



Recent trapping
from 2009 to 2017
at 1200 to 2200 m
elevations:
most recent
outbreak



Conclusion : il y a montée en altitude de la tordeuse du mélèze

- Les observations directes (abondance d'insectes) et indirectes (cernes) convergent vers des tendances similaires: l'itnesité des gradations et ...
 - ... *diminue de* 1200 à 1700 m
 - Est plus ou moins stable vers 2000 m
 - ... *augmente à* 2300 m
- Comme d'autres organismes, la tordeuse monte en altitude

Autres stress, autres dangers ?

- Durée des saisons de végétations ?
 - Gelées
- Dormance et température hors saison de végétation ?
- Perturbation des cycles végétatifs et des cycles de reproduction
 - Signalements de baisse de fertilité ?

Comment utiliser ces résultats ?

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



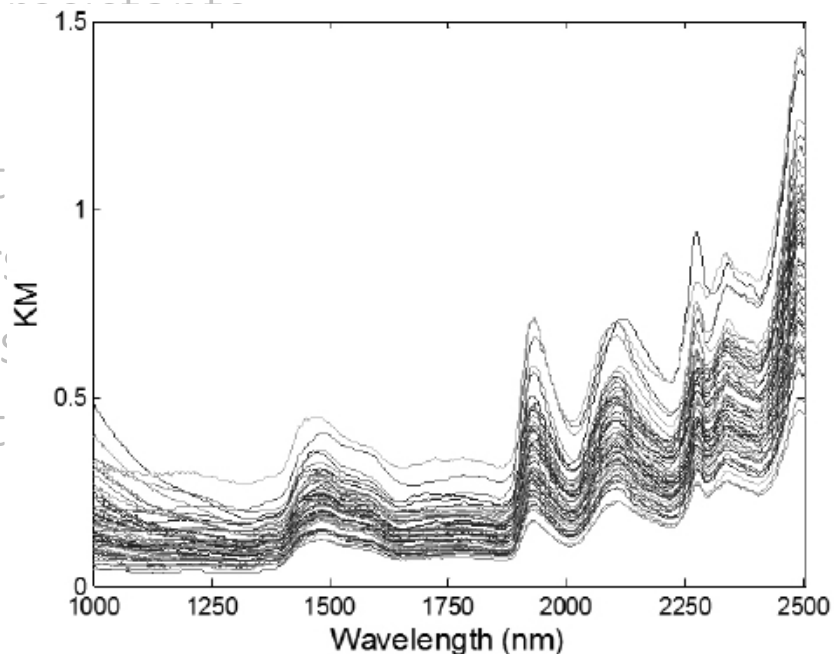
Perspectives : comment utiliser ces résultats ?

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



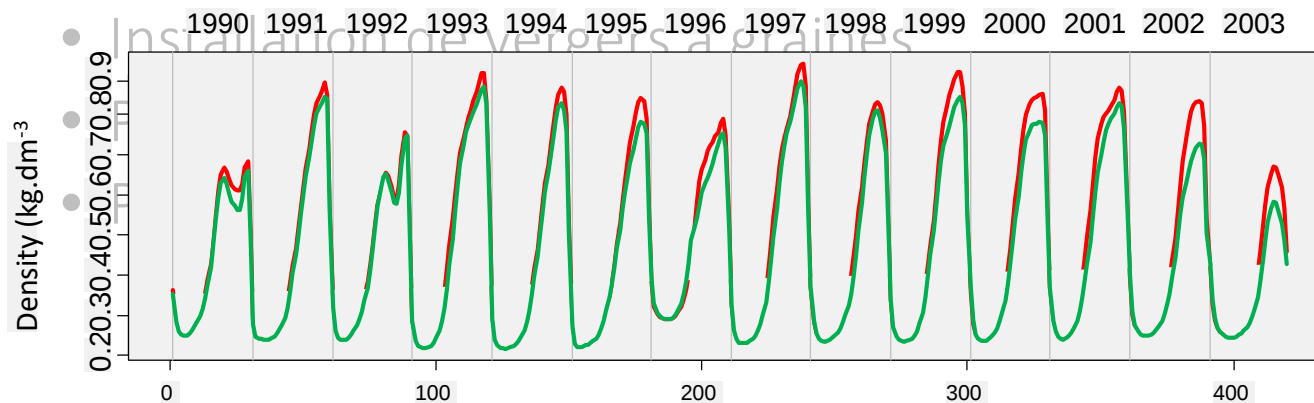
Forêts plantées

- 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
 - Croisements artificiel
 - Tests des descendant
 - Installation de vergers
 - Production de graines
 - Production et plantat



Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
 - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
 - Mais... mesure de caractères du bois
 - Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
 - Sélection d'individus résistants
 - Croisements artificiels
 - Tests des descendants





- Croisements artificiels
- Tests des descendants
- Installation de vergers à graines
- Production de graines
- Production et plantation de variétés résistantes

individus
s ?



- Croisements artificiels
- Tests des descendants
- Installation de vergers à graines
- Production de graines
- Production et plantation de variétés résistantes

Forêts pl

- Programme

- Mesure de

- Mais... m
 - Perspec

- Sélection

- Croisements artificiels

- Tests des descendants

- Installation de vergers à graines

- Production de graines

- Production et plantation de variétés résistantes



dividus
?

Forêts pla

- Programme d
• Mesure des
• Mais... me
Perspectiv
• Sélection d'
• Croisement
• Tests des de
• Installation
• Production de graines
• Production et plantation de variétés résistantes



Forêts plantées

- Progr

- M

- Sé

- Cr

- Te

- Ins

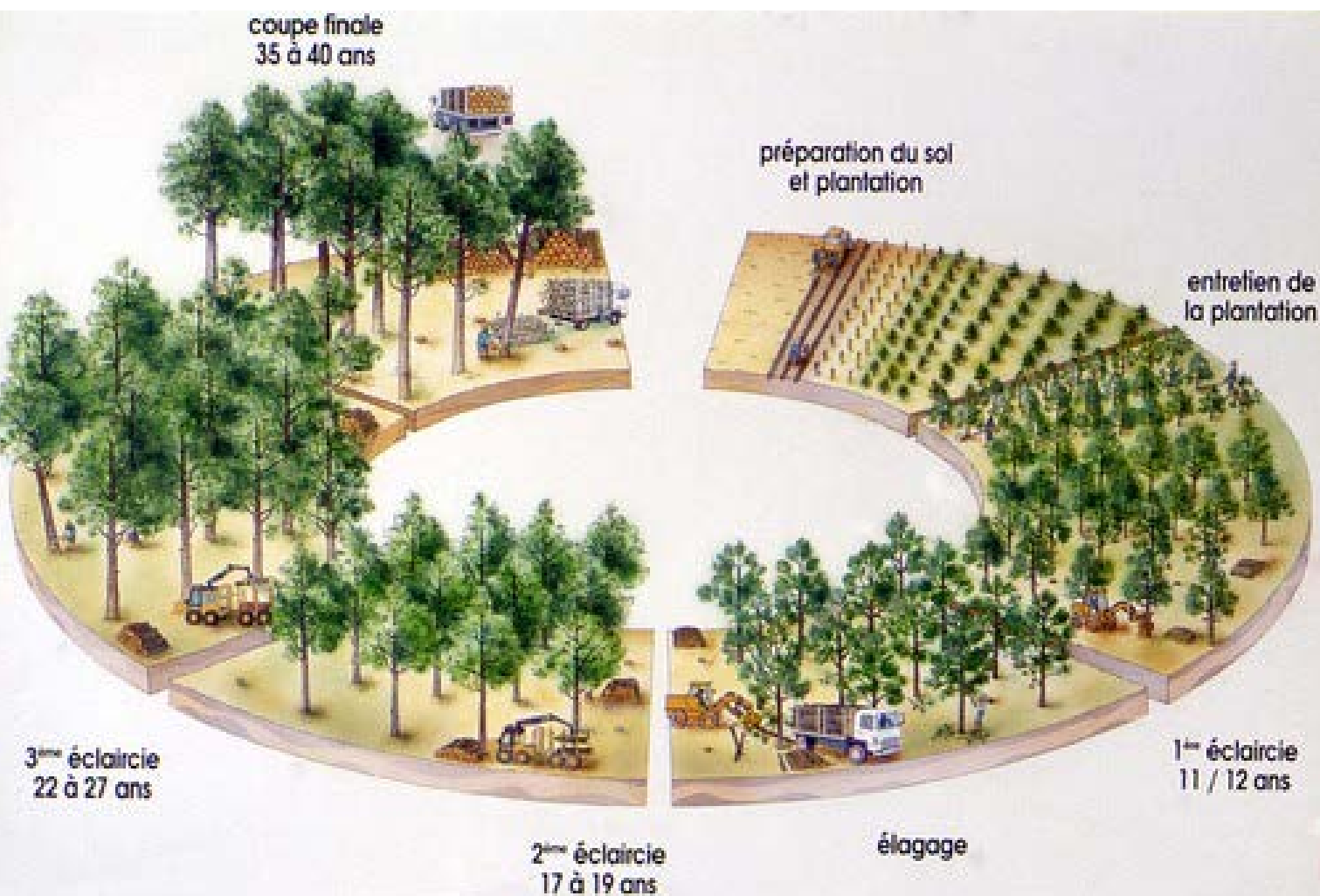
- Pro

- Production et plantation de variétés résistantes



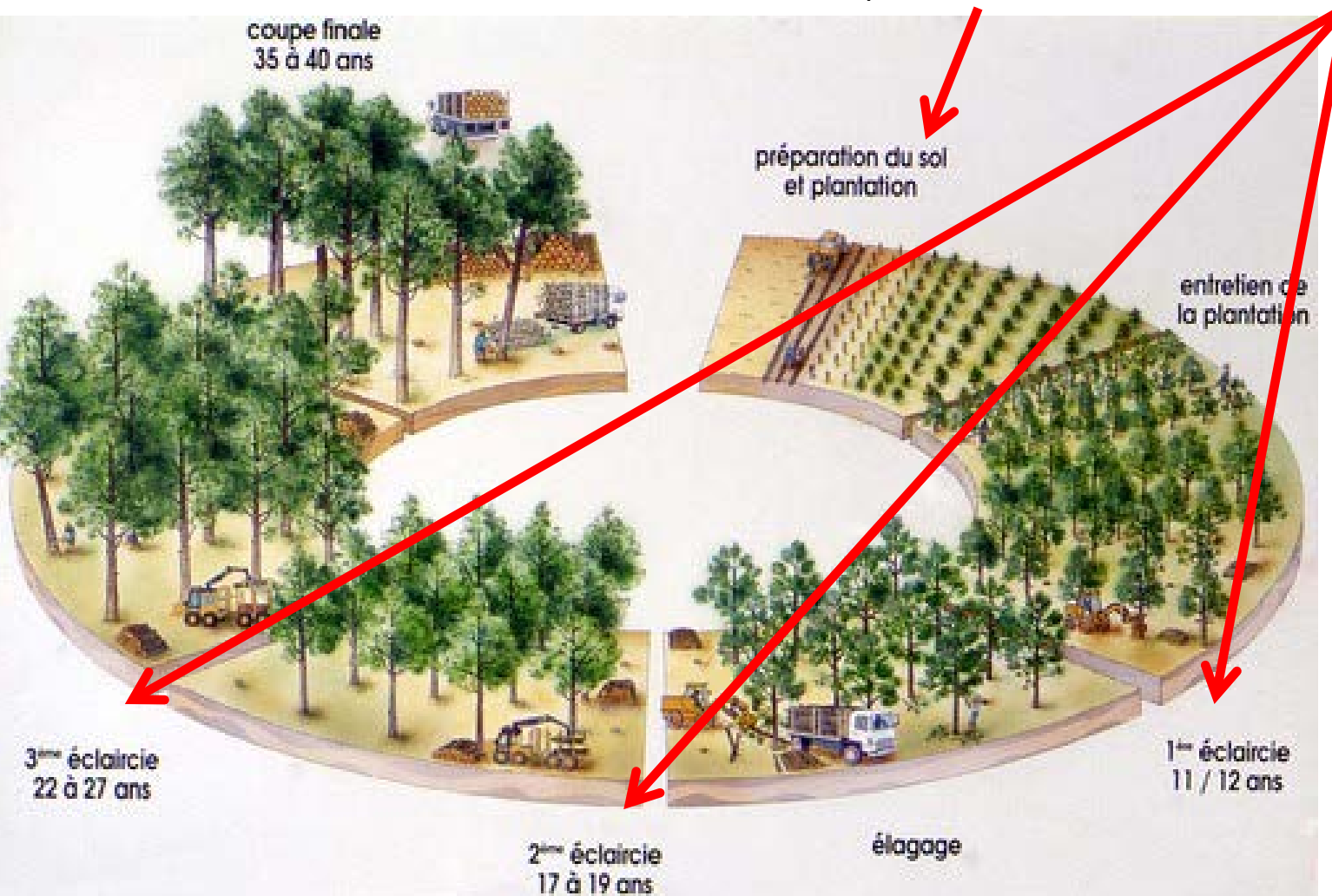
dividus
?

Sylviculture



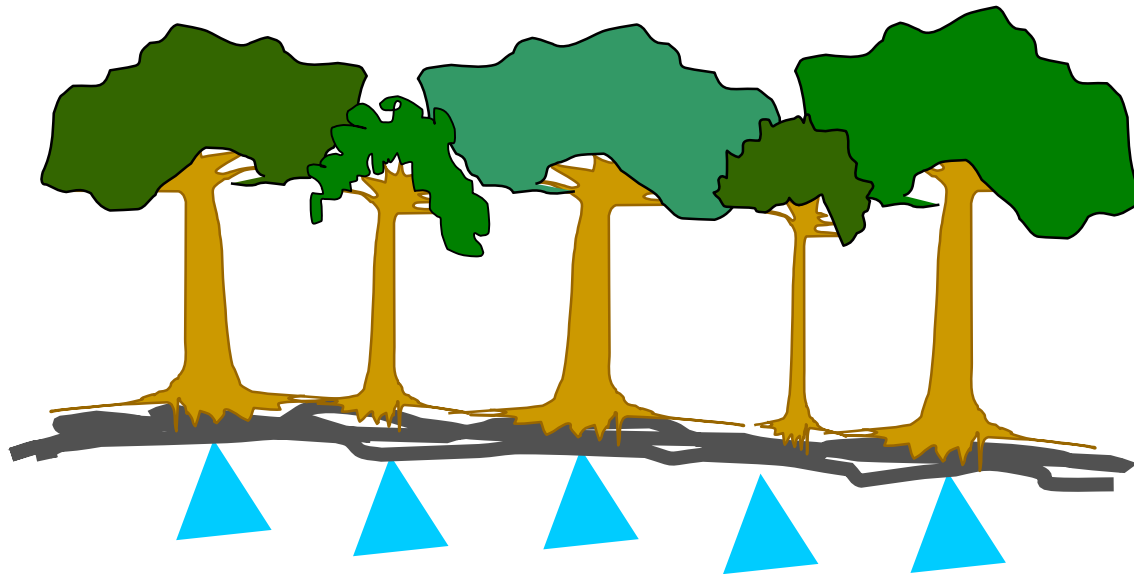
Sylviculture

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



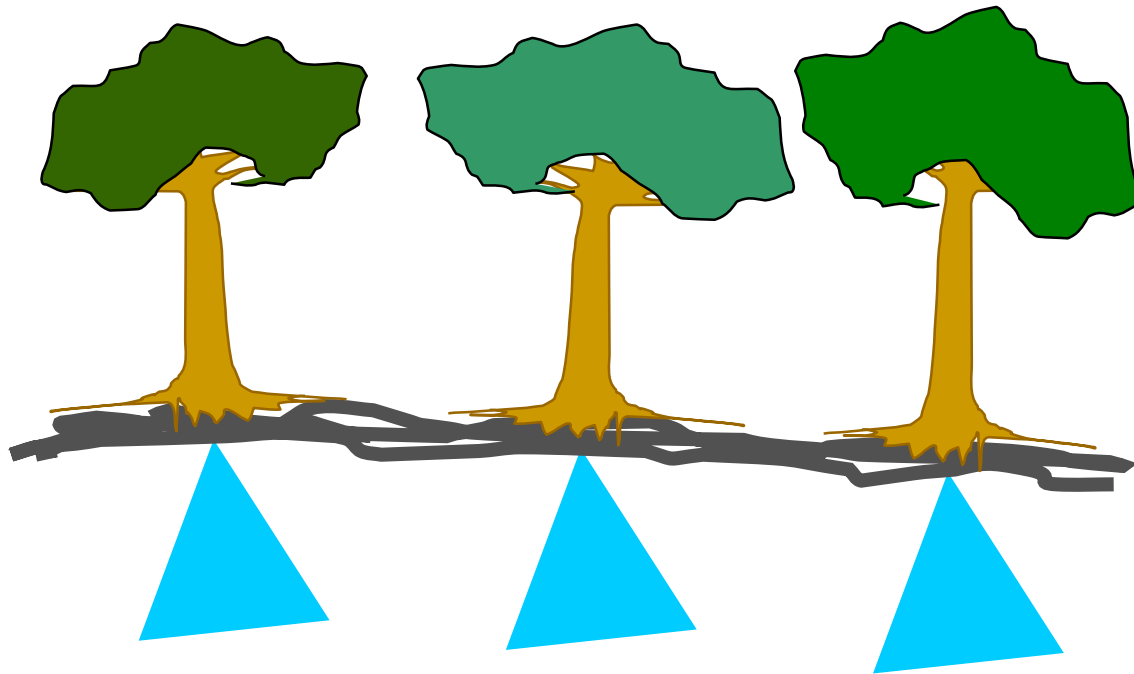
Sylviculture

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



Sylviculture

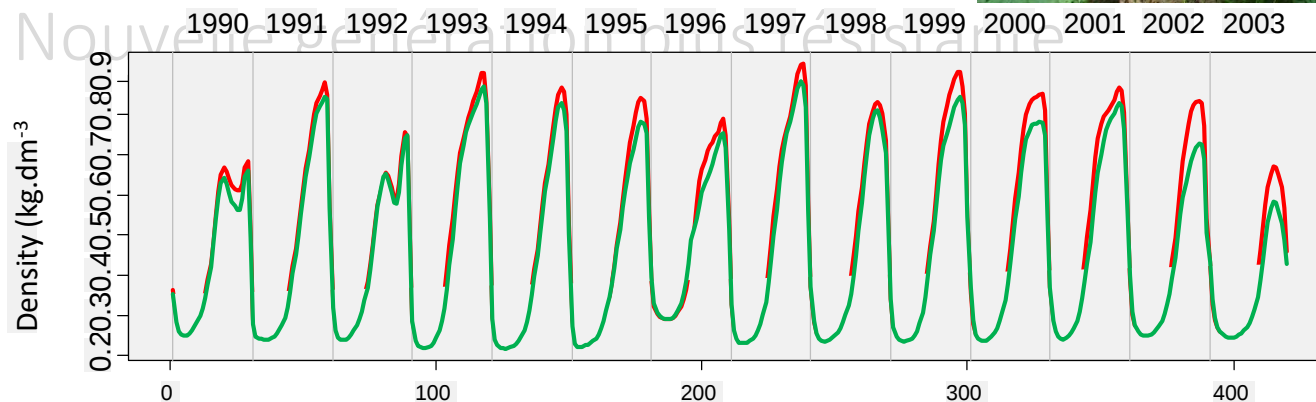
- Choisir espèces et variétés résistantes
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies



Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
 - Caractères du bois : technique

- Repérage des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et de sem
- Nouvelle génération résistante



Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
 - Caractères du bois : technique
- Repérage et sélection des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et de s
- Nouvelle génération plus rés



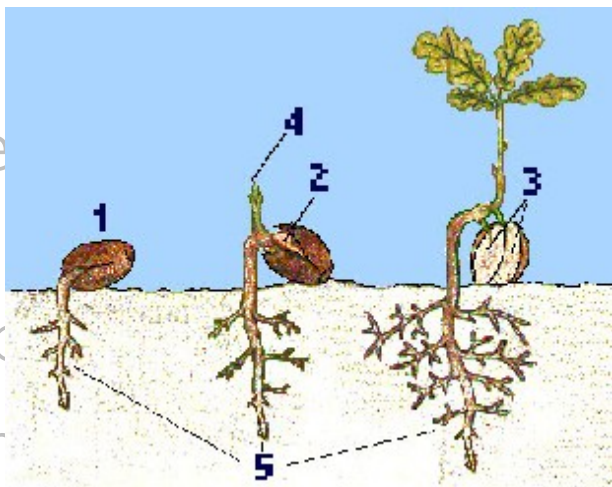
Forêts régénérées naturellement

- Me

-

- Rep

- Éli



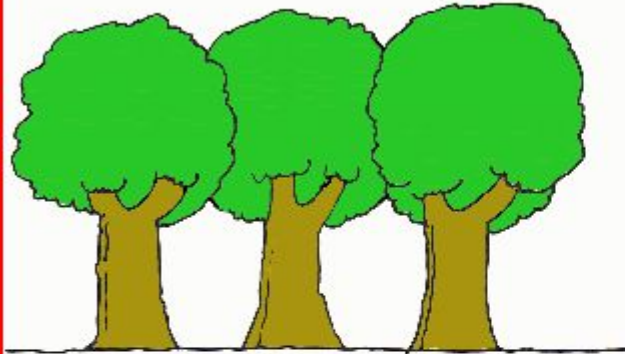
- Croisements naturels

- Production de graines et de semis

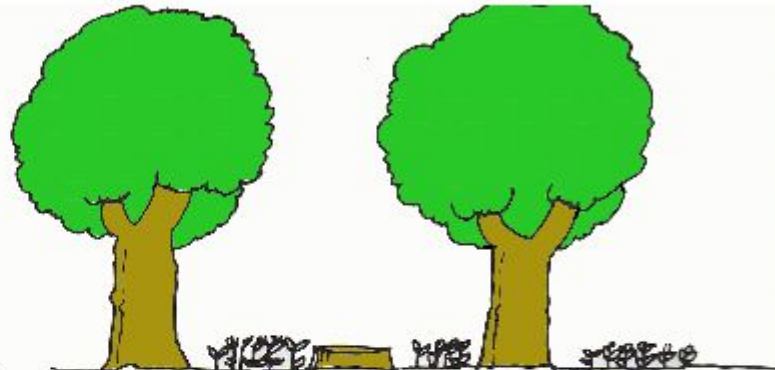
- Nouvelle génération plus résistante



Coupe de régénération



1 : Peuplement à maturité



2 : Coupe d'ensemencement



3 : Extraction sur régénération acquise



4 : Coupe définitive

- Nouvelle génération plus résistante

Conclusions (....)

- Climat : changement rapide
- Plus rapide que l'adaptation naturelle des forêts
- Adaptation assistée par l'homme
 - Suffisamment rapide?
 - Pour quelles conditions futures ? Incertitudes...
- Le plus efficace, le plus sûr et le moins coûteux...
...limiter l'intensité du changement climatique



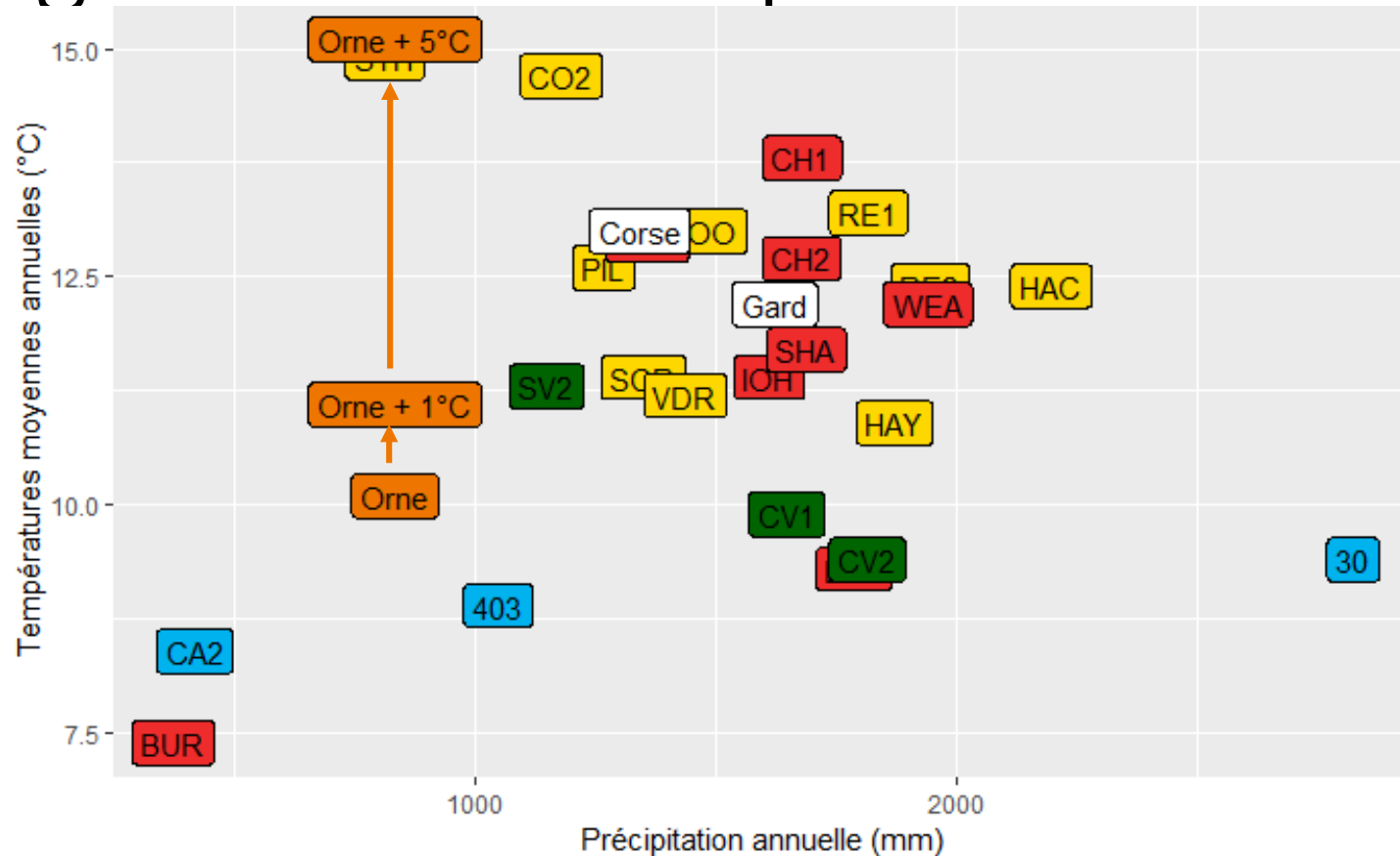
Météo-France 17 septembre 2019

<http://www.meteofrance.fr/actualites/75607524-nouvelles-simulations-du-climat-5-points-cles>

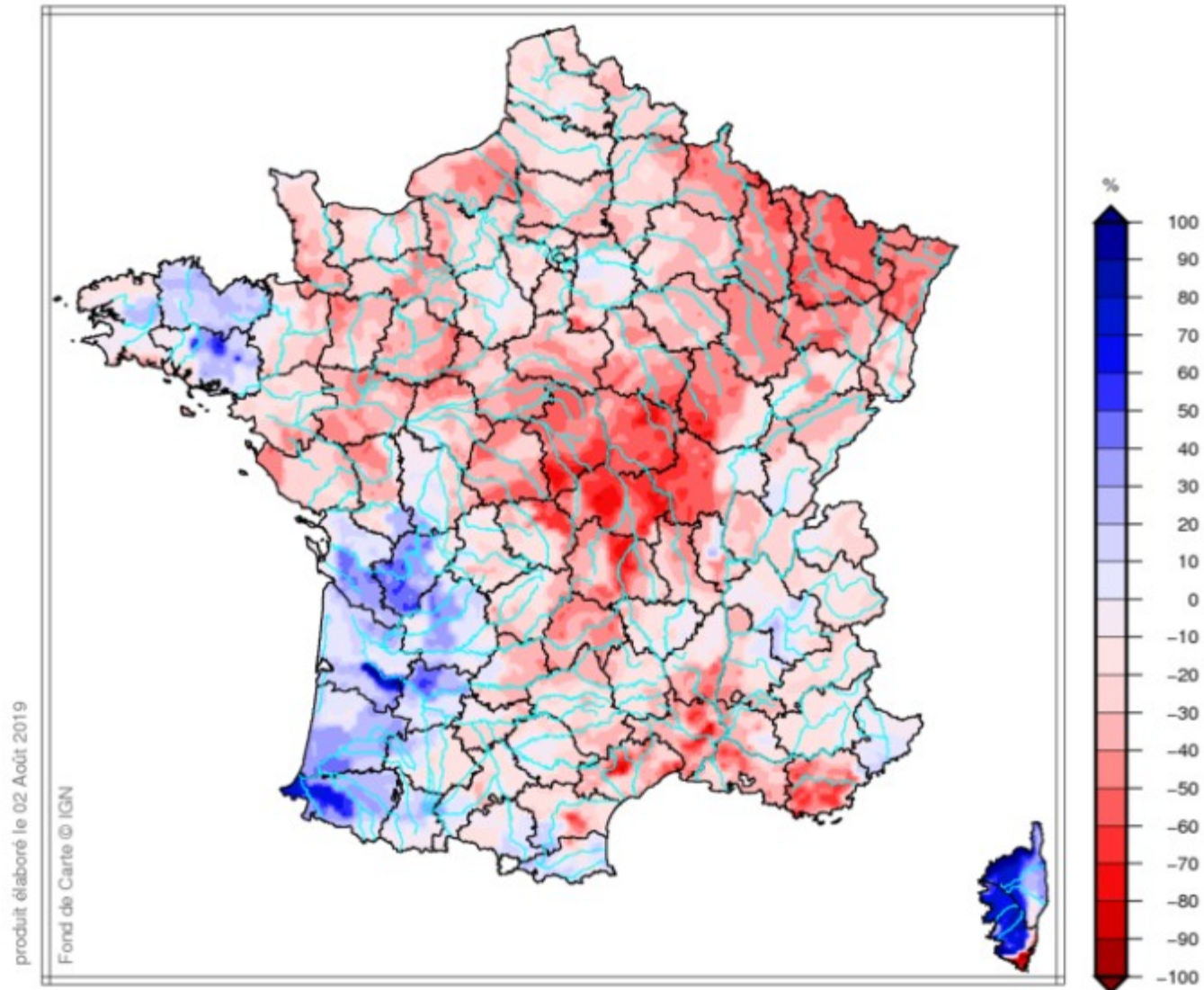
- 1- La planète pourrait connaître un réchauffement de 6 à 7 °C à la fin du siècle par rapport à l'ère préindustrielle
- 2- La température de la Terre à la fin du siècle dépend fortement des politiques climatiques mises en oeuvre aujourd'hui.
- 3- Atteindre l'objectif de 2 °C de réchauffement climatique fixé par l'accord de Paris nécessite un effort d'atténuation très important.
- 4- La banquise pourrait disparaître entièrement.
- 5- L'été 2003 pourrait être normal en 2050.

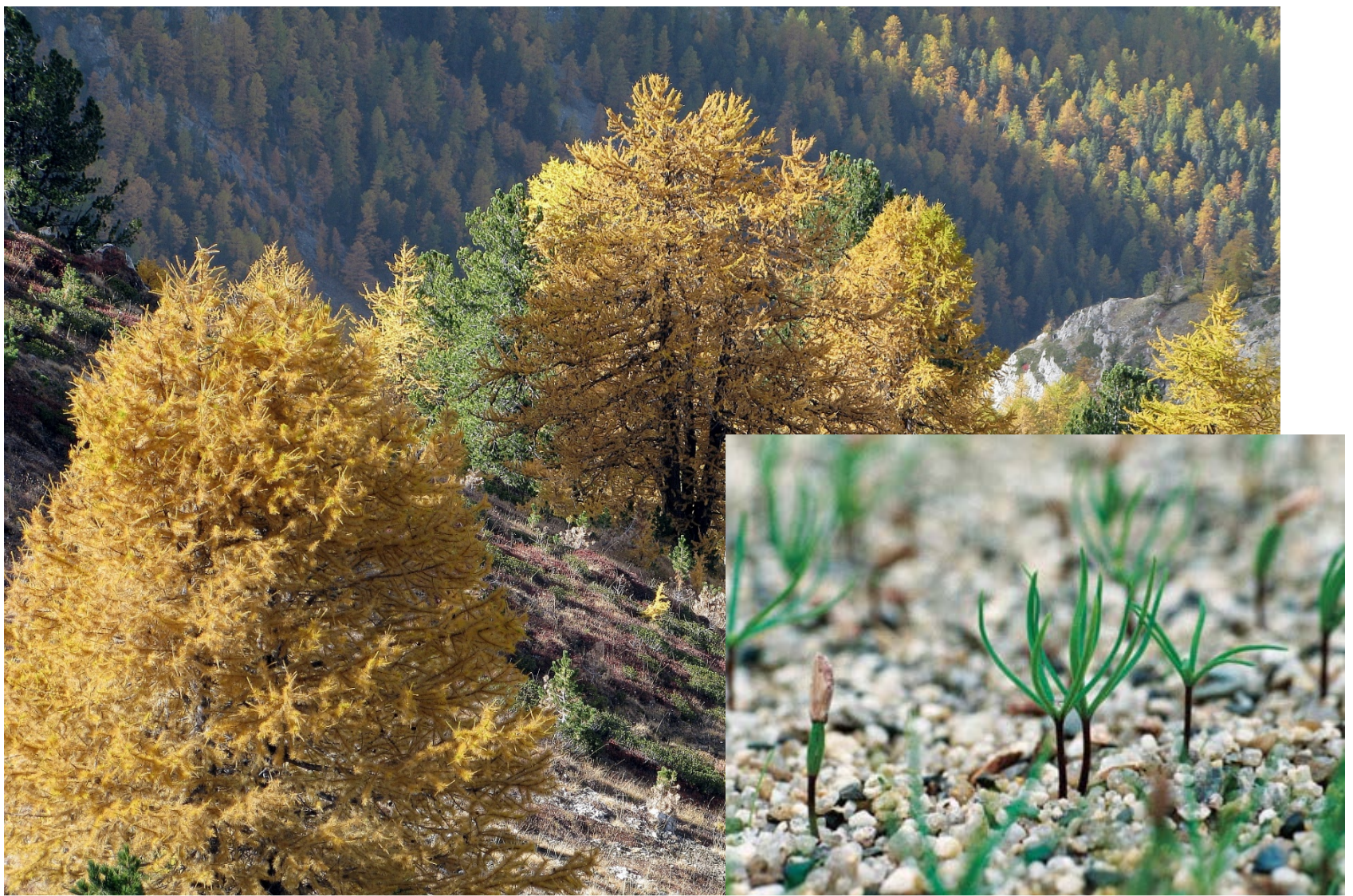
Transplantation de provenances et changement climatique

Mortalité
élevée en Corse



Écart à la normale de l'indice d'humidité des sols au 1er août 2019





A. Martinez-Meier, G. Dalla-Salda, F. Millier, L. Pâques, A.S. Sergent, M. Nardin, M. Ruiz-Diaz, J.P. Charpentier, S. Rosner, E. Merlo, M.E. Fernandez, J. Gyenge, T. Chauvin, L. Sanchez, V. Guérin, S. Marin, J.P. Rossi, V. Segura, C. Bastien, J.C. Bastien, J.C. Vilardi, M.E. Gauchat, N. Macchioni, J.C. Rodrigues, G. Chaix, M. Ivkovich, P. Label, C. Pichot, I. Scotti, H. Cochard, L. Bouffier, C. Plomion, C. Damesin, A. Latreille, S. Wagner, S. Aitken, C. Rathgeber et d'autres

Actualité forêts et changement climatique

- Actualité en santé des forêts

<https://agriculture.gouv.fr/actualite-en-sante-des-forets>

- Changement climatique : les forêts françaises à l'épreuve de la sécheresse

<https://www.onf.fr/onf/+ /48a::changement-climatique-les-forets-francaises-lepreuve-de-la-secheresse.html>