



HAL
open science

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.... Master. France. 2016. hal-03547663

HAL Id: hal-03547663

<https://hal.inrae.fr/hal-03547663>

Submitted on 28 Jan 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

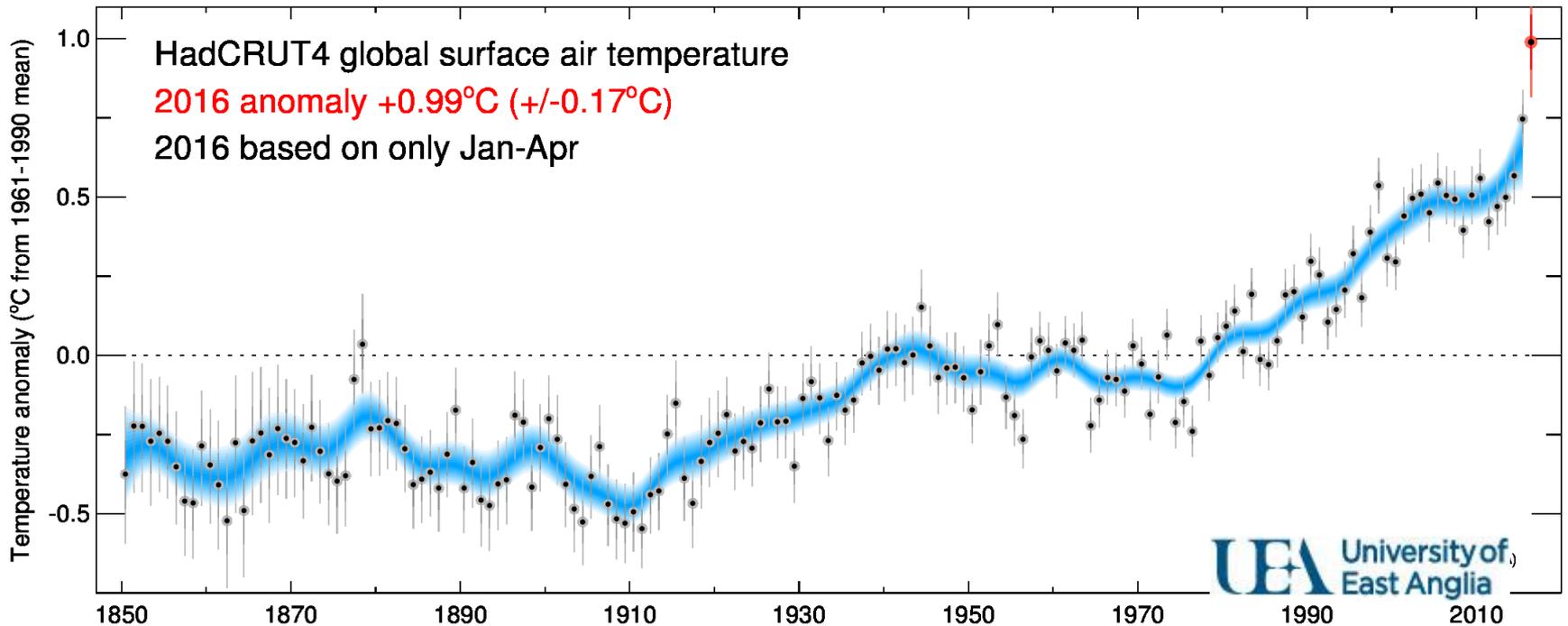
Contexte, stratégie de recherche, exemples...

Philippe Rozenberg,
INRA Val de Loire, Orléans



Changement climatique

- Réchauffement
- Autres variables



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

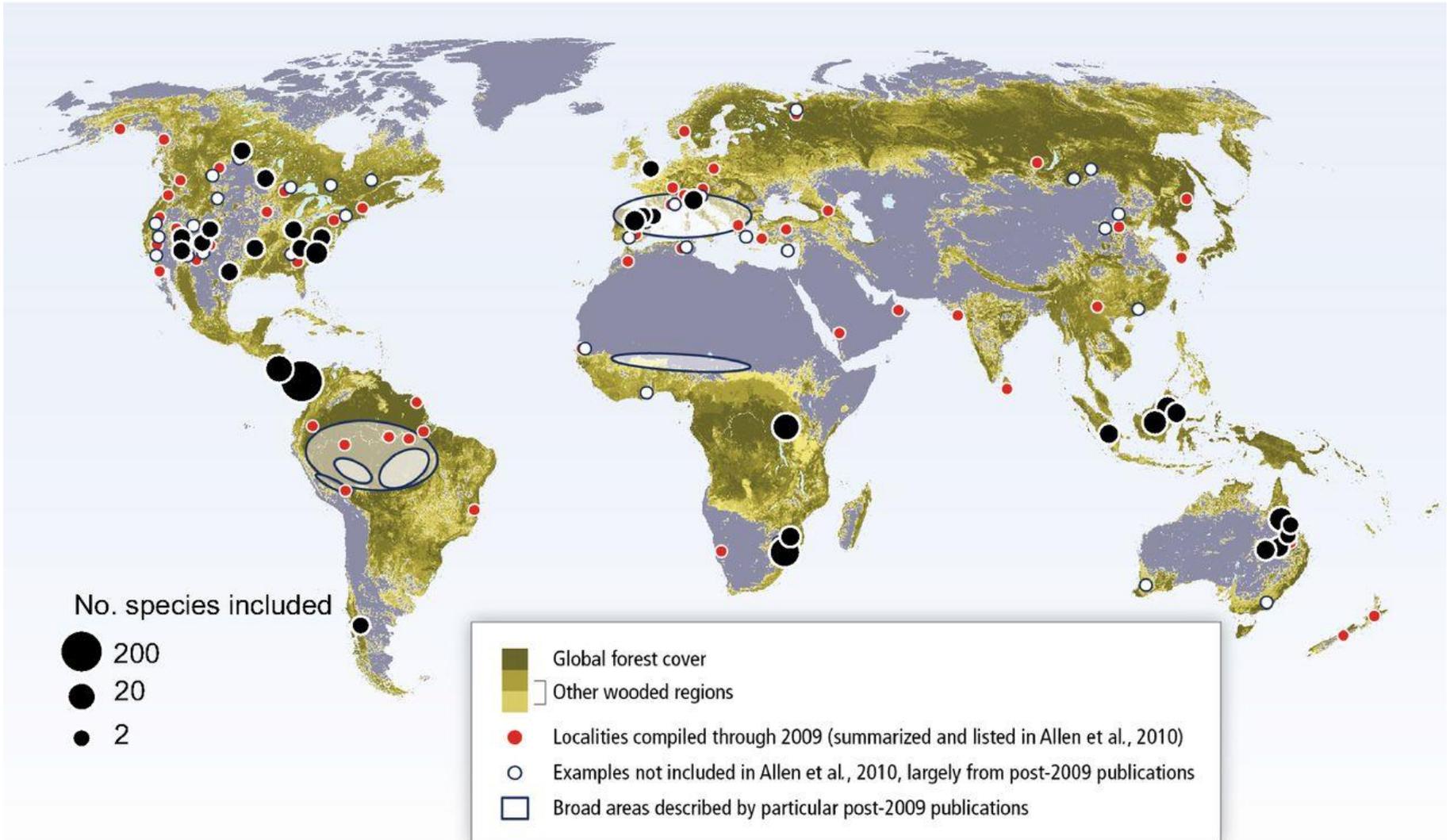
Les manifestations les plus évidentes

- dépérissements



Pinus ponderosa, Patagonia, Argentine, 2011

Dépérissements forestiers



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/qcb.13148.

Dépérissements récents et importants



Dépérissements récents et importants

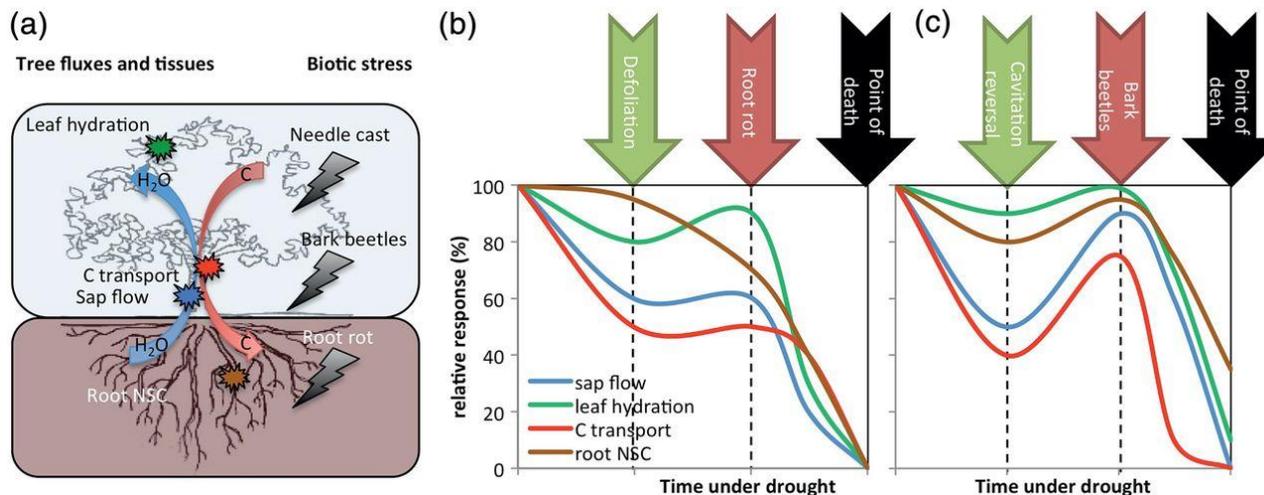
- Russie centrale 2010
- Nord-ouest de l'Amérique du Nord, 2000, *Dendroctonus ponderosae*, « Mountain pine beetle »



Dépérissements récents et importants

- Russie centrale 2000
- Nord-ouest de l'Amérique du Nord, 2000, *Dendroctonus ponderosae*, « Mountain pine beetle »
- Relation avec le changement climatique

Klein, Tamir. 2015. « Drought-Induced Tree Mortality: From Discrete Observations to Comprehensive Research ». *Tree Physiology* 35 (3): 225-28.
doi:10.1093/treephys/tpv029.



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, Zihai 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, 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, Zihai 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.

Augmentation 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, Zihai 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 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, Zihai 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 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.

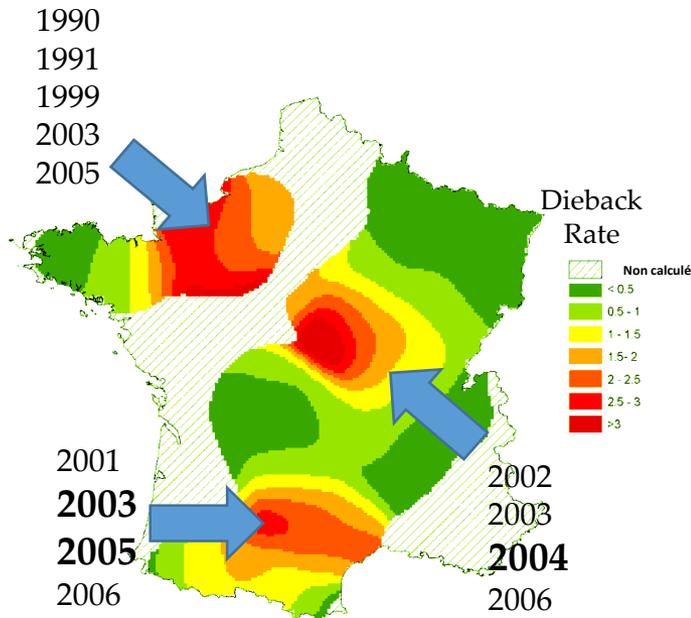
- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

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.

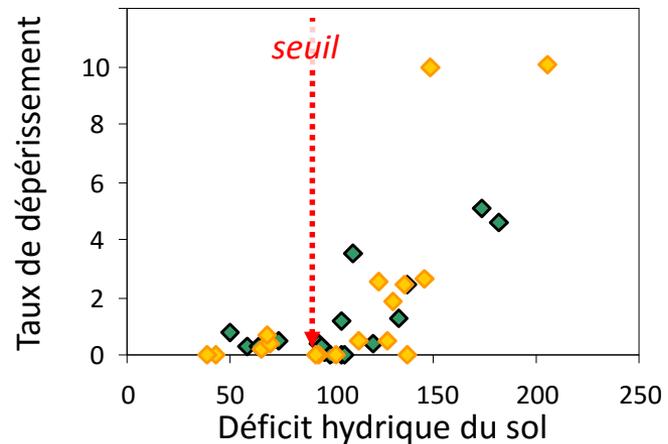
- Globalement : oui également, mais faiblement et plutôt en climats secs

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.

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.

Sécheresse = précipitations ou température ?

- Forêts feuillues nord-américaines : réponse homogène à la sécheresse, plutôt liée aux faibles précipitations au nord, et aux hautes températures au sud

Martin-Benito, Dario, et Neil Pederson. 2015. « Convergence in Drought Stress, but a Divergence of Climatic Drivers across a Latitudinal Gradient in a Temperate Broadleaf Forest ». *Journal of Biogeography* 42 (5): 925-37. doi:10.1111/jbi.12462.



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**



Le cercle vicieux des dépérissements...

- Activités humaines -> Carbone et autres *GES* -> Effet de serre -> Réchauffement + sécheresses -> Dépérissements forestiers -> Carbone...
- Parmi les interventions possibles...
 - « Puits de carbone » : bois, plantations



Le reboisement aggrave-t-il le réchauffement global ?

- Des effets antagonistes :
 - stockage du carbone et évapotranspiration **refroidissent**
 - effet albédo **réchauffe**...
- Hémisphère sud, l'augmentation des surfaces plantées **aggrave le réchauffement**

Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Zhaomin Wang. 2015. « Global warming caused by afforestation in the Southern Hemisphere ». *Ecological Indicators* 52 (mai): 371-78. doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.004.

- Norvège

De Wit, Heleen A., et Glen P. Peters. 2014. « Climate Warming by Reduced Carbon Uptake ». *Climate Change* 102 (1): 1-12.

- Bilan ob
- for
- for
- ref

Li, Yan, Maosheng Wang, et Glen P. Peters. 2015. « Local Cooling and Warming by Afforestation in the Southern Hemisphere ». *Global Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1021/acscom.5b00031



Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Glen P. Peters. 2015. « Local Cooling and Warming by Afforestation in the Southern Hemisphere ». *Global Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1021/acscom.5b00031

Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Glen P. Peters. 2015. « Local Cooling and Warming by Afforestation in the Southern Hemisphere ». *Global Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1021/acscom.5b00031

Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Glen P. Peters. 2015. « Local Cooling and Warming by Afforestation in the Southern Hemisphere ». *Global Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1021/acscom.5b00031

Le reboisement aggrave-t-il le réchauffement global ?

- Des effets antagonistes :
 - stockage du carbone et évapotranspiration refroidissent
 - effet albédo réchauffe...
- Hémisphère sud, l'augmentation des surfaces plantées aggrave le réchauffement
- Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Zhaomin Wang. 2015. « Global warming caused by afforestation in the Southern Hemisphere ». *Ecological Indicators* 52 (mai): 371-78. doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.004.
 - Norvège, simulations : effet **réchauffement** dominant

De Wit, Heleen A., Anders Bryn, Annika Hofgaard, Jonas Karstensen, Maria M. Kvalevåg, et Glen P. Peters. 2014. « Climate Warming Feedback from Mountain Birch Forest Expansion: Reduced Albedo Dominates Carbon Uptake ». *Global Change Biology* 20 (7): 2344-55. doi:10.1111/gcb.12483.

- Bilan observé par satellite :
 - forêts tempérées et surtout forêts boréales en hiver : réchauffement
 - forêts tropicales, forêts tempérées en été, forêts boréales faiblement en été : refroidissement

Li, Yan, Maosheng Zhao, Safa Motesharrei, Qiaozhen Mu, Eugenia Kalnay, et Shuangcheng Li. 2015. « Local Cooling and Warming Effects of Forests Based on Satellite Observations ». *Nature Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1038/ncomms7603.

Le reboisement aggrave-t-il le réchauffement global ?

- Des effets antagonistes :
 - stockage du carbone et évapotranspiration refroidissent
 - effet albédo réchauffe...
- Hémisphère sud, l'augmentation des surfaces plantées aggrave le réchauffement
- Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Zhaomin Wang. 2015. « Global warming caused by afforestation in the Southern Hemisphere ». *Ecological Indicators* 52 (mai): 371-78. doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.004.
 - Norvège, des simulations prédisent un effet réchauffement dominant

De Wit, Heleen A., Anders Bryn, Annika Hofgaard, Jonas Karstensen, Maria M. Kvalevåg, et Glen P. Peters. 2014. « Climate Warming Feedback from Mountain Birch Forest Expansion: Reduced Albedo Dominates Carbon Uptake ». *Global Change Biology* 20 (7): 2344-55. doi:10.1111/gcb.12483.

- Bilan observé par satellite :
 - forêts tempérées et surtout forêts boréales en hiver : **réchauffement**
 - forêts tropicales, forêts tempérées en été, forêts boréales faiblement en été : **refroidissement**

Li, Yan, Maosheng Zhao, Safa Motesharrei, Qiaozhen Mu, Eugenia Kalnay, et Shuangcheng Li. 2015. « Local Cooling and Warming Effects of Forests Based on Satellite Observations ». *Nature Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1038/ncomms7603.

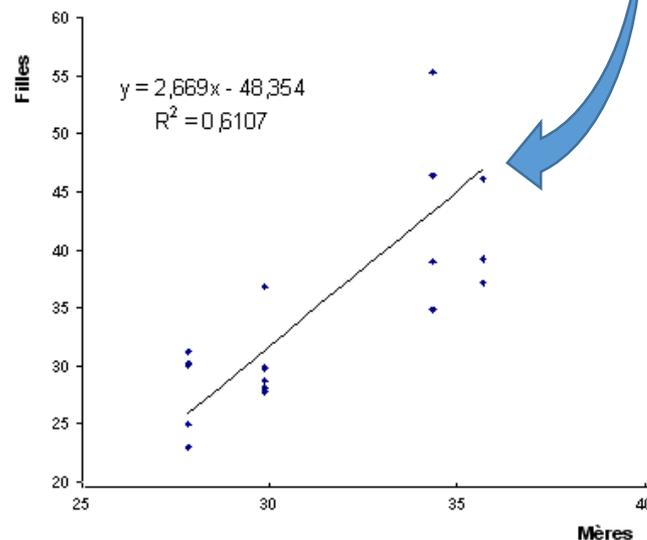
Que faire? Tendance et stratégie

- Utiliser du bois durablement
- Conserver, développer les forêts (?)
 - Pas n'importe quelles forêts : plus adaptées aux nouvelles conditions environnementales
 - Régénération naturelle, plantations
 - ...Plus adaptées =
 - Sylviculture et environnement
 - Sélection d'individus/variétés/origines/espèces mieux ajustées aux nouveaux stress
 - Phénotypes favorables du point de vue des nouvelles pressions de sélection
 - Pour des caractères *adaptatifs déterminés génétiquement*

Adaptation *évolutive* (génétique)

- Possible

- Variation phénotypique,
- Déterminisme génétique
 - Variation génétique
 - Héritabilité



Caractères adaptatifs

- Caractères *adaptatifs pertinents* ?
- Caractères *adaptatifs* ?
 - Relation avec la *fitness* (= valeur adaptative = succès reproducteur global)
 - succès reproducteur global = potentiel de reproduction + survie
- ...*pertinents* : sécheresses -> résistance à la sécheresse
 - (...et si ce n'est pas -seulement- la sécheresse ?)

Caractères adaptatifs, résistance à la sécheresse, *évitantes et tolérantes*

- Evitantes :
 - Comportement stomatique *isohydrique*
- Tolérantes :
 - Comportement stomatique *anisohydrique*

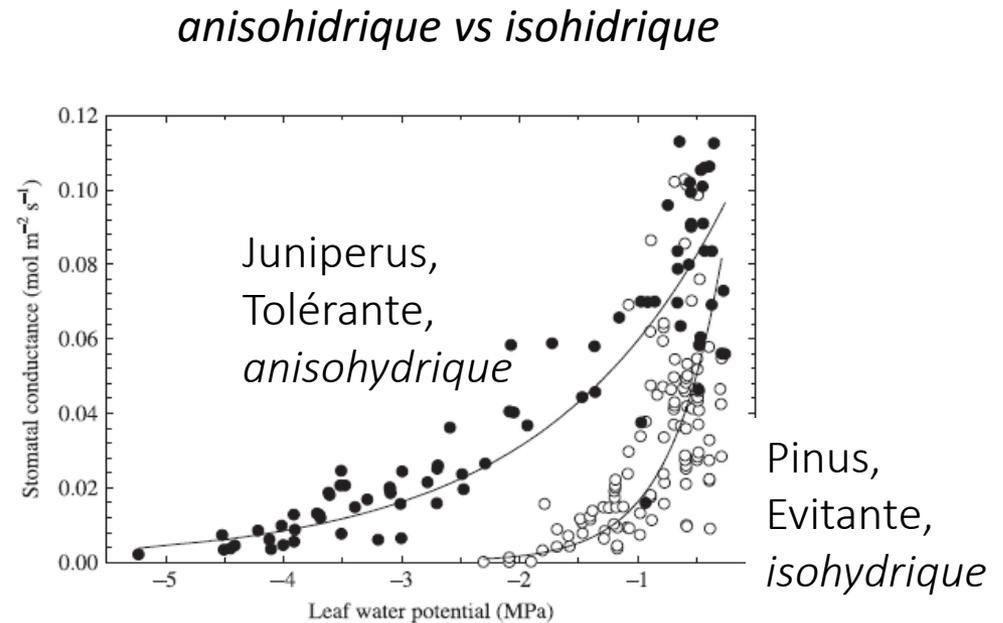


Fig. 8 Stomatal conductance vs leaf water potential for piñon (open circles) and juniper (closed circles) at Mesita del Buey, Los Alamos, New Mexico. Data from Barnes (1986).

McDowell et al, 2008

anisohidrique vs isohidrique

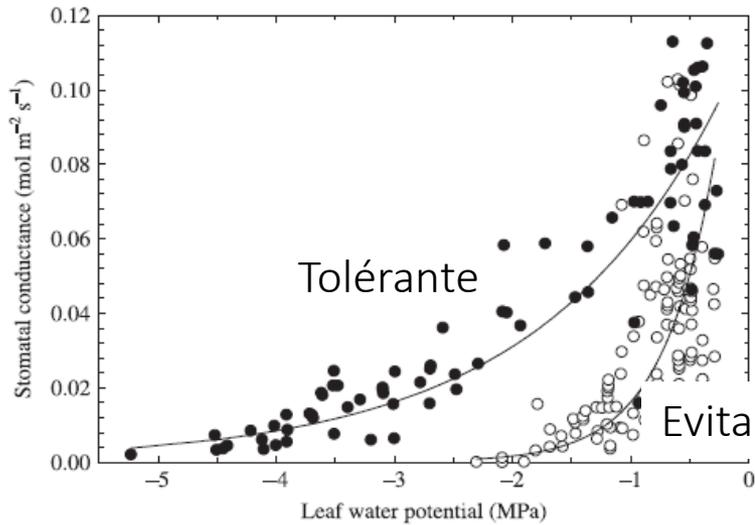
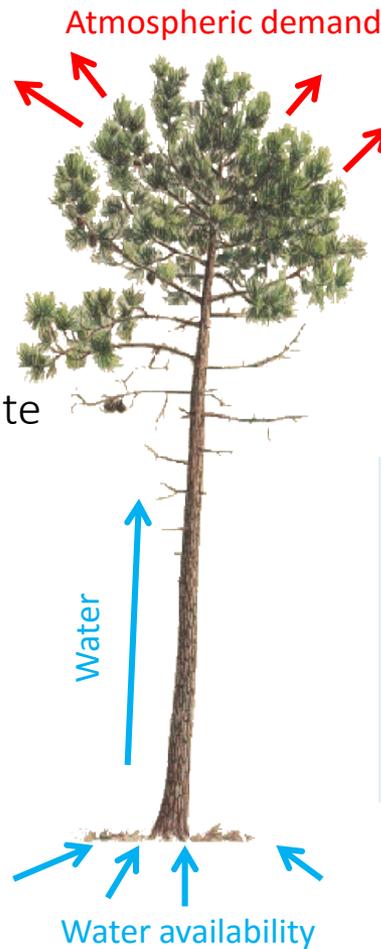
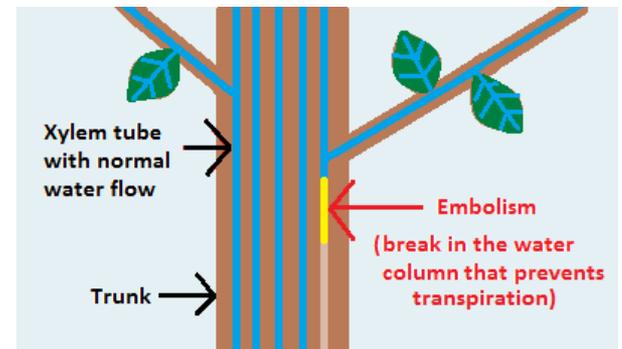


Fig. 8 Stomatal conductance vs leaf water potential for piñon (open circles) and juniper (closed circles) at Mesita del Buey, Los Alamos, New Mexico. Data from Barnes (1986).



Embolie



anisohidrique vs isohidrique

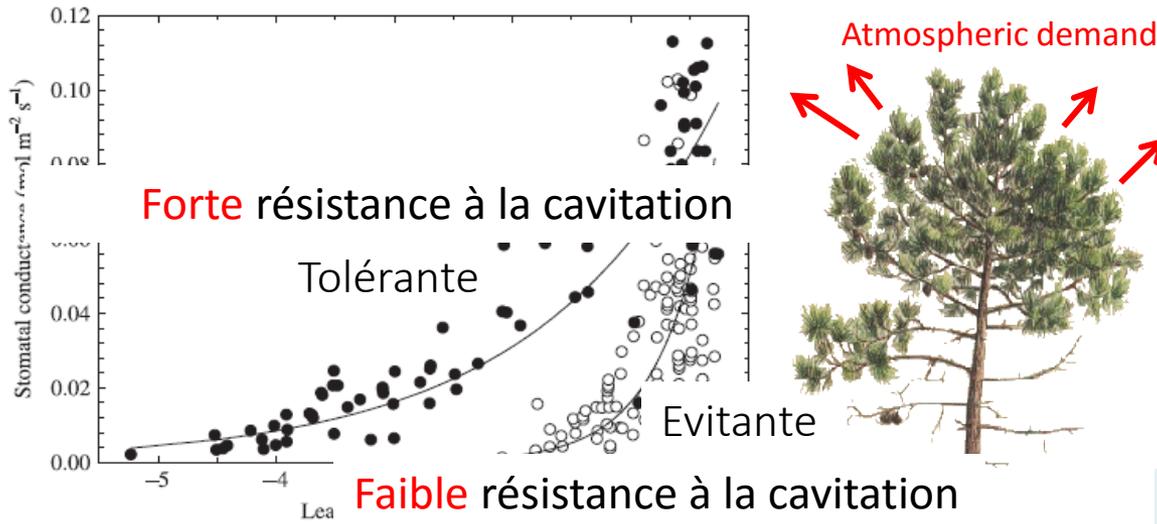
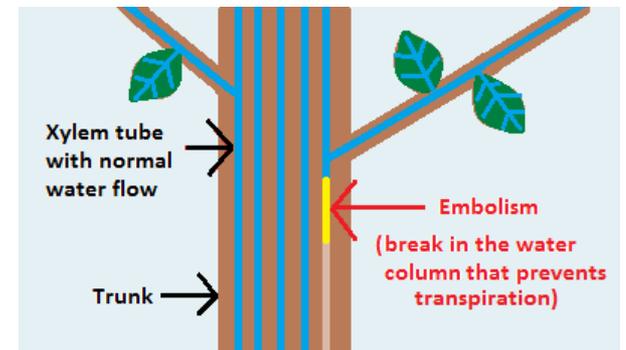
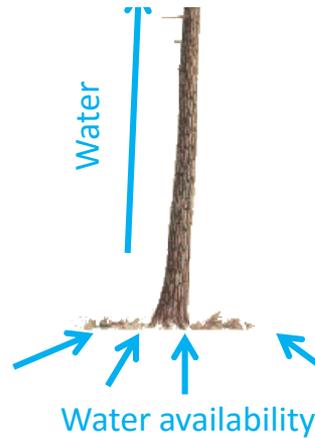


Fig. 8 Stomatal conductance vs leaf water potential for piñon (open circles) and juniper (closed circles) at Mesita del Buey, Los Alamos, New Mexico. Data from Barnes (1986).



Embolie

Évitantes et tolérantes face à la sécheresse

- Risques :
 - Evitantes : inanition (sécheresse de longue durée)
 - Tolérantes : déficience hydraulique (sécheresse intense)
- Sécheresses normales
 - les deux stratégies co-existent et sont efficaces.
- Sécheresses extraordinaires récentes :
 - Espèces considérées comme *tolérantes* plus affectées (cas du douglas en France)

Déficiência hydraulique ou inanition ?

- *Picea abies* “Thirst Beats Hunger”:

Hartmann, Henrik, Waldemar Ziegler, Olaf Kolle, et Susan Trumbore. « Thirst Beats Hunger – Declining Hydration During Drought Prevents Carbon Starvation in Norway Spruce Saplings ». *New Phytologist* (2013): n/a–n/a. doi:10.1111/nph.12331.

- *Pinus edulis*, les deux

Sevanto, Sanna, Nate G. McDowell, L. Turin Dickman, Robert Pangle, et William T. Pockman. 2014. « How Do Trees Die? A Test of the Hydraulic Failure and Carbon Starvation Hypotheses ». *Plant Cell Environ* 37 (1): 153-61. doi:10.1111/pce.12141.

- Autres...

Anderegg, William R. L., Joseph A. Berry, Duncan D. Smith, John S. Sperry, Leander D. L. Anderegg, et Christopher B. Field. 2012. « The roles of hydraulic and carbon stress in a widespread climate-induced forest die-off ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (1): 233-37.

Barigah, Têtè Sévérien, Olivia Charrier, Marie Douris, Marc Bonhomme, Stéphane Herbette, Thierry Améglio, Régis Fichot, Frank Brignolas, et Hervé Cochard. 2013. « Water Stress-Induced Xylem Hydraulic Failure Is a Causal Factor of Tree Mortality in Beech and Poplar ». *Ann Bot* 112 (7): 1431-37. doi:10.1093/aob/mct204. doi:10.1073/pnas.1107891109.

Note : résistance... et résilience

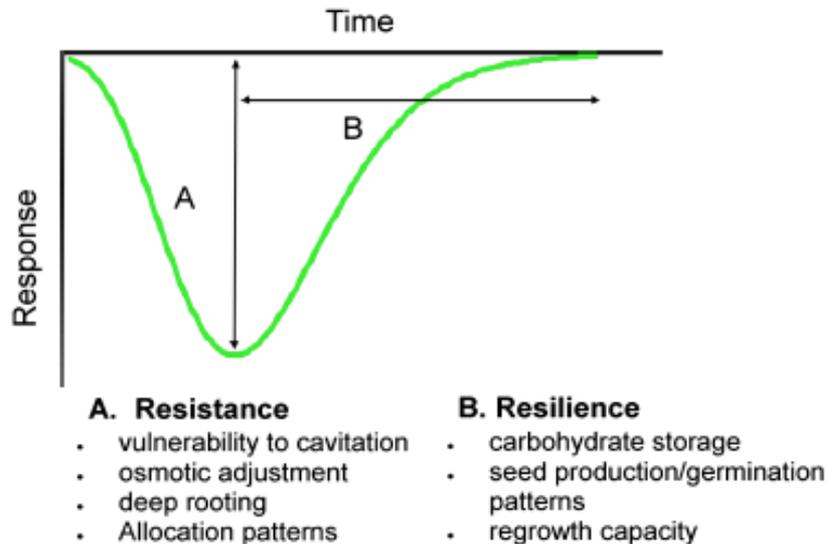


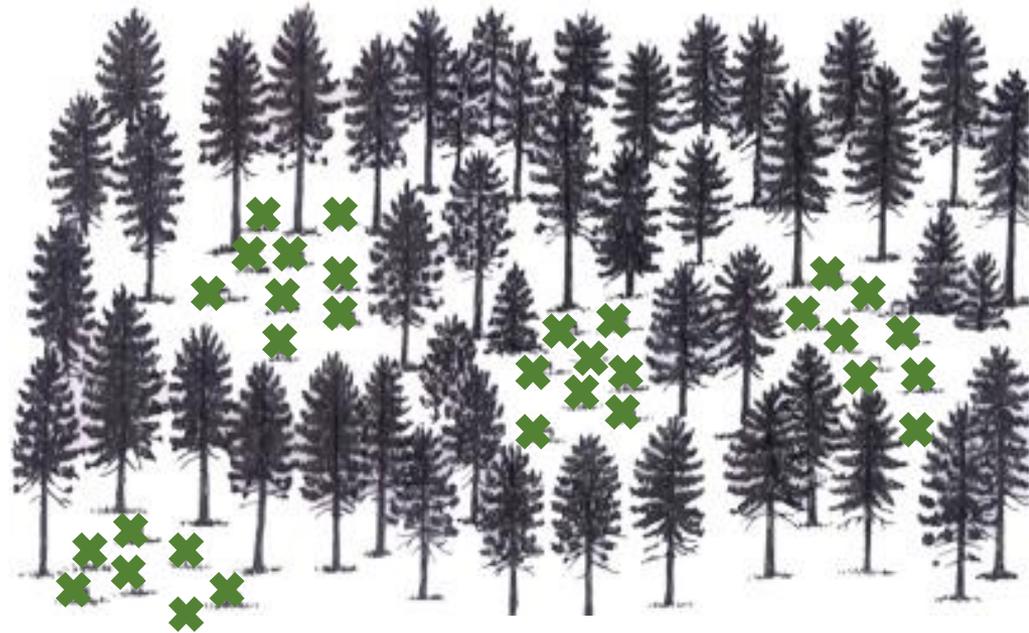
Fig. 1 A simplified conceptual diagram of plant responses to drought. The response curve (green line) represents changes in plant function in response to a single drought event. The magnitude of the response is determined by (A) resistance traits, whereas the time for plant function to return to pre-drought conditions is determined by (B) resilience traits. Some examples of such resistance or resilience traits are presented.

O'Grady et al, 2013

- Réparation d'embolie
- Formation de nouveau xylème
- Formation de nouvelles feuilles, de nouvelles racines fines

Dépérissements et évolution

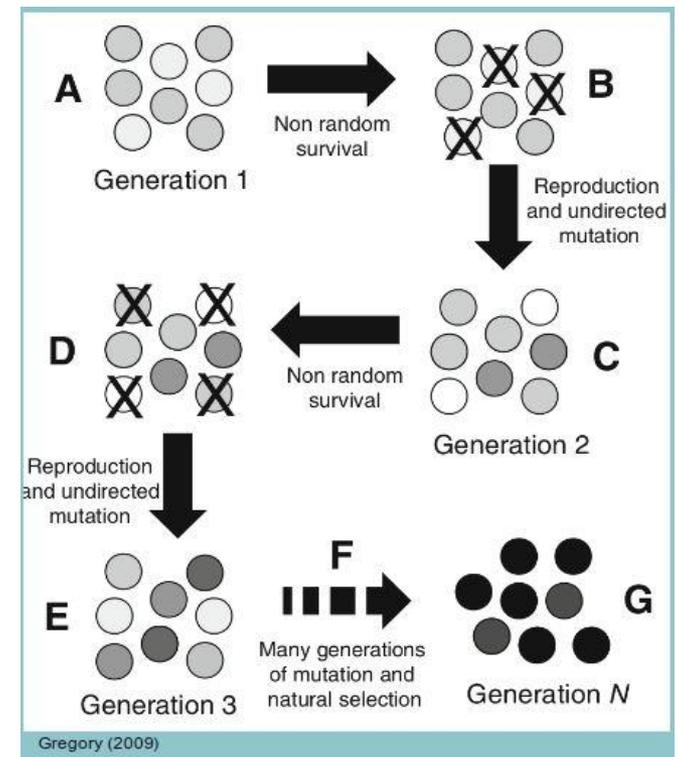
- Échecs de systèmes de production... *et mécanisme évolutif de sélection naturelle*
- Nombre de survivants
- Survivants plus résistants



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,
 - 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



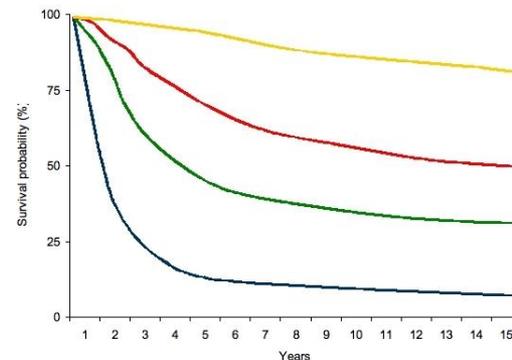
- Existe-t-il un potentiel d'adaptation génétique à la sécheresse ?

Caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse

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



- Survie : comparer morts et survivants



Comparer arbres morts et survivants

- Quels caractères ?

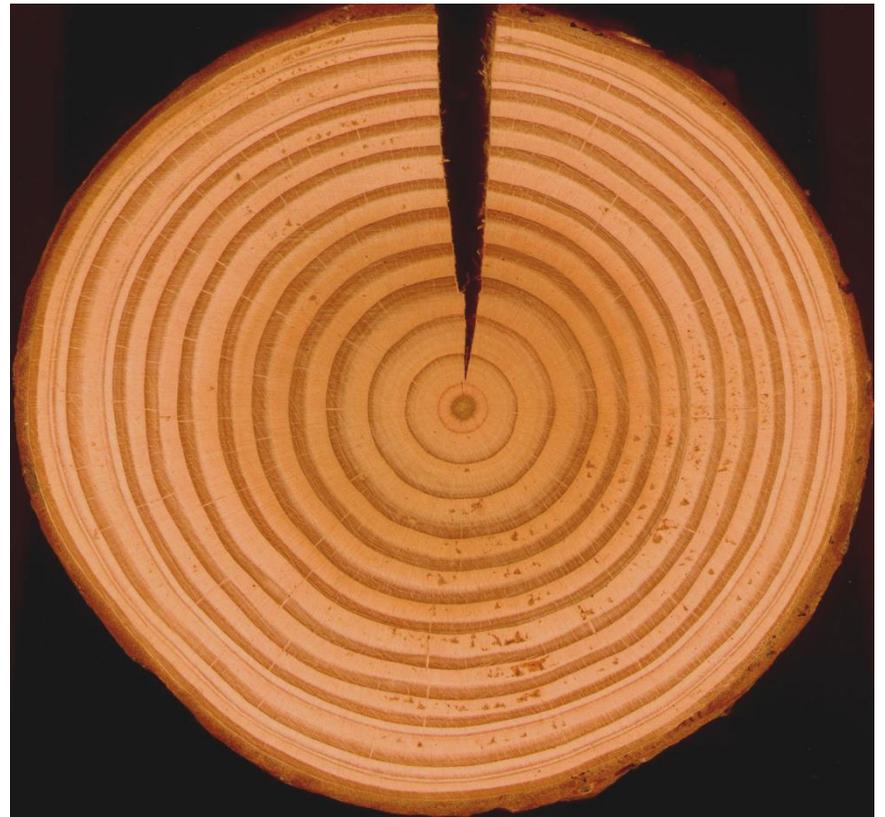
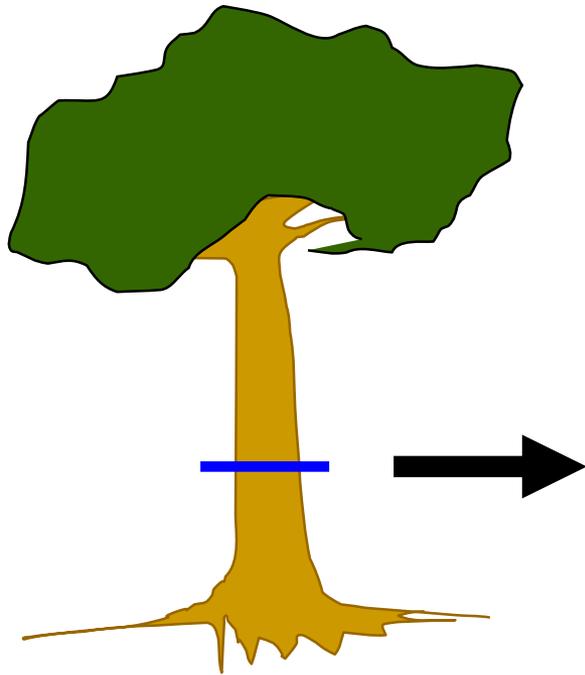


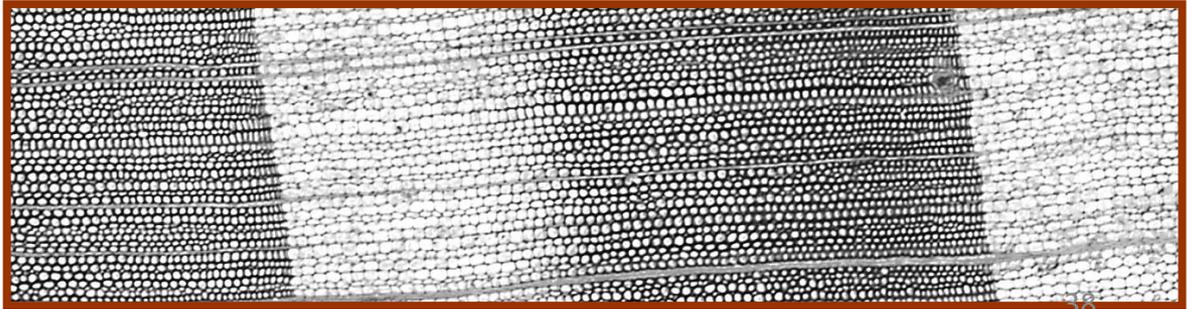
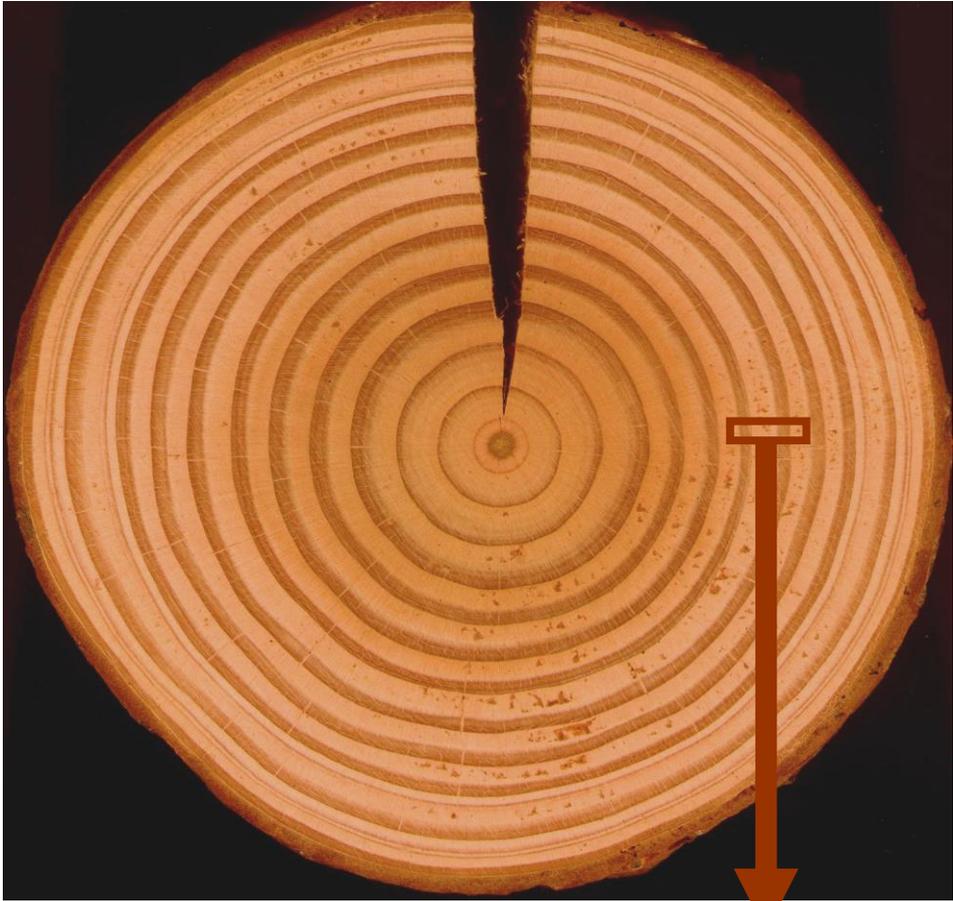
Problème méthodologique :

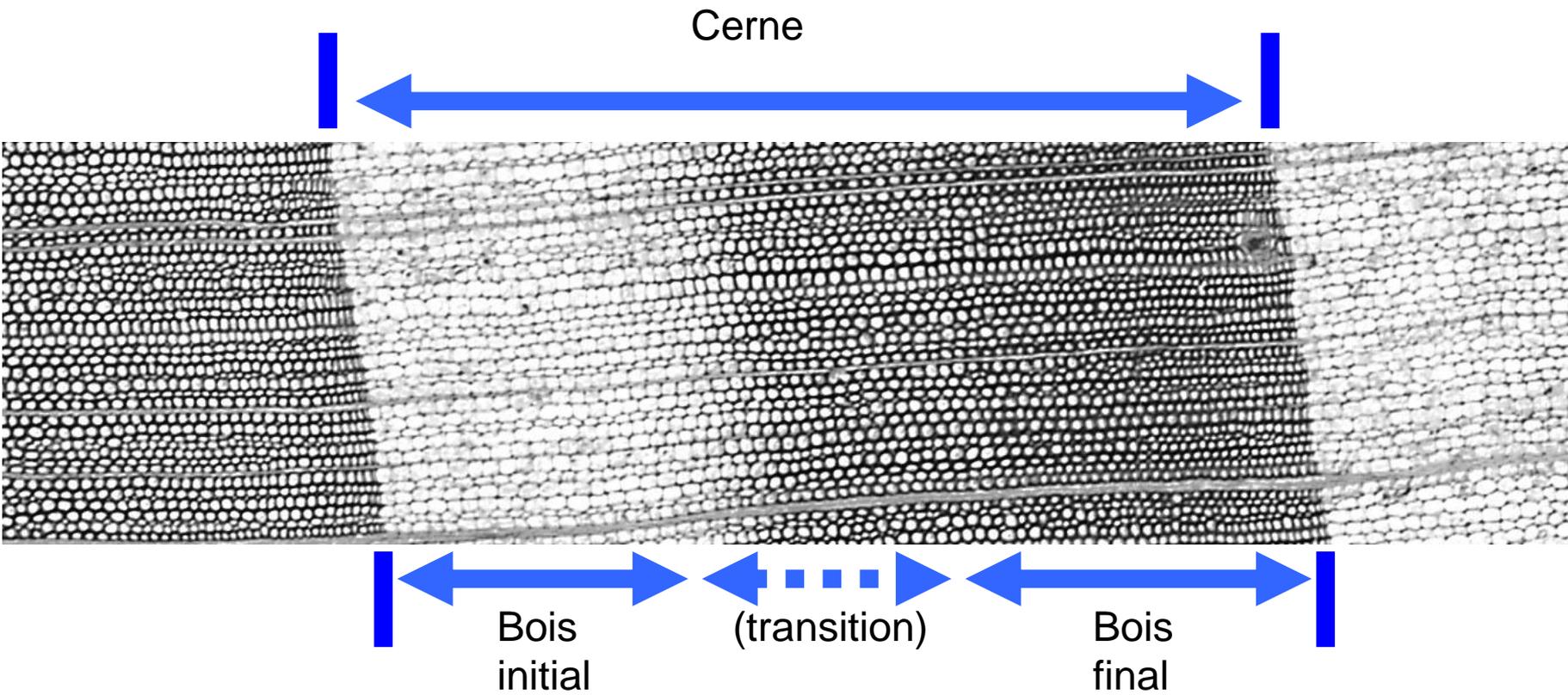
- Sur arbres morts et vivants
- mesurables à une échelle compatible avec l'estimation des paramètres génétiques

Comparer arbres morts et survivants

- Le bois



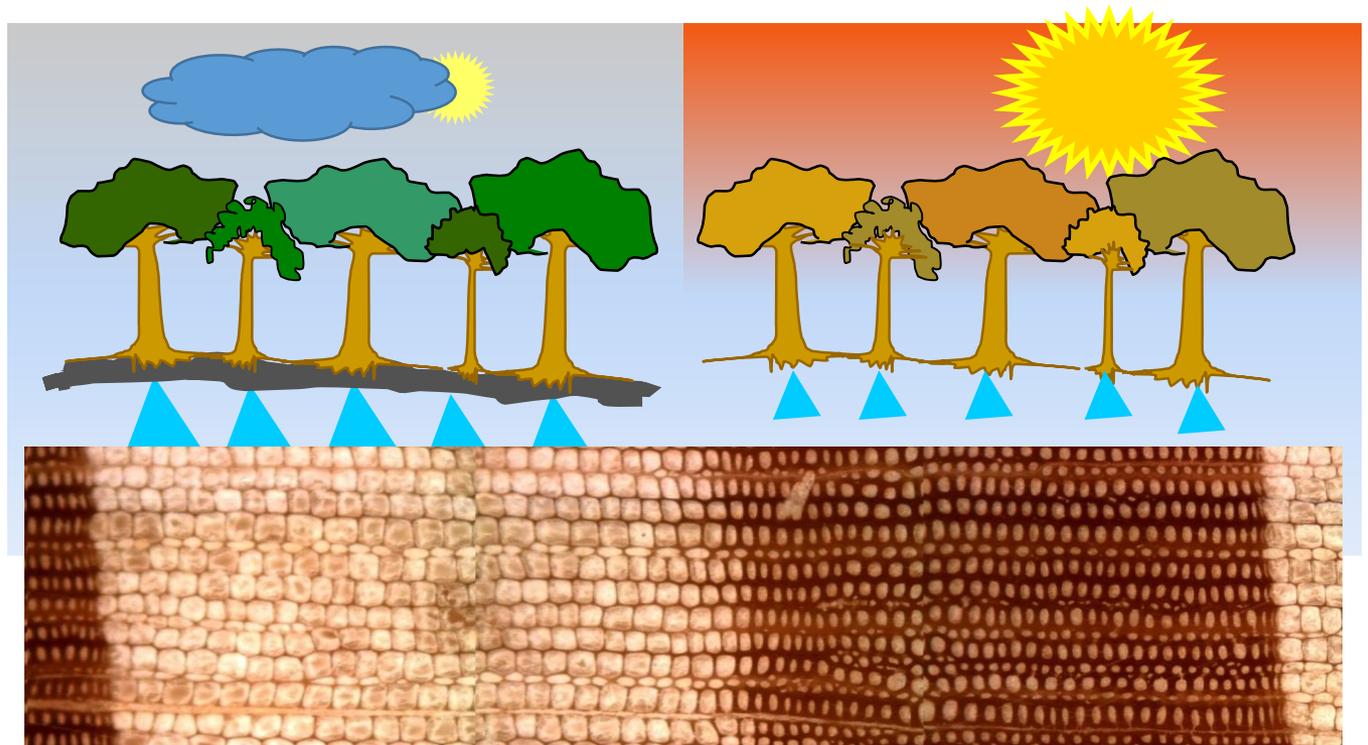




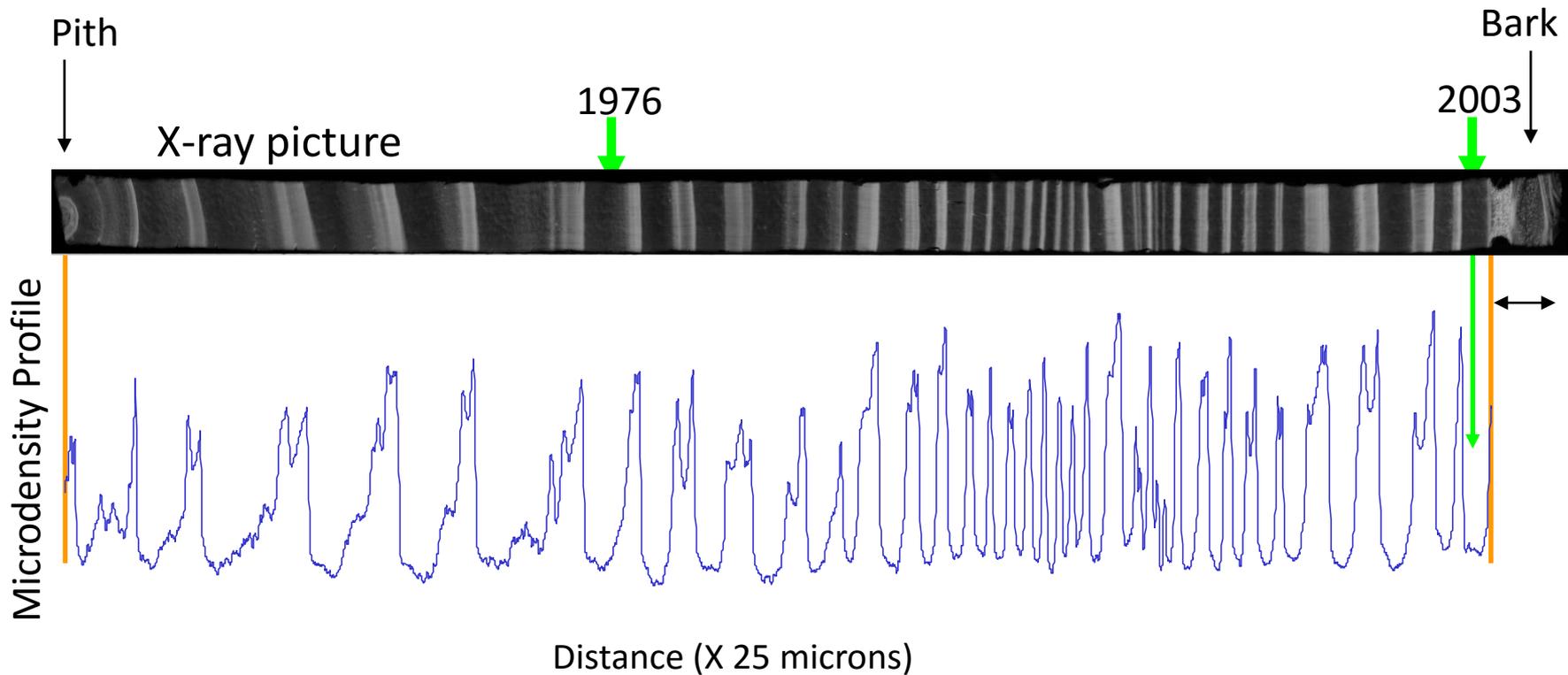
Pseudotsuga menziesii

Les cernes

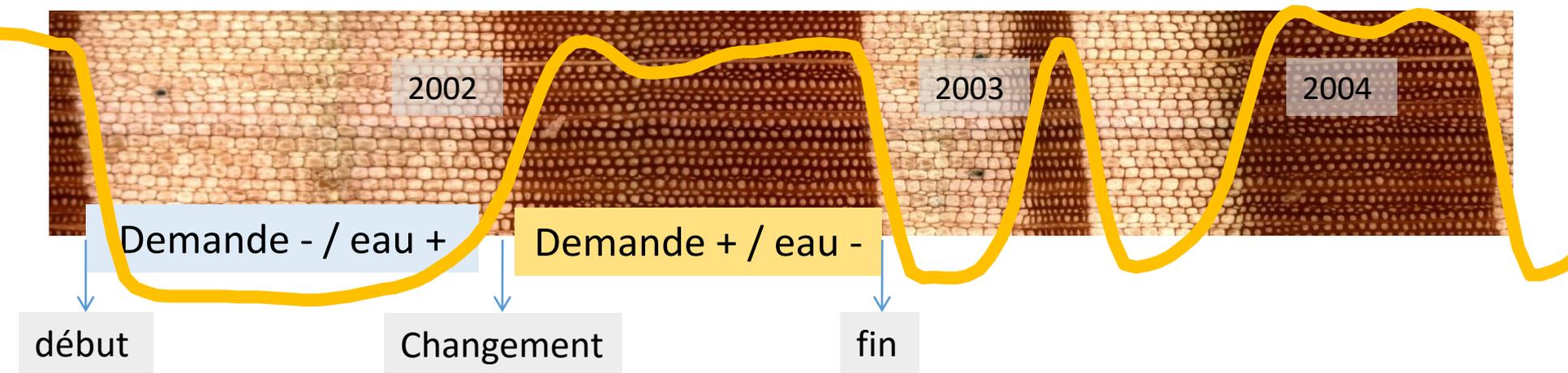
- Un cerne = un an = une saison de végétation
- Fonctions
 - Support
 - Réserves
 - Conduction
- Accès *rétrospectif*



Microdensité indirecte aux rayons X



Microdensité

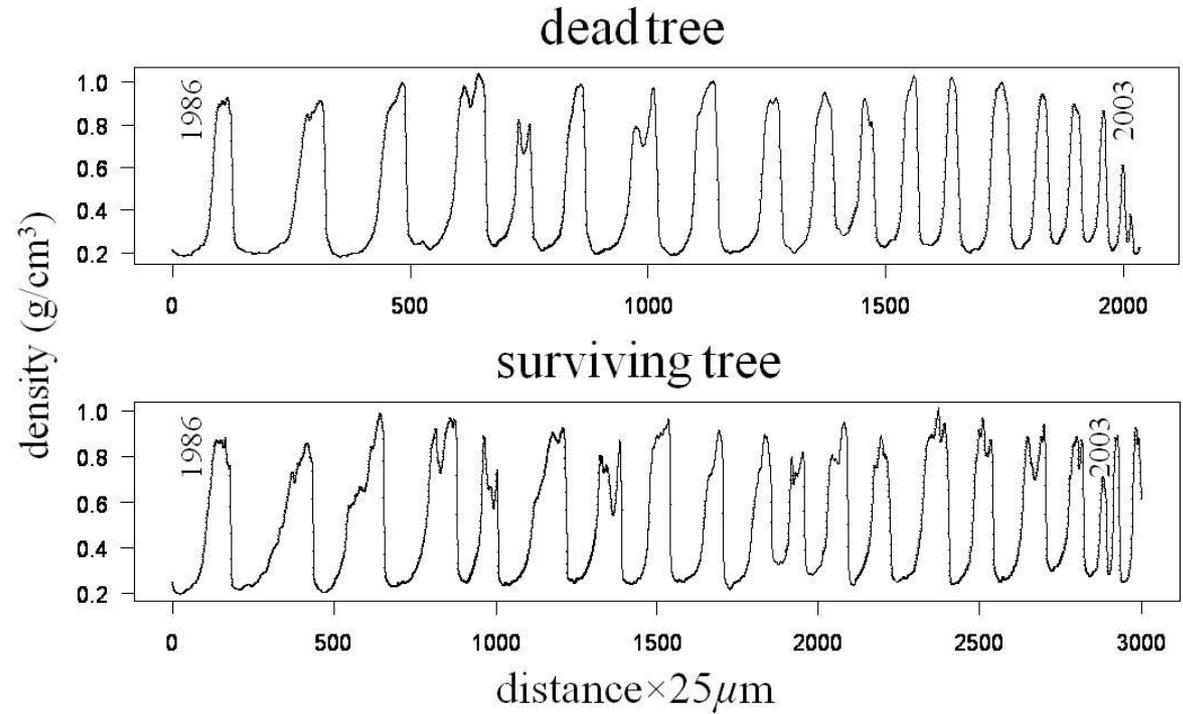


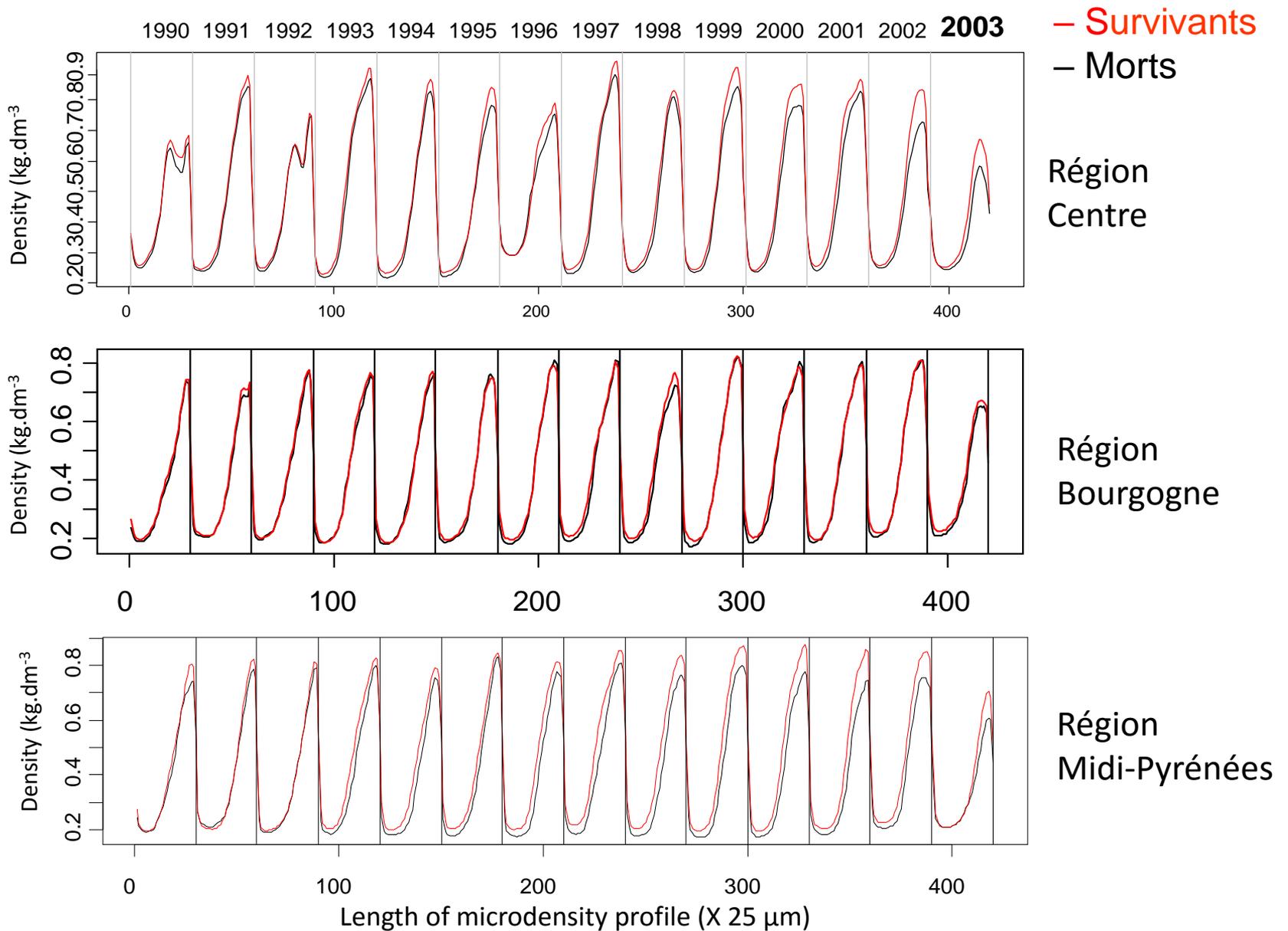
Carottes



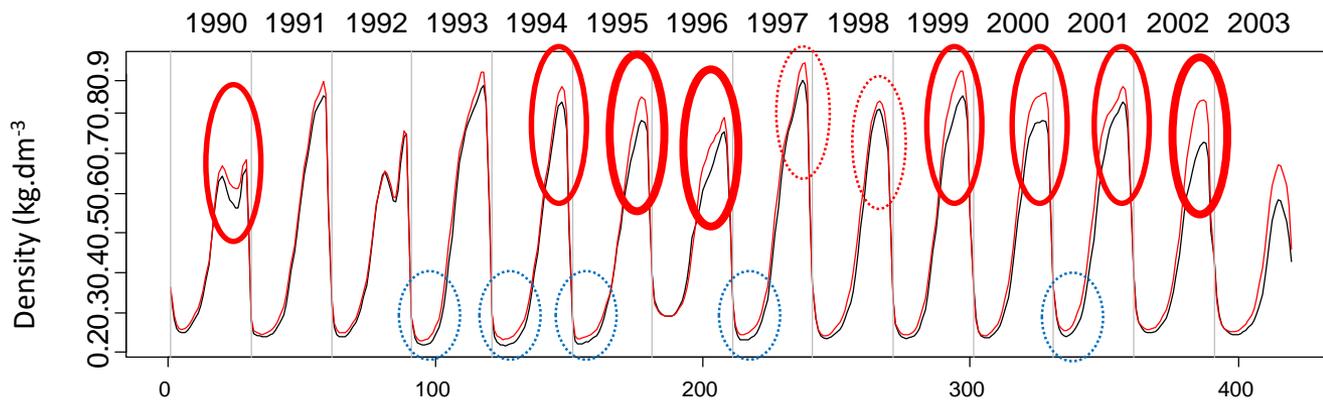
Profils d'arbres morts et survivants

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).



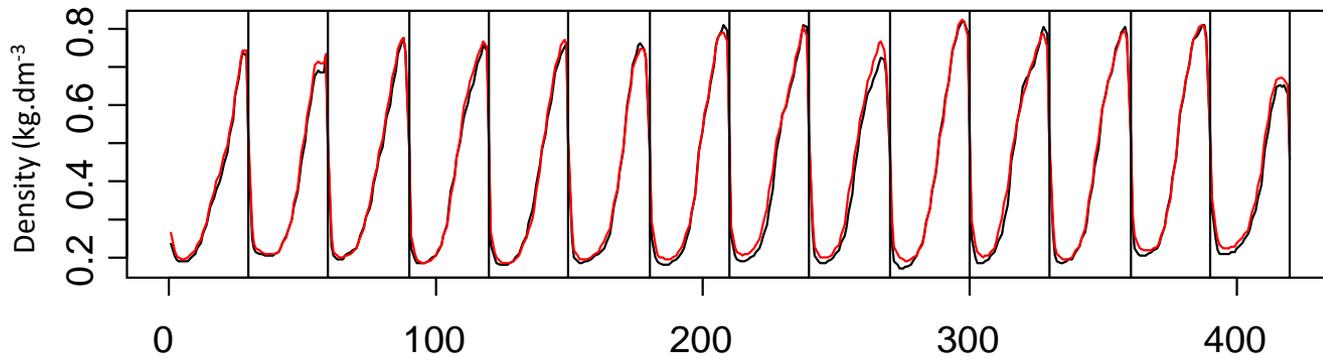


Ruiz Diaz Britez, Manuela, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, et Philippe Rozenberg. « Wood density proxies of adaptive traits linked with resistance to drought in douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) ». *Trees*, s. d., 1-16.

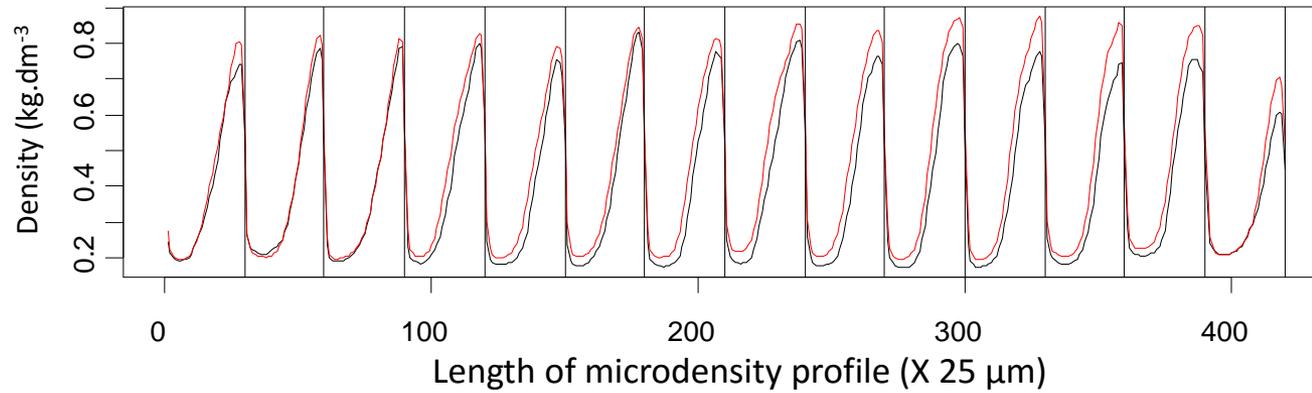


– Survivants
– Morts

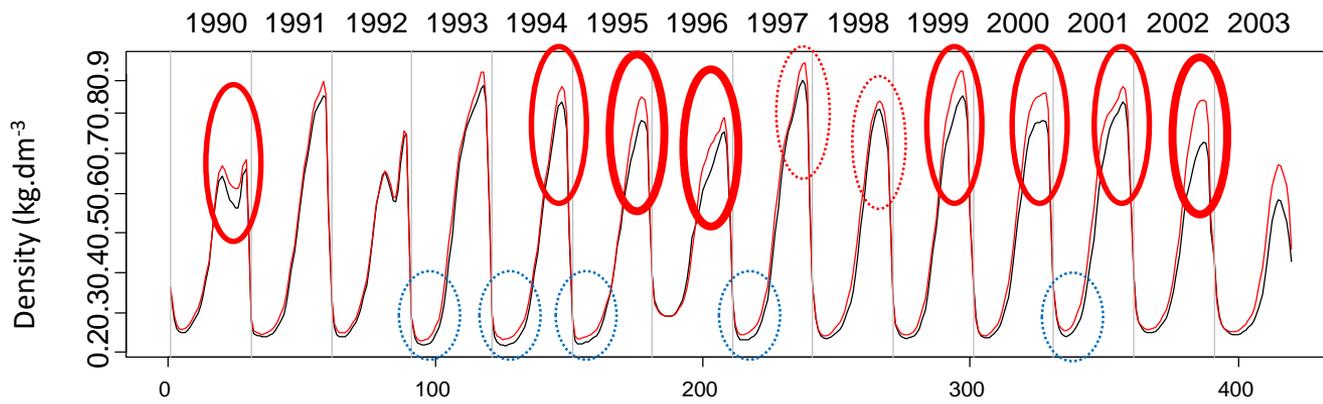
Région
Centre



Région
Bourgogne

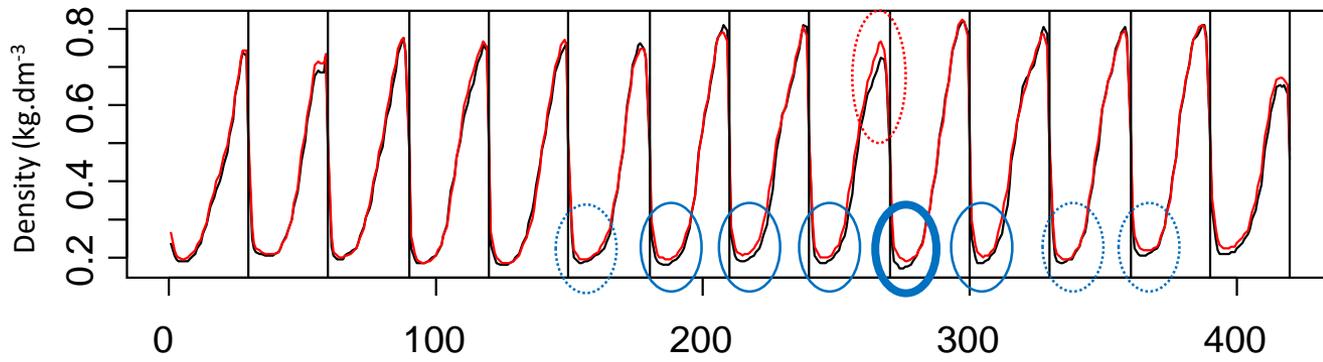


Région
Midi-Pyrénées

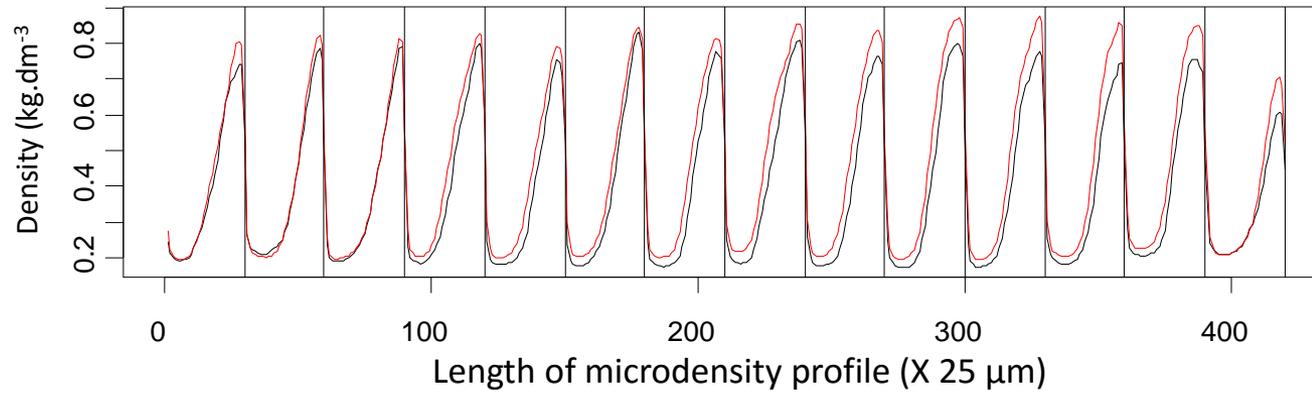


– Survivants
– Morts

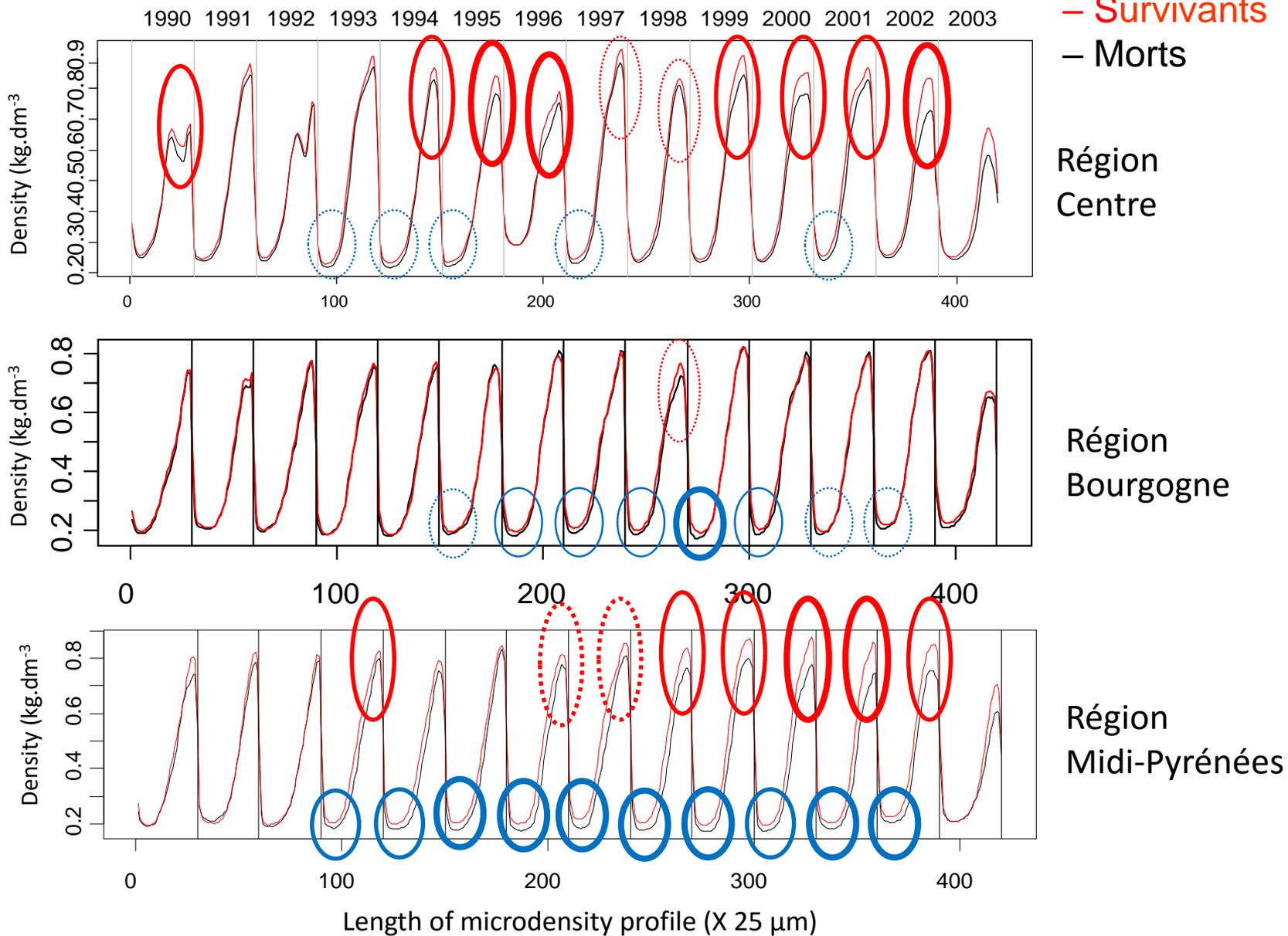
Région
Centre



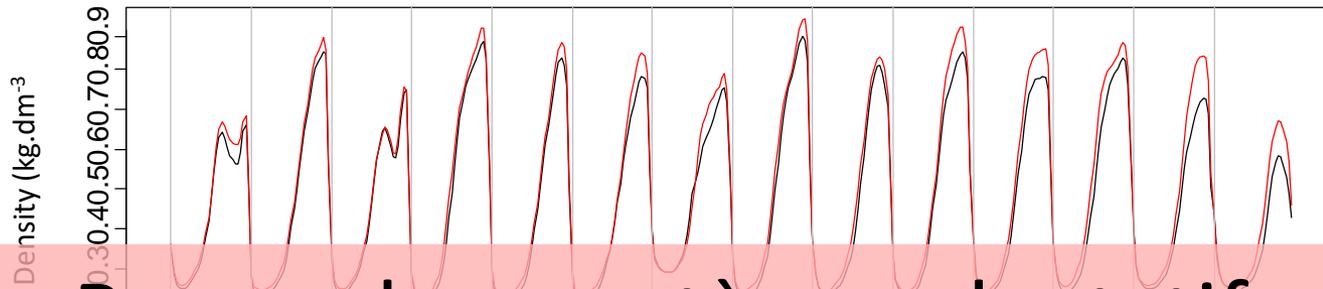
Région
Bourgogne



Région
Midi-Pyrénées

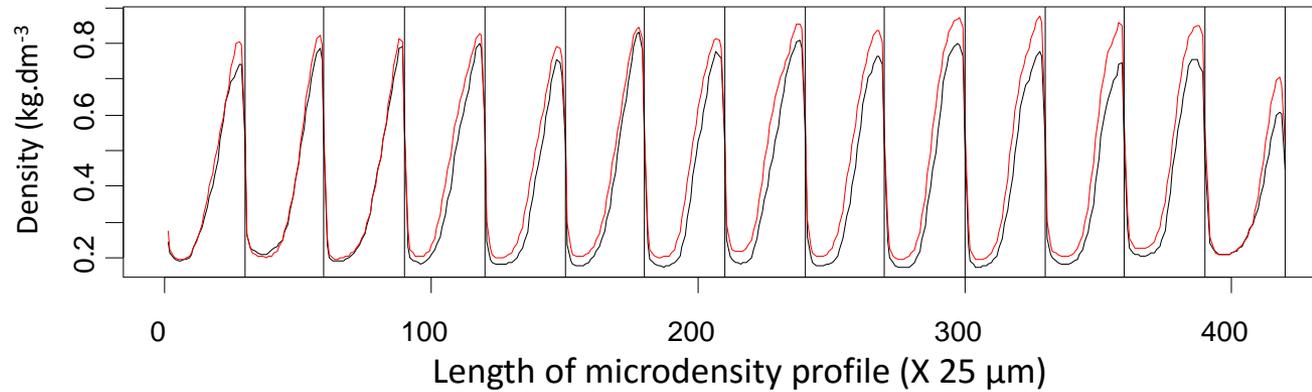
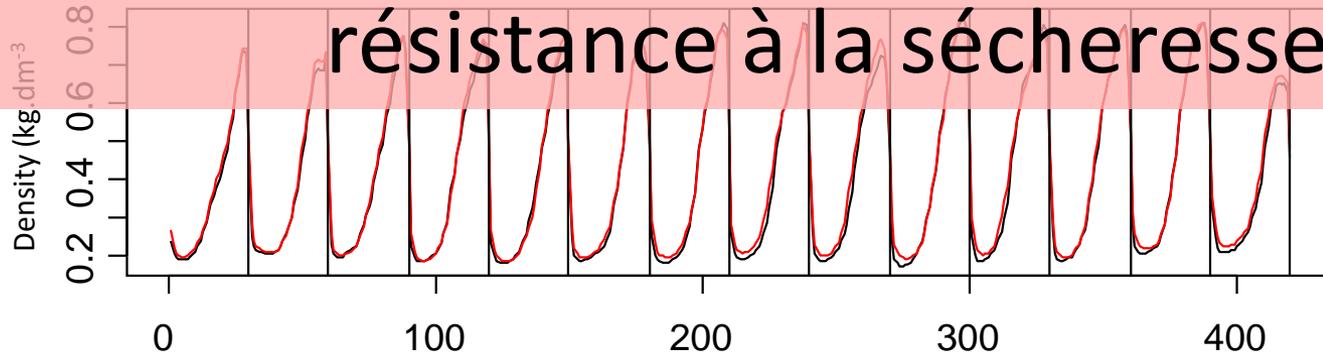


1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 **2003**

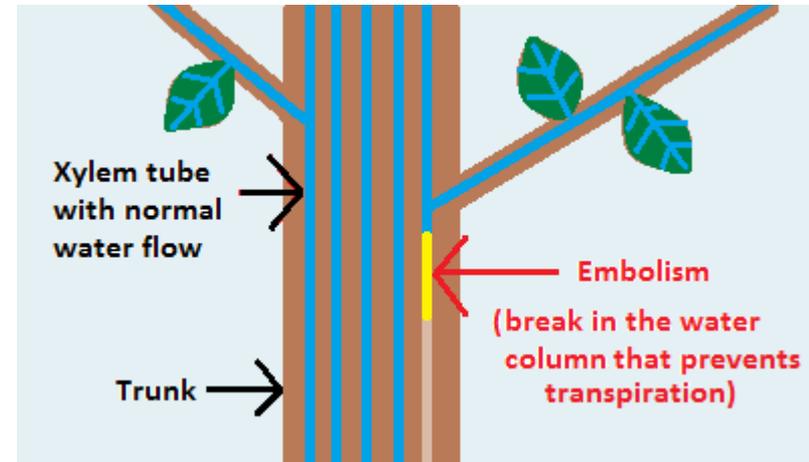
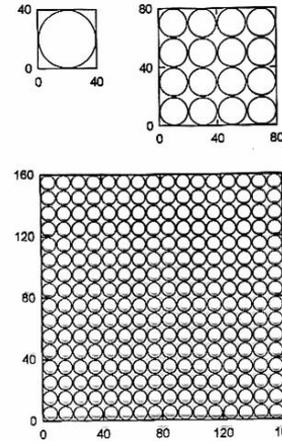
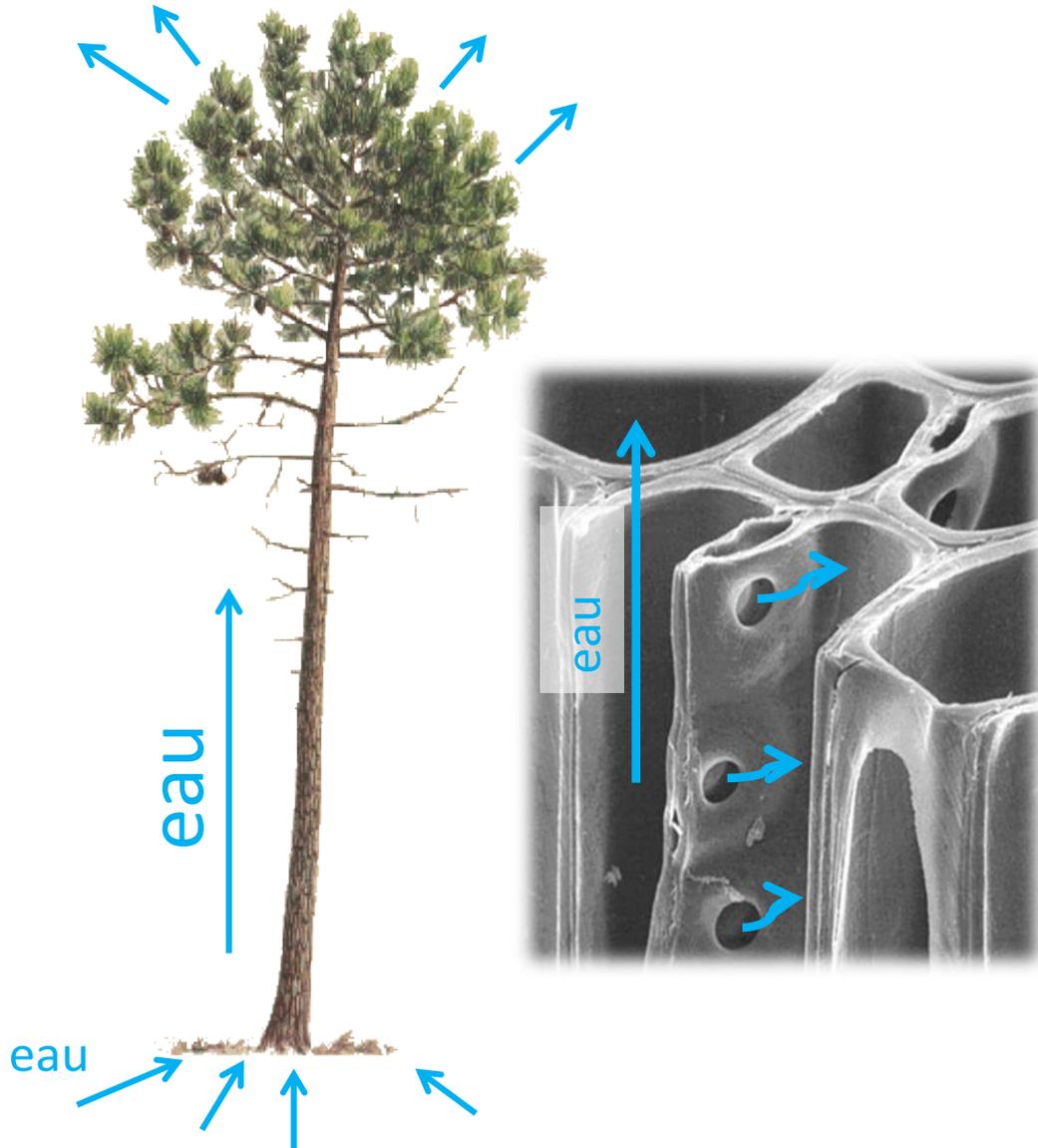


Proxys de caractères adaptatifs pour la

résistance à la sécheresse

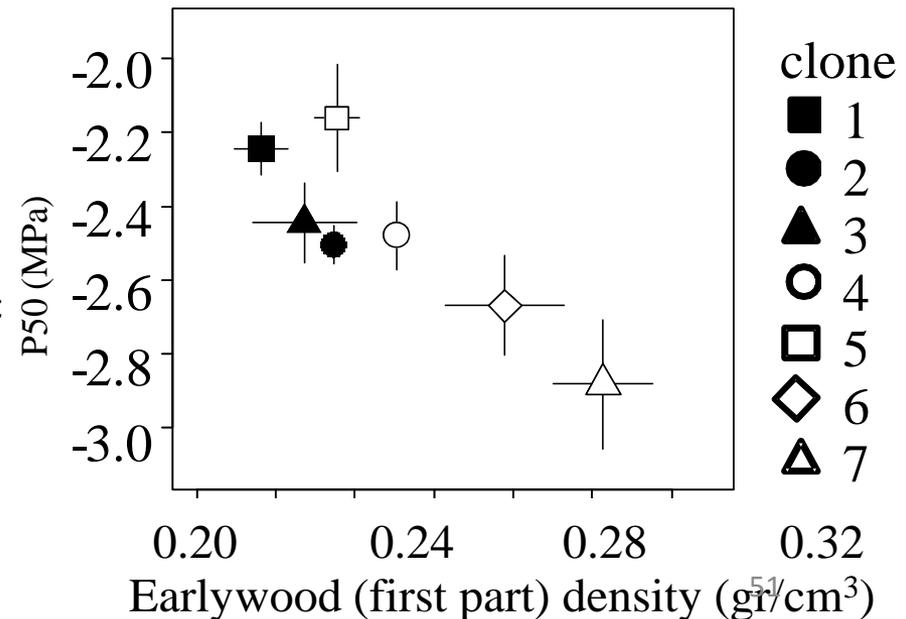


Survivants : densité plus élevée



Variables de microdensité et résistance à la cavitation

level	P12		P50		P88	
	tree	clonal	tree	Clonal	tree	clonal
microdensity						
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).

Caractères adaptatifs pour espèces de type *évitantes* ?

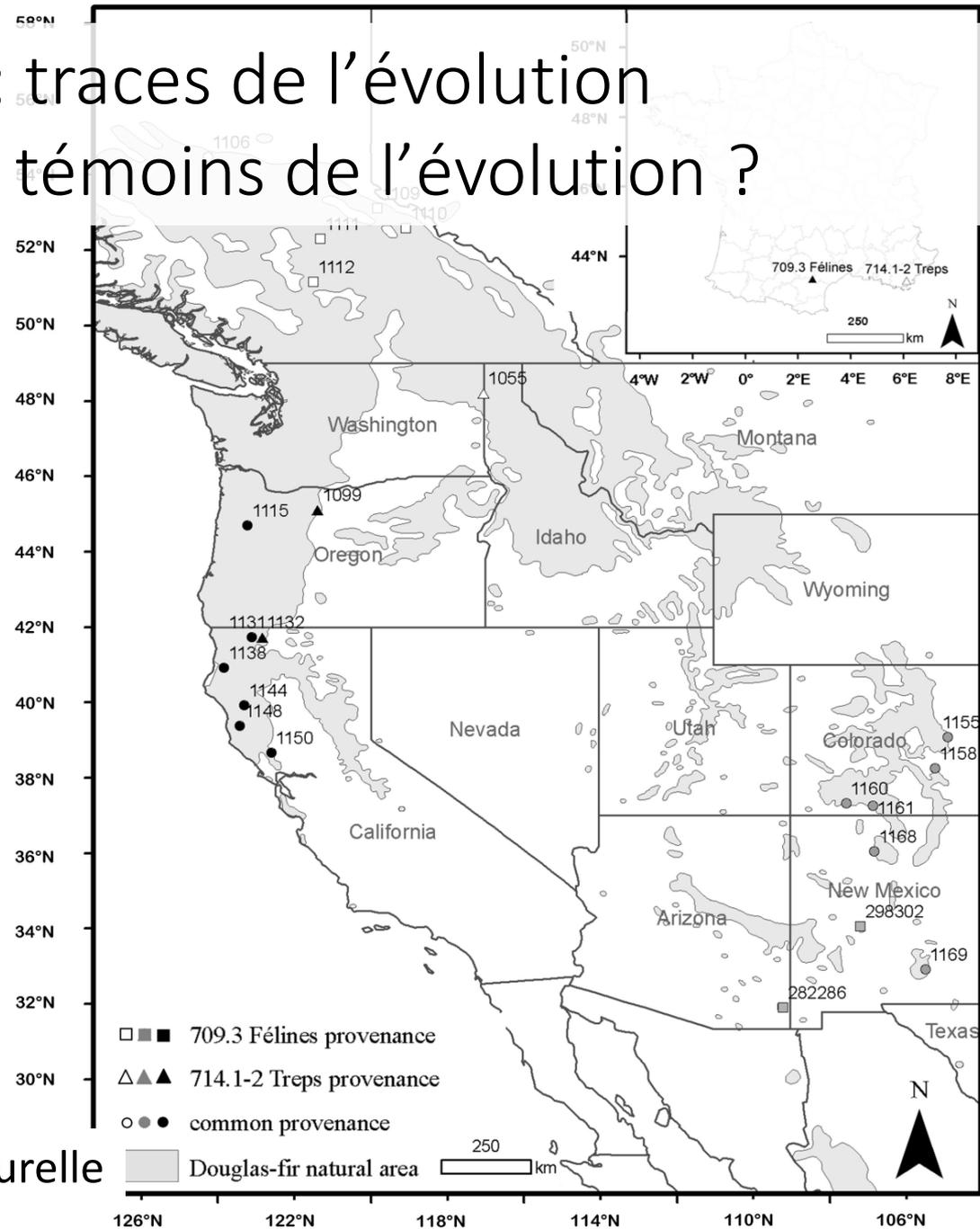
- Bois pas ou peu impliqué dans la résistance à la sécheresse
 - Pas d'accès rétrospectif
 - Pas de comparaison d'arbres morts et vivants
- Autres stratégies
 - Parcelles permanentes
 - Conditions contrôlées : mesures puis application d'un stress provoquant 50% de mortalité
 - En conditions naturelles : les traces de l'évolution

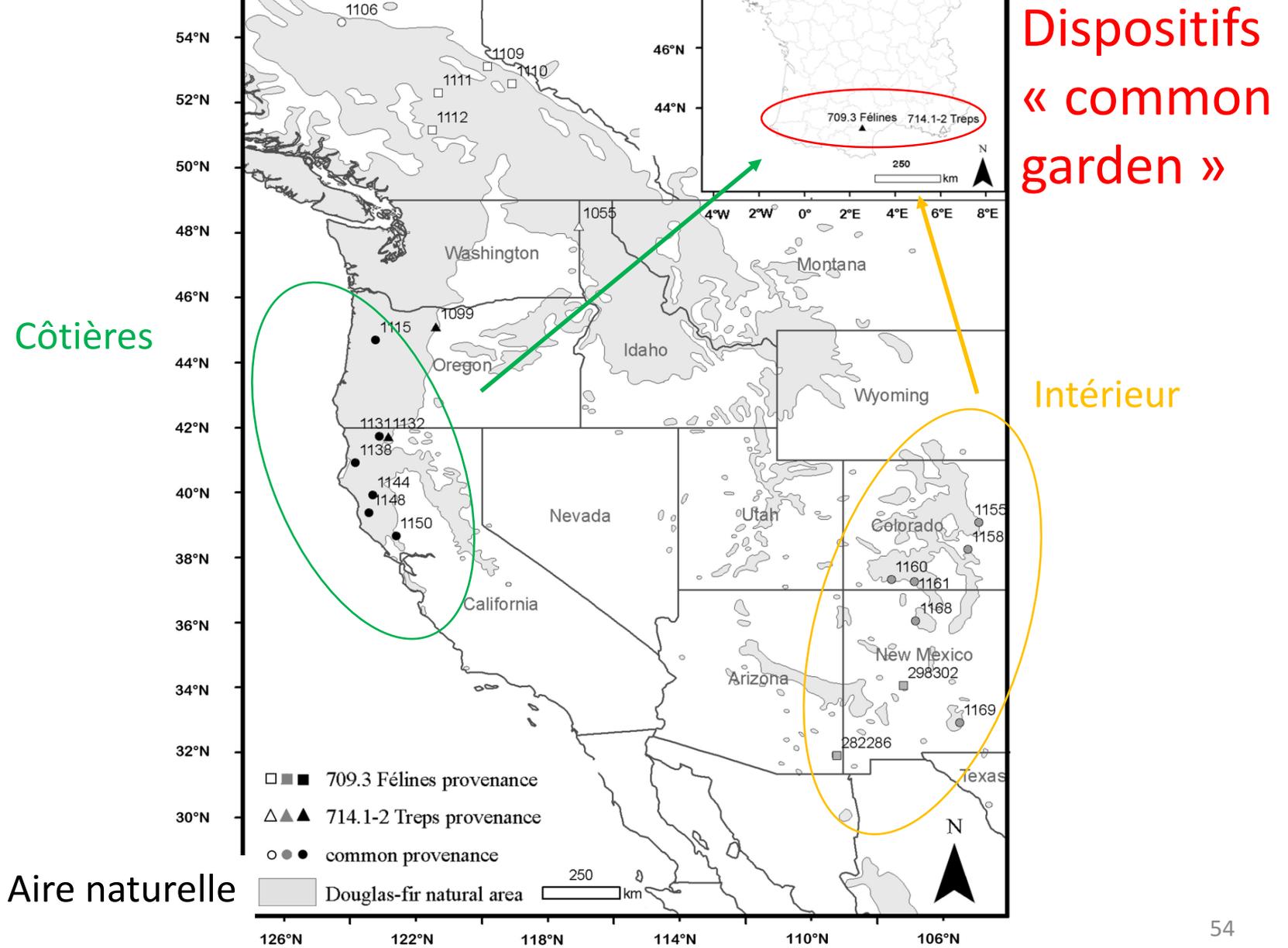
Autre stratégie : traces de l'évolution

1. 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

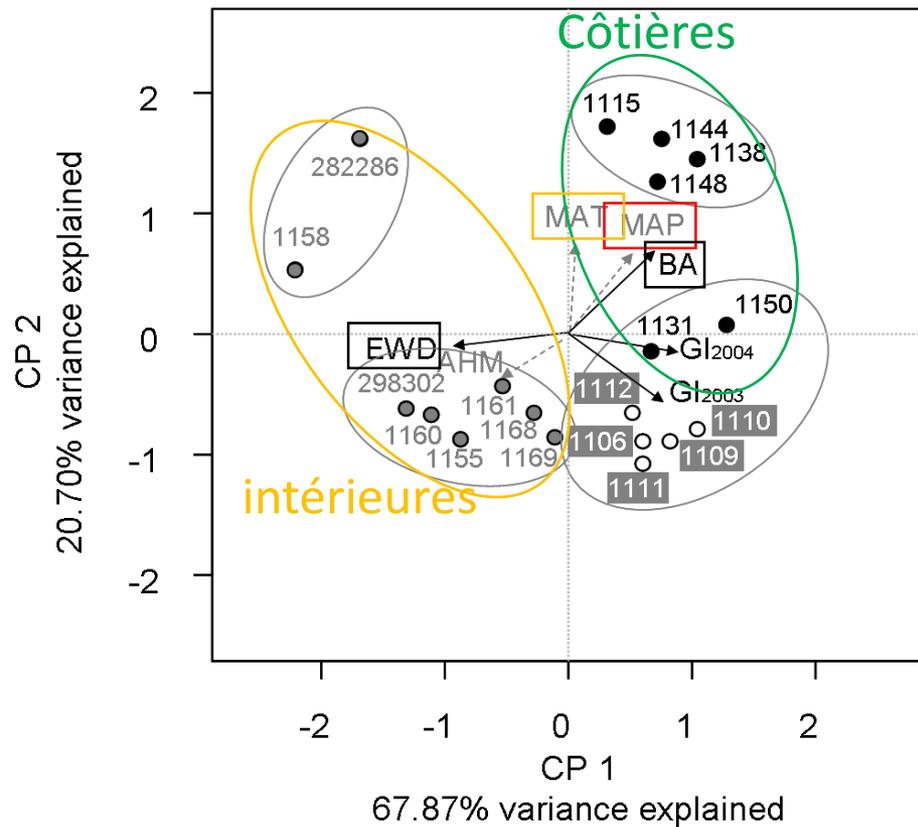
Aire naturelle



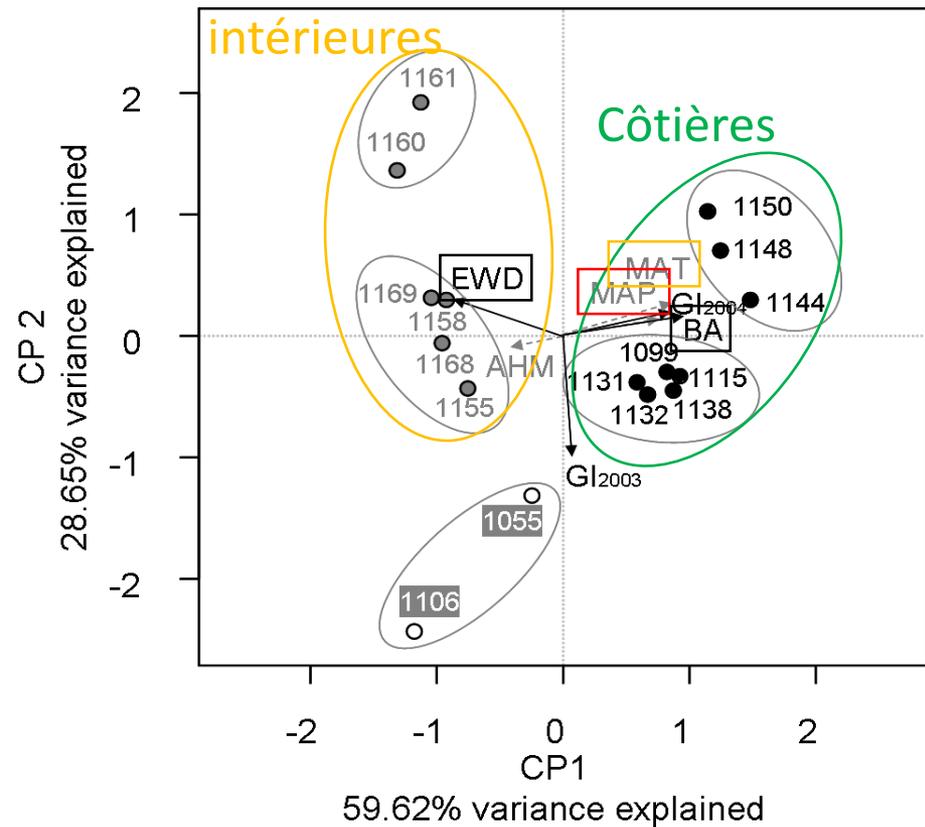


Analyse multivariante

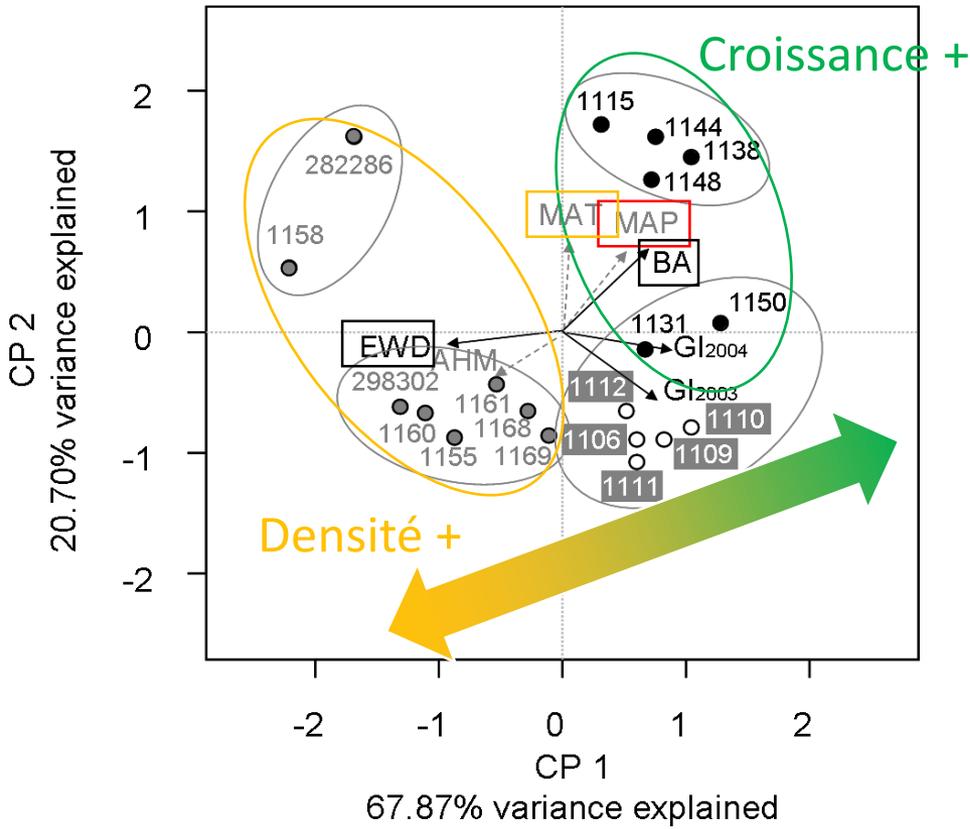
a. Félines



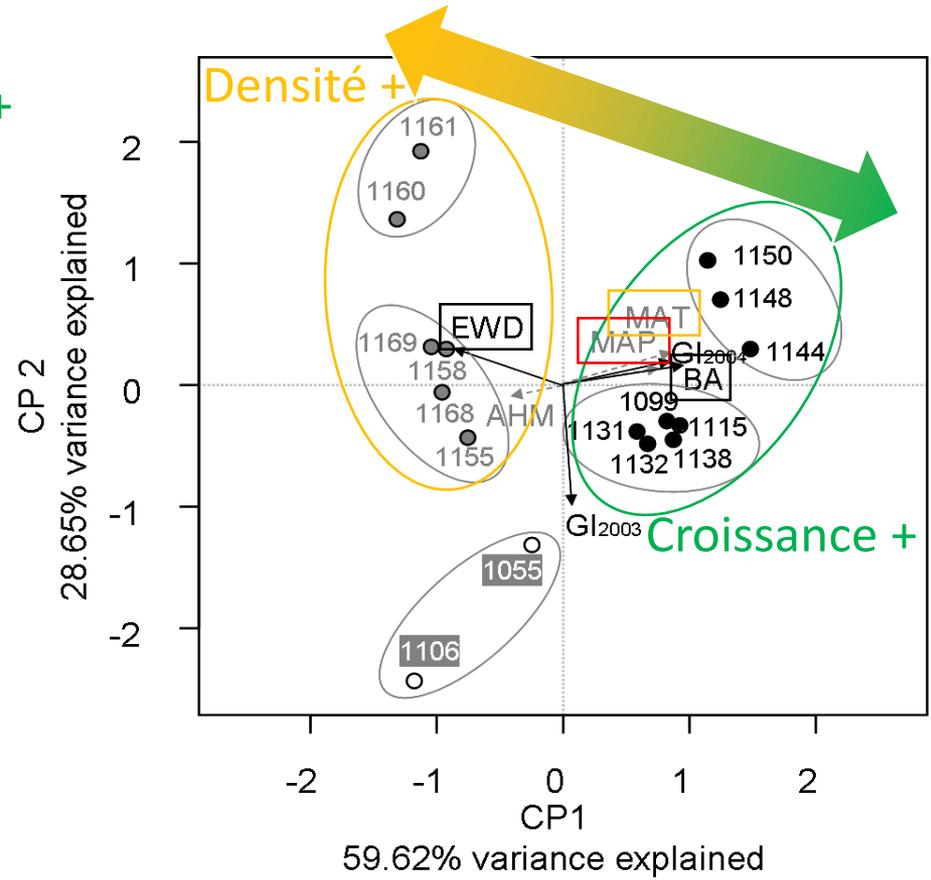
b. Le Treps



a. Félines



b. Le Treps



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.dowIPVrH.dpuf

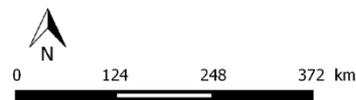
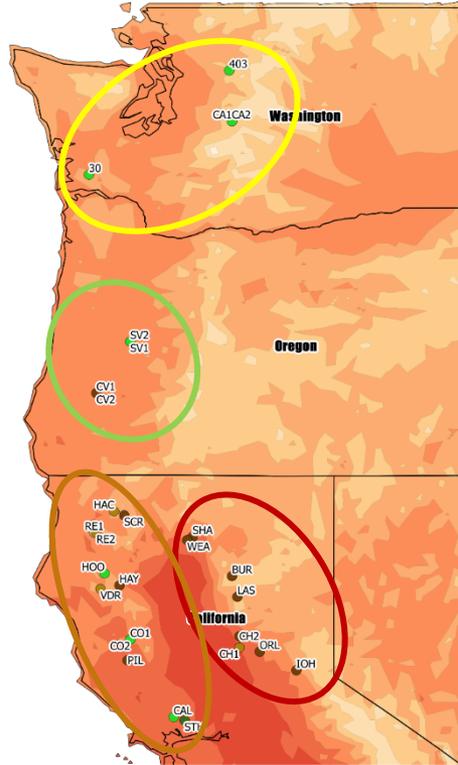
Côtières...?

- 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
 - *Quelle structuration génétique de l'adaptation à la sécheresse dans cette zone ? -> thèse Thibaud Chauvin*

Caractéristiques climatiques des régions d'origines des provenances

Carte des températures moyennes annuelles de l'aire d'origine des provenances de douglas (1961 - 1990)

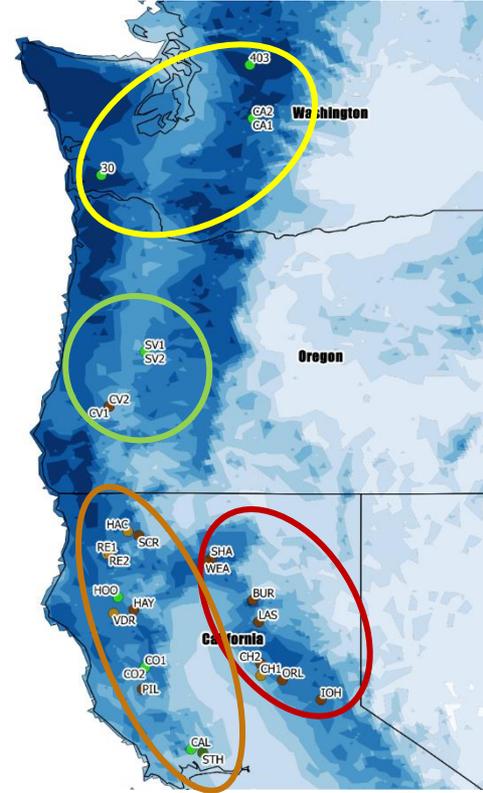
- Légende**
- Altitudes des provenances (m)
- 170 - 380
 - 380 - 580
 - 580 - 790
 - 790 - 990
 - 990 - 1200
- Températures moyennes annuelles (°C)
- < 0
 - 0 - 4
 - 4 - 7
 - 7 - 10
 - 10 - 13
 - 13 - 16
 - 16 - 18
 - 18 - 21
 - > 21



Source: <http://www.noaa.gov/cgi-bin/climaps/climaps.pl>

Carte des précipitations moyennes annuelles de l'aire d'origine des provenances de douglas (1961 - 1990)

- Légende**
- Altitudes des provenances (m)
- 170 - 380
 - 380 - 580
 - 580 - 790
 - 790 - 990
 - 990 - 1200
- Précipitations moyennes annuelles (mm)
- < 127
 - 127 - 304,8
 - 304,8 - 508
 - 508 - 702
 - 702 - 1016
 - 1016 - 1270
 - 1270 - 1778
 - 1778 - 2540
 - > 2540

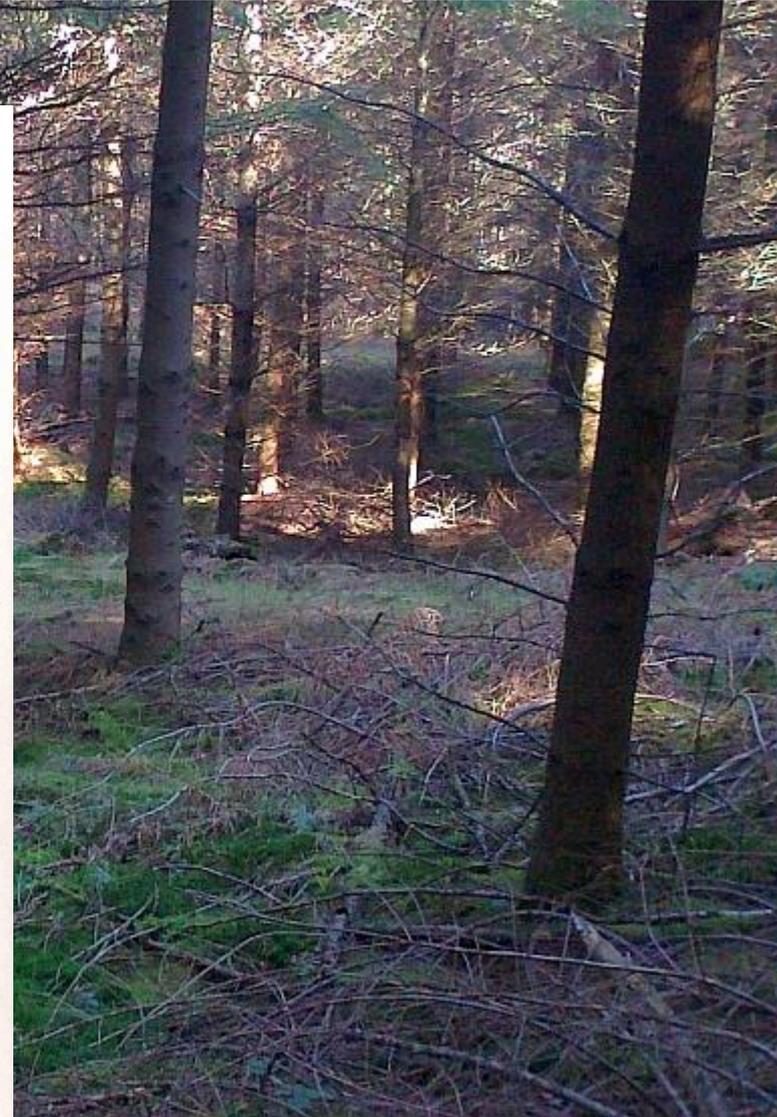
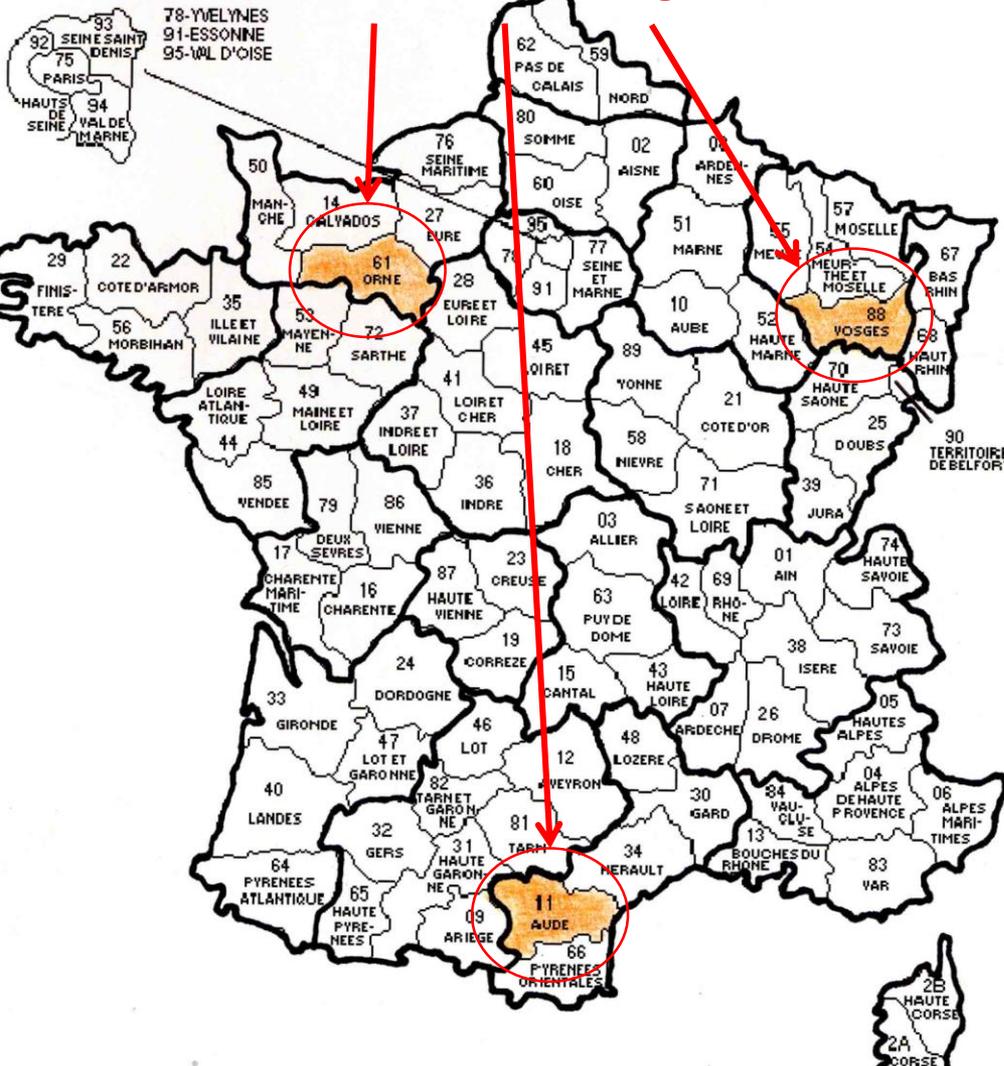


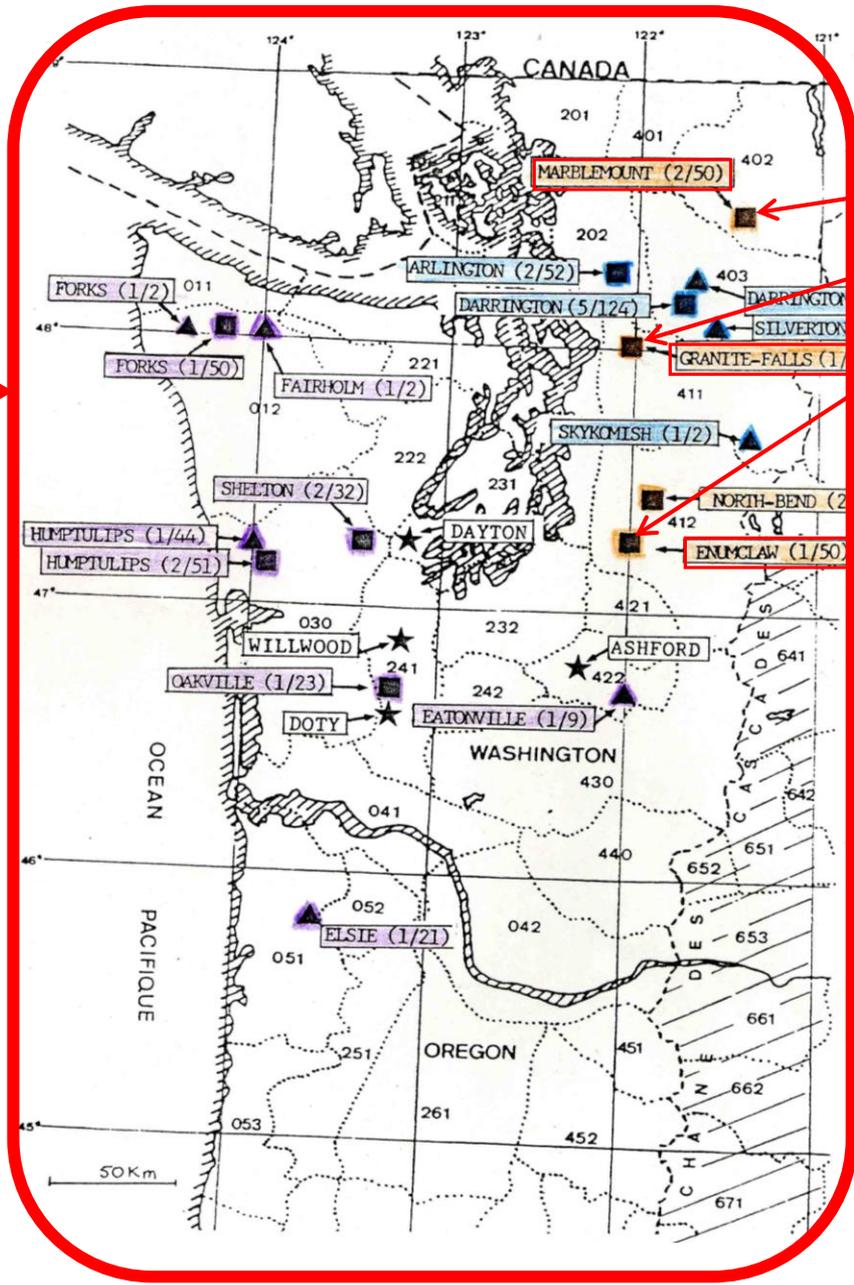
Source: <http://www.noaa.gov/cgi-bin/climaps/climaps.pl>

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

Thèse M. Ruiz-Diaz, déterminisme génétique : familles

Orne, Aude, Vosges





Marblemount
Granite-Falls
Enumclaw
56 families

1600 carottes



1600 profils

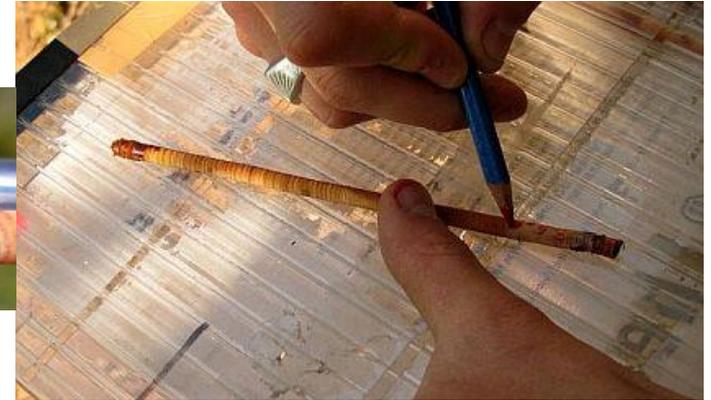
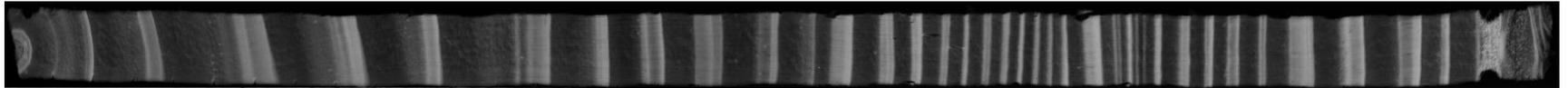
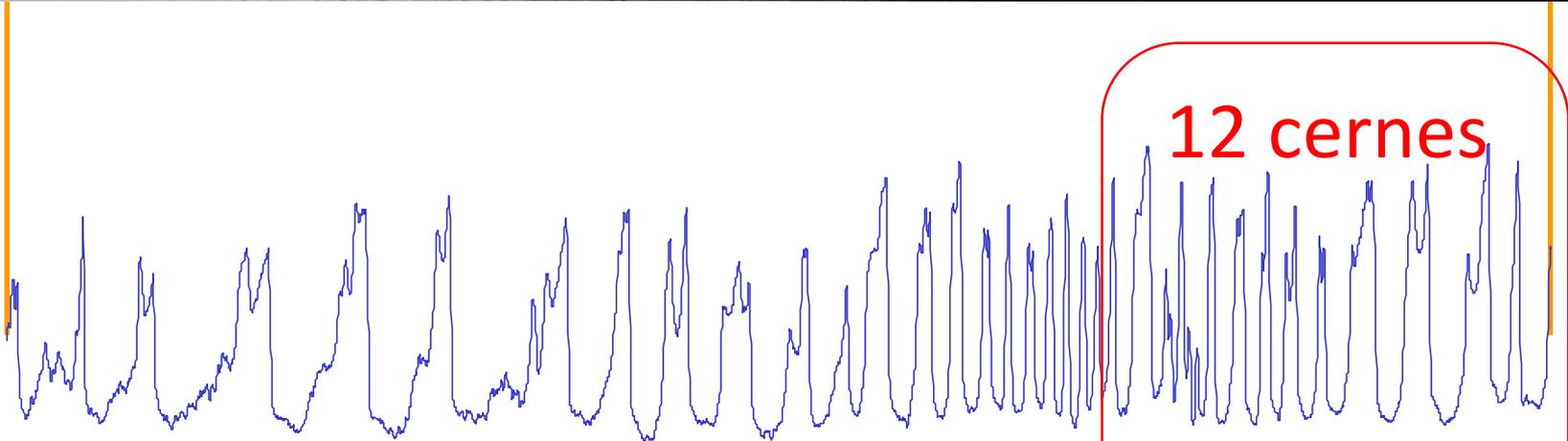


Image rayons X



Microdensité



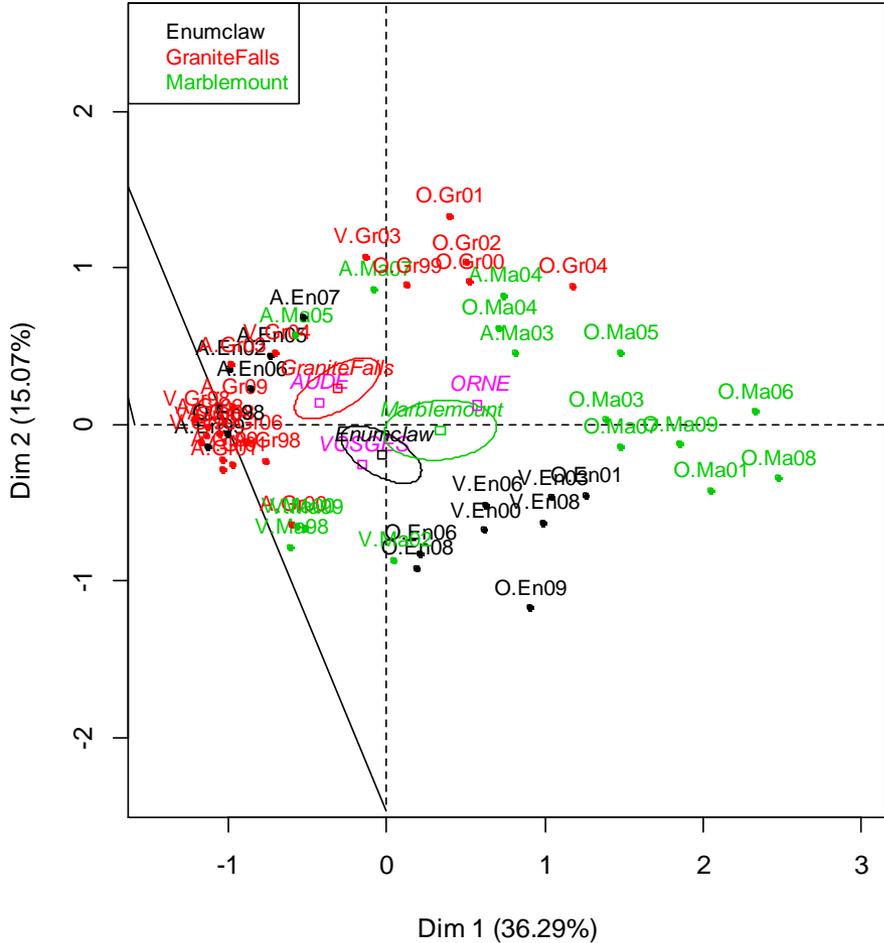
12 cernes

12 années

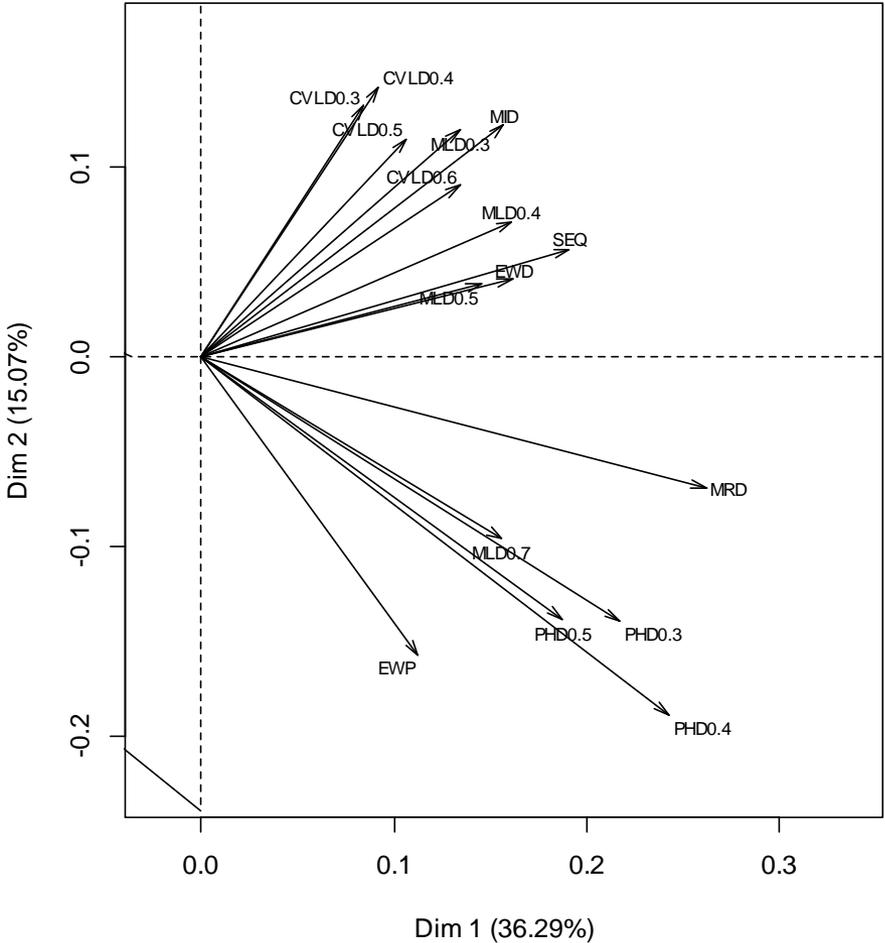
Distance (X 25 microns)

Resultats : héritabilité

Individuals factor map (PCA)

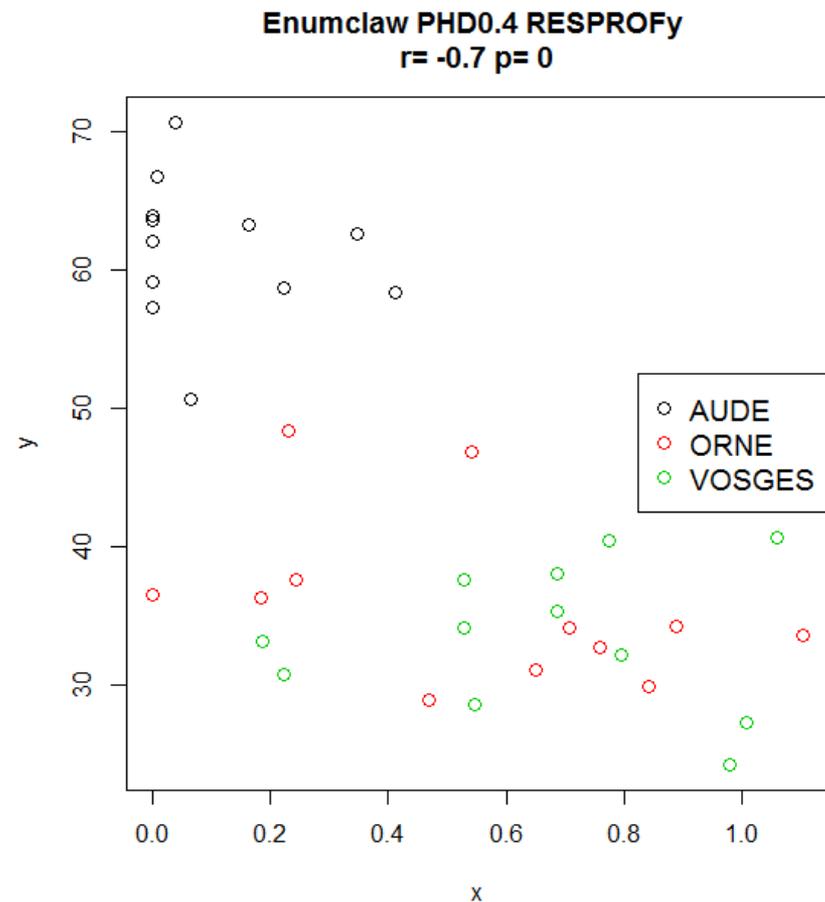


Variables factor map (PCA)



Des tendances

- 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

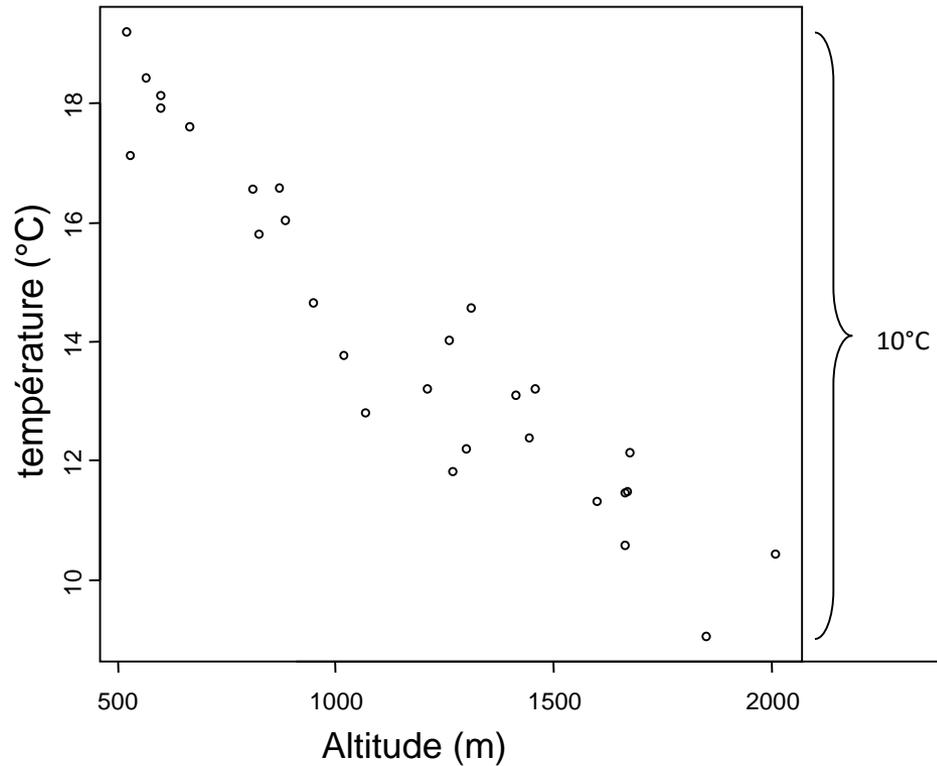
2. En conditions naturelles

- 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)

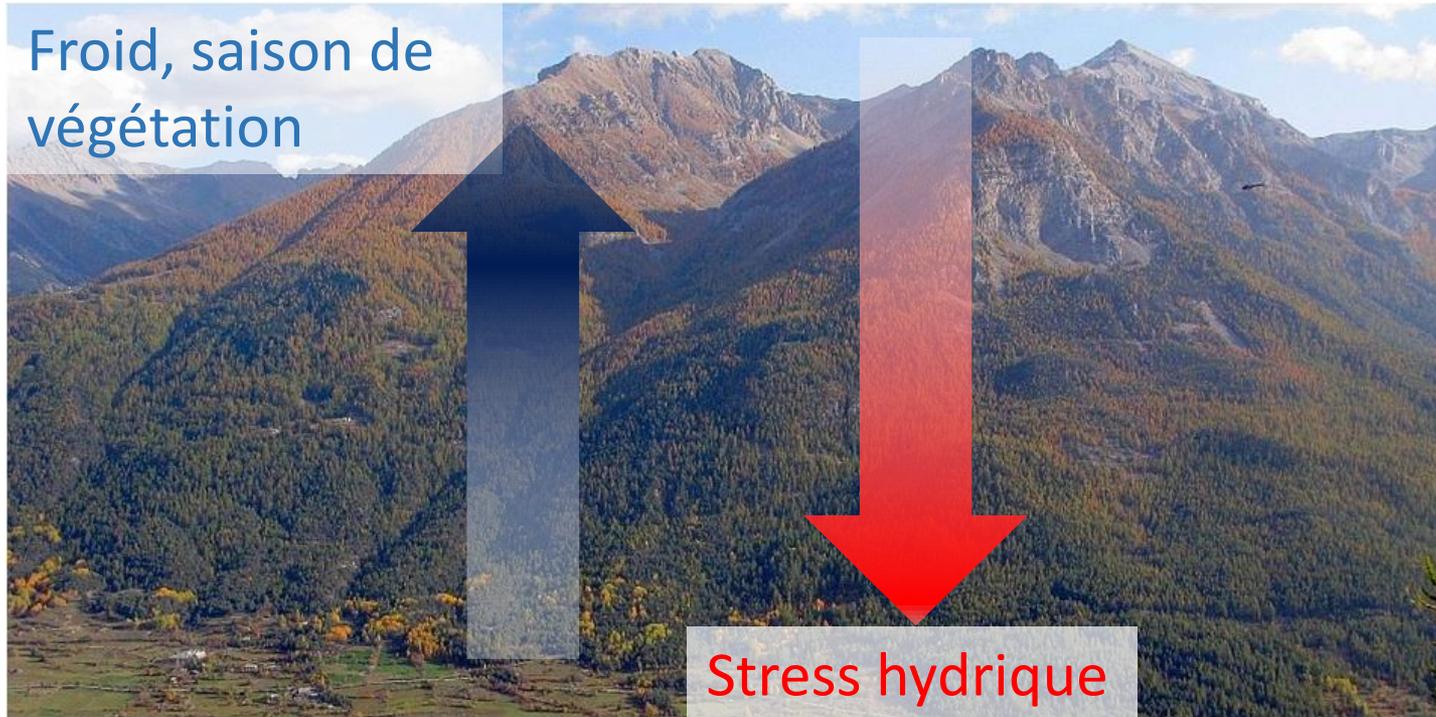
Gradients altitudinaux = gradients de température

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

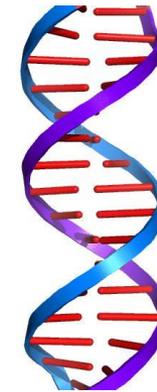
+ 10°C sur 1500 m



Pressions de sélection



Génétique moléculaire



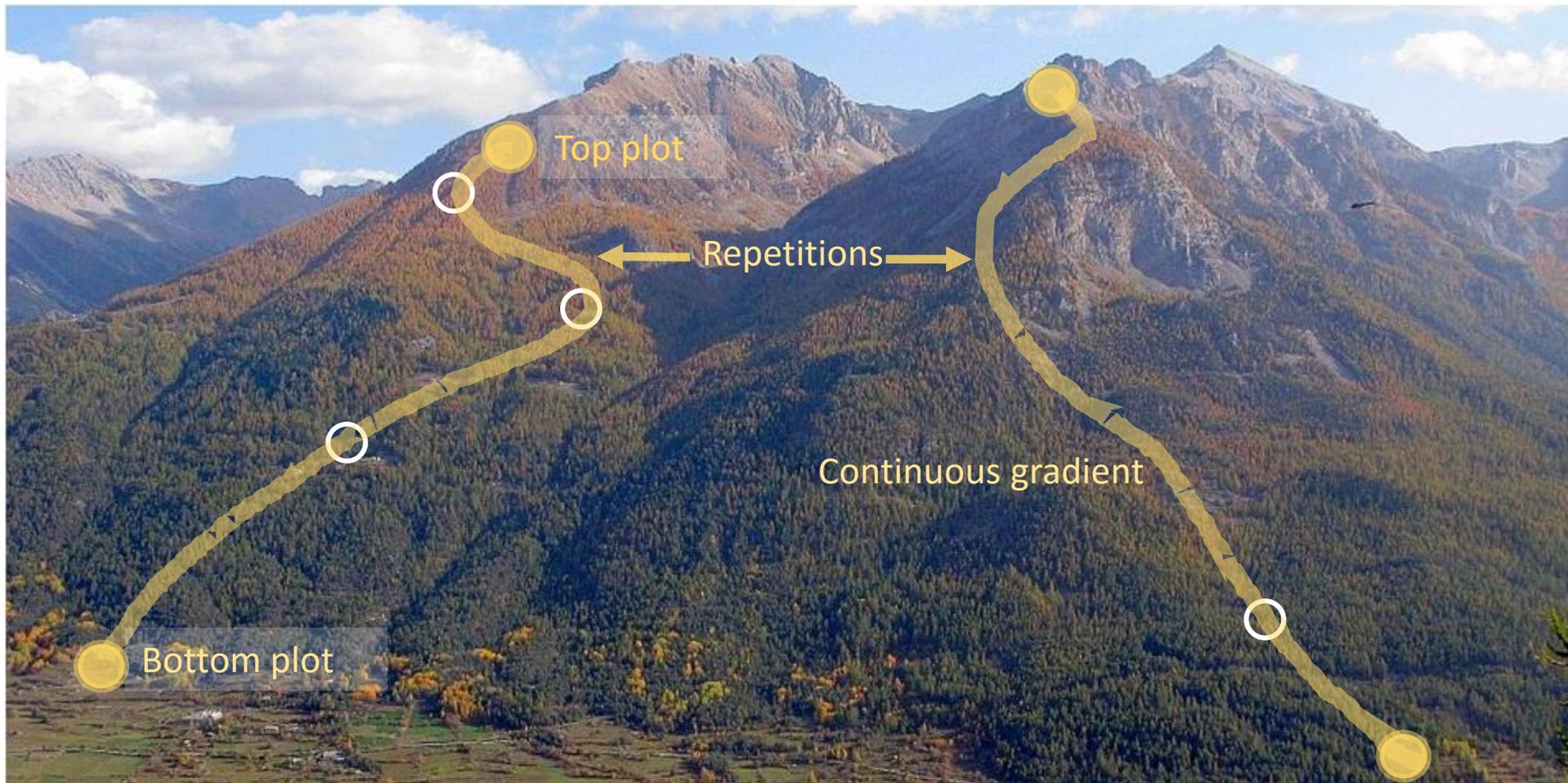
CSauer 2011 ©

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

Besega, 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.

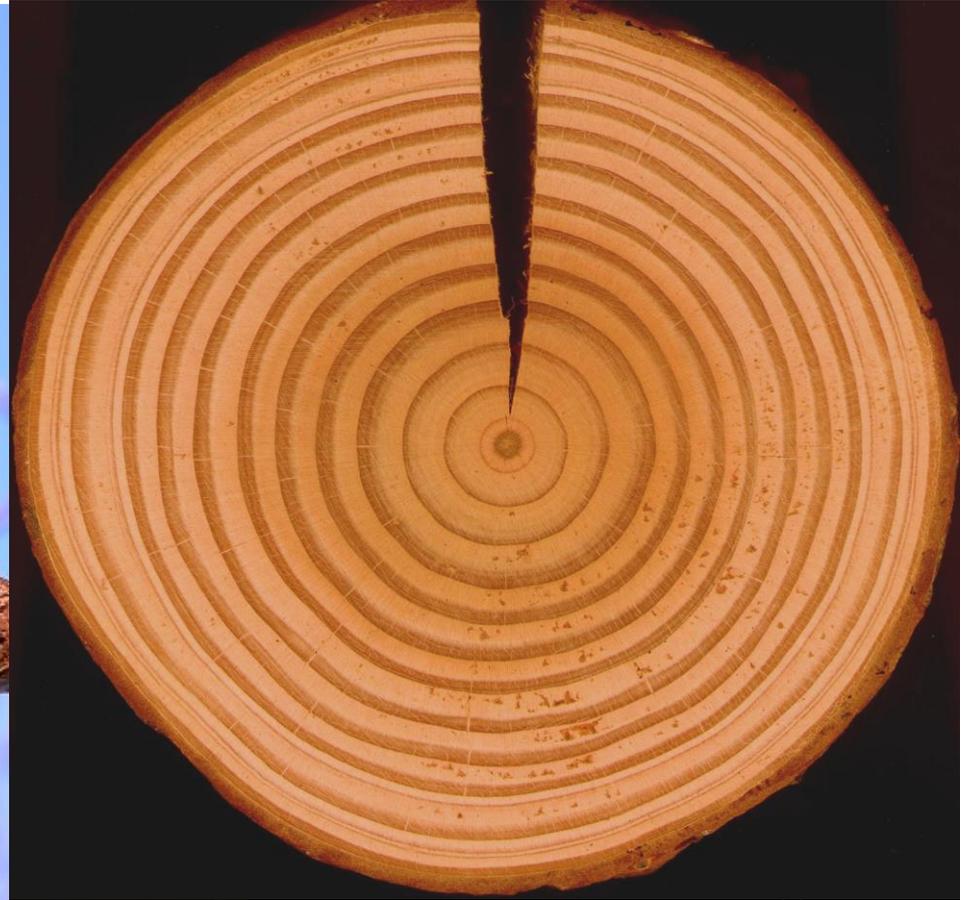


Gradients altitudinaux



Effets non léthaux du changement climatique

- Phénologie, croissance



Effets sur la phénologie

- Hautes latitudes nord 2000–10 : saison de végétation plus longue
 - Date de début plus précoce : 4,7 jours/10 ans
 - Date de fin plus tardive : 1,6 jours/10 ans
- Des différences Amérique du nord et Eurasie
 - Amérique du nord, date de début plus précoce de 11,5 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 2,2 jours/10 ans.
 - Eurasie, date de début plus précoce de 2,7 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 3,5 jours/10 ans.

Zeng, Heqing, Gensuo Jia, et Howard Epstein. 2011. « Recent Changes in Phenology over the Northern High Latitudes Detected from Multi-satellite Data ». *Environmental Research Letters* 6 (4) (janvier 1): 045508. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045508.

- 1982–2011, en moyenne à l'échelle mondiale -1.4 ± 0.6 jours / 10 ans.

Wang, Xuhui, Shilong Piao, Xiangtao Xu, Philippe Ciais, Natasha MacBean, Ranga B. Myneni, et Laurent Li. 2015. « Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-up Slowed down or Changed Abruptly over the Last Three Decades? ». *Global Ecology and Biogeography* 24 (6): 621-31. doi:10.1111/geb.12289.

Effets sur la phénologie

- Hautes latitudes nord 2000–10 : saison de végétation plus longue
 - Date de début plus précoce : 4,7 jours/10 ans
 - Date de fin plus tardive : 1,6 jours/10 ans
- Des différences Amérique du nord et Eurasie
 - Amérique du nord, date de début plus précoce de **11,5** jours/10 ans, date de fin plus tardive de **2,2** jours/10 ans.
 - Eurasie, date de début plus précoce de **2,7** jours/10 ans, date de fin plus tardive de **3,5** jours/10 ans.

Zeng, Heqing, Gensuo Jia, et Howard Epstein. 2011. « Recent Changes in Phenology over the Northern High Latitudes Detected from Multi-satellite Data ». *Environmental Research Letters* 6 (4) (janvier 1): 045508. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045508.

- 1982–2011, en moyenne à l'échelle mondiale -1.4 ± 0.6 jours / 10 ans.

Wang, Xuhui, Shilong Piao, Xiangtao Xu, Philippe Ciais, Natasha MacBean, Ranga B. Myneni, et Laurent Li. 2015. « Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-up Slowed down or Changed Abruptly over the Last Three Decades? ». *Global Ecology and Biogeography* 24 (6): 621-31. doi:10.1111/geb.12289.

Effets sur la phénologie

- Hautes latitudes nord 2000–10 : saison de végétation plus longue
 - Date de début plus précoce : 4,7 jours/10 ans
 - Date de fin plus tardive : 1,6 jours/10 ans
- Des différences Amérique du nord et Eurasie
 - Amérique du nord, date de début plus précoce de 11,5 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 2,2 jours/10 ans.
 - Eurasie, date de début plus précoce de 2,7 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 3,5 jours/10 ans.

Zeng, Heqing, Gensuo Jia, et Howard Epstein. 2011. « Recent Changes in Phenology over the Northern High Latitudes Detected from Multi-satellite Data ». *Environmental Research Letters* 6 (4) (janvier 1): 045508. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045508.

- **1982–2011, en moyenne à l'échelle mondiale -1.4 ± 0.6 jours / 10 ans.**

Wang, Xuhui, Shilong Piao, Xiangtao Xu, Philippe Ciais, Natasha MacBean, Ranga B. Myneni, et Laurent Li. 2015. « Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-up Slowed down or Changed Abruptly over the Last Three Decades? ». *Global Ecology and Biogeography* 24 (6): 621-31. doi:10.1111/geb.12289.

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 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 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

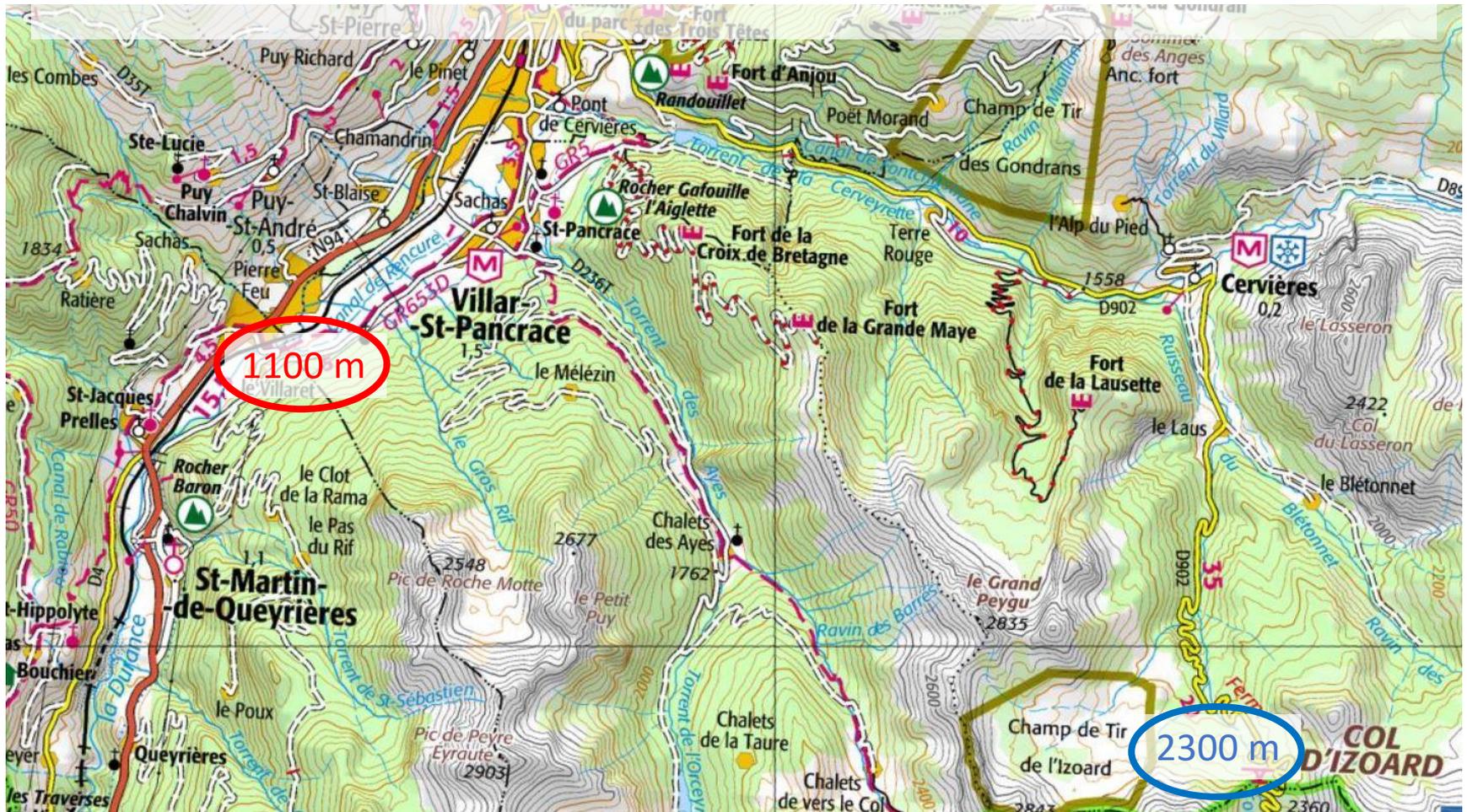
- Forêts mélangés de conifères dans les Cascades en Amérique du Nord : croissance augmentée par des hivers plus doux, survie diminuée par l'augmentation de l'intensité des incendies

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)

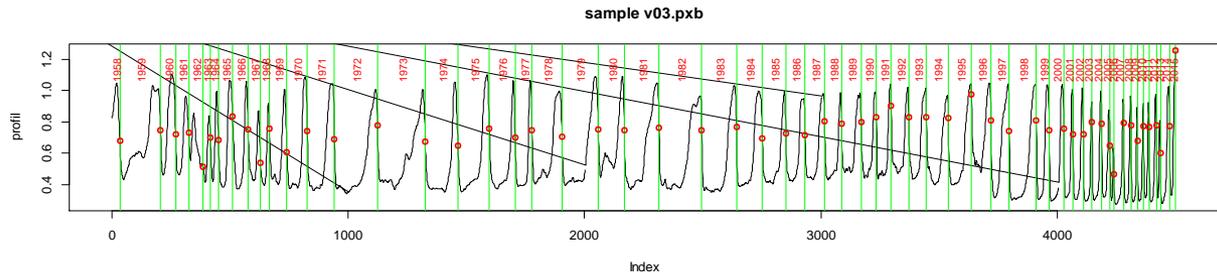
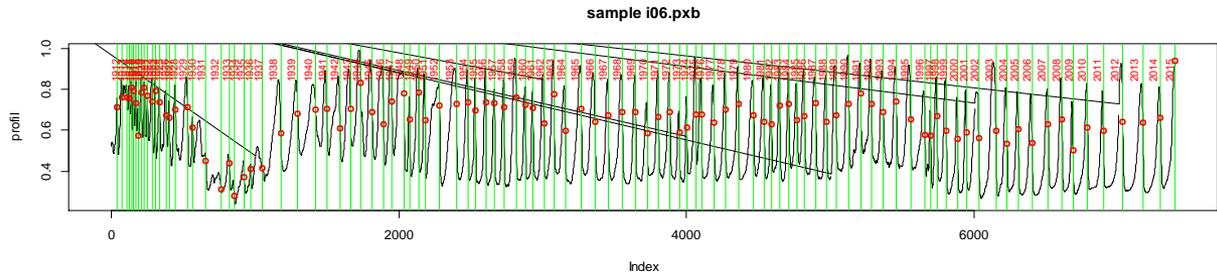
Kauppi, Pekka E., Maximilian Posch, et Pentti Pirinen. 2014. « Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960 ». *Plos One* 9 (11): e111340. doi:10.1371/journal.pone.0111340.

Effet sur la croissance : approche dendroécologique

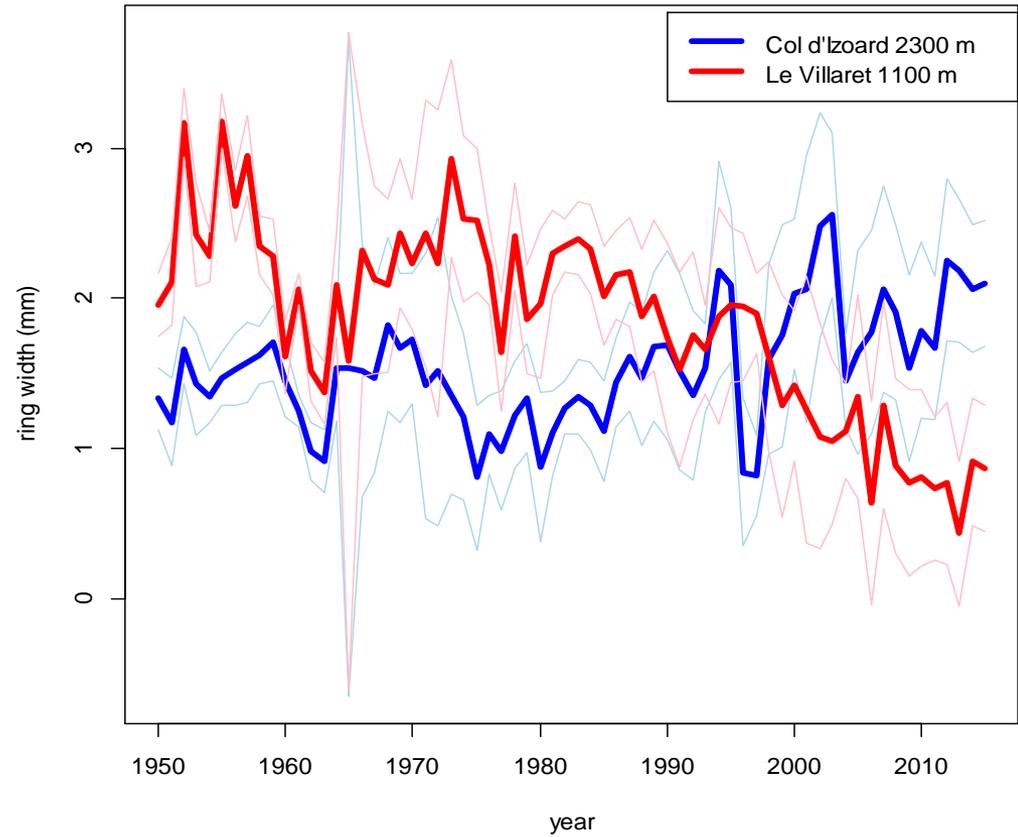
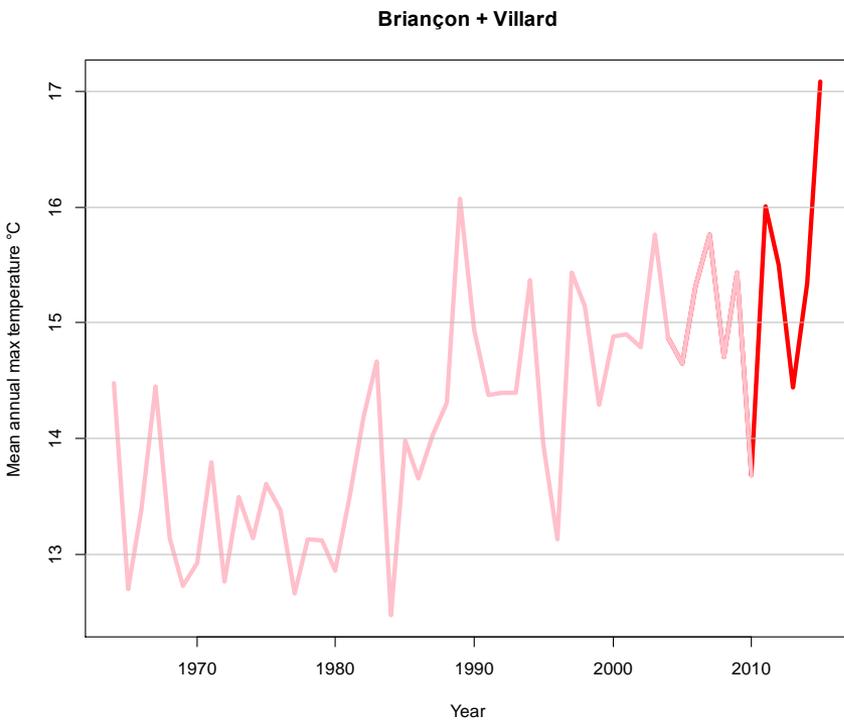


Le Villaret (1100 m) Izoard (2300 m)

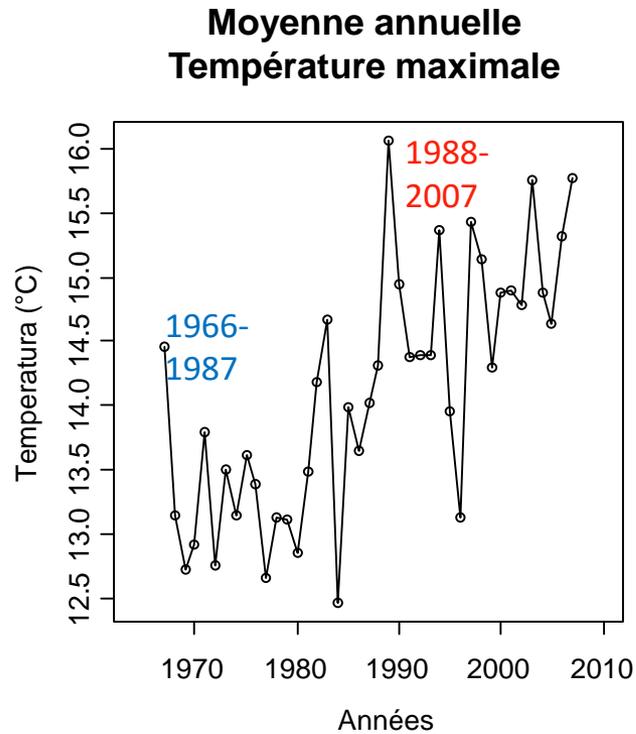
Le Villaret (1100 m) Izoard (2300 m)



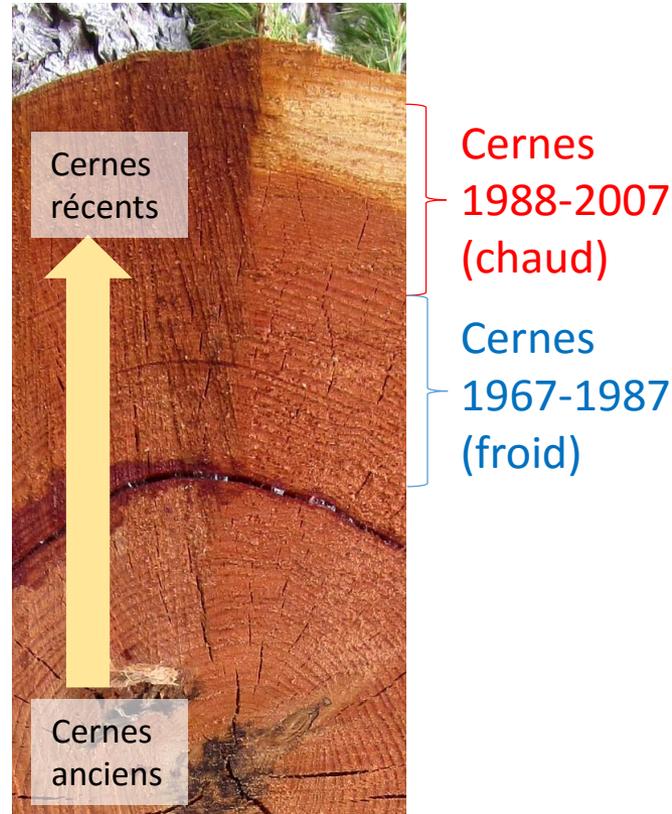
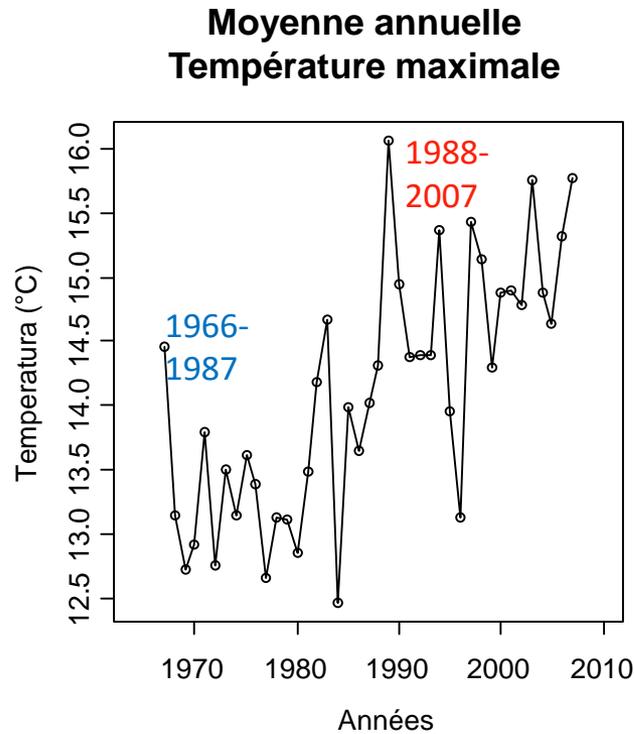
Largeur de cerne 1100 et 2300 m



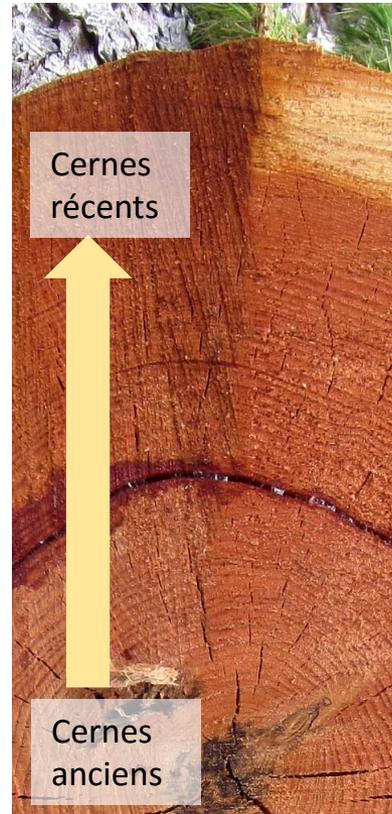
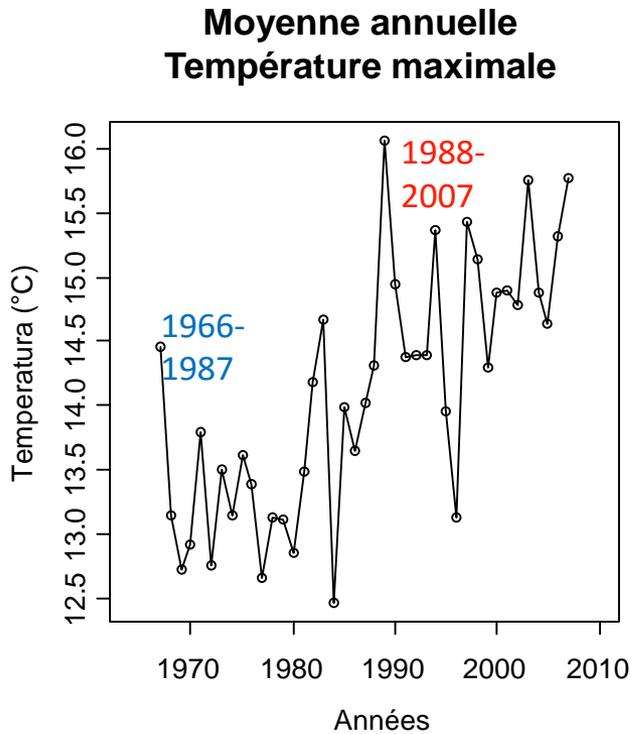
Réponses observées : modification de la structure des cernes



Réponses observées : modification de la structure des cernes



Réponses observées : modification de la structure des cernes



Cernes
1988-2007
(chaud)

Cernes
1967-1987
(froid)

Bois
final
plus
dense

Bois
initial
moins
dense

Structure des cernes

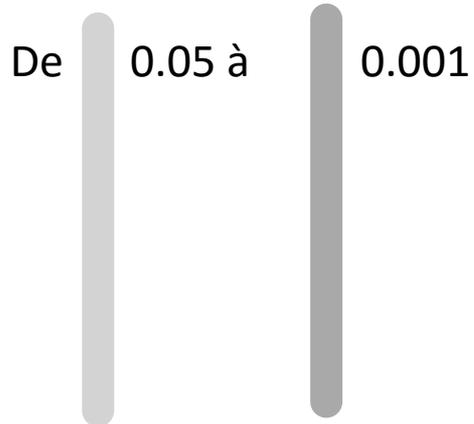
1967-1987

période « **fraiche** »

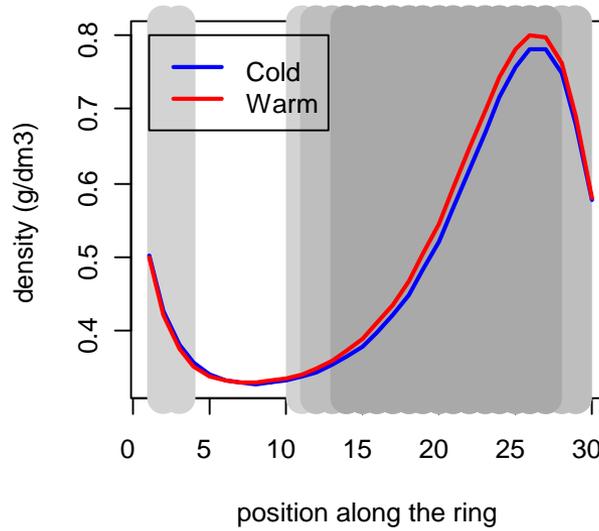
1988-2007

période « **chaude** »

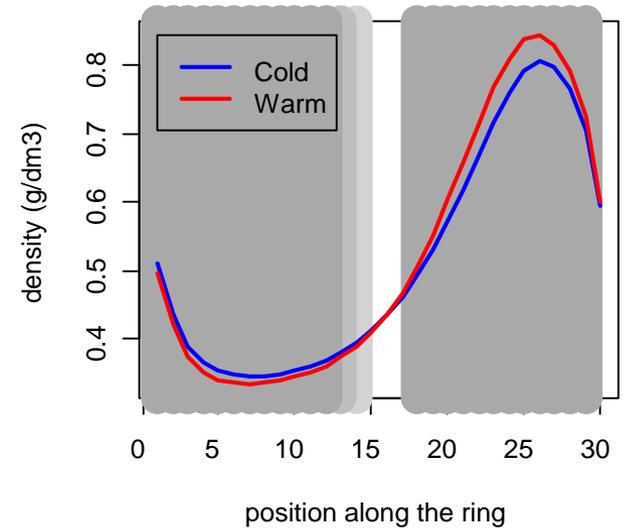
Quatre altitudes



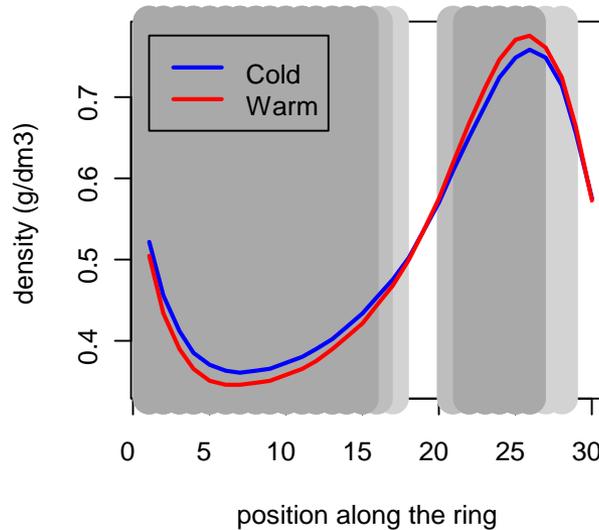
Altitude 1350 m



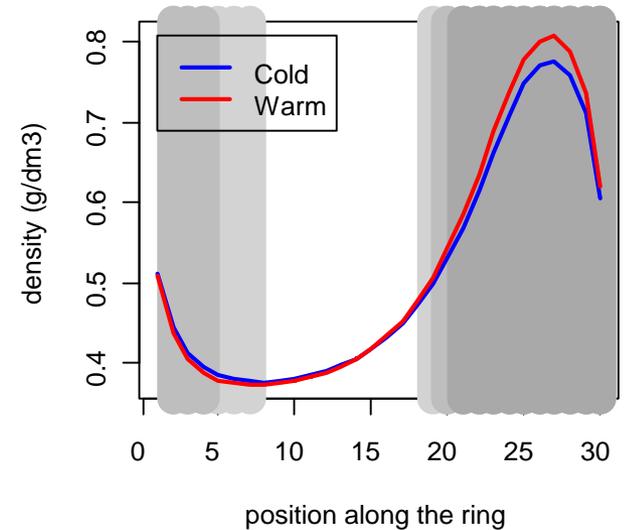
Altitude 1700 m



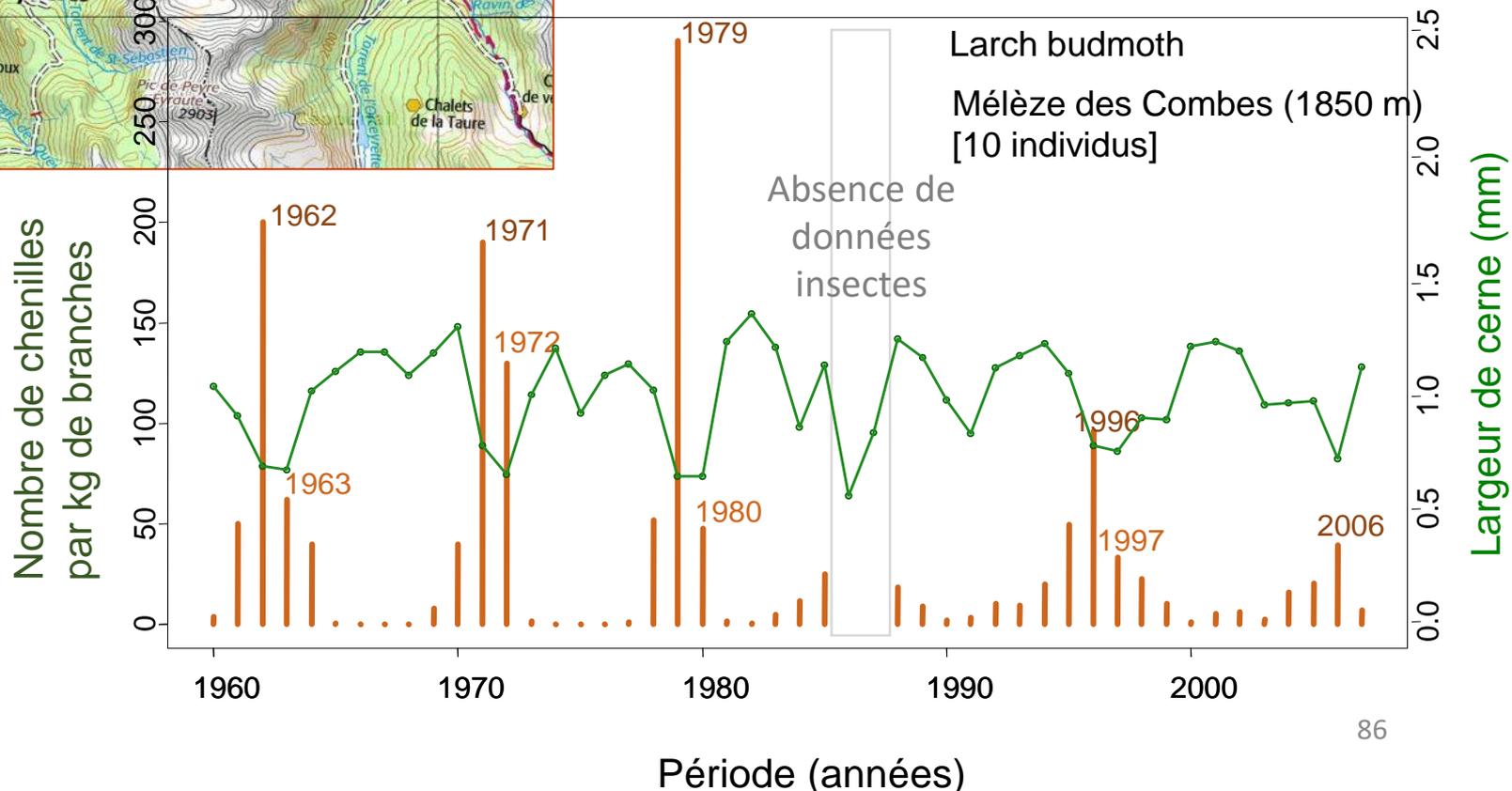
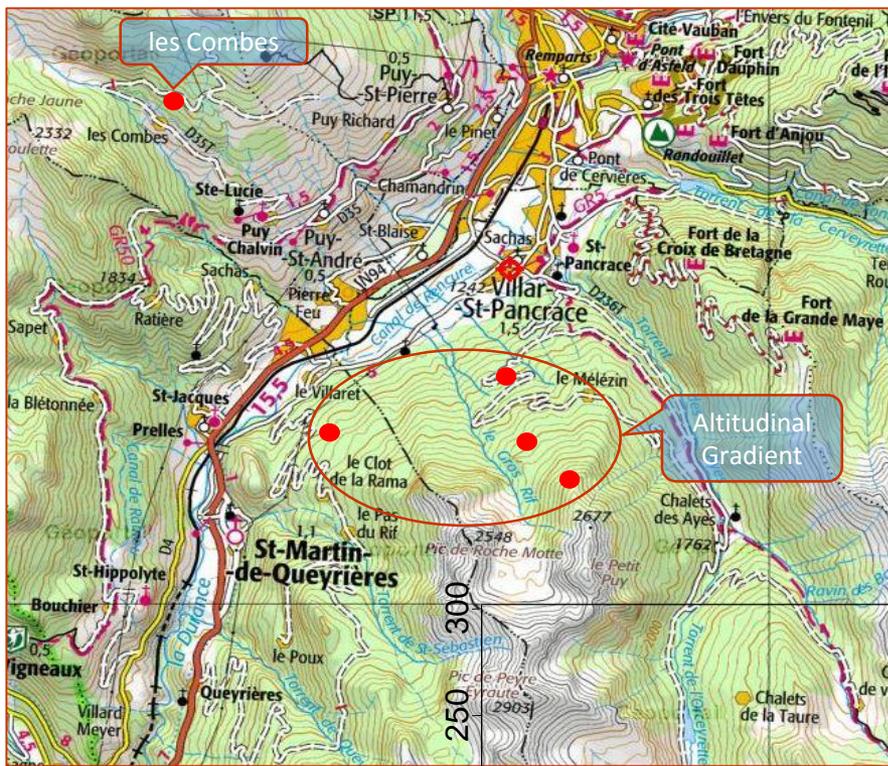
Altitude 2000 m



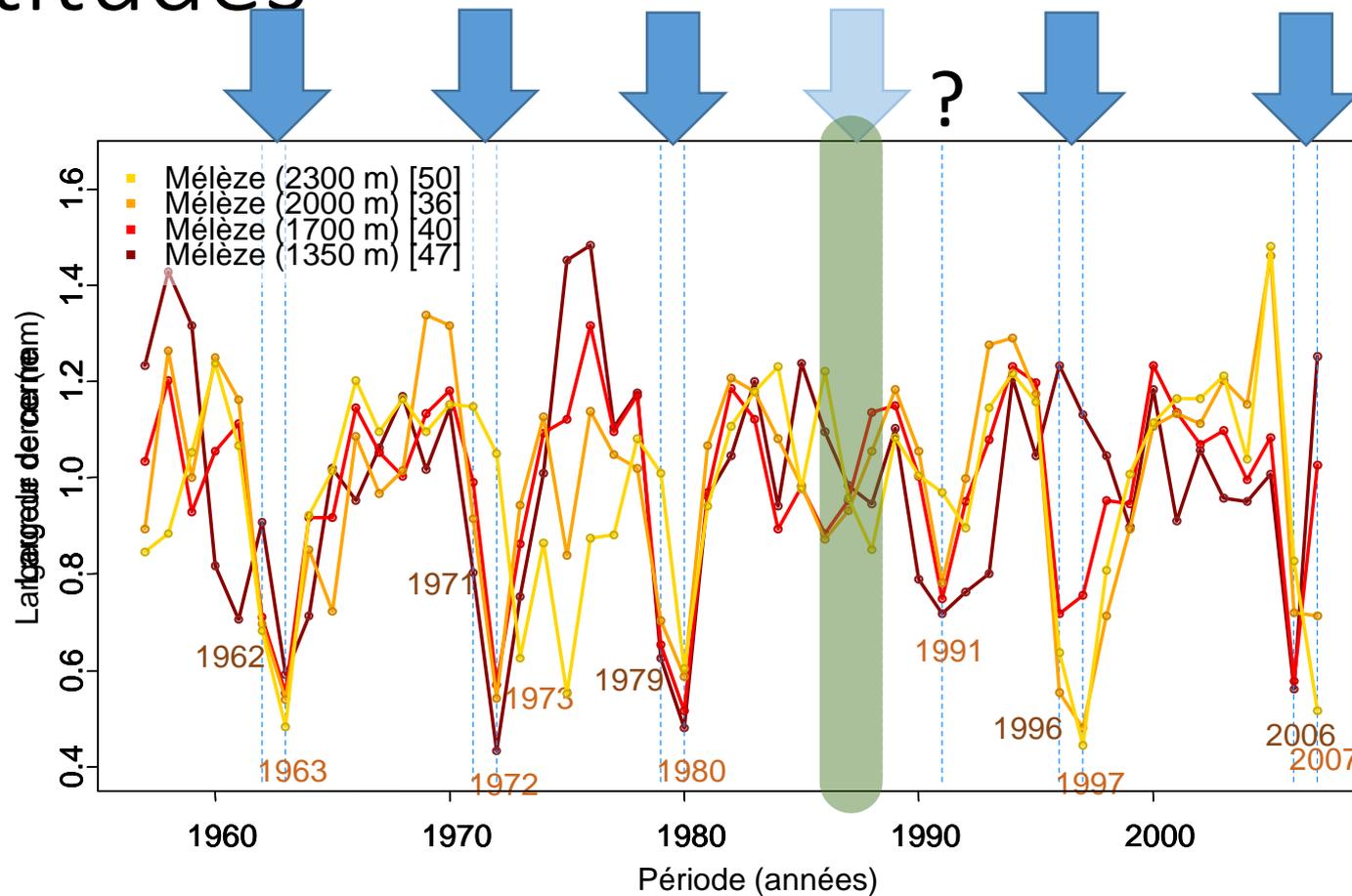
Altitude 2300 m



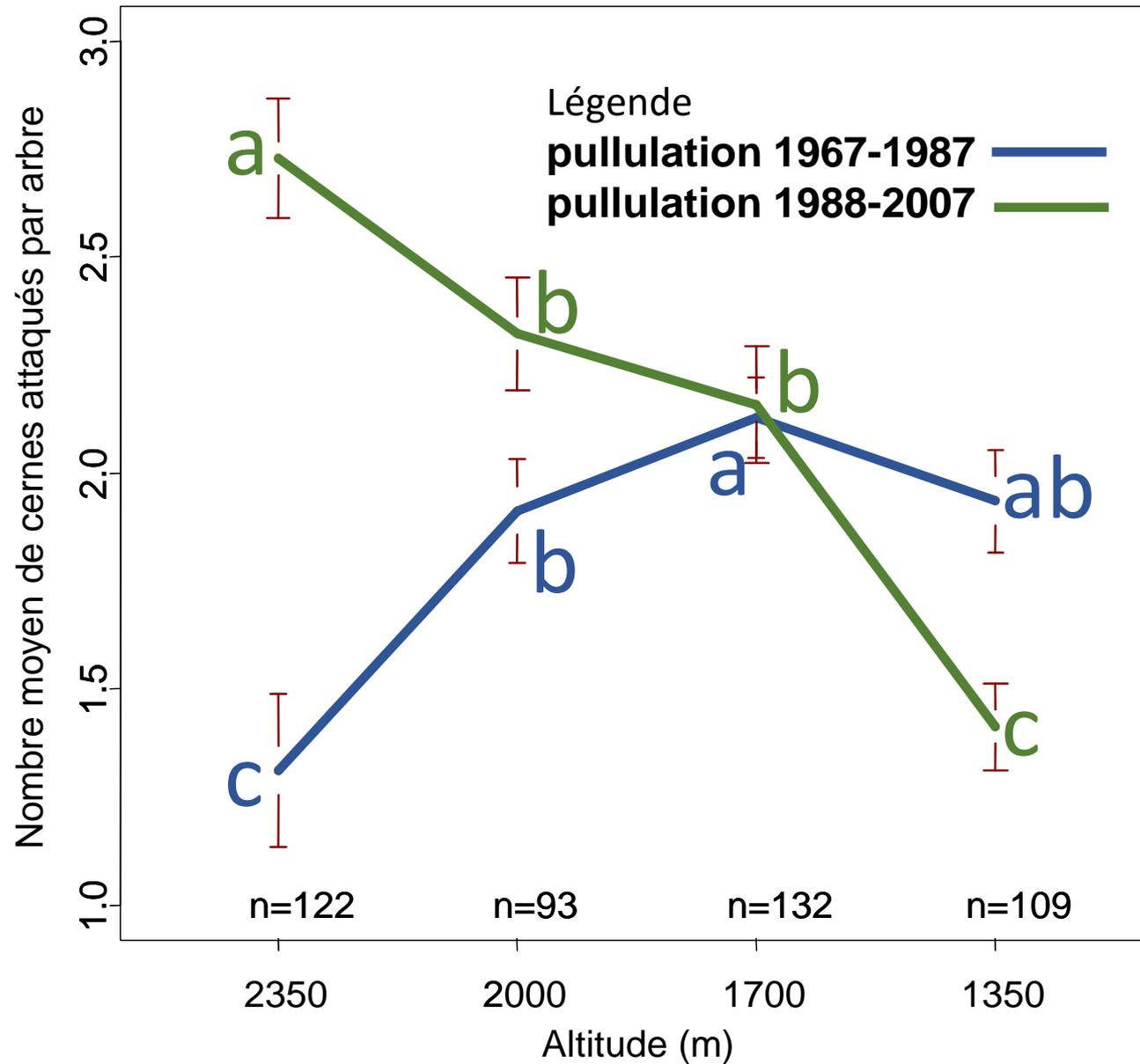
Tordeuse du mélèze insecte défoliateur du mélèze



Tordeuse du mélèze à différentes altitudes



La tordeuse du mélèze remonte



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 ?

Une réponse adaptative individuelle et à court terme: la plasticité phénotypique

- Capacité d'un génotype à former différents phénotypes quand il est exposé à des conditions environnementales variées
 - Plasticité spatiale :
 - ... Capacité des copies végétatives d'un génotype à former des phénotypes différents quand elles sont installées dans des milieux avec des conditions environnementales variées
 - Plasticité temporelle :
 - ... Capacité d'un génotype (*individu*) à former différents phénotypes quand son environnement varie avec le temps





a

b

c

d

21

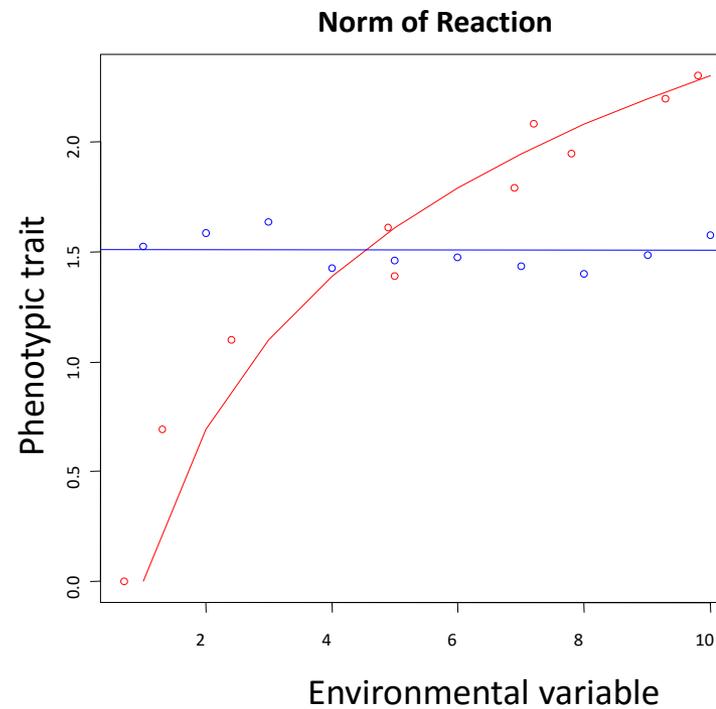
5

26

91

Mesure de la PP

- Norme de réaction



Définir l'environnement

- Site géographique
- Temps (moment)
- Partenaire biotique
 - ... Capacité d'un génotype à former des phénotypes distincts quand il interagit avec d'autres organismes vivants
 - Résistances*
- *Quantifier l'environnement pour construire des normes de réactions*

Mécanisme d'adaptation ?

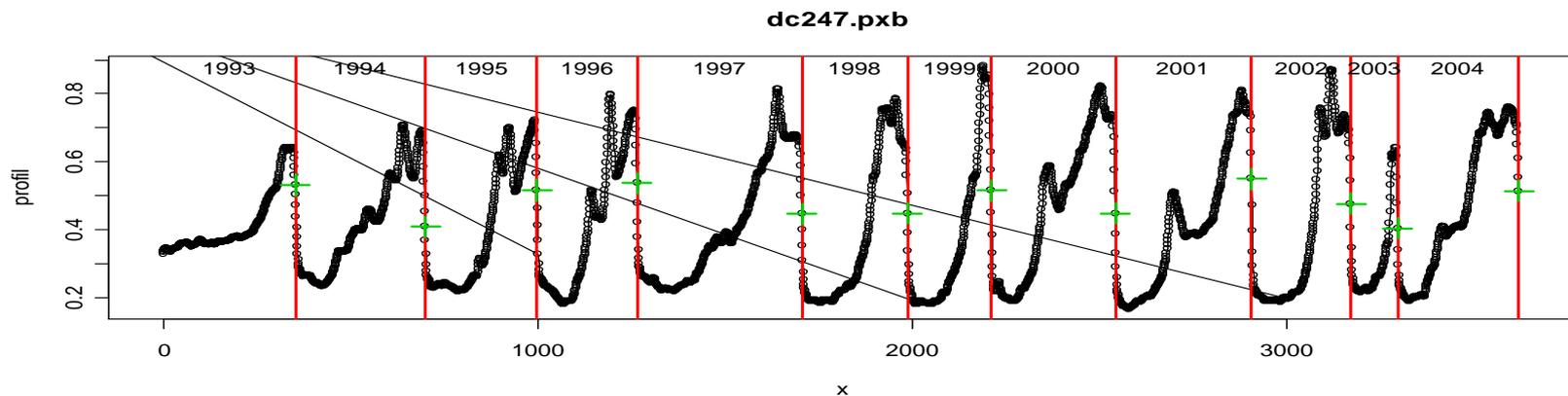
- ▶ Adaptation : tout ajustement phénotypique ou génétique améliorant la *fitness* dans un environnement donné
- ▶ Bradshaw 1965
« if the duration of the environmental fluctuation is much less than the generation time, any adaptation that occurs can only take place by plasticity »
- ▶ Thompson 1991
« phenotypic plasticity is adaptive when the appropriate phenotype in each environment results in a higher fitness in that environment compared with the alternative phenotype »

Les arbres sont de bons modèles pour la PP

- Arbres
 - fixés, pérennes, longue durée de vie
 - mécanisme important d'acclimatation et d'adaptation
- Mais chez les arbres forestiers la fitness est difficile à estimer
- (Sauf sa composante “survie”)

Les cernes sont bien adaptés à l'étude de la PP

- Climat tempéré
- Accès rétrospectif
- PP spatiale (clones) et temporelle



Le bois et la PP temporelle

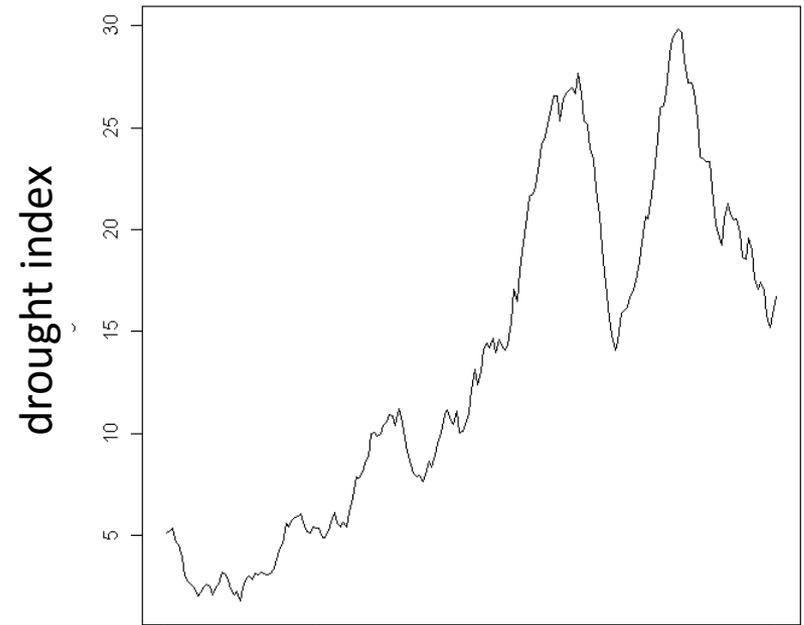
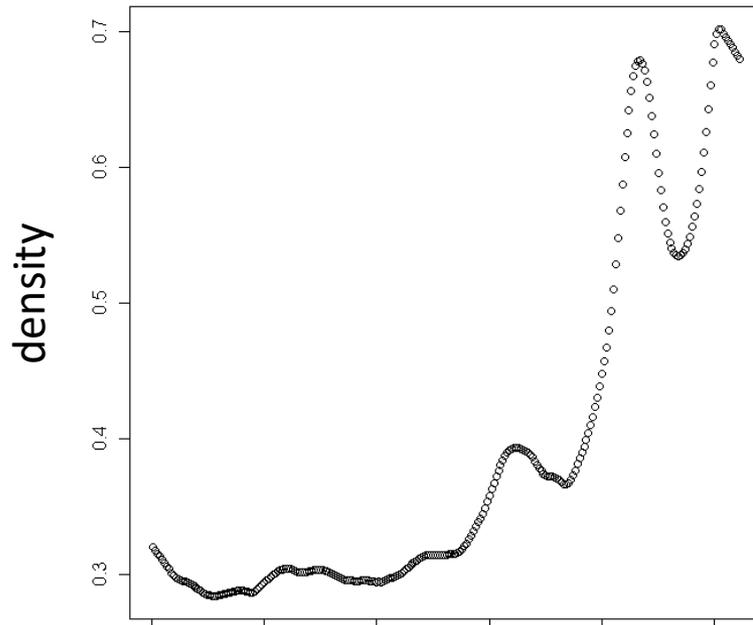
- **Etude rétrospective** de la réponse d'un individu (= génotype) aux variations environnementales
- Forte variation **intra-cerne** (la plus forte)
- Fort changement **environnemental** entre le début et la fin de la saison de croissance (climat)
- **Valeur adaptative** liée à la fonction de conduction
- Autant de **répétitions** que de cernes disponibles

A. Martinez-Meier, L. Sanchez, G. Dalla-Salda, L. Gallo, M. Pastorino, and P. Rozenberg. Ring density record of phenotypic plasticity and adaptation to drought in Douglas-fir. *accepted in Forest Ecology and Management*, 2009

Dendroplasticité

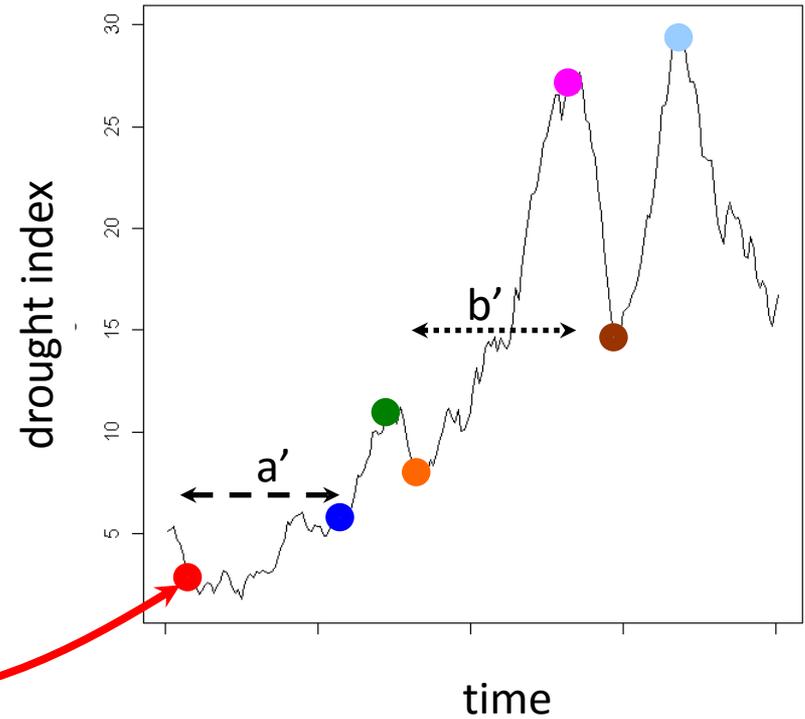
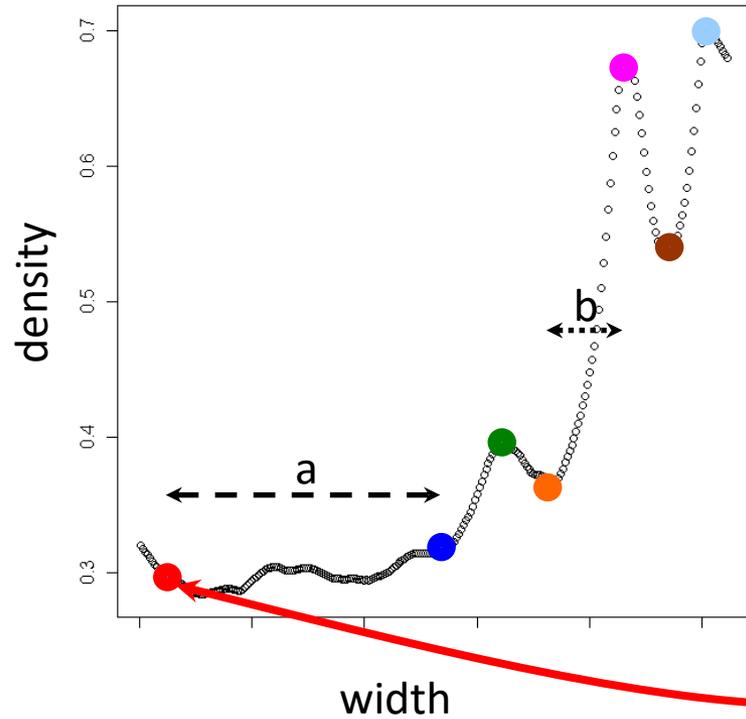
(néologisme)

- Profil de cerne + indice climatique intra-saison de végétation = **norme de réaction**



Ring Width ← ———— → Time

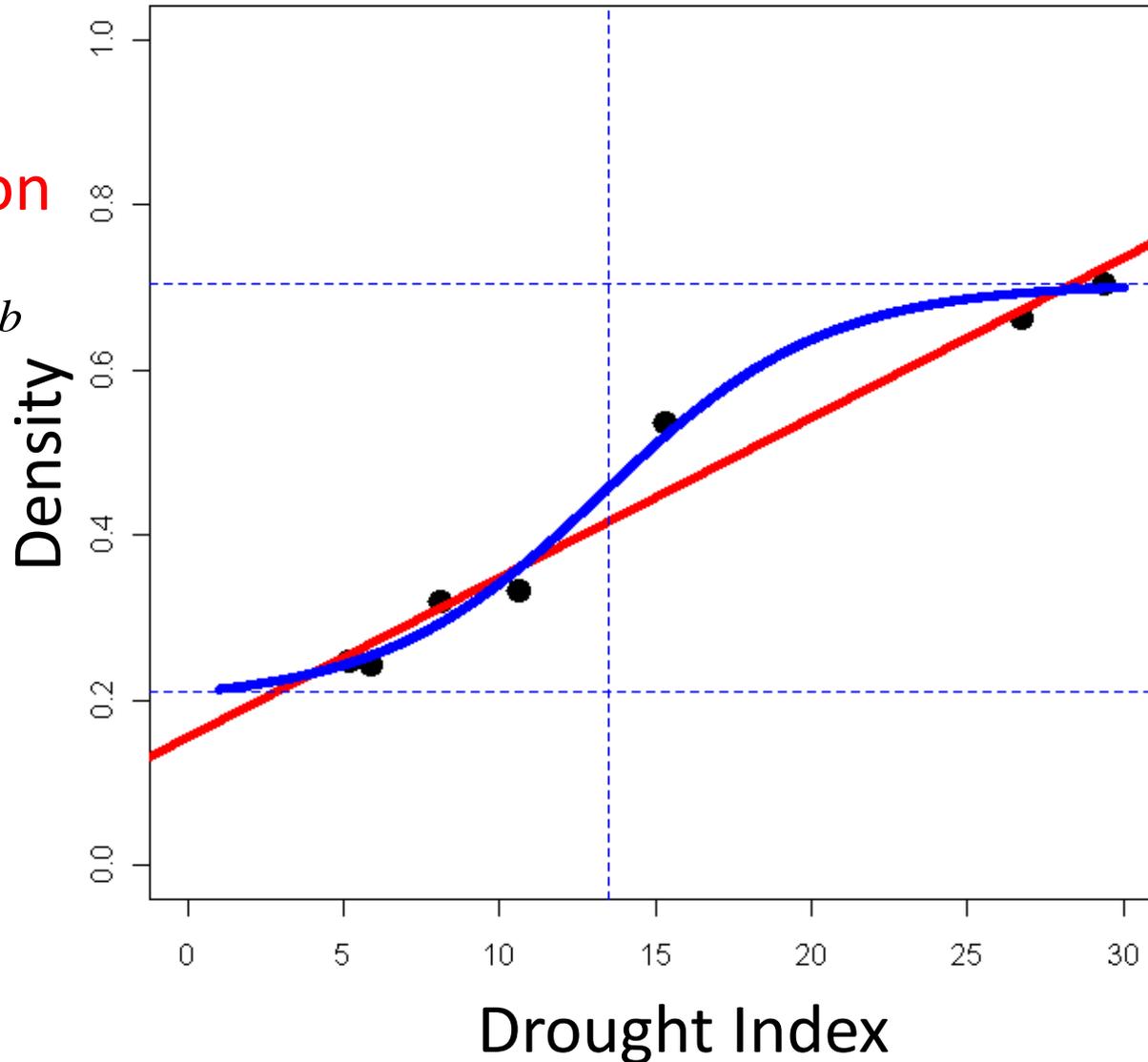
Méthode « points de ruptures »



Norme de réaction

Linear regression

$$y = a \times x + b$$



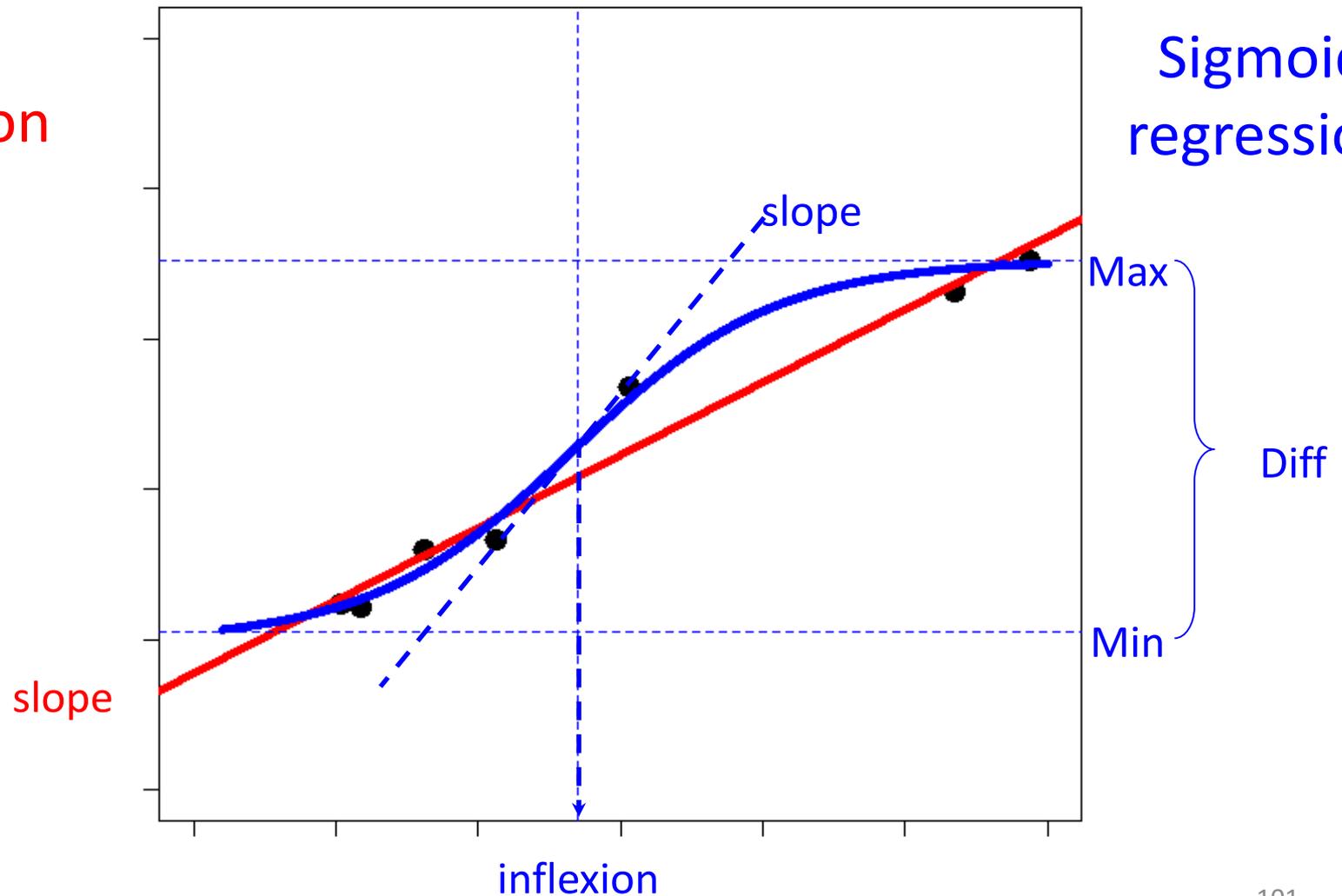
Sigmoid regression

$$y = c + \frac{d - c}{1 + \exp^{b(x-e)}}$$

Paramètres de la norme de réaction

Linear regression

Sigmoid regression



Variation de la dendroplastocité

- Sigmoide = le meilleur ajustement
- Différences significatives entre arbres morts et survivants (**PP plus forte chez les survivants**, *Martinez-Meier et al 2009*)
- Variation génétique significative
- Héritabilité faible à modéré (de **0,16 à 0,70**, douglas, *Martinez-Meier et al 2009*, pin maritime *Bouffier et al*)
- Sélectionnable et transmissible

Comment utiliser ces résultats ?

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



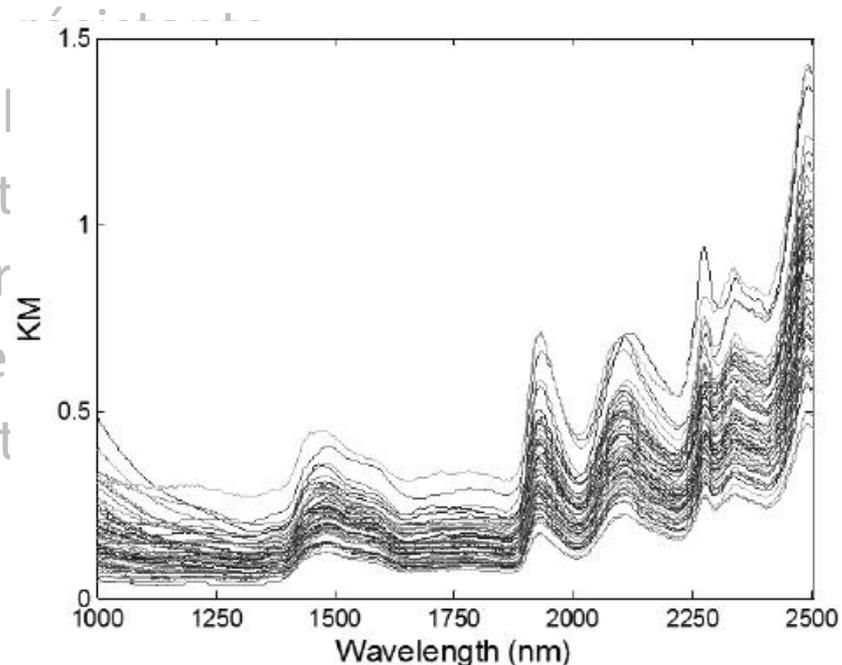
Perspectives : comment utiliser ces résultats ?

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



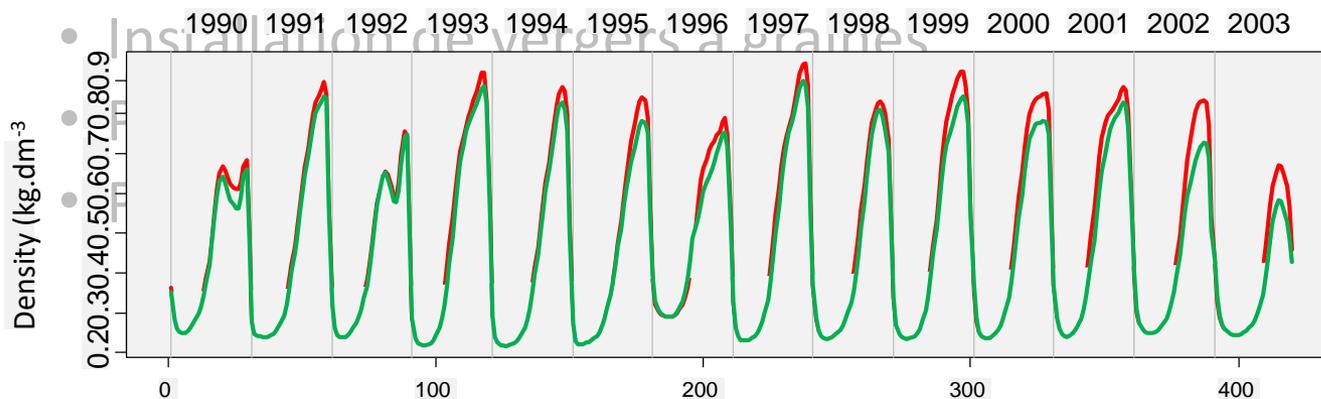
Forêts plantées

- 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 verger
 - Production de graine
 - 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





ndividus
rs ?

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



- 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...
- Perspectives

- Sélection

- Croisements artificiels

- Tests des descendants

- **Installation de vergers à graines**

- Production de graines

- Production et plantation de variétés résistantes

dividus
s ?

Forêts pla

- Programme o
 - 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

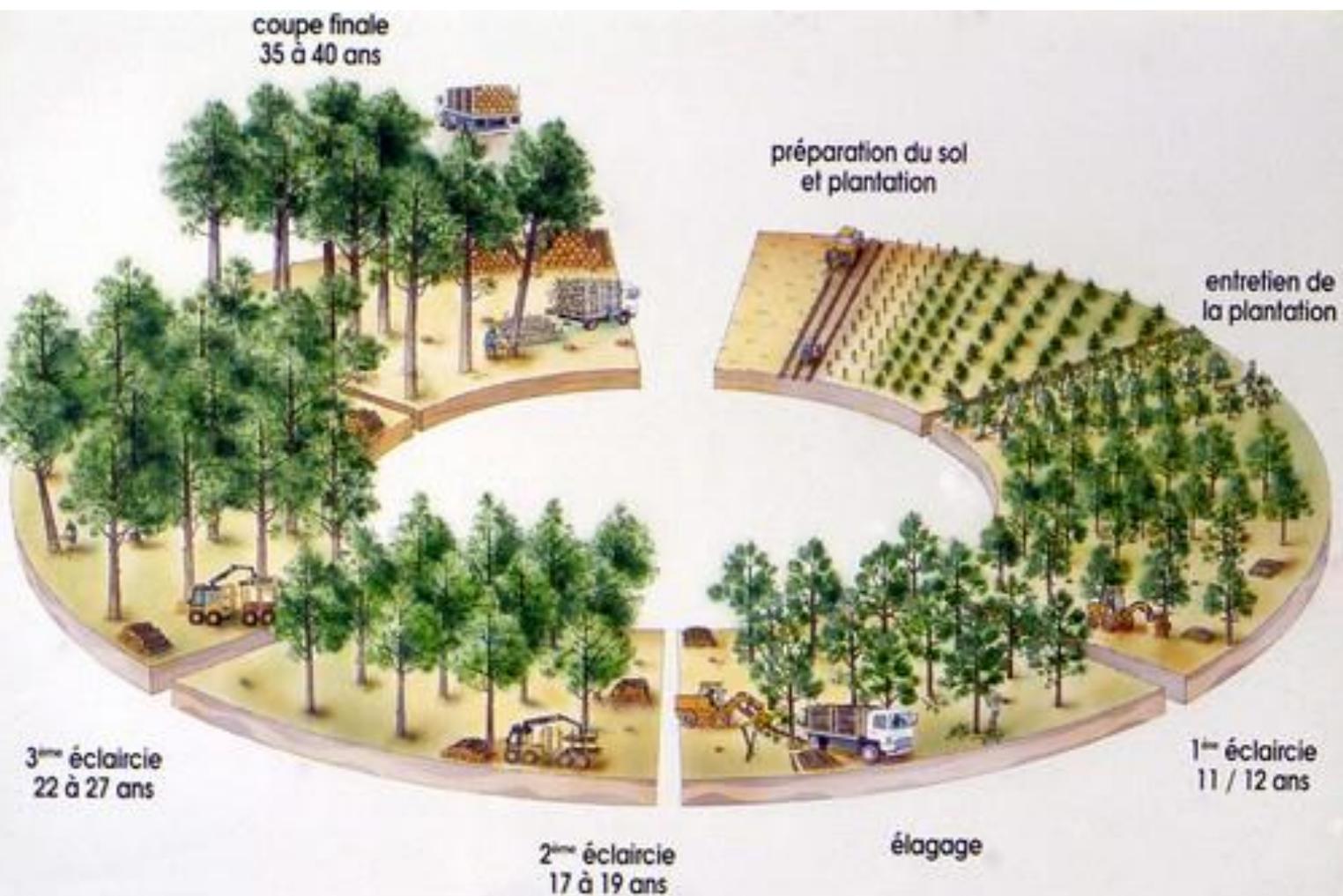
- Pr

- Production et plantation de variétés résistantes



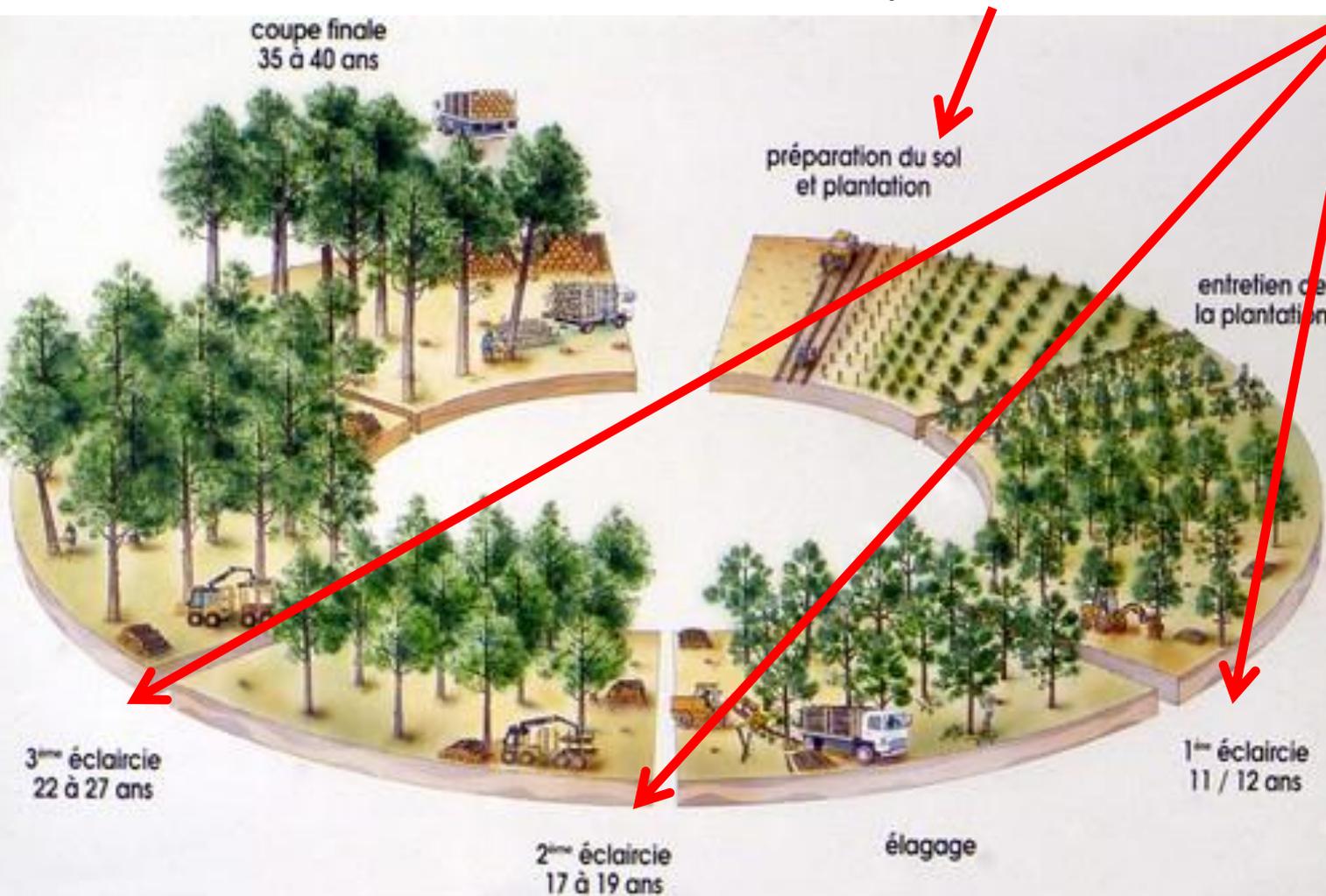
dividus
?

Sylviculture



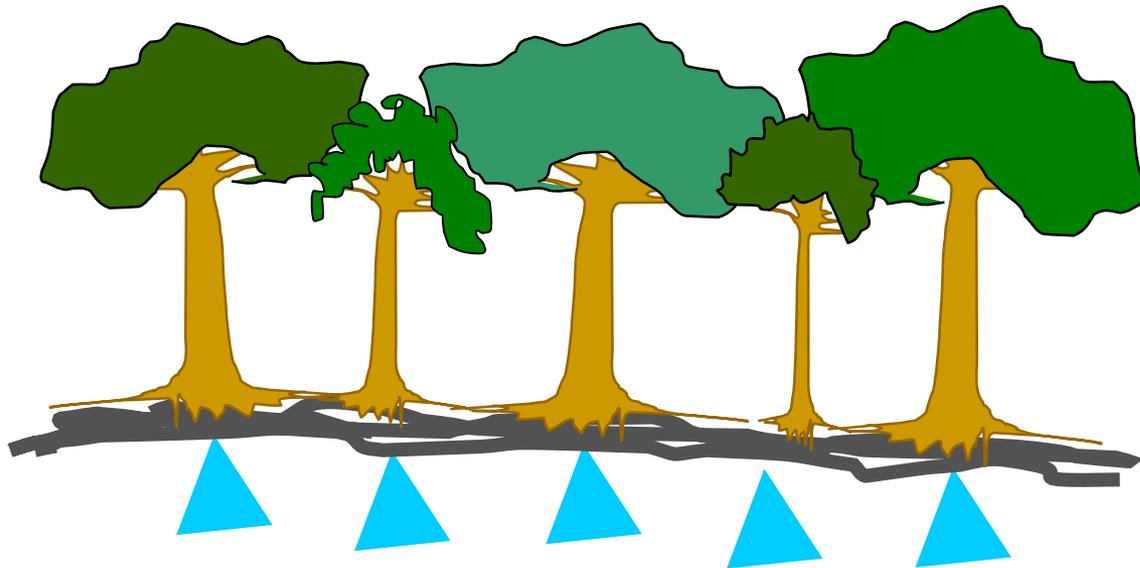
Sylviculture

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



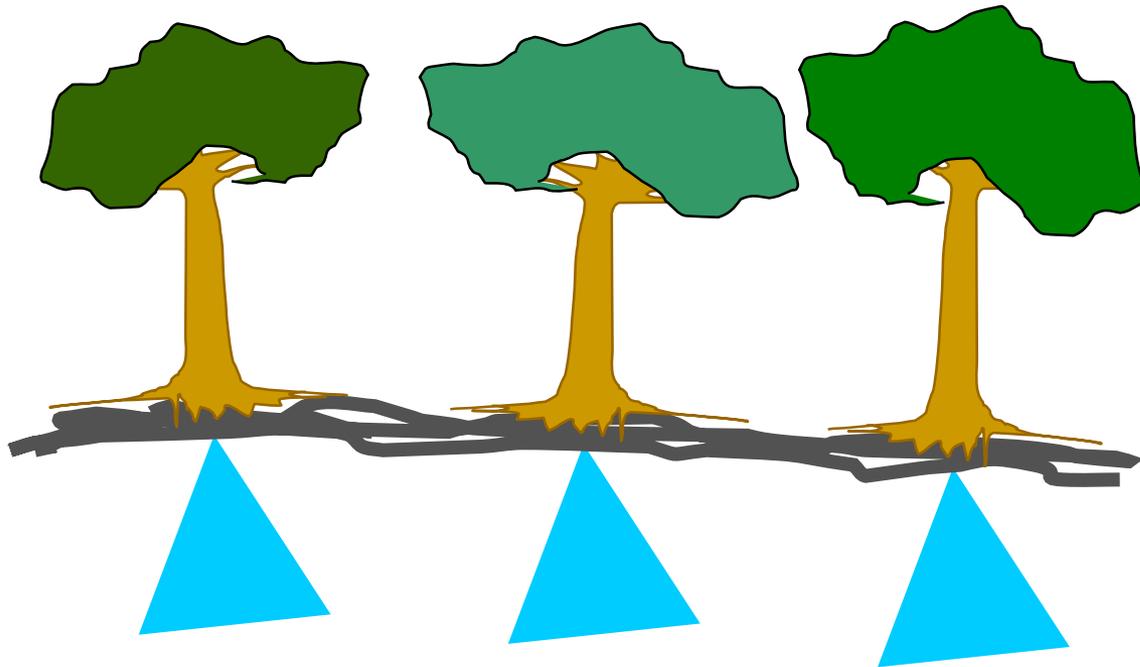
Sylviculture

- 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

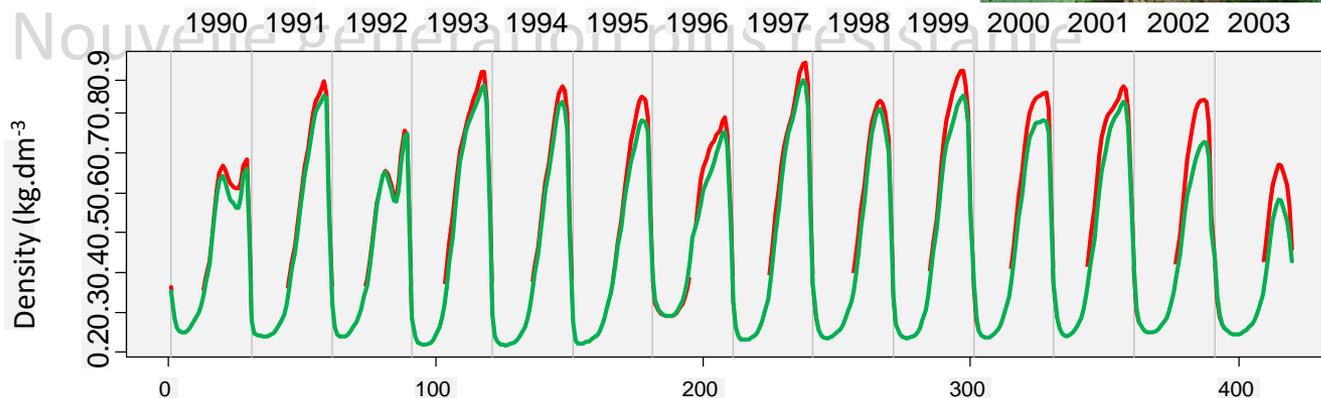
- Repérage des arbres résistants

- Élimination des autres arbres

- Croisements naturels

- Production de graines et de sem

- Nouveaux arbres



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
- Nouvelle génération plus rés



Forêts régénérées naturellement

- Me

-

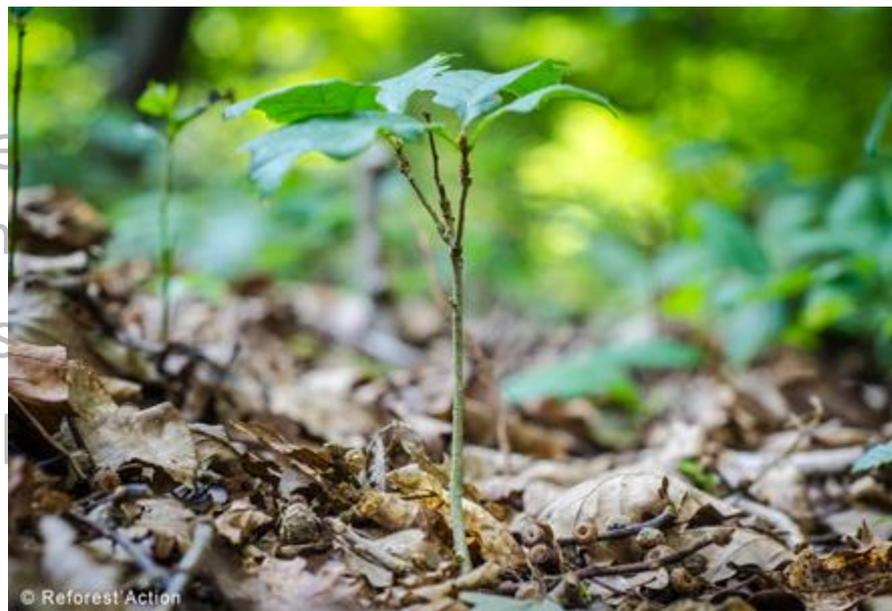
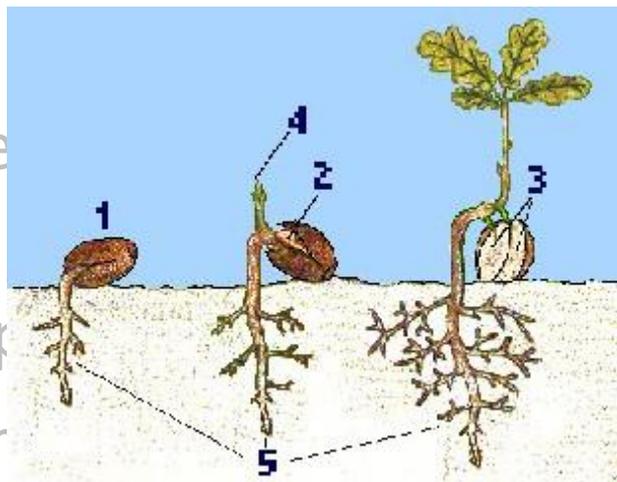
- Rep

- Étir

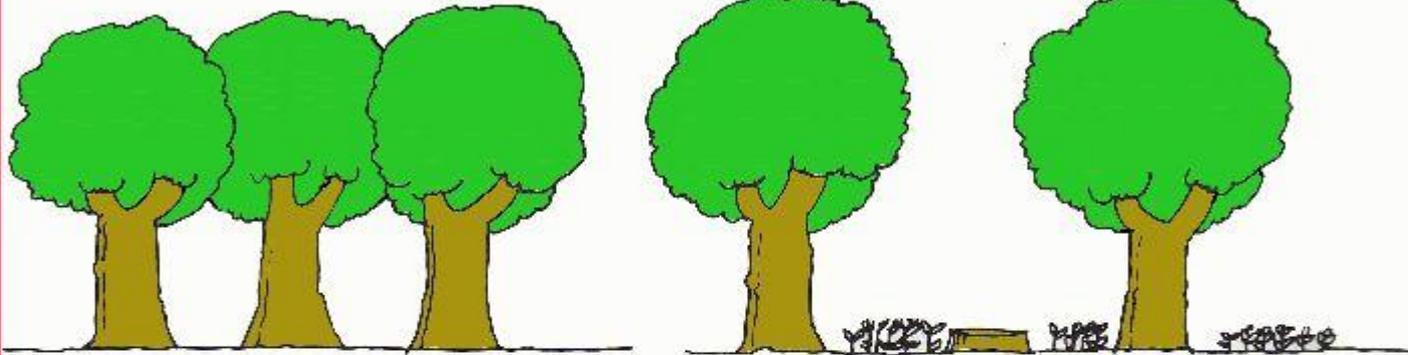
- Croisements naturels

- Production de graines et de semis

- Nouvelle génération plus résistante

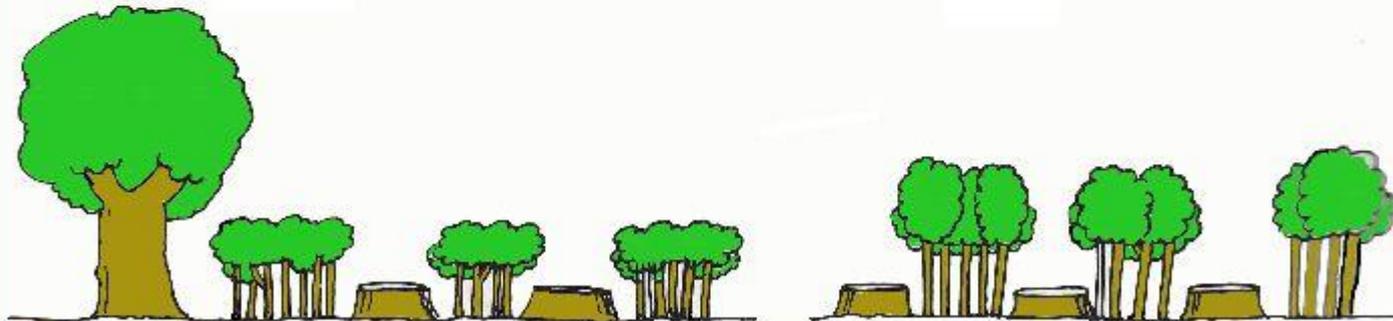


Coupe de régénération



1 : Peuplement à maturité

2 : Coupe d'ensemencement



3 : Extraction sur régénération acquise

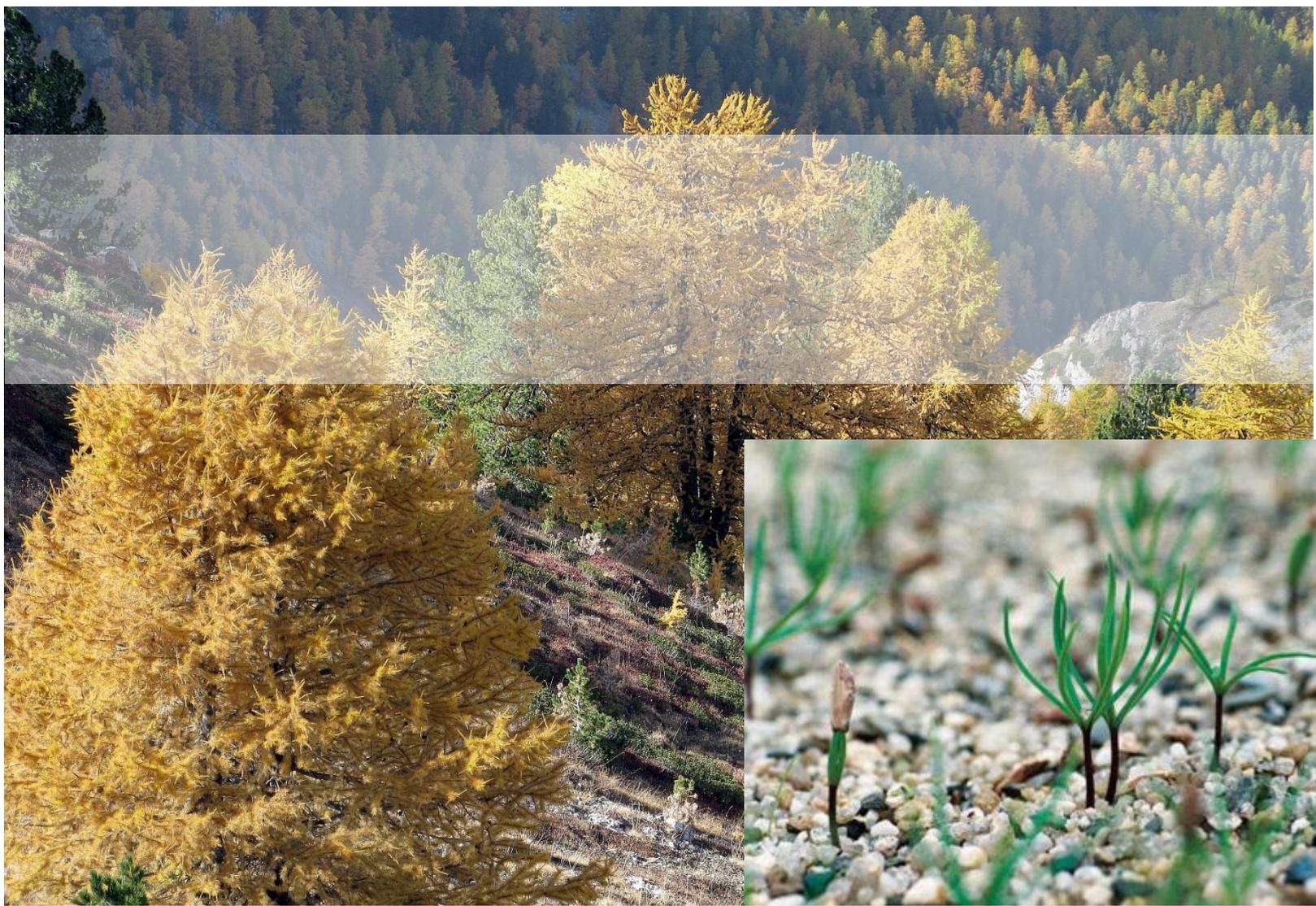
4 : Coupe définitive

- 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





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