

Prédiction de la phénologie des forêts tempérées françaises selon différents scénarios de changement climatique

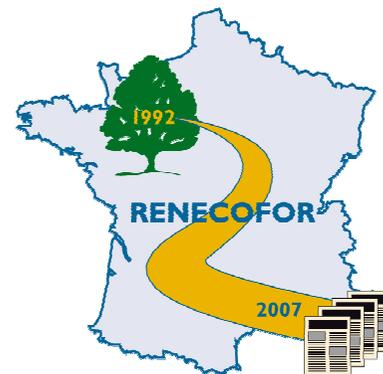
F. Lebourgeois, J.C. Pierrat et V. Perez
Avec la collaboration de C. Piedallu, S. Cecchini, E. Ulrich



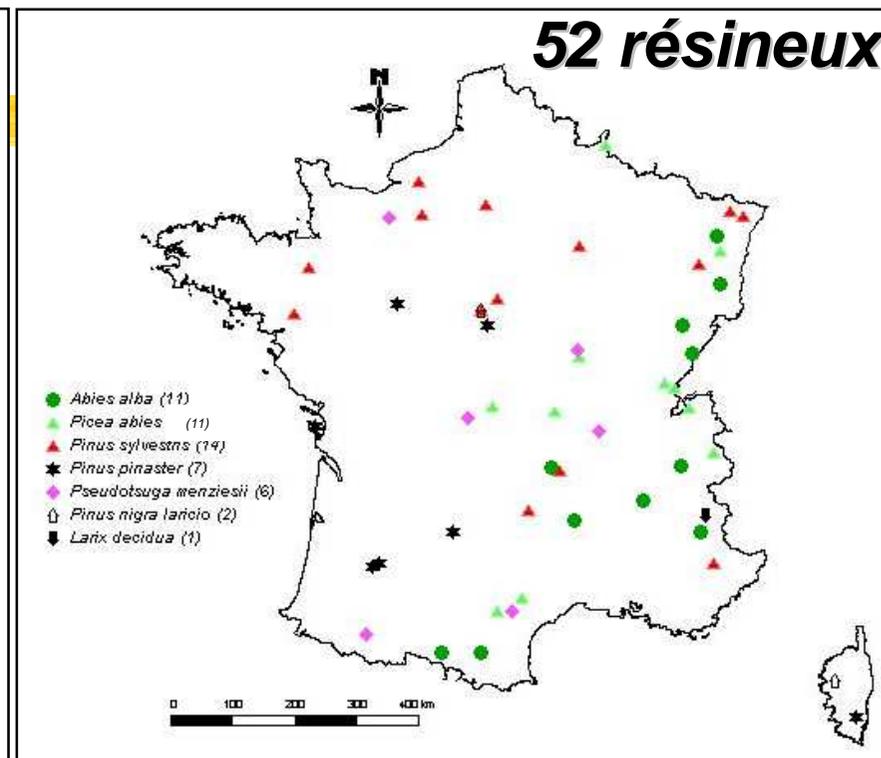
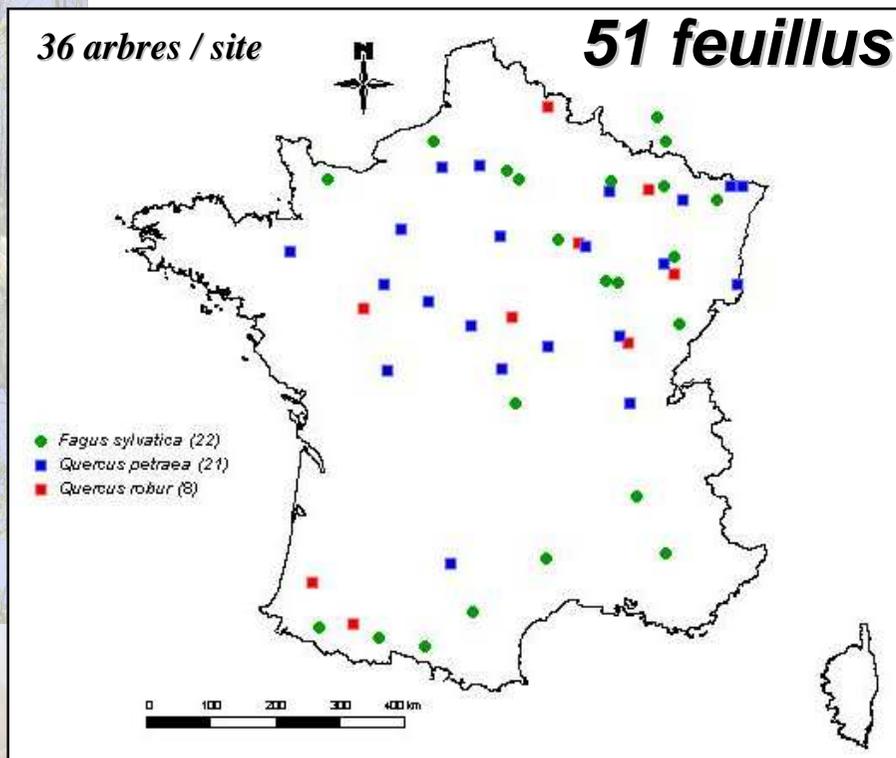


Plan

- **Peuplements et protocoles**
- **Objectifs et méthode** (*Random Forest*)
- **Résultats**



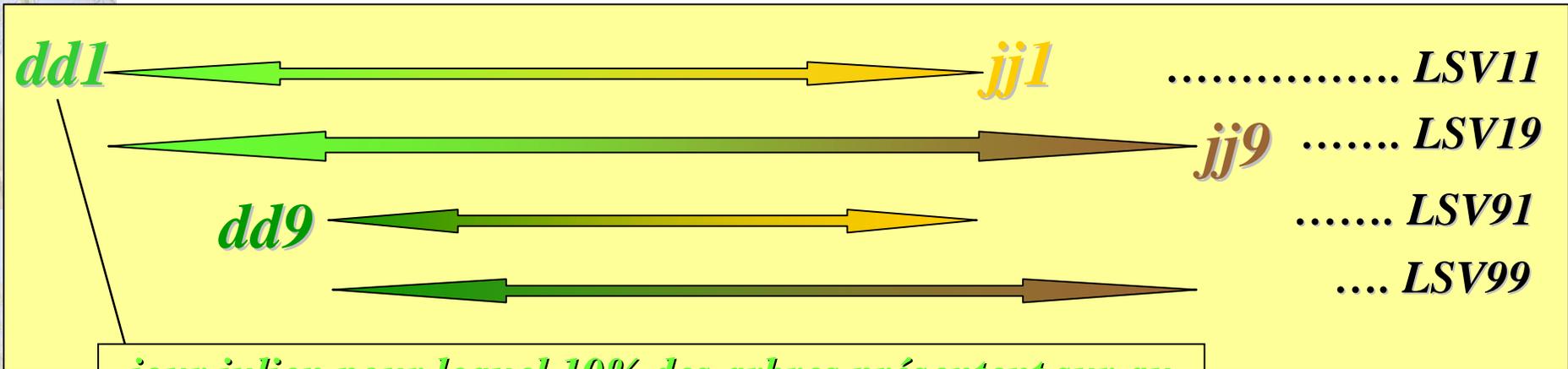
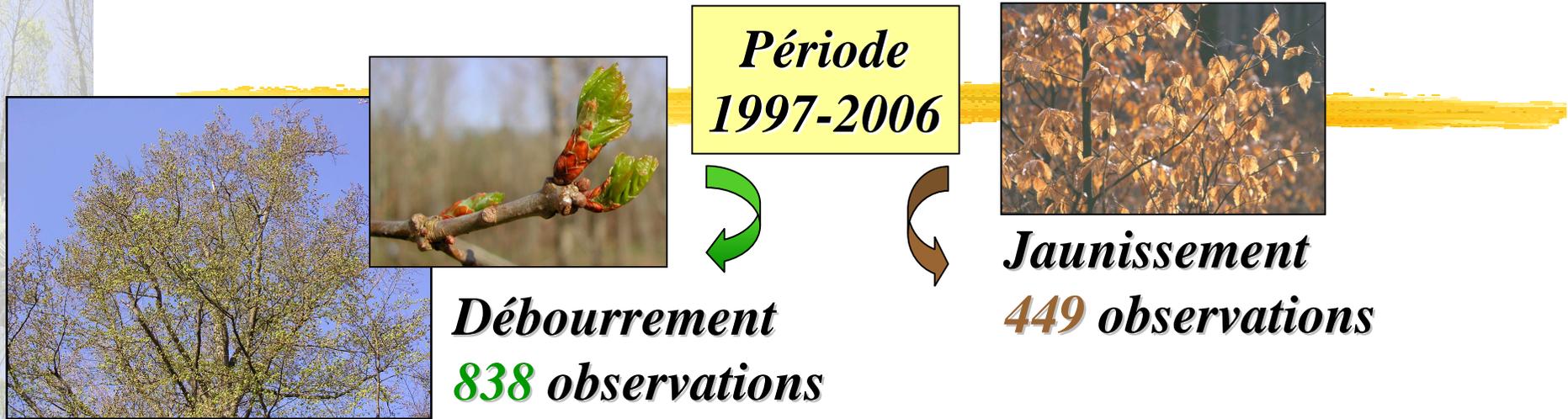
Peuplements et protocole des observations



	Peuplement	Nb arbres
<i>Fagus sylvatica</i>	22	792
<i>Quercus petraea</i>	21	756
<i>Quercus robur</i>	8	288
	51	1836

<i>Pinus sylvestris</i>	14	504
<i>Abies alba</i>	11	396
<i>Picea abies</i>	11	396
<i>Pinus pinaster</i>	7	252
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6	216
<i>Pinus nigra ssp. Laricio</i>	2	72
<i>Larix decidua</i>	1	36
	52	1872

Peuplements et protocole des observations



jour julien pour lequel 10% des arbres présentent sur au moins 20% du houppier des bourgeons ouverts

Les feuillus : 8 phases

Les résineux : 2 phases

Objectifs

1. **Quantifier** la variabilité...

- interspécifique
- spatiale
- inter-annuelle



(Lebourgeois et al. 2002, 2008)

2. **Construire** des modèles permettant d'expliquer la variabilité à l'échelle de la France

=> variables géographiques, climatiques

=> Régression par Forêts d'arbres aléatoires (RandomForest)

3. **Utiliser** ces modèles pour prédire les phénophases à l'échelle de la France

=> période 1991-2000 (référence, Tyndall, 15x15 km²)

=> périodes 2041-2050 et 2091-2100

. 2 scénarios: A2 et B2

. 4 modèles de circulation: HadCM3, CGCM2, CSIRO2, PCM

New et al. 2002, *Climate Research*, 21, 1-25

Mitchell et al. 2004, *Tyndall Centre Working Paper*, N55, 1-25



Méthode

Régressions multivariées...

phénophases = F(genre, altitude, température, ETP, Rg,...)

Problèmes...

- nombreuses variables explicatives (ici 89)
- variables corrélées
- interactions multiples
- pas de normalité des variables (intervalle de confiance)

DONC...

Par arbre (**CART**) et Forêts d'arbres aléatoires (**Random Forest**)

BREIMAN L. - Bagging predictors. - Machine Learning, vol. 24, n°1996, pp. 123-140.

BREIMAN L. - RandomForests. - Machine Learning, vol. 45, n°2001, pp. 5-32.

LIAW A., WIENER M. - Classification and regression by randomForest. - R News, vol. 2-3, n°12, 2002, pp. 18-22.



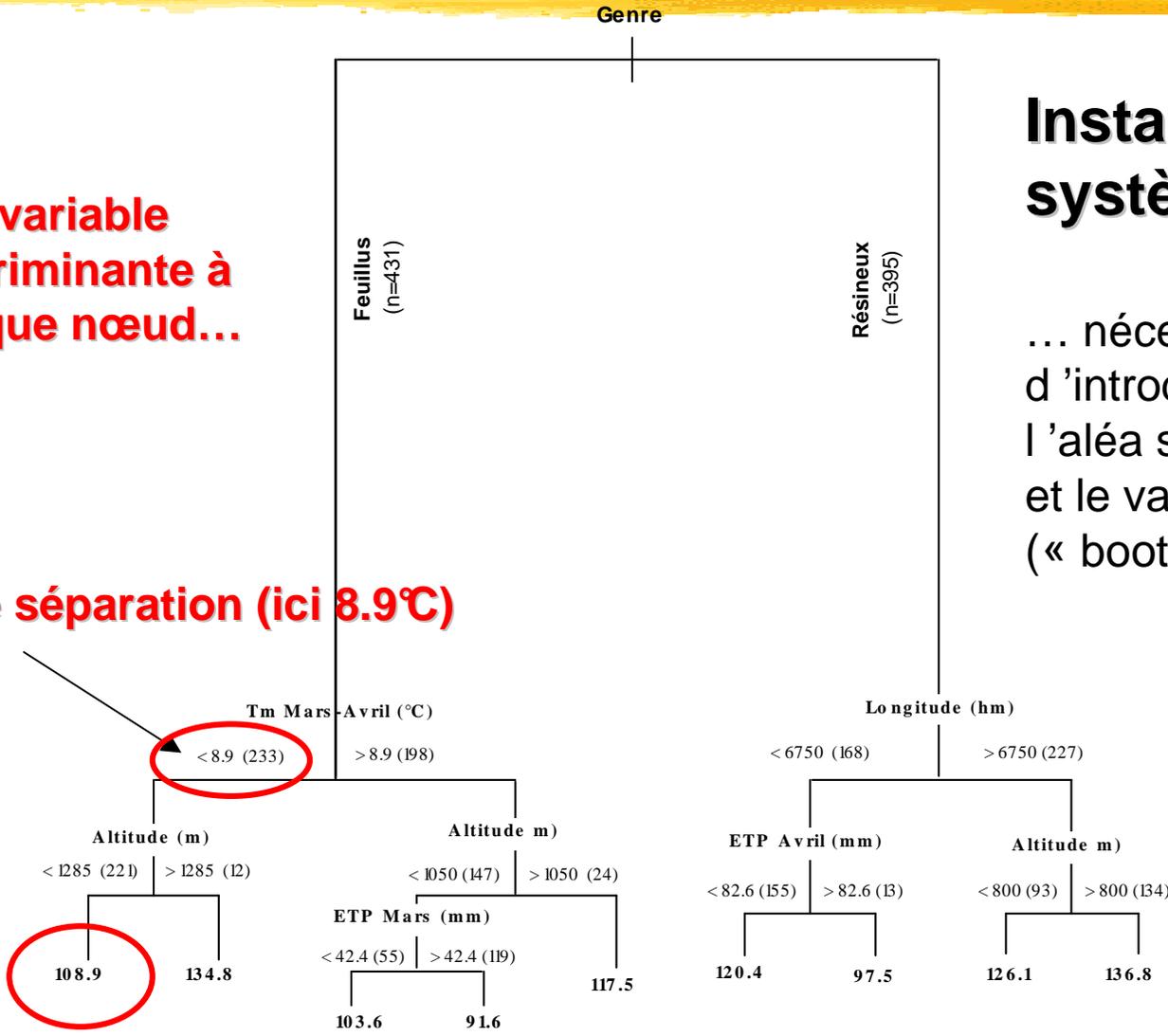
Méthode

Première possibilité... Régression par arbre simple

Une variable discriminante à chaque nœud...

Seuil de séparation (ici 8.9°C)

Valeur du facteur étudié (ici dd1)



Instabilité du système !

... nécessité d'introduire de l'aléa sur les ind. et le var.
(« bootstrap »)



Méthode

Seconde possibilité... Régression Forêts d'arbres aléatoires

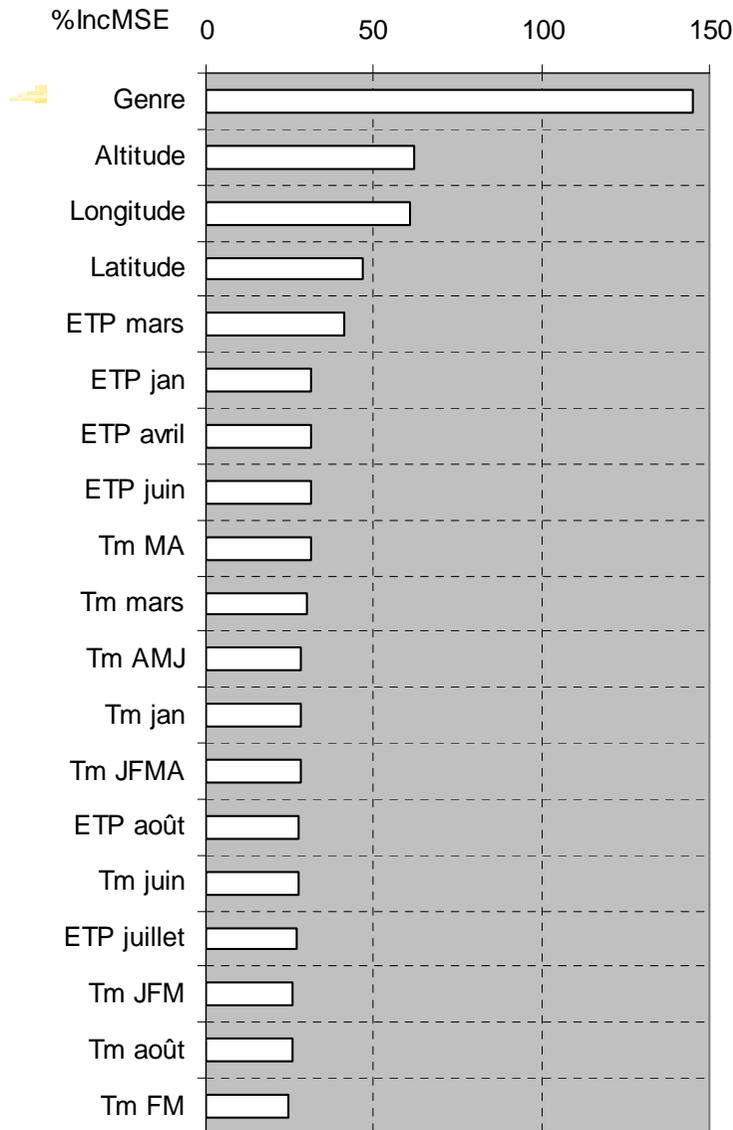
Pourquoi ça marche?

- Moyenne des B arbres stabilisée si les arbres sont peu corrélés : restreint l'ensemble des variables à chaque noeud
- Donne de surcroît
 - la qualité d'ajustement du modèle et de la prédiction
 - la précision oob (« out of bag error »)
 - %IncMSE = variable d'importance



Méthode

Seconde possibilité... Régression Forêts d'arbres aléatoires



Ordre décroissant de l'importance des variables

Indice d'importance : %incMSE
Erreur obtenue en cas de permutation de la variable...

choix de l'opérateur

ntree = nb d'arbres (ici 10000)

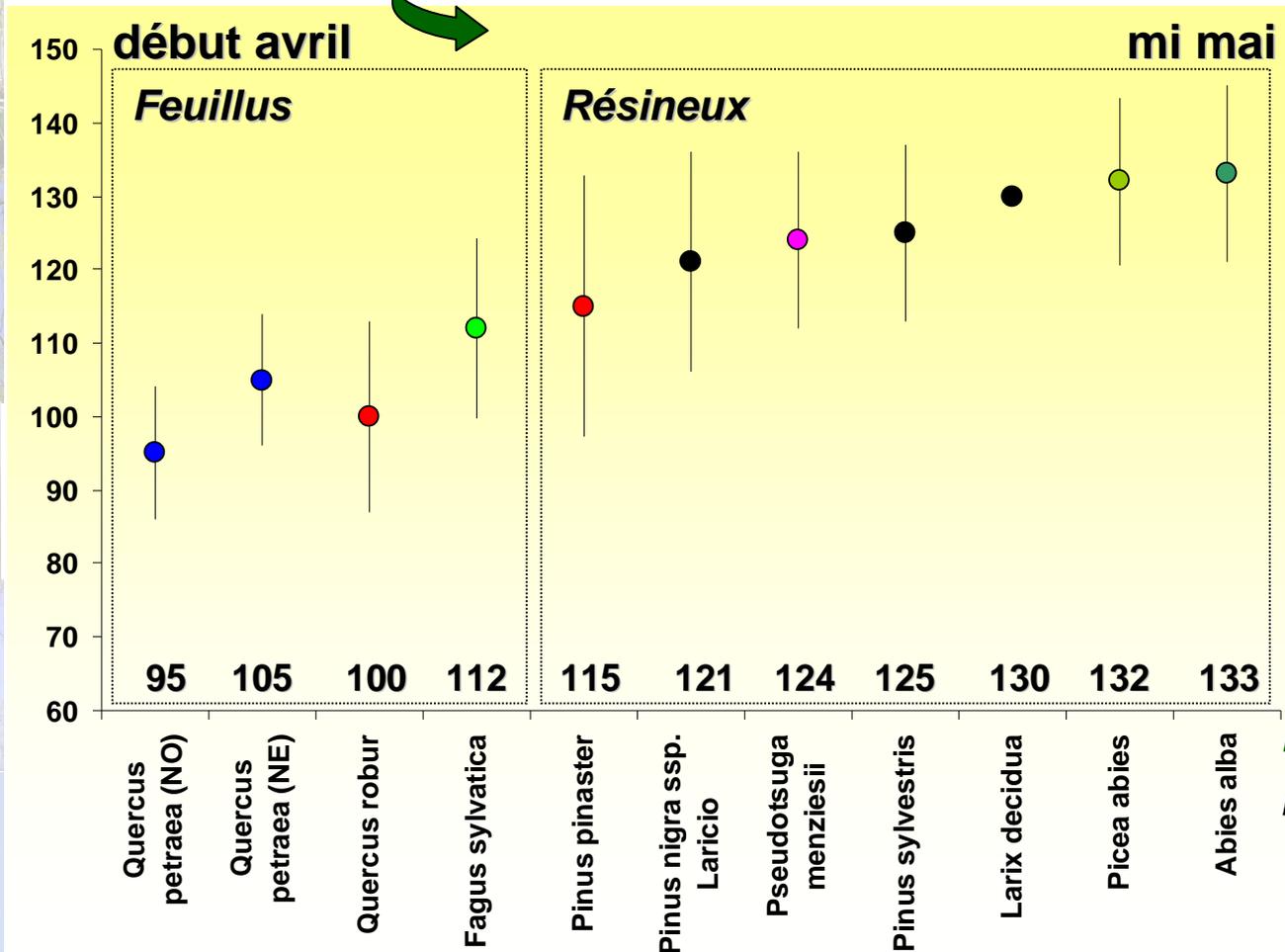
mtry = nb de variables pour différencier les niveaux (ici 4)

=> Puis nombre total de variables conservées (ici max 10)

Résultats...

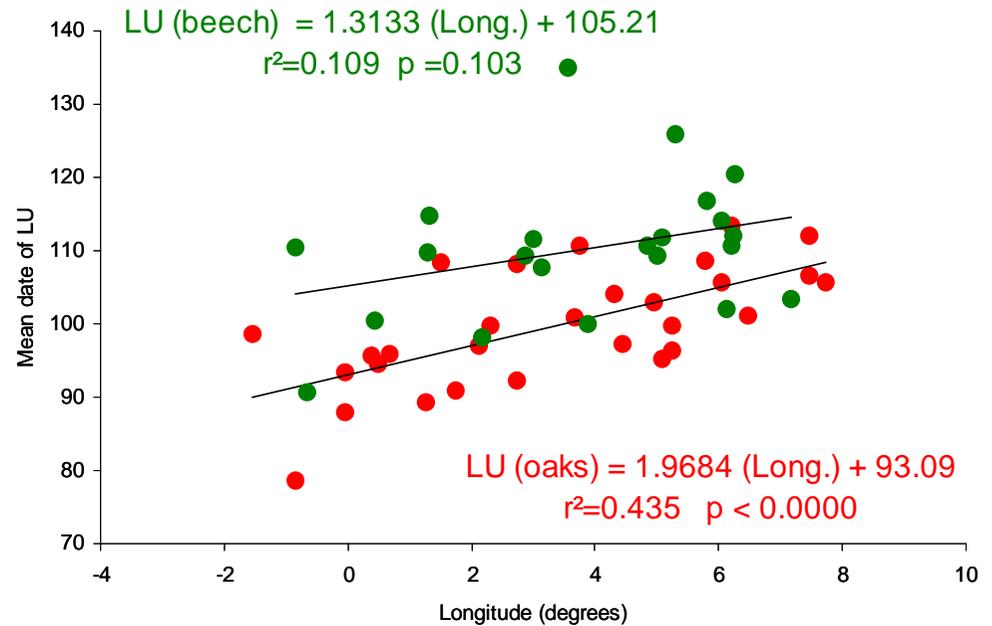
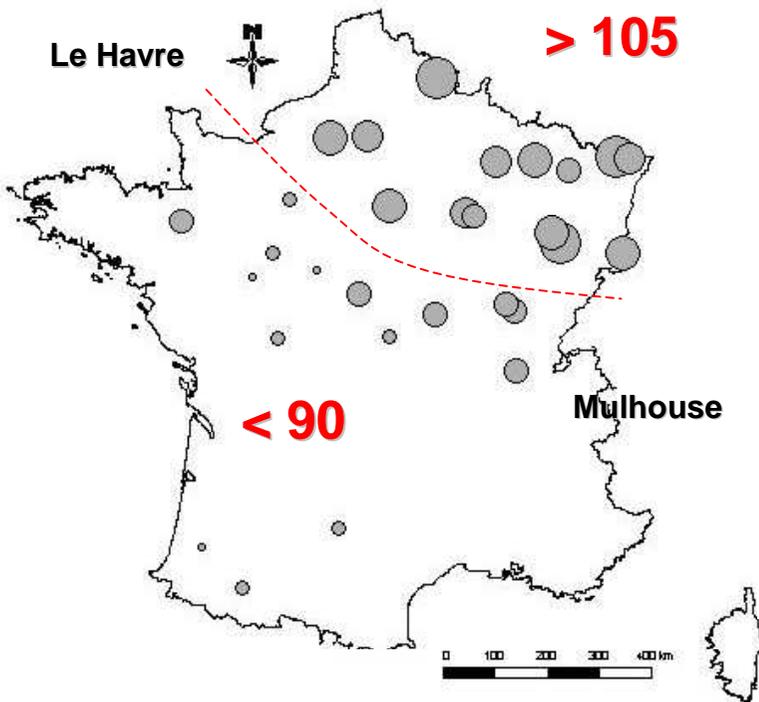
12 mars EcType : 17.3 jours 30 juin

←-----→
dd1, 1997-2006, 838 observations



Durée (dd9-dd1)
moy. 10 jours

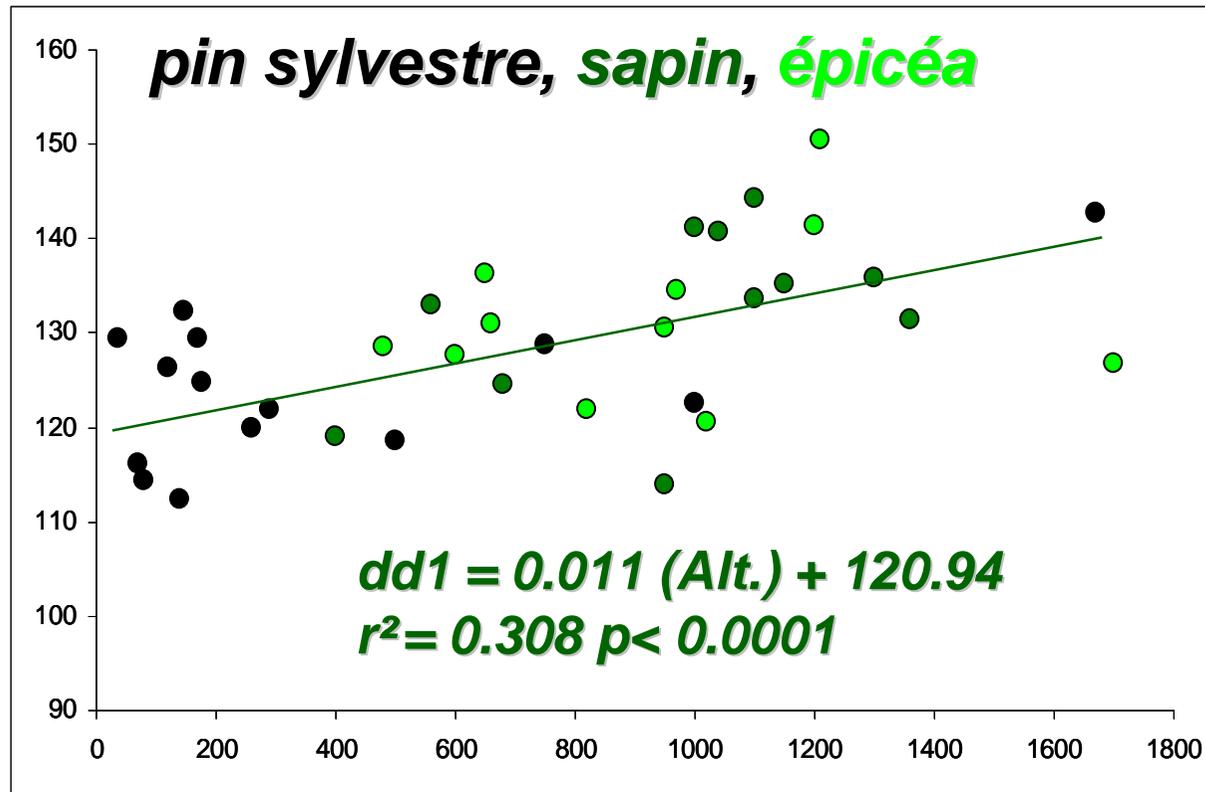
Résultats... variabilité géographique



Exemple des Chênes...
effet de la longitude... gradient Ouest-Est

Résultats... variabilité altitudinale

(gamme 15 à 1850 m)



Toutes les espèces : retard 2 jours / 100 m

Résultats... effet thermique

Périodes clés:

- mars - avril (mai)
- ETP Turc et/ou Tmoy °C
- r² 0.16 à 0.65

ETP : +10 mm

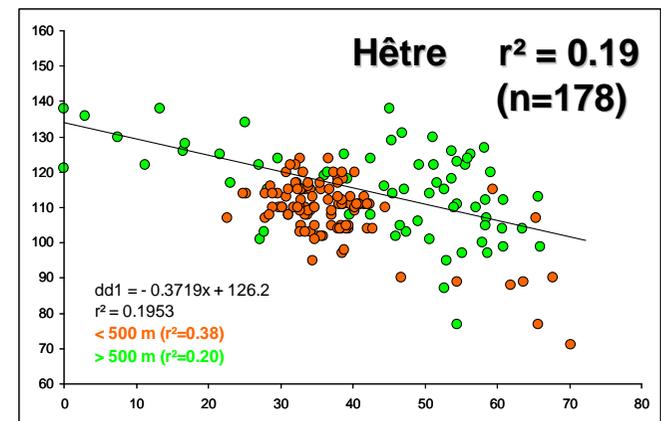
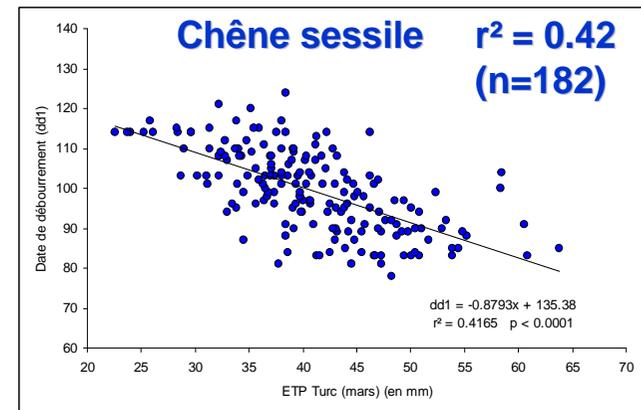
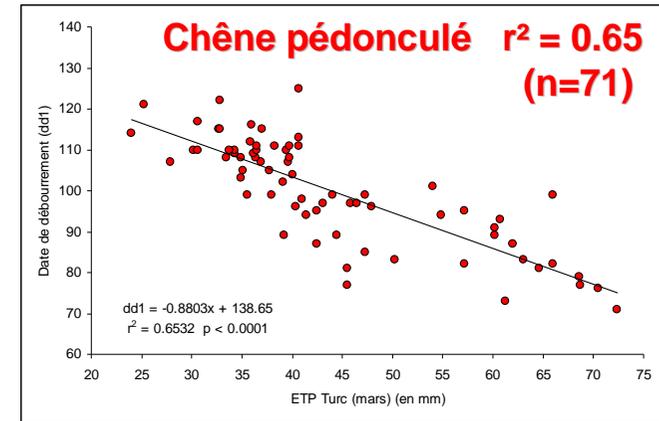
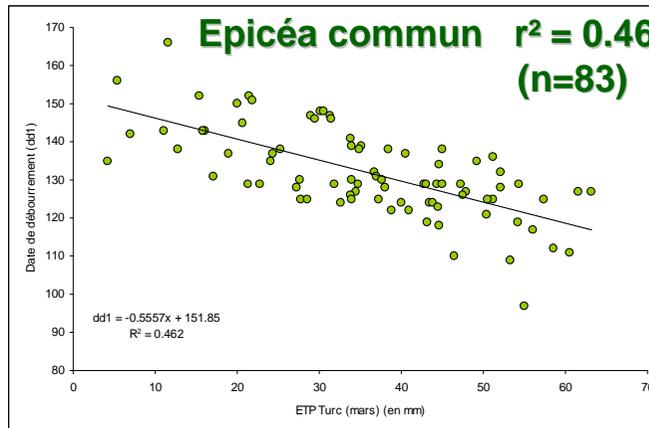
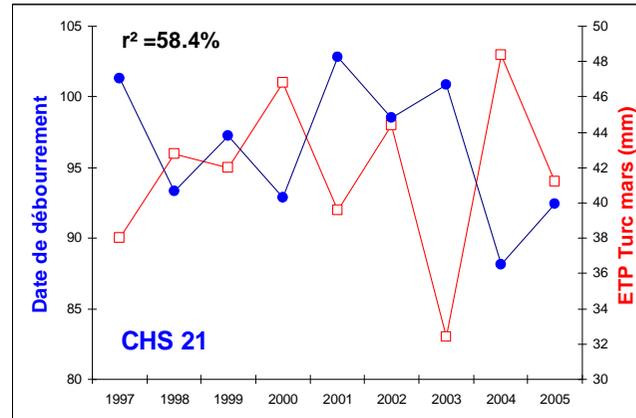
Avancée de...

↓
4 à 9 jours

Tmoy : +1°C

Avancée de...

↓
2 à 5 jours



Résultats... Analyse multivariée: Forêts d'arbres

Modèles « non » transposables / transposables



Débourrement

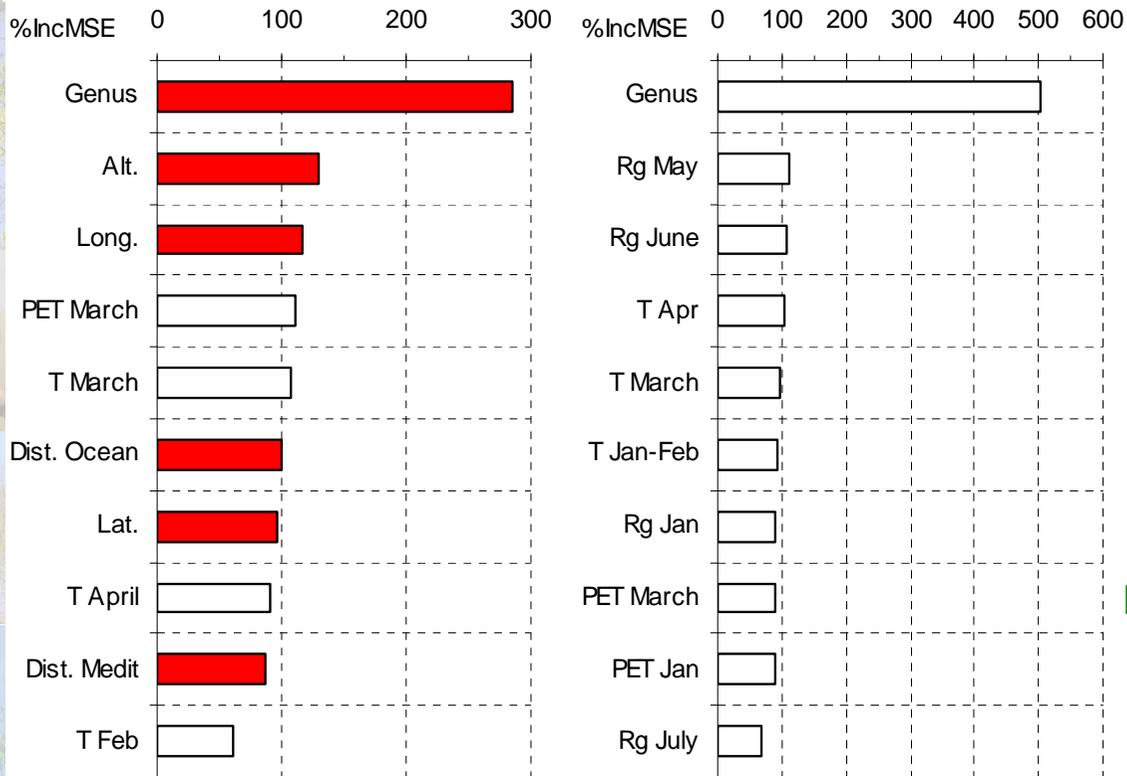
Date de débourrement (dd1)

n=826 observations

erreur d'ajustement: 4 jours / 4,3 jours

erreur de prédiction: 8,4 jours / 9,7 jours

% Var.: 75,6% / 68,2%



- paramètres communs : Genre, T avr, T mars, ETP mars, T (jan)-fév

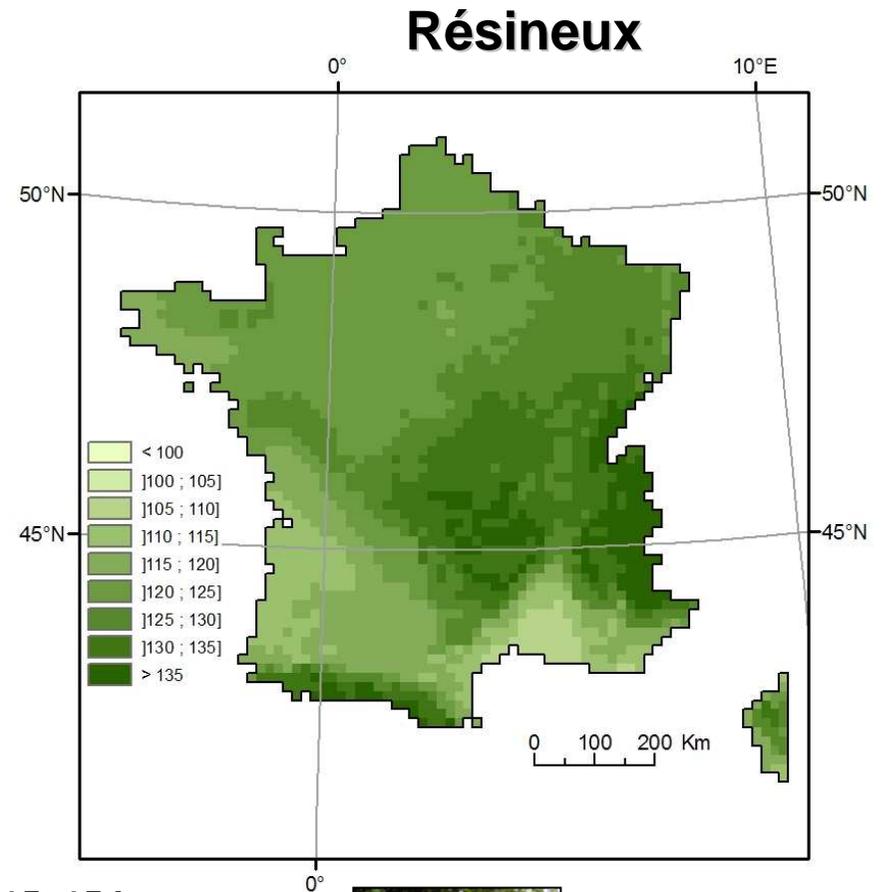
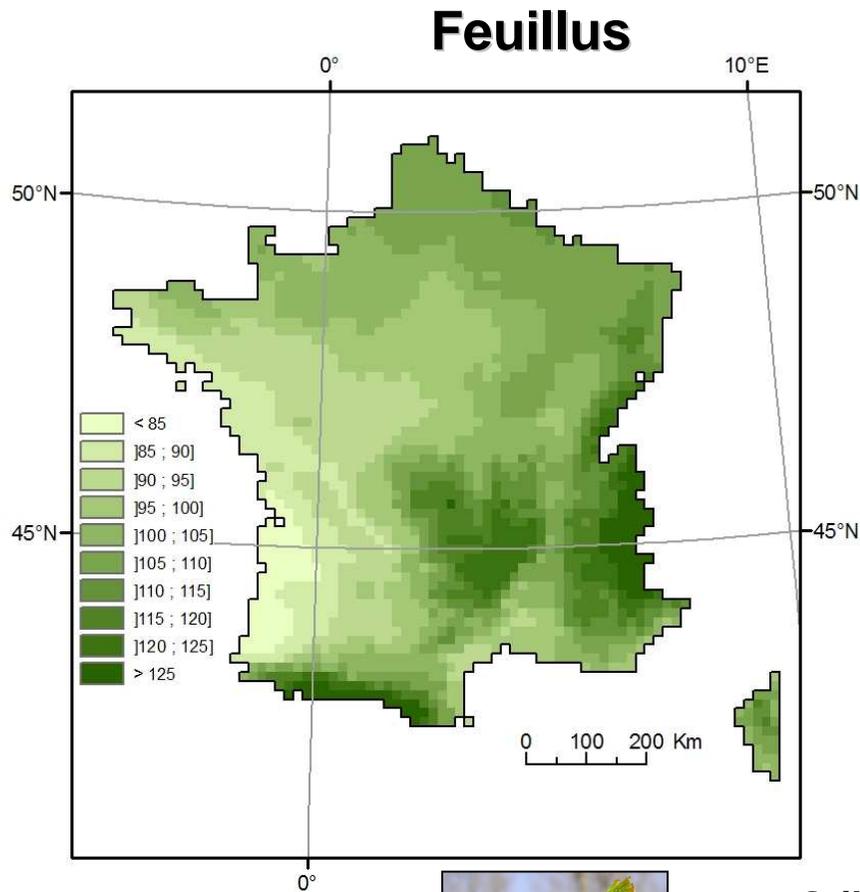
- les 5 paramètres géographiques sont remplacés par:

- 4 Rg (jan, mai, juin, juil)
- ETP jan



1991-2000
2041-250
2091-2100

Résultats... Cartographie débourement période actuelle 1991-2000



Grille 15x15 km
2461 points



Résultats... Analyse multivariée: Forêts d'arbres

Modèles « non » transposables / transposables

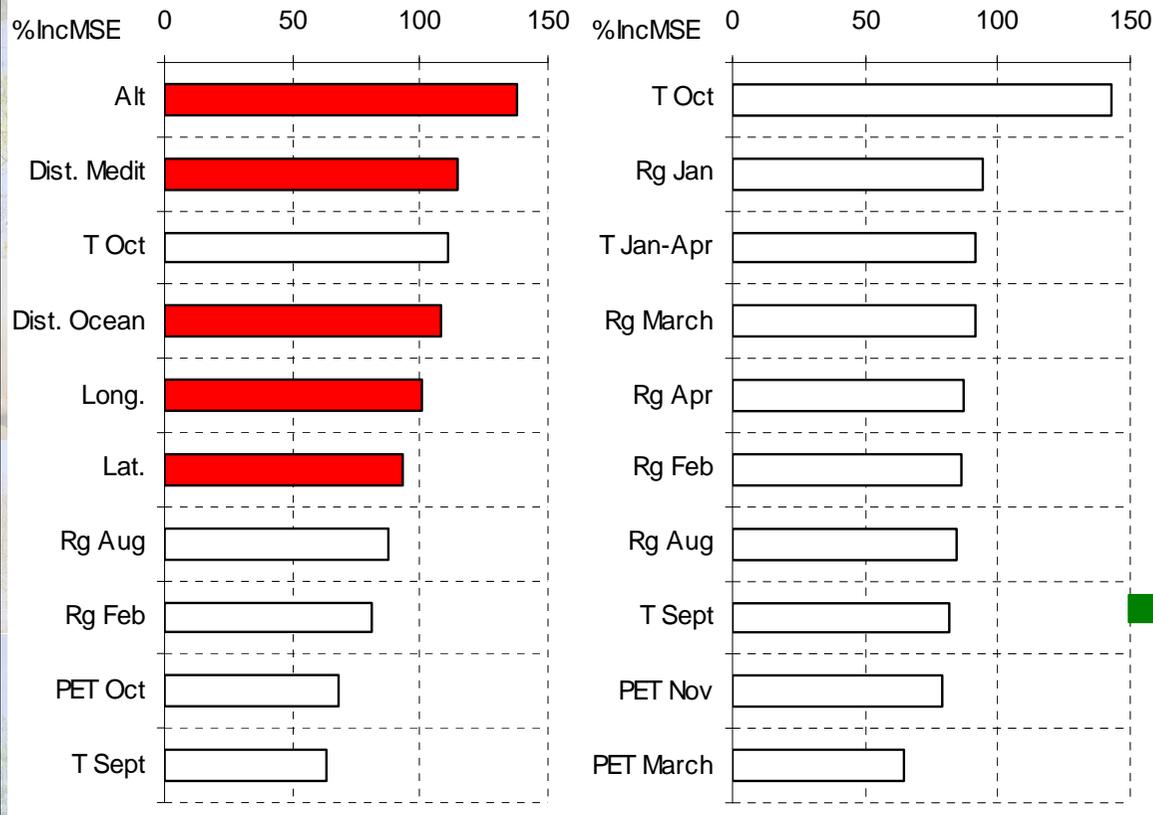


Jaunissement

Date de jaunissement (jj9)

n=410 observations

erreur d'ajustement:	4,3 jours	/	5,1 jours
erreur de prédiction:	9,6 jours	/	11,4 jours
% Var.:	56,5%	/	38,9%



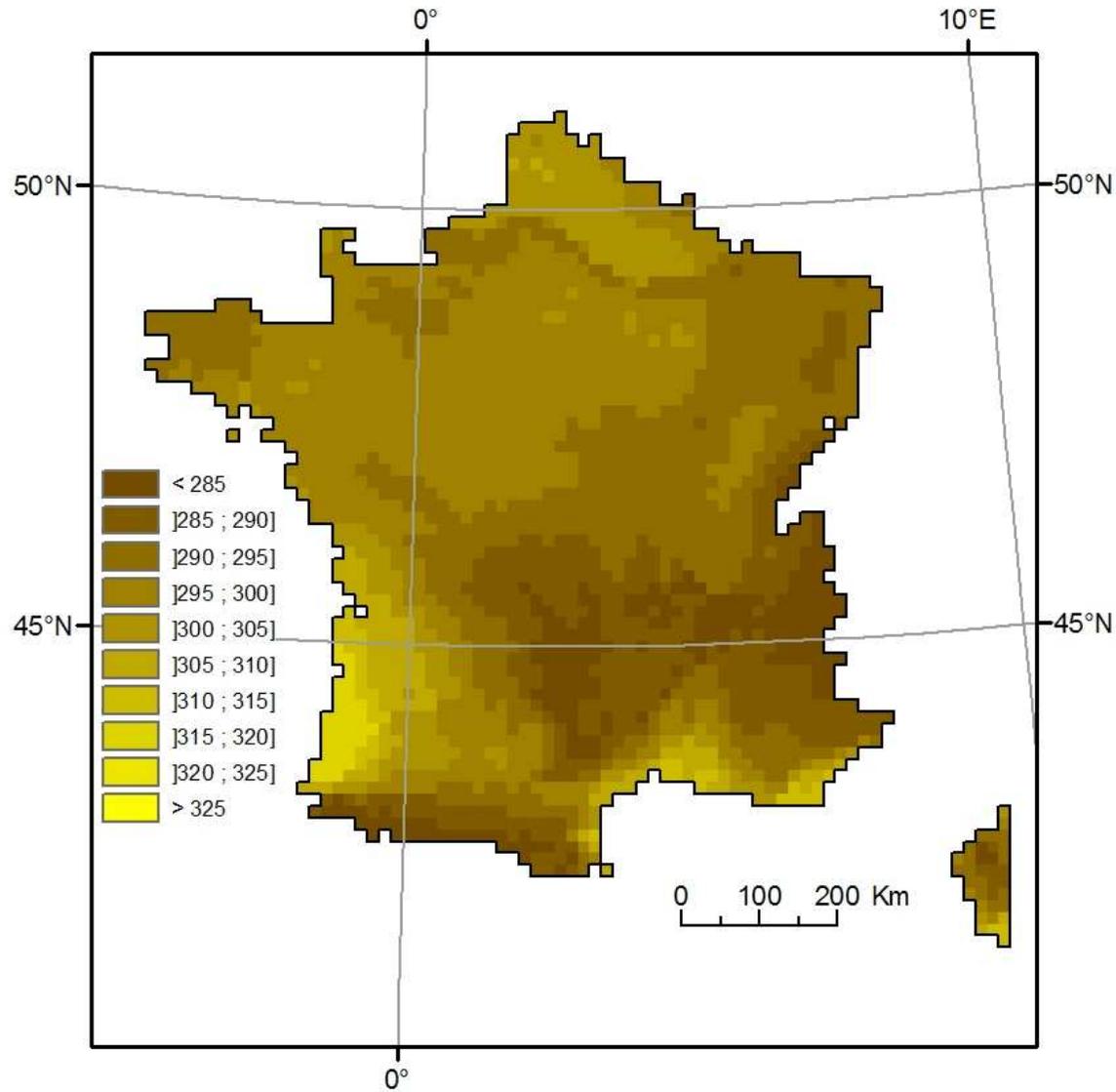
- **paramètres communs :**
T oct, T sept, Rg fév, Rg août
(ETP oct=> ETP nov)

- **les 5 paramètres géographiques** sont remplacés par:

- 3 Rg (jan, mars, avril)
- T jan-avril
- ETP mars

1991-2000
2041-250
2091-2100

Résultats... Cartographie jaunissement période actuelle 1991-2000



Résultats... Analyse multivariée: Forêts d'arbres

Modèles « non » transposables / transposables



Longueur saison de végétation (jj9-dd1)

Longueur de la saison de végétation (jj9-dd1)

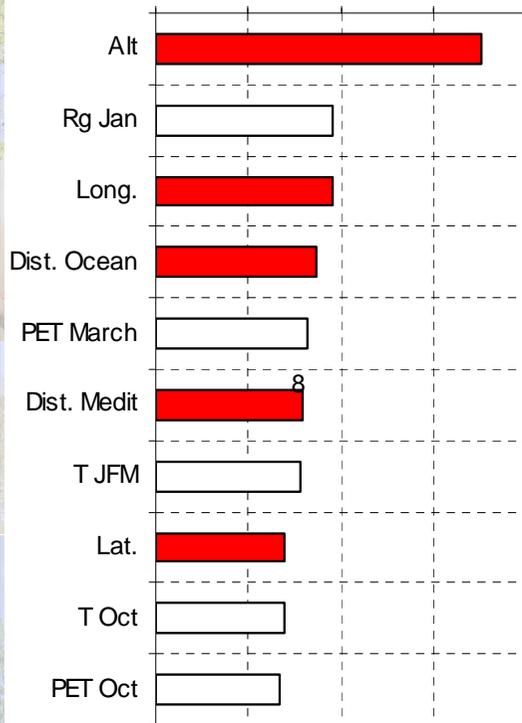
n=410 observations

erreur d'ajustement: 5,4 jours / 6,9 jours

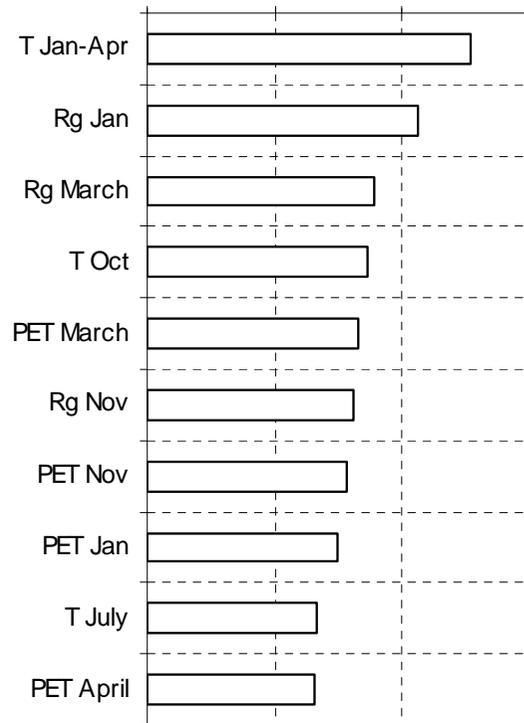
erreur de prédiction: 11,8 jours / 15,7 jours

% Var.: 71,6% / 49,7%

%IncMSE 0 50 100 150 200



%IncMSE 0 50 100 150



- paramètres communs :
Rg jan, ETP mars, T oct

T JFM => T jan à avril

ETP oct => ETP nov

- les 5 paramètres géographiques sont remplacés par:

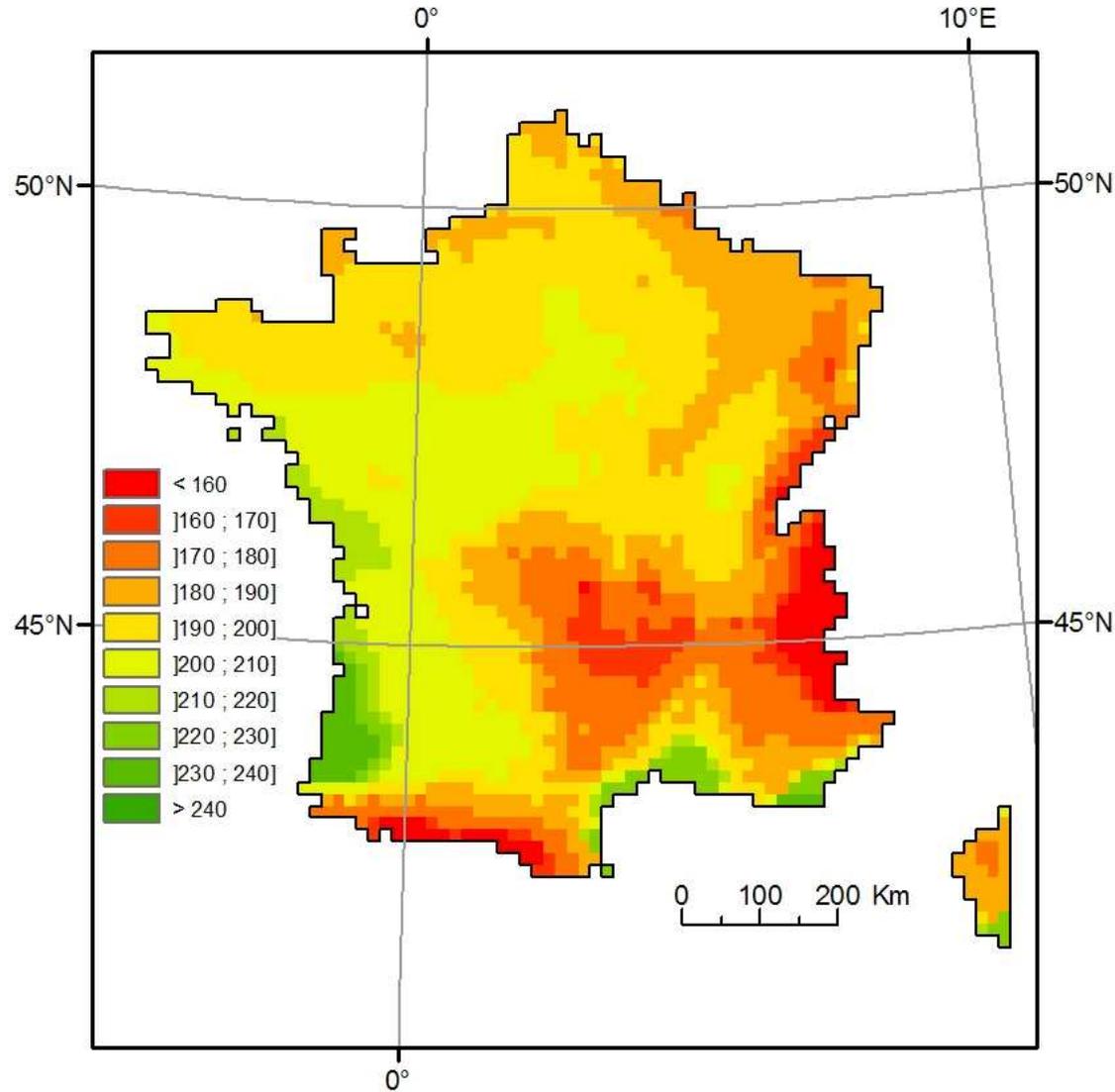
- 2 Rg (mars, nov)
- T juillet
- ETP jan et avril

1991-2000
2041-250
2091-2100





Résultats... Cartographie Sais. Vég. période actuelle 1991-2000



Réchauffement... 2041-2050 et 2091-2100

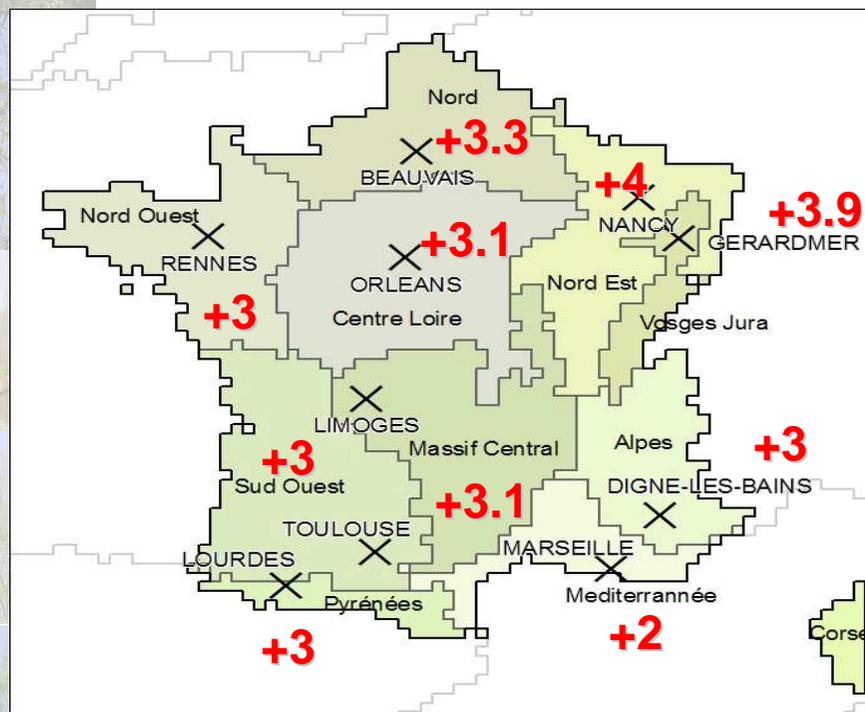
2 scénarios: A2 et B2

4 modèles de circulation: HadCM3, GCM2, CSIRO2, PCM

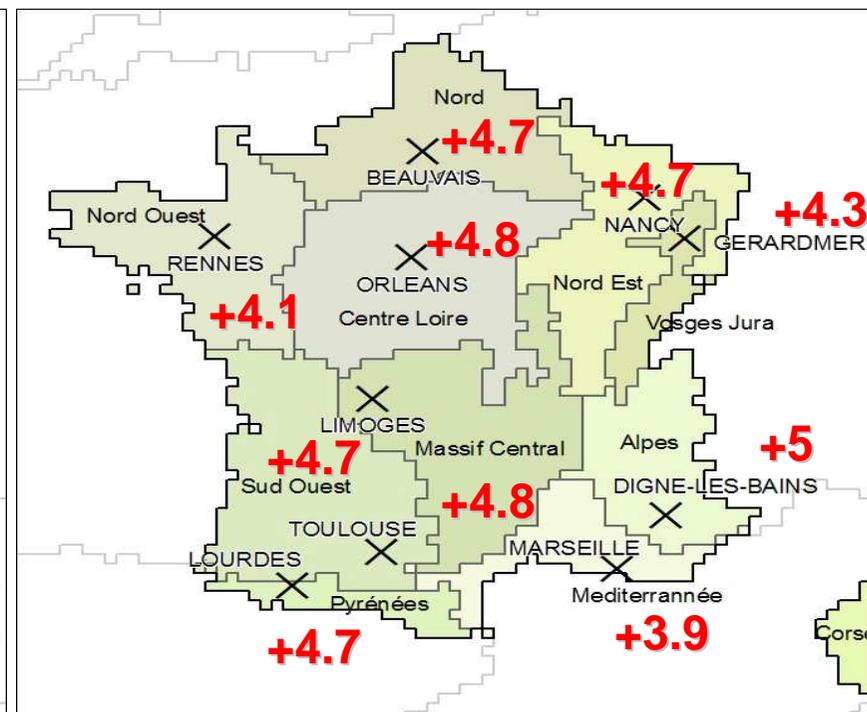
Pour tous les scénarios: A2 > B2

HadCM3 > CGCM2=CSIRO2 >> PCM

ΔT - 2091-2100 - HadCM3-A2 (réf. 1991-2000)

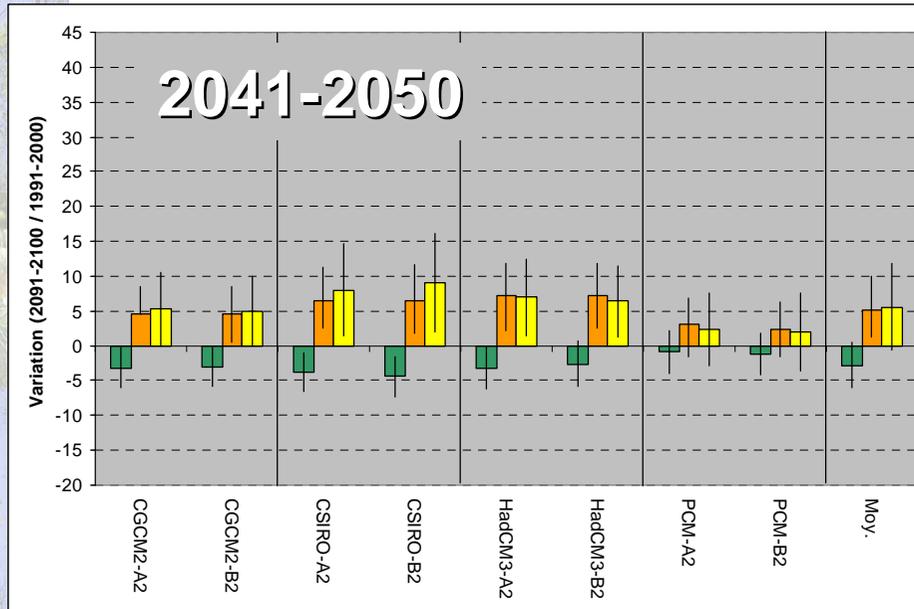


T mars
+ 3 à + 4°C



T octobre
+ 4 à +5°C

Variations prédites... Echelle France entière



Exemple : feuillus

Saison végétation

+30 j ←

Jaunissement

+20 j ←

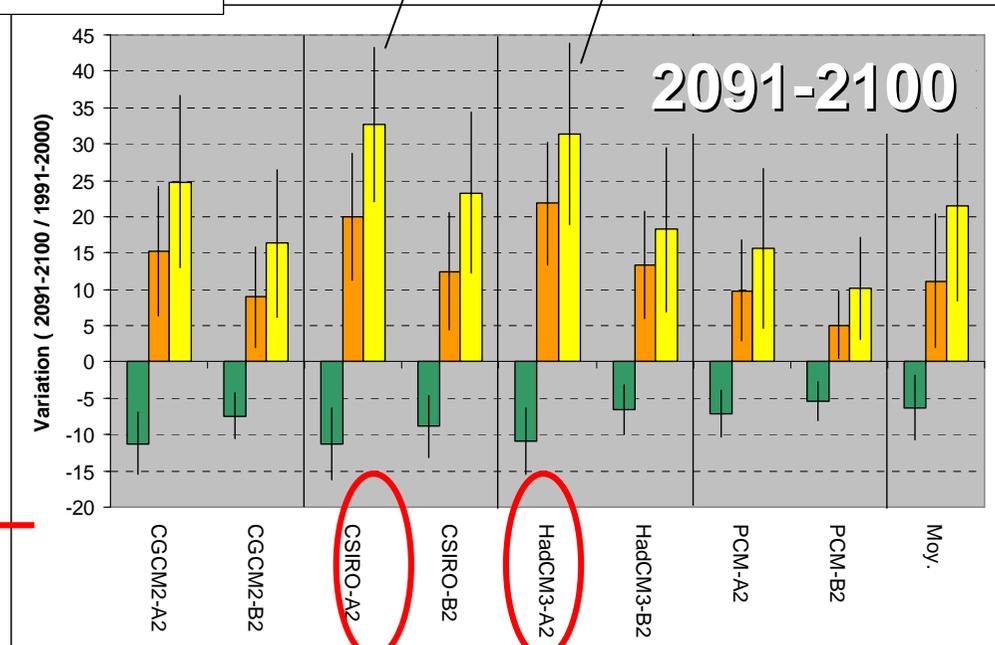
Débourement

-10 j ←

- HadCM3, CSIRO
- Déb: + précoce
- Jaun: + tardif
- SV: rallongt.
- tendances ?

Erreur préd.: 9, 11, 15

Forte disparité régionale



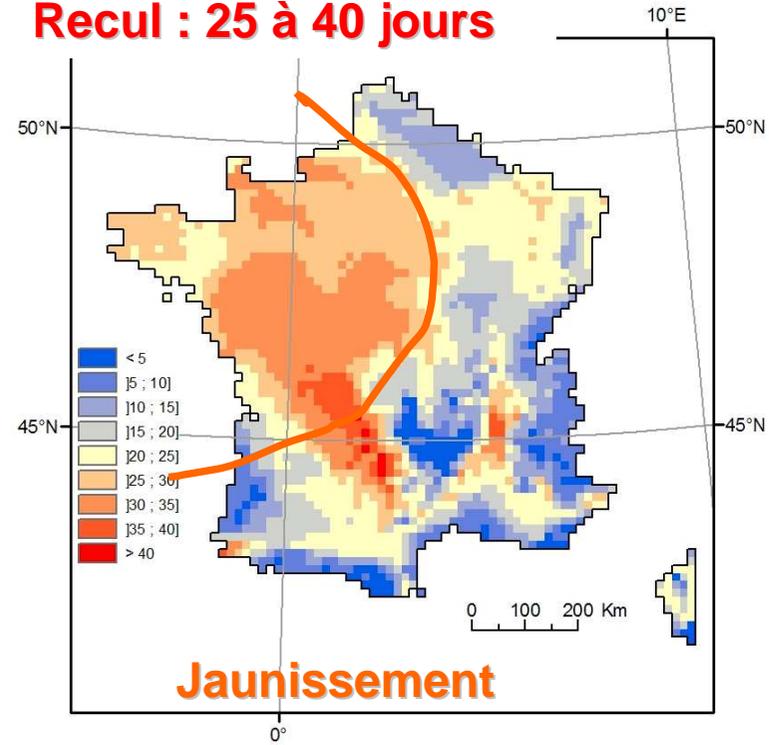
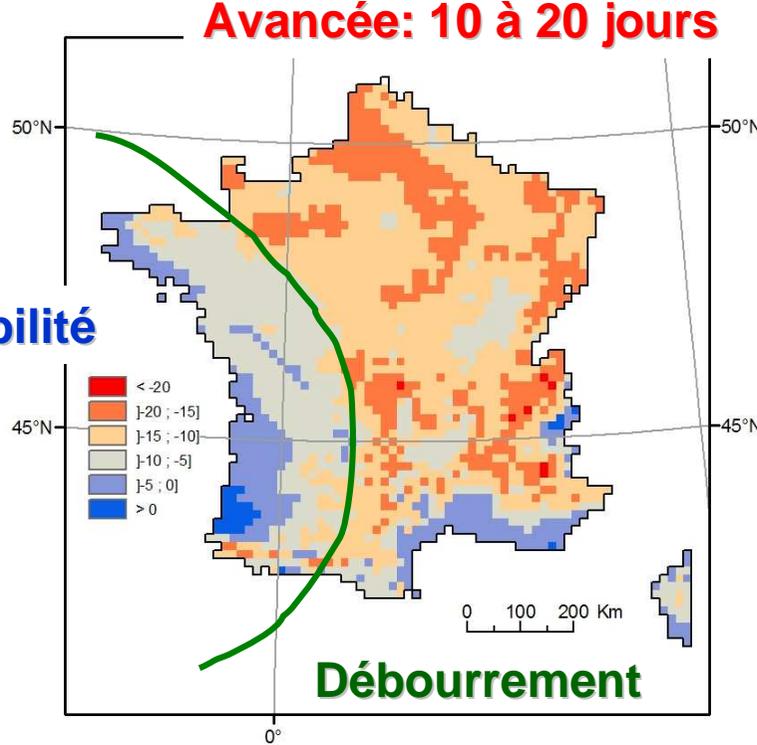
Variations prédites... Cartographie échelle régionale

Différence 2091-2100 / 1991-2000 (Feuillus)

Avancée: 10 à 20 jours

Recul : 25 à 40 jours

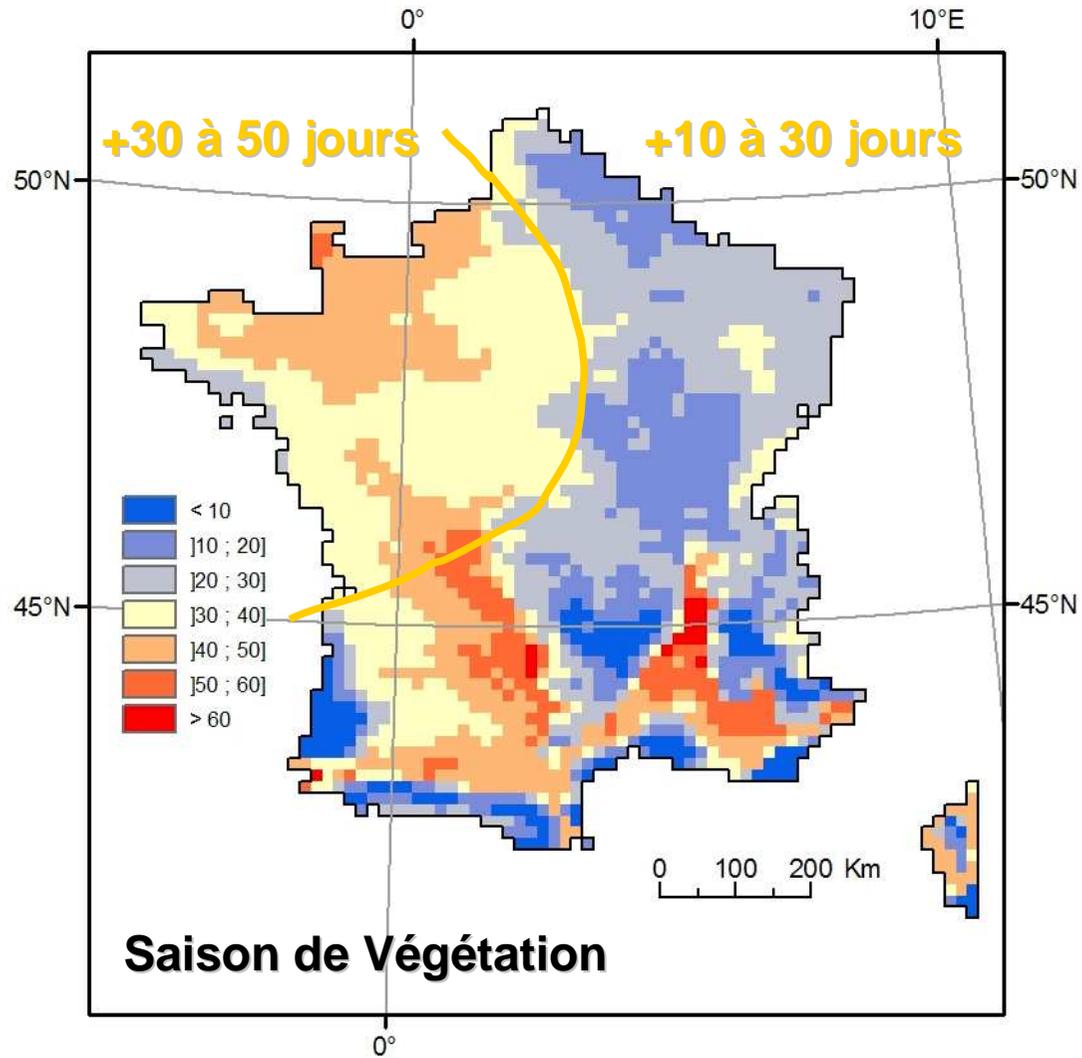
stabilité



Gelées tardives - précoces

Variations prédites... Échelle régionale

Différence 2091-2100 / 1991-2000 (Feuillus)



Et la suite.....

- **Colloque phénologie – GDR : Novembre 2009 (Nancy, Bordeaux, Montpellier ?)**

- **Sujet de thèse (en collaboration notamment avec le CEFE, I. Chuine)**

Utilisation de la base française du GDR pour

- Analyser les dérives phénologiques en France (toutes les esp.)
- Modéliser à vaste échelle la phénologie
- Prédire les changements futurs

=> Relations avec travaux JC Gégout, D Marage « Traits de Vie »

Publications :

Lebourgeois et al. 2002, Revue Forestière Française, 54, 5, 407-418

Lebourgeois et al., 2006, Rendez-Vous-Techniques, 13, 19-22

Lebourgeois et al., 2006, Rendez-Vous-Techniques, 13, 23-26

Lebourgeois F. and Ulrich E. 2007. Forest trees phenology in the French Permanent Plot Network (Renecofor). In " Response of temperate and Mediterranean forests to climate change: effects on carbon cycling, productivity and vulnerability Edition (CARBOFOR) (sous presse)

Lebourgeois et al. 2008, Revue Forestière Française, 60, 3, 323-343

Lebourgeois et al. Simulating phenological shifts in french temperate forests under climatic change scenarios, Global Ecology and Biogeography (in prep)