



Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique
de la phénologie des peuplements
du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers
(RENECOFOR)

F. Lebourgeois, P. Godfroy, JC Pierrat

**Réunion Réseau Cataneat
Anglet - 28 et 29 mars 2006**

Cette étude a été soutenue financièrement par l'Office National des Forêts
(Département Recherches - Réseau RENECOFOR).

**Les auteurs remercient tous les observateurs du réseau qui assurent
depuis 1997 les relevés des données.**

Nous remercions également le service Météo-France pour l'aide quant à la sélection des stations météorologiques.

Sommaire

Partie I : **Observations phénologiques : concepts, intérêts et problématiques actuelles**

- A.** Définition et domaines d 'application de la phénologie
- B.** De quoi dépend le rythme de développement des espèces ?
- C.** Y-a-t-il eu des évolutions récentes des rythmes saisonniers ?

Partie II : **Phénologie des peuplements du RENECOFOR**

- A.** Quelle est la variabilité interspécifique ?
- B.** Quelle est la variabilité spatiale ?
- C.** Quelles sont les relations directes entre les phénophases et les variables du milieu ?
- D.** Peut-on construire des modèles « simples » à l 'échelle de la France permettant d 'expliquer ces variabilités ?



Partie I

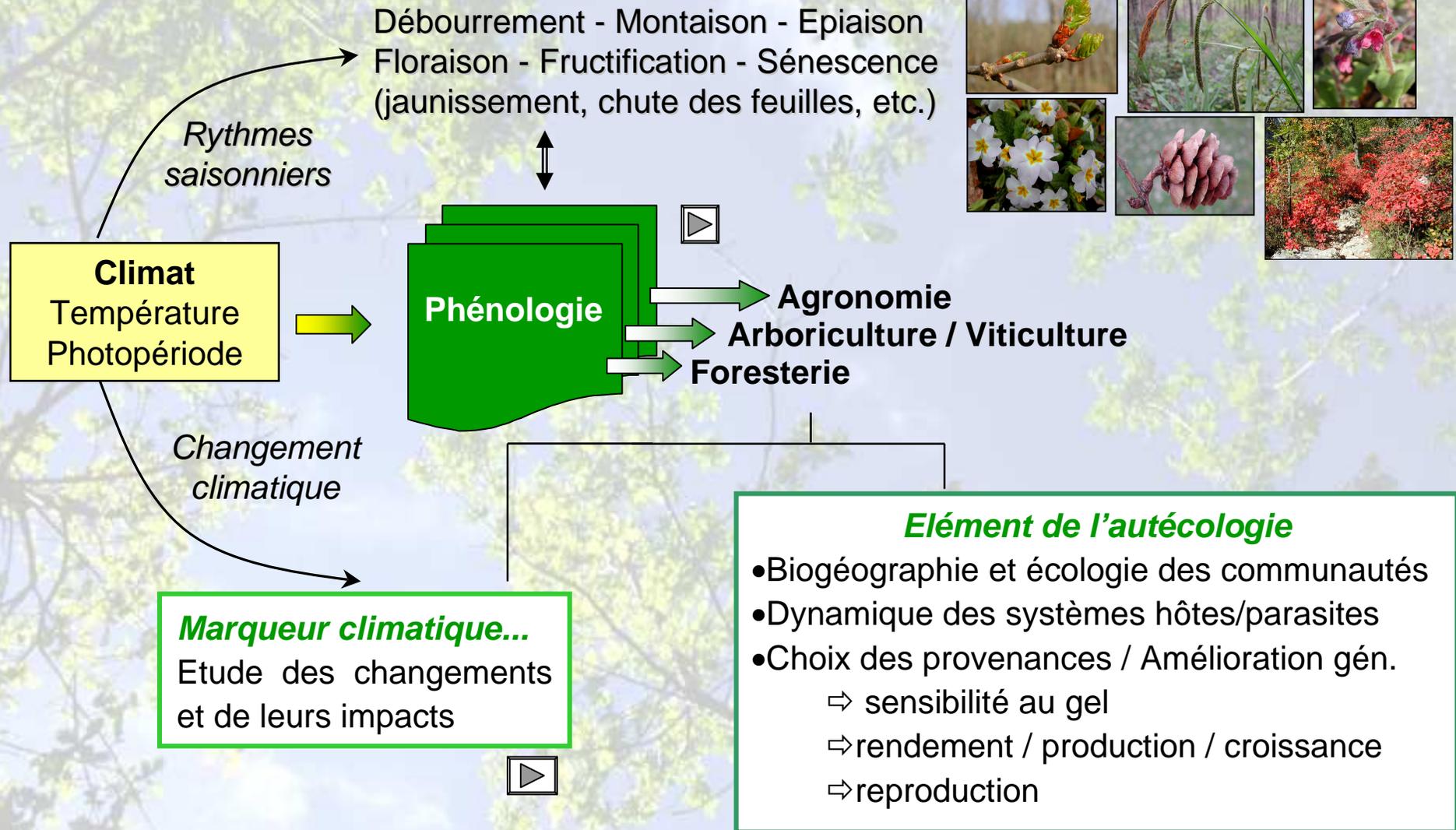
Observations phénologiques : concepts, intérêts et problématiques actuelles

A. Définitions et domaines d 'application de la phénologie

B. De quoi dépend le rythme de feuillaison des espèces ?

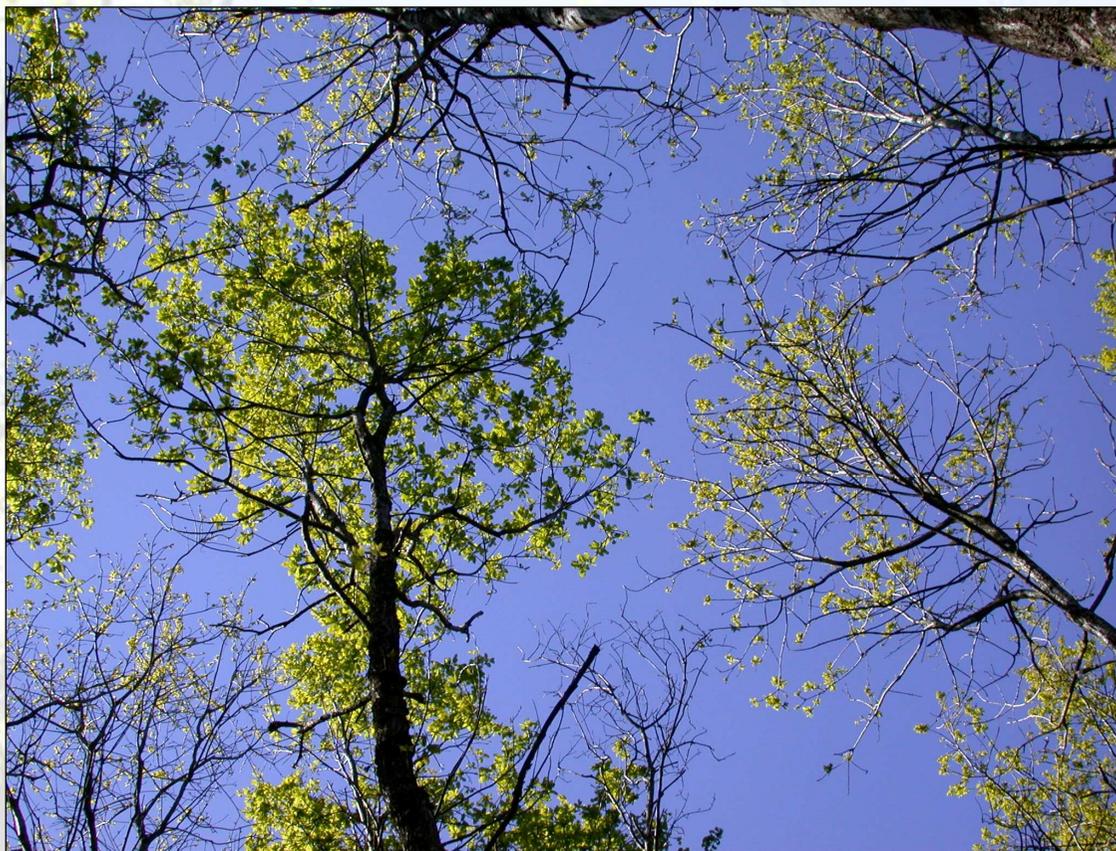
C. Y-a-t-il eu des évolutions récentes des rythmes saisonniers ?

A. Définitions et domaines d'application



A. Définitions et domaines d'application

Pour les essences forestières... **débourrement** et **sénescence**





Température... un facteur clé

hiver

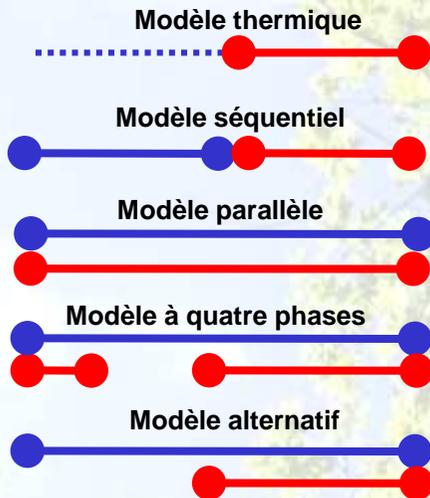
printemps



Satisfaction **des besoins en froid** : accumulation d'unités de développement (*chilling units*) permettant aux bourgeons de passer la phase suivante

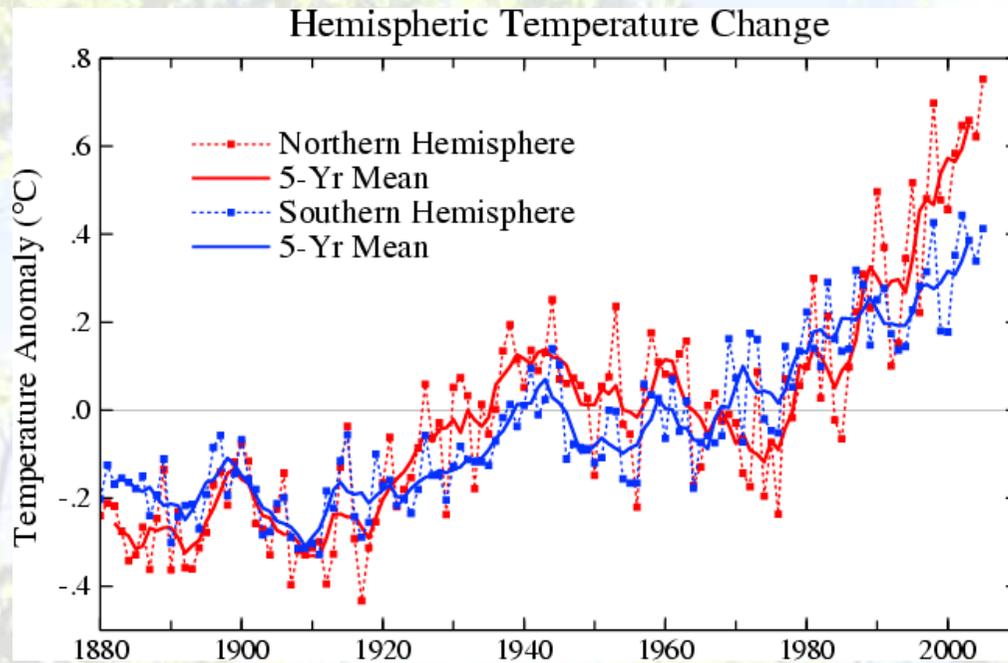
Satisfaction **des besoins en chaleur** : accumulation d'unités de croissance (*forcing units*) permettant aux bourgeons d'éclater

Processus intra-annuel



- Dates du début d'action
- T°C seuil (chilling ou forcing)
- Accumulation au dessus de ces seuils

C. Evolution du rythme saisonnier dans le contexte du réchauffement global

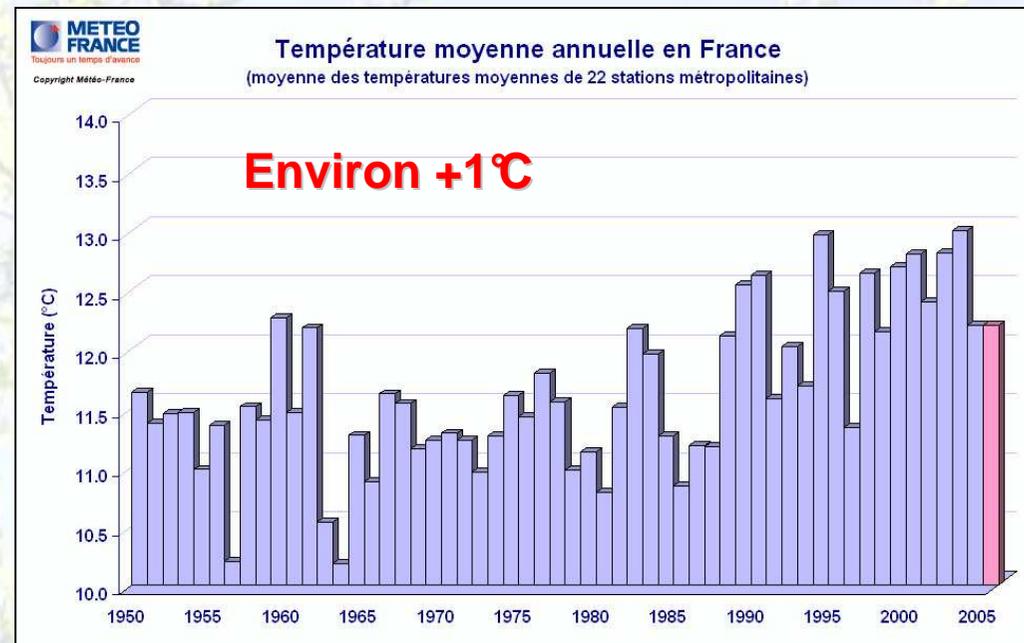


Dans le monde.... +0,7°C



En France...

<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>



Les longues séries de données phénologiques dans le monde

- Dates de vendange en Bourgogne (1370 à l'actuel)
- Dates de floraison du prunus à Kyoto au Japon (depuis 9e siècle)
- Série de Thomas Mikesell en Ohio (1883-1912)
- Série de la famille Marsham en Angleterre (1736-1925)
- Stations du « *International Phenological Gardens* » : 6423 stations en Europe Centrale et de l'Est (1960 à nos jours)

C. Evolution du rythme saisonnier dans le contexte du réchauffement global

Depuis 1950...

modification significative du rythme saisonnier de développement...

(Menzel et Fabian 1999 ; Chmiellewski et Rotzer 2001 ; Menzel 2000 ; Ahas et al. 2002 ; Penuelas et al. 2002 ; Root et al. 2003)



LSV : +10 à 15 jours ▶

Conséquences sur le fonctionnement

Augmentation des risques de dommage lié au gel

Modification du bilan de carbone

Interaction CO₂ et réchauffement

Gestion forestière ?

Croissance, productivité, qualité

Compétition inter-spécifique

Dynamique hôte/parasite

Chorologie : aire de répartition, niche

Génétique : adaptation, régression

Phyllogénétique : érosion biodiversité

etc.



C. Evolution du rythme saisonnier dans le contexte du réchauffement global

Signe - : plus précoce



Région	Phénophase	Nb esp.	Variation moy. Nb jours/décennie	Période	Référence
Europe	spring events	14	-2	1959-1993	(Menzel & Fabian 1999)
Europe, North Am., Asia	spring events	33	-3.9	1950-2000	(Root et al. 2003)
Germany	leaf colouring	3	0.7	1951-1996	(Menzel et al. 2001)
Germany	leaf unfolding	5	-3.2	1951-1996	(Menzel et al. 2001)
Estonia	leaf unfolding	2	-2.3	1948-1996	(Ahas et al. 2000)
Europe, North Am.	leaf unfolding	9	-3.5	1950-2000	(Root et al. 2003)
Spain	flowering	38	-4.2	1952-2000	(Penuelas et al. 2002)
North-Am.	flowering	14	-3	1970-1999	(Abu-Asab et al. 2001)
Estonia	flowering	3	-2.5	1948-1996	(Ahas et al. 2000)
Europe, North Am.	flowering	12	-3.6	1950-2000	(Root et al. 2003)
Spain	fruiting	17	-8	1974-2000	(Penuelas et al. 2002)
Europe	autumn events	14	1.6	1959-1993	(Menzel & Fabian 1999)
			-2.8		

Chute des feuilles

Espèce	Région	Période	Variation moy. Nb jours/décennie	Référence
Quercus robur	U. K.	1950-1996	-4.3 to -5.8	(Cannell et al. 1999)
Quercus robur	Germany	1951-1996	-3.1	(Menzel et al. 2001)
Quercus robur	Estonia	1948-1996	-1.7	(Ahas et al. 2000)
Betula pendula	Germany	1951-1996	-3.7	(Menzel et al. 2001)
Betula pendula	Estonia	1948-1996	-2.9	(Ahas et al. 2000)
Betula pendula	Northern Europe	1951-1998	-2.7	(Ahas et al. 2002)
Fagus sylvatica	Germany	1951-1996	-2.3	(Menzel et al. 2001)
Picea abies	Germany	1951-1996	-3.1	(Menzel et al. 2001)
Populus tremuloides	Canada	1900-1997	-2.6	(Beaubien & Freeland 2000)
			-3.0	

C. Evolution du rythme saisonnier dans le contexte du réchauffement global



« *International Phenological Gardens* »
(6423 stations depuis 1960) (Chmielewski 1996)

Absence de données centralisées



CRÉATION DU GROUPEMENT DE RECHERCHE
SYSTÈME D'INFORMATION PHÉNOLOGIQUE
POUR L'ETUDE ET LA GESTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
(GDR SIP-GECC 2006-2009)

Isabelle Chuine, CEFE-CNRS Montpellier
Bernard Seguin, AgroClim INRA Avignon
François Lebourgeois, LERFOB, Nancy



**Base de données
(GIP MediasFrance)**

**Nouvelles
Observations**

- sites et espèces*
- sociétale
 - économique
 - écologique
 - *projet pédagogique*

Analyse

- détection des changements
- modélisation du fonctionnement
- étude de l'évolution du climat
- gestion et sélection des semences
- etc.



C. Evolution du rythme saisonnier dans le contexte du réchauffement global

- **Météorologie nationale** (de 1880 à 1950 ou 1970 ; 1 site 1880-2000)
plus de 100 populations naturelles ; 180 espèces
- **INRA Phéno-Clim**
28 plantations fruitières (floraison) ; 10 à 50 ans
- **Autres centres INRA** (Bordeaux, Orléans, Avignon)
17 plantations forestières ; 1 à 25 ans
- **Muséum National d 'Histoire Naturelle (Phénoflore)**
400 espèces en plantations ornementales ; floraison depuis 2000
- **Parcs Saint-Maur et Versailles**
floraison de 200 espèces en plantations ornementales (Fin du XIX et début Xxième siècle)
- **Office National des Forêts**
- **Réseau d 'arboretums**
- **etc...**
- **Réseau National de suivi à long terme des écosystèmes forestiers**
(RENECOFOR)



Partie II

Phénologie des peuplements du RENECOFOR

A. Quelle est la variabilité interspécifique ?

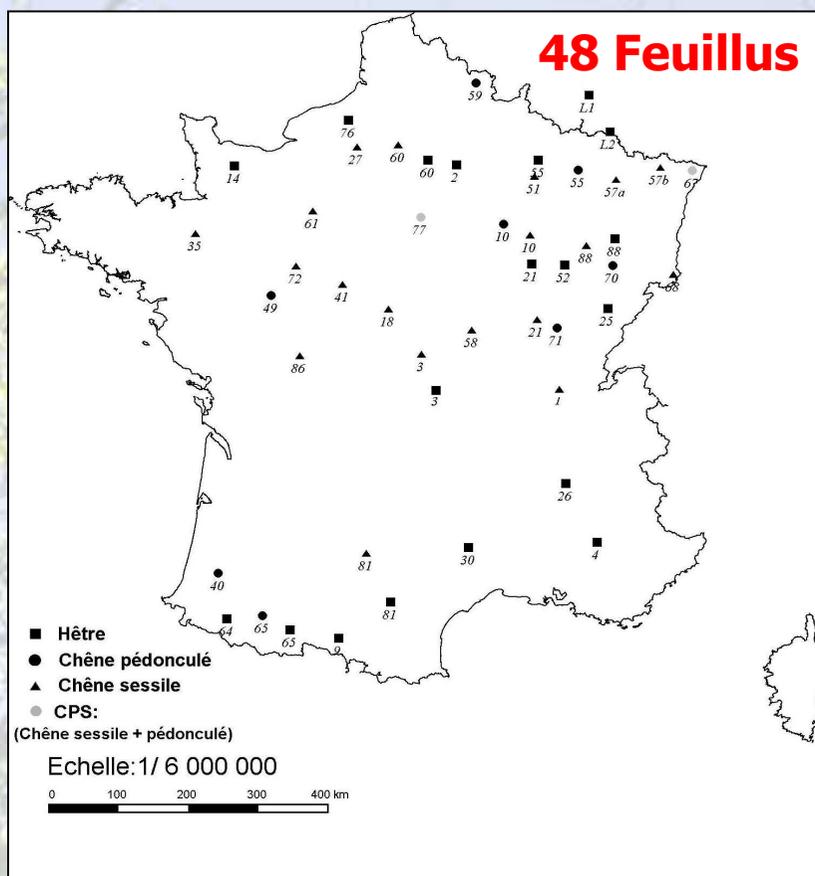
B. Quelle est la variabilité spatiale ?

C. Quelles sont les relations directes entre les phénophases et les variables du milieu ?

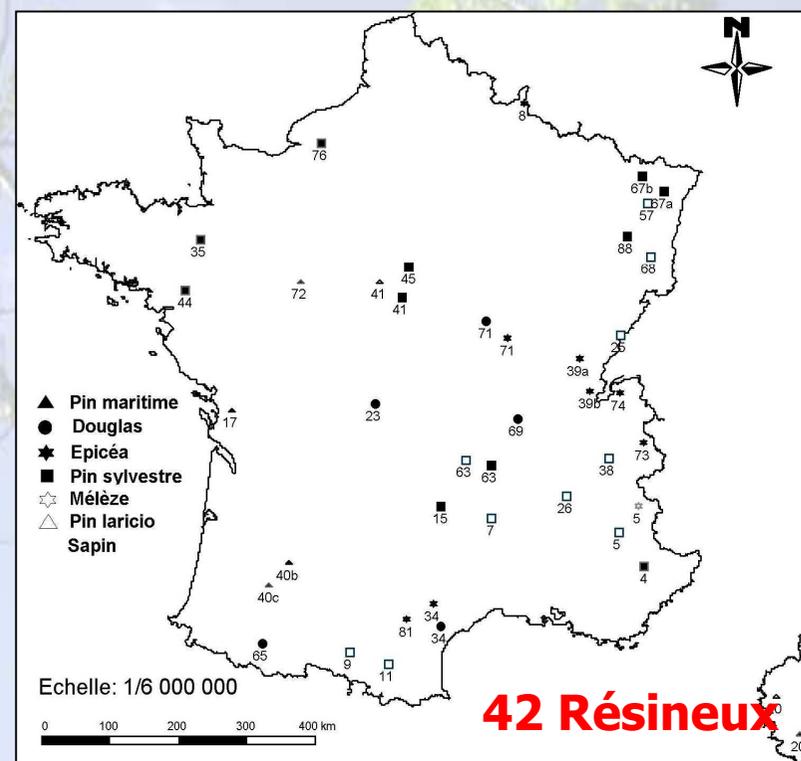
D. Peut-on construire des modèles « simples » à l'échelle de la France permettant d'expliquer ces variabilités ?

Renecofor : les données phénologiques disponibles

102 sites => 90 sites : 3 à 7 ans d'observation **débourrement** (1997-2003)
81 sites au moins 5 années disponibles
46 sites série complète 1997-2003



10 essences forestières adultes
en conditions naturelles



Renecofor : le protocole des observations

- Proportion des 36 arbres échantillons présentant un stade phénologique déterminé
- Observations « hebdomadaires » mars-juin et sept-nov



b5



dd1 Jour julien pour lequel 10% des arbres présentent sur au moins 20% du houppier des bourgeons au stade b5



dd9 (idem que dd1 mais avec 90% des arbres)



LSV11

jj1



jj9



Même principe que les dates de débourrement mais avec le jaunissement des feuilles.

LSV19

LSV91

LSV99

Les feuillus : 8 phases
Les résineux : 2 phases

Renecofor : les données stationnelles et climatiques disponibles

Données stationnelles

- latitude (en degrés, min, sec)
- longitude (en degrés, min, sec)
- altitude (15 à 1850 m)
- pente (en %)
- exposition (6 modalités)
- espèce

Données météorologiques

- **journalières de 1997-2003**
 - Tmin, Tmax, Tmoy, Durée insolation
- 20 stations RENECOFOR
- 58 stations Météo-France
 - => 79 peuplements (42 Fe/37 Re)
- **modélisées sous SIG (Piedallu, 2005)**
 - radiations globales (MJ/m²)



Objectifs de l'étude

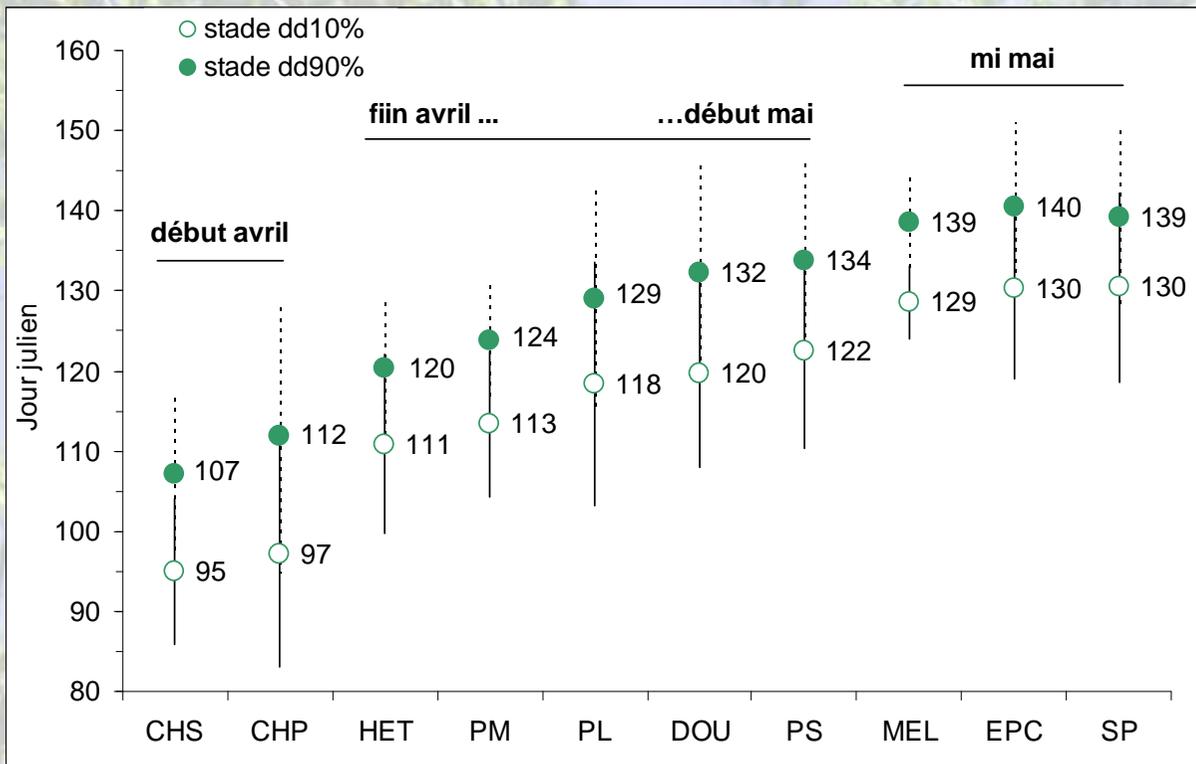
- moyenne 1997-2003
- variabilité régionale
- variabilité inter-espèces
- modèles de prédictions

- Taux d'explication les plus élevés (R²)
- Ecart de prédiction les plus faibles
- Biologiquement pertinents
- Facilement applicables



Quelle est la variabilité interspécifique ?





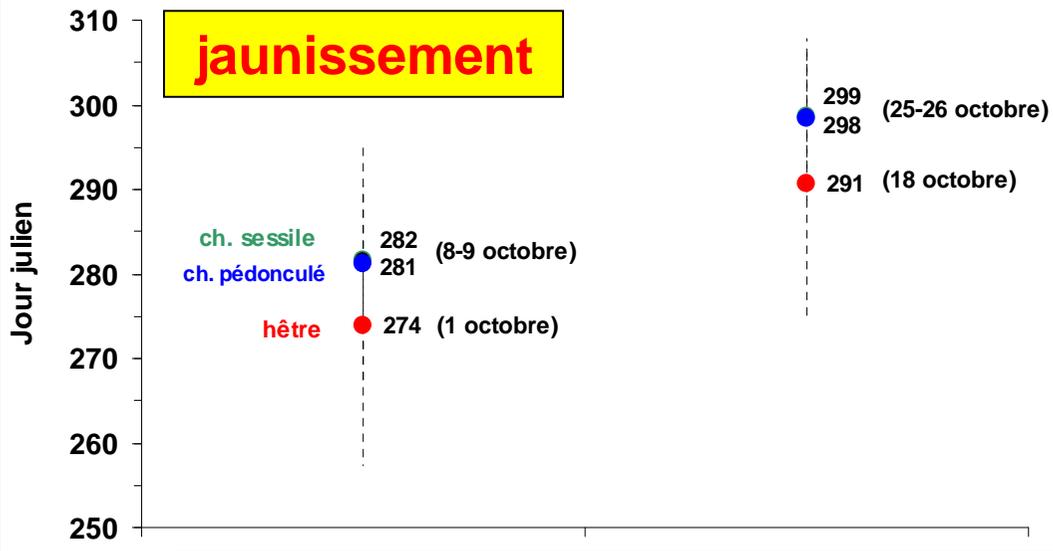
variabilité inter-espèce

débourrement

} $\Delta = 10$ jours



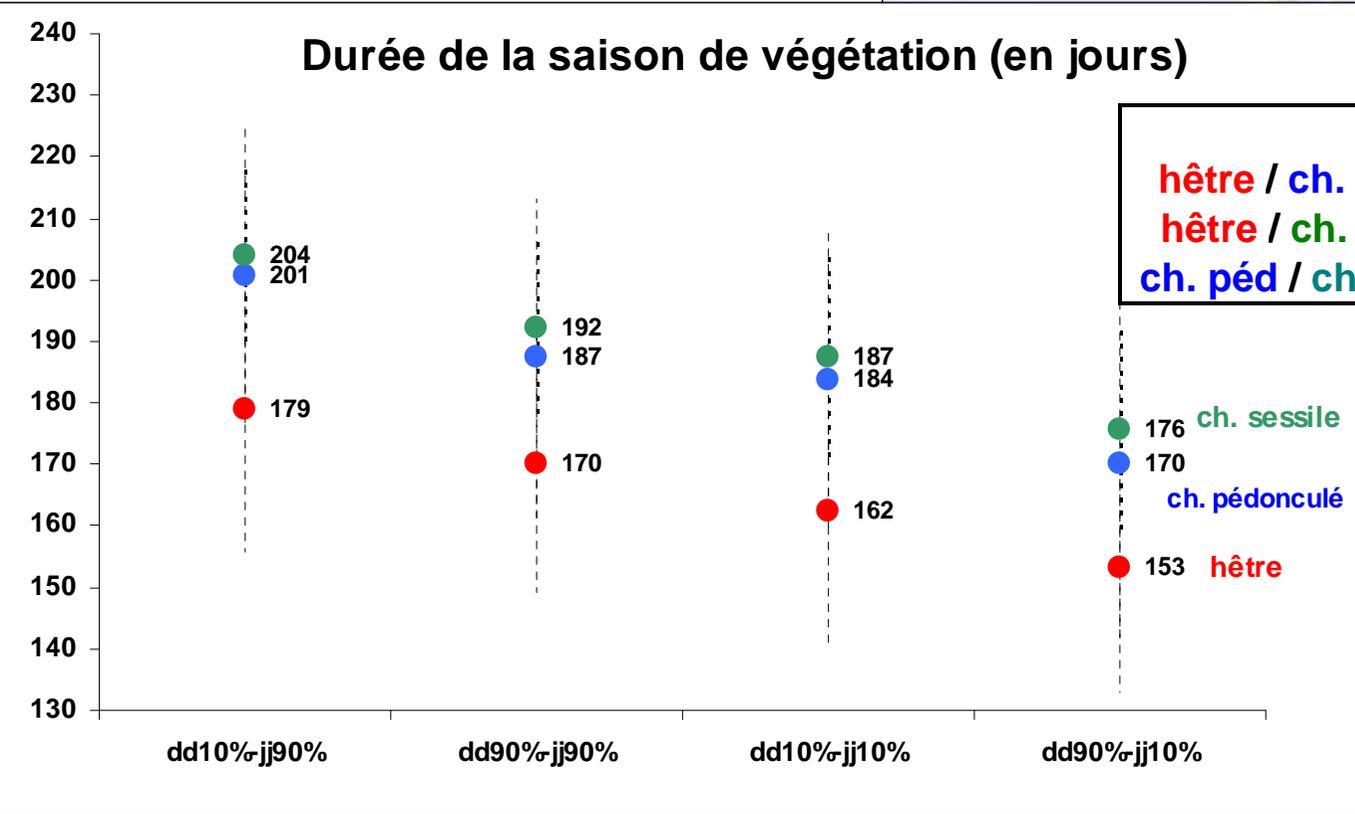
jaunissement



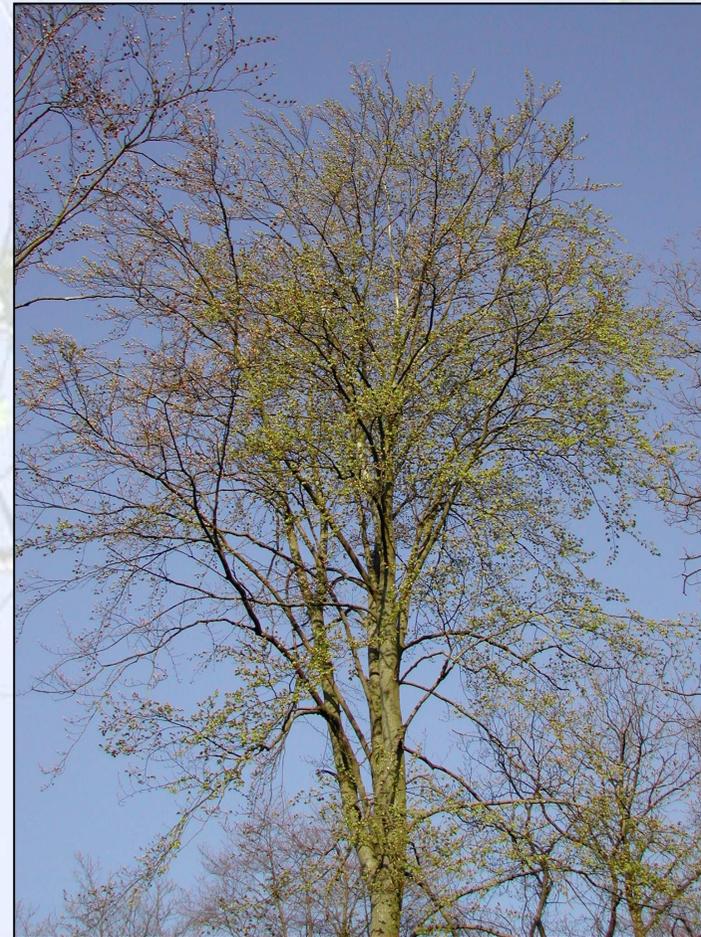
variabilité inter-espèce



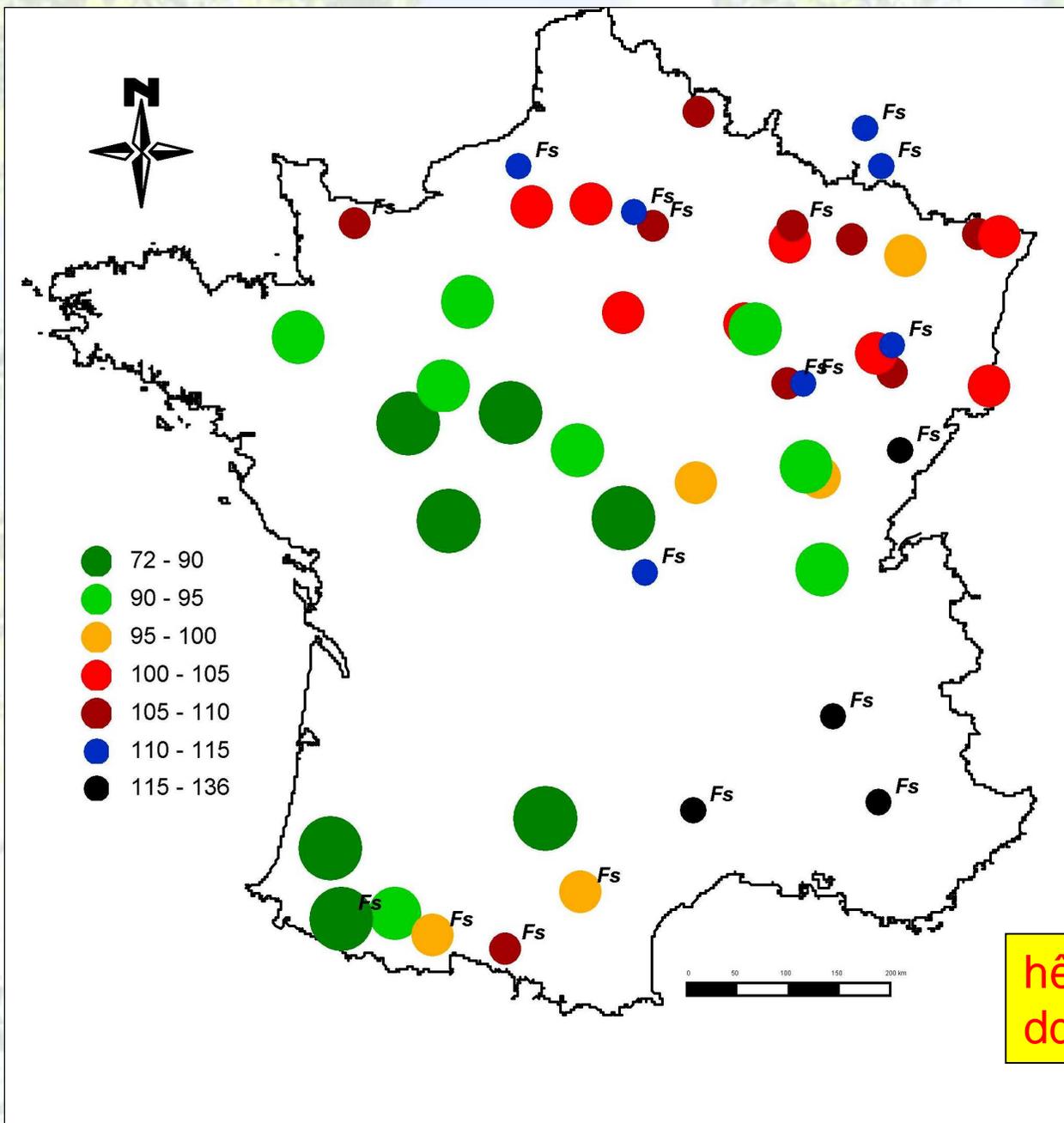
Durée de la saison de végétation (en jours)



Quelle est la variabilité spatiale ?



variabilité régionale du débourrement

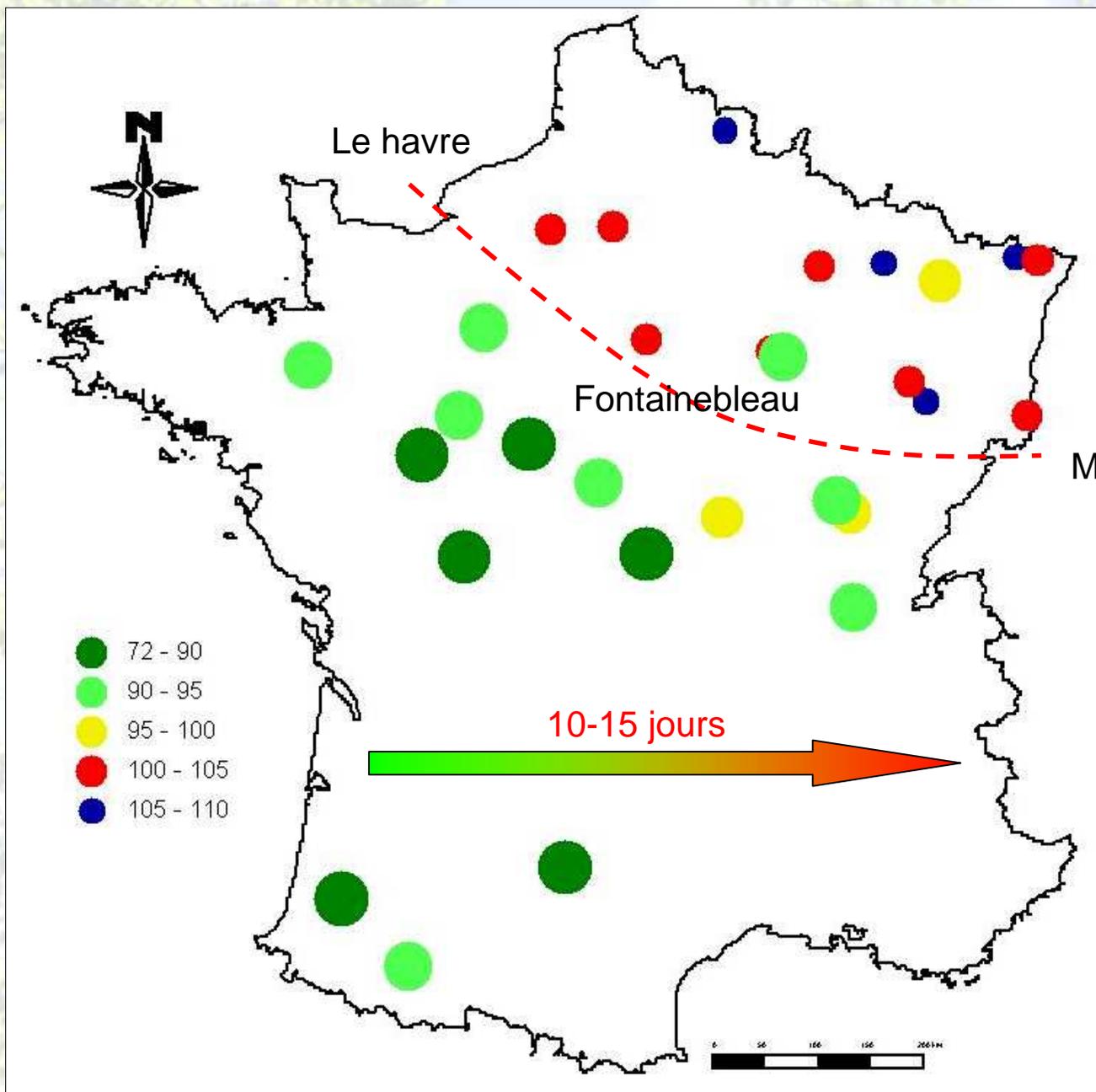


hêtre et chênes
dd10

variabilité régionale du débourrement



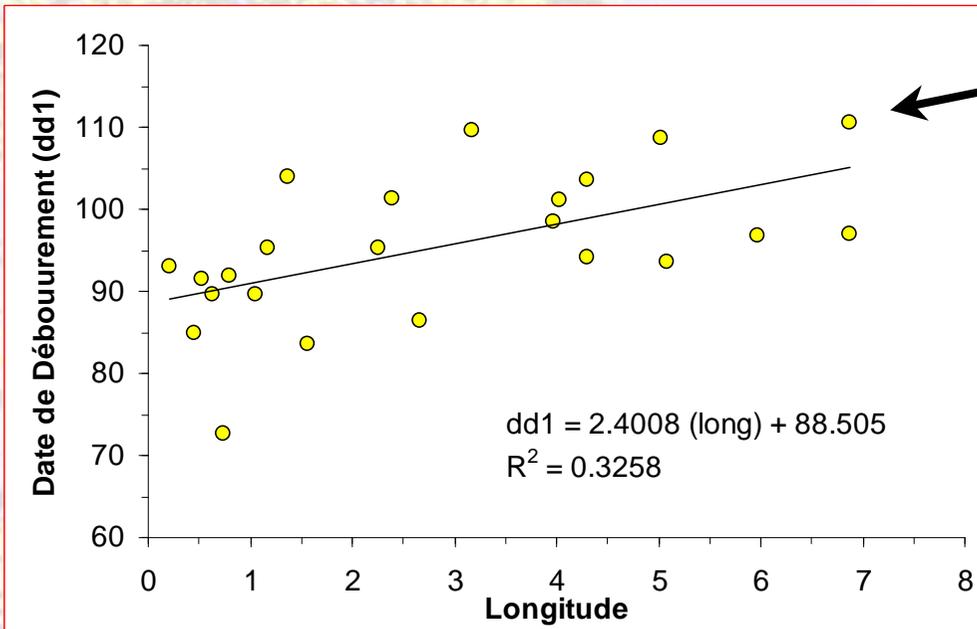
**chênes
dd10**



Relations directes entre les variables du milieu et les phénophases



Relations directes avec la longitude



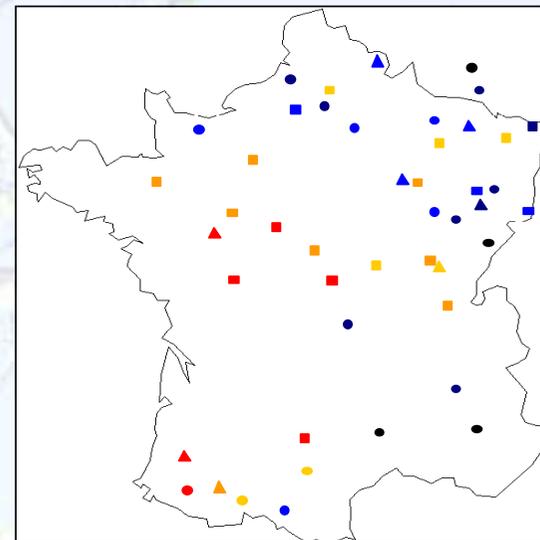
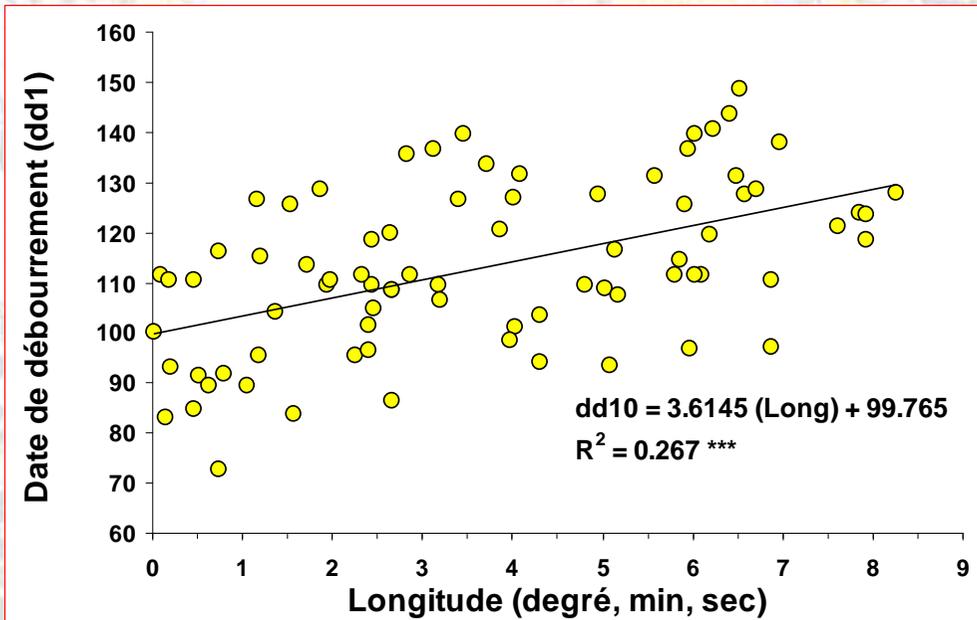
Un point = moyenne 1997-2003
pour un peuplement

Chênes

Débour. : - 2,4 jours / degré

Toutes les espèces

Débour. : - 4 jours / degré



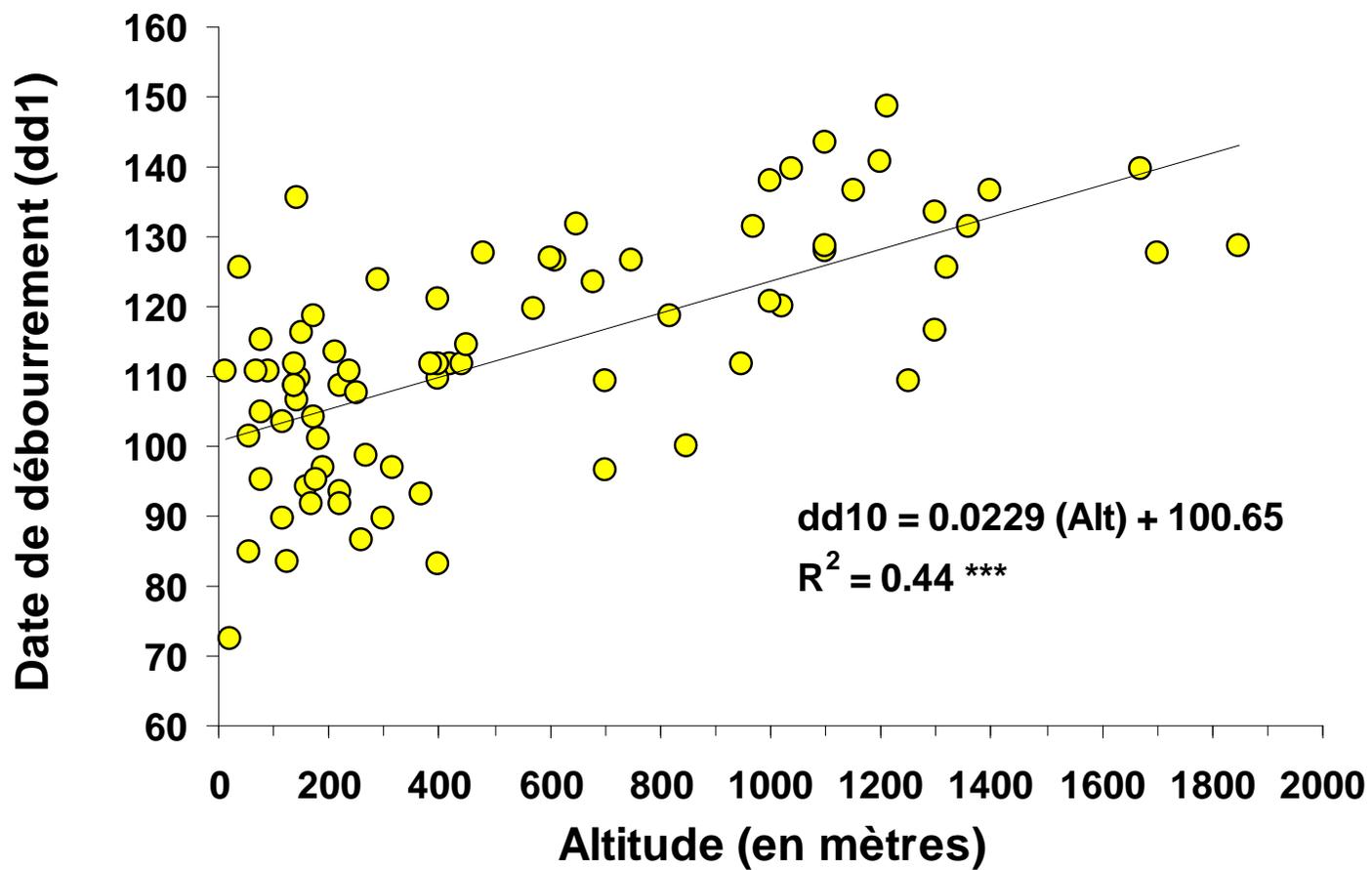
het65, dou65, het64, het14.....sp67, sp68

79 placettes - moyenne 1997-2003

Relation directe avec l'altitude

	Lat.	Long.	Alt.
dd1		0.2671	0.440
dd9		0.2399	0.4317
jj1		0.1614	0.1523
jj9		0.2018	0.1875

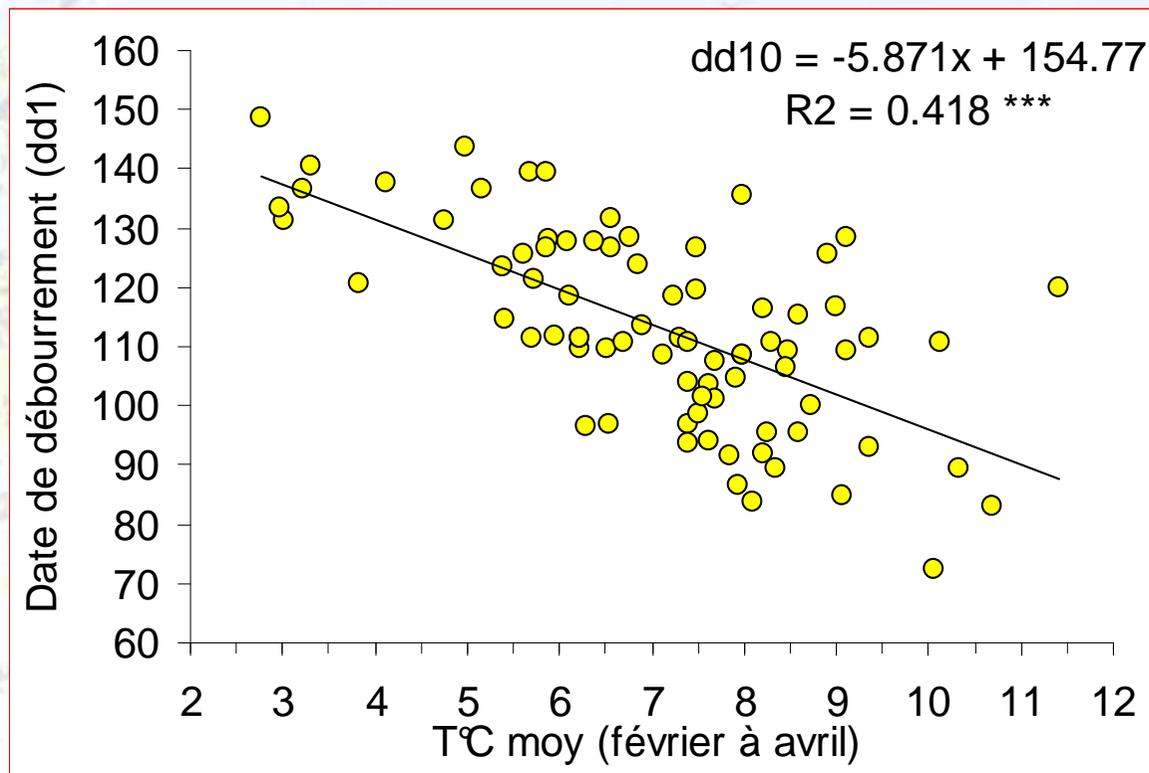
Débour. : - 2 jours / 100 m



Relations directes avec la température

Pour le débournement

corrélations les plus fortes avec fin hiver / début printemps ($r^2 > 0,4$)

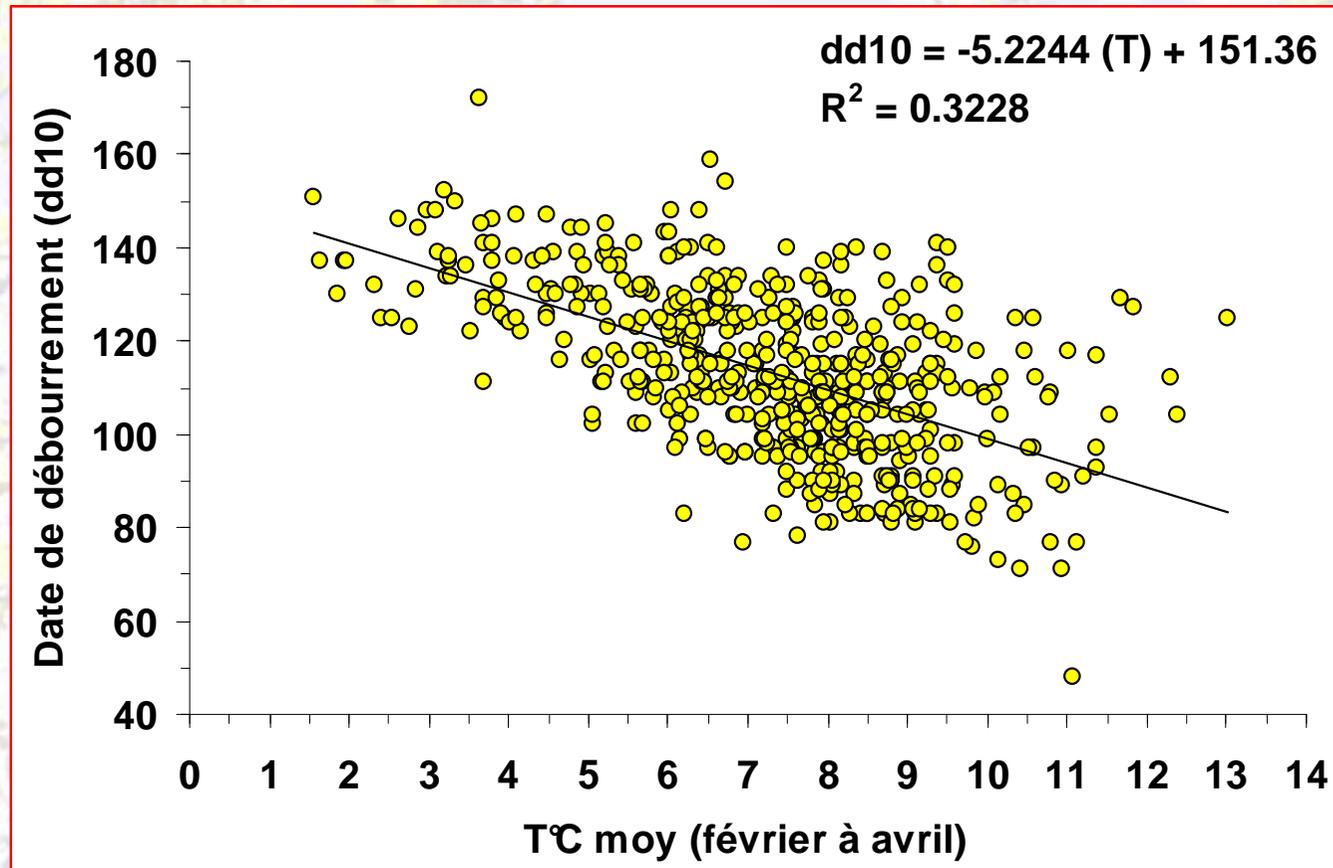


Débournement : avancé de 6 jours / °C

Stade 90% ; $r^2 = 0,36$; $dd90 = -5,1361 (T) + 160,59$

Relations directes avec la température

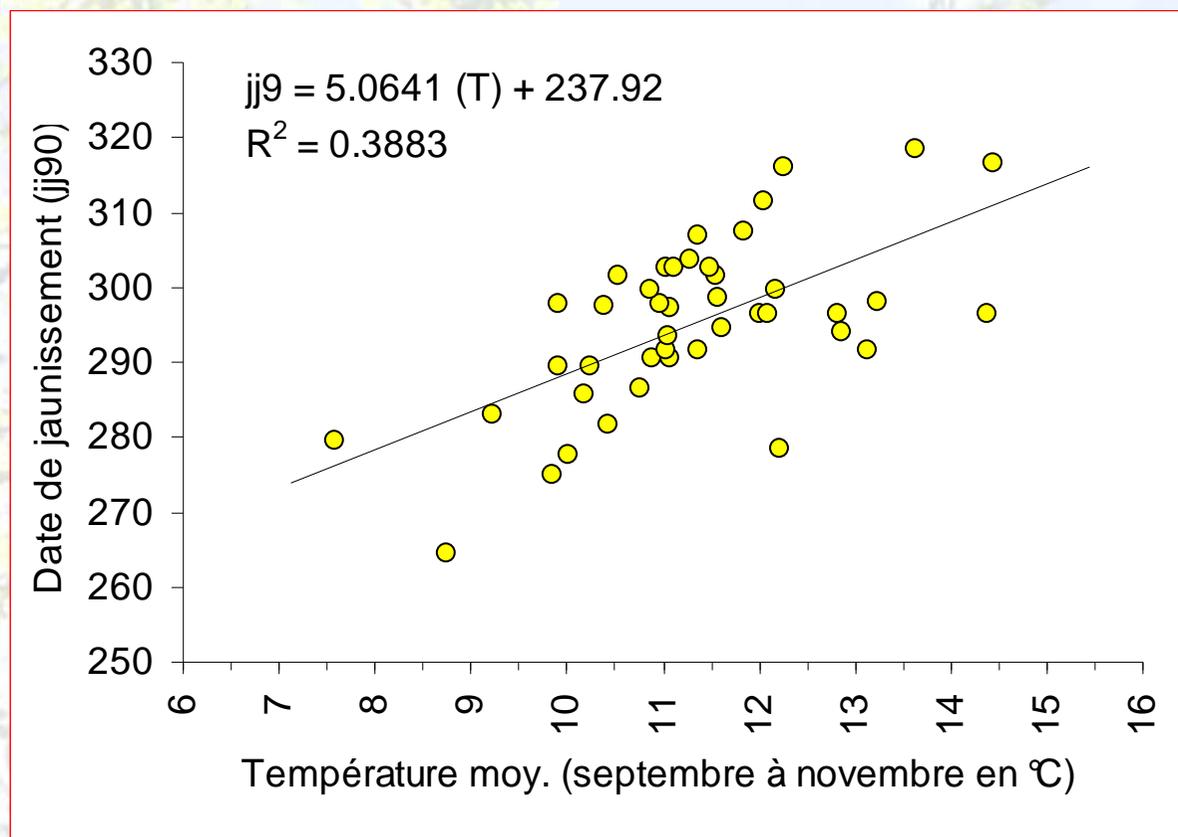
Pour le débourrement (avec 553 données)



Débourrement : avancé de 5 jours / °C

Relations directes avec la température

Pour le jaunissement (uniquement 42 feuillus)

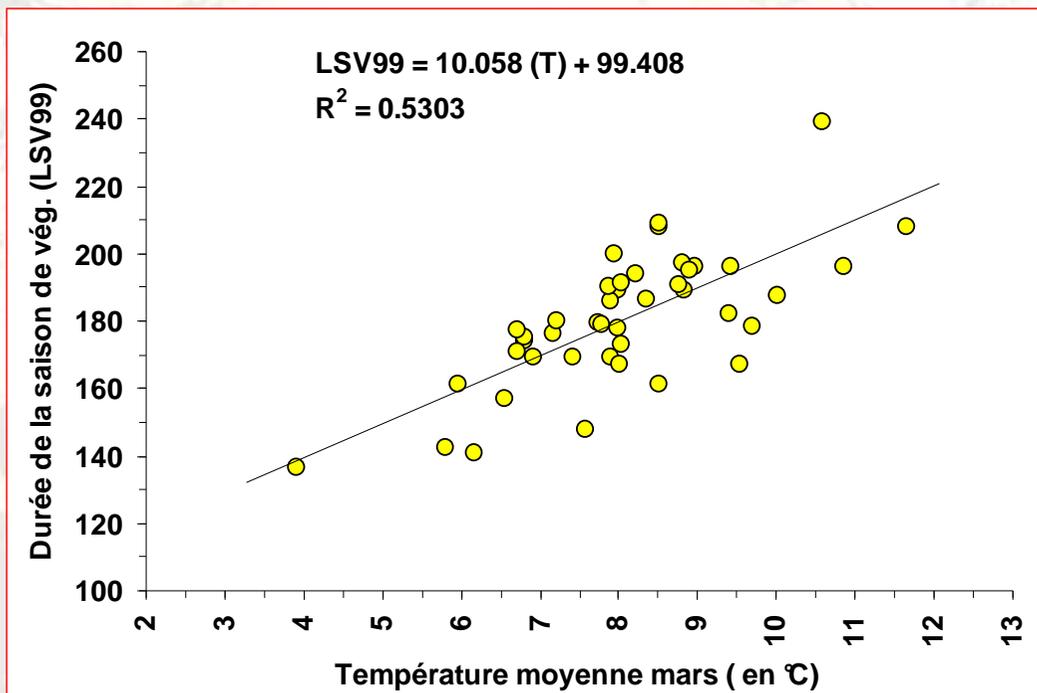


Jaunissement : retard de 5 jours / °C

Relations directes avec la température

- **Pour la longueur de la saison de végétation (42 feuillus uniquement)**
- corrélations $lsv_{99} > lsv_{19} > lsv_{11} > lsv_{91}$
- corrélations les plus fortes avec fin hiver / début printemps
- le mois de mars expliquent plus de 50% pour lsv_{99} et lsv_{19}

Paramètre	Equation avec la...(r ²)	
	Temp. moy. annuelle (°C)	Temp. moy. de mars (°C)
LSV99	=59.8333 + 10.7525 (T) ; (0.506)	=101.341 + 9.8999 (T) ; (0.548)
LSV19	=54.3763 + 12.1762 (T) ; (0.483)	=100.9134 + 11.2685 (T) ; (0.529)
LSV11	=56.2892 + 10.5385 (T) ; (0.375)	=95.3167 + 9.9078 (T) ; (0.424)
LSV91	=60.5516 + 9.1302 (T) ; (0.308)	=94.5901 + 8.5582 (T) ; (0.346)



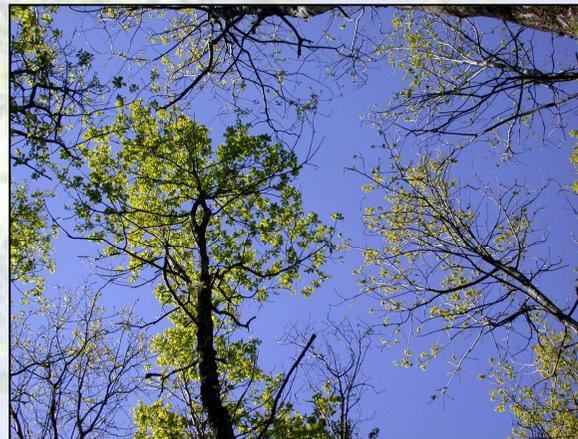
↓
environ +10 jours / °C

Avec altitude : -3 jours / 100 m

Conclusions partielles : relations directes « simples »

- A cette échelle spatiale et temporelle, fortes corrélations entre les phénophases et les paramètres simples disponibles
- $dd_{10} > dd_{90}$ et $jj_{90} > jj_{10}$
- **Effet de l'altitude** : une augmentation de 100 m se traduit par...
 - Un retard de débourrement de 2 jours
 - Une diminution de la durée de la saison de végétation de 3 jours
- **Effet thermique** : une augmentation de la température de 1°C se traduit par...
 - une précocité du débourrement de 6 jours
 - un rallongement de la saison de végétation de 10 jours

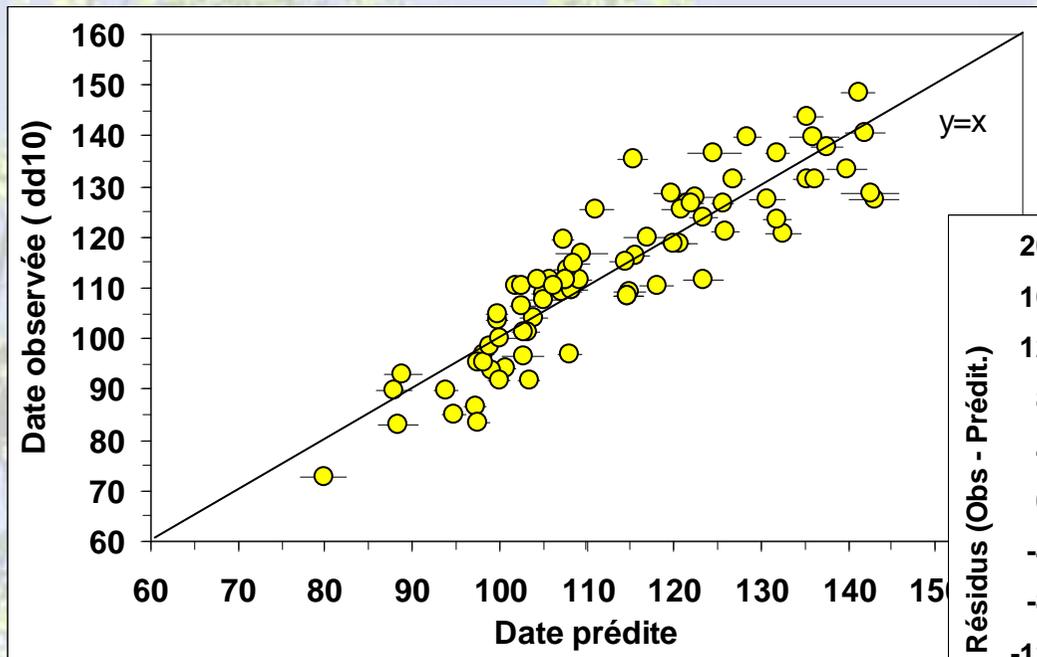
Peut-on construire des modèles à l'échelle de la France entière ?



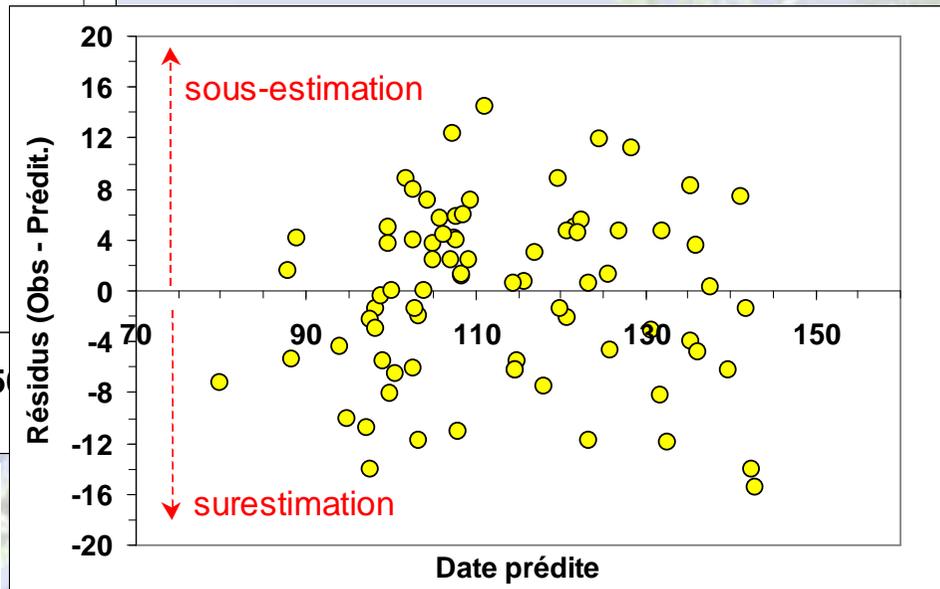
Modèle de prédiction du débourrement : global (dd10 - 79 peuplements)

$$dd10 = -9.8719 + 16.0713 (\text{esp.}) + 0.0208 (\text{alt.}) + 2.6379 (\text{Lat.}) - 1.7344 (\text{Tmoy année})$$

$r^2 = 0.806$; $F = 76.99$, $Pr (F) = 0.0000$ (Feuillus = code 0 et Résineux = code 1)



$T_{max} \text{ année: } r^2=0.813$; $T_{mars: } r^2=0.809$



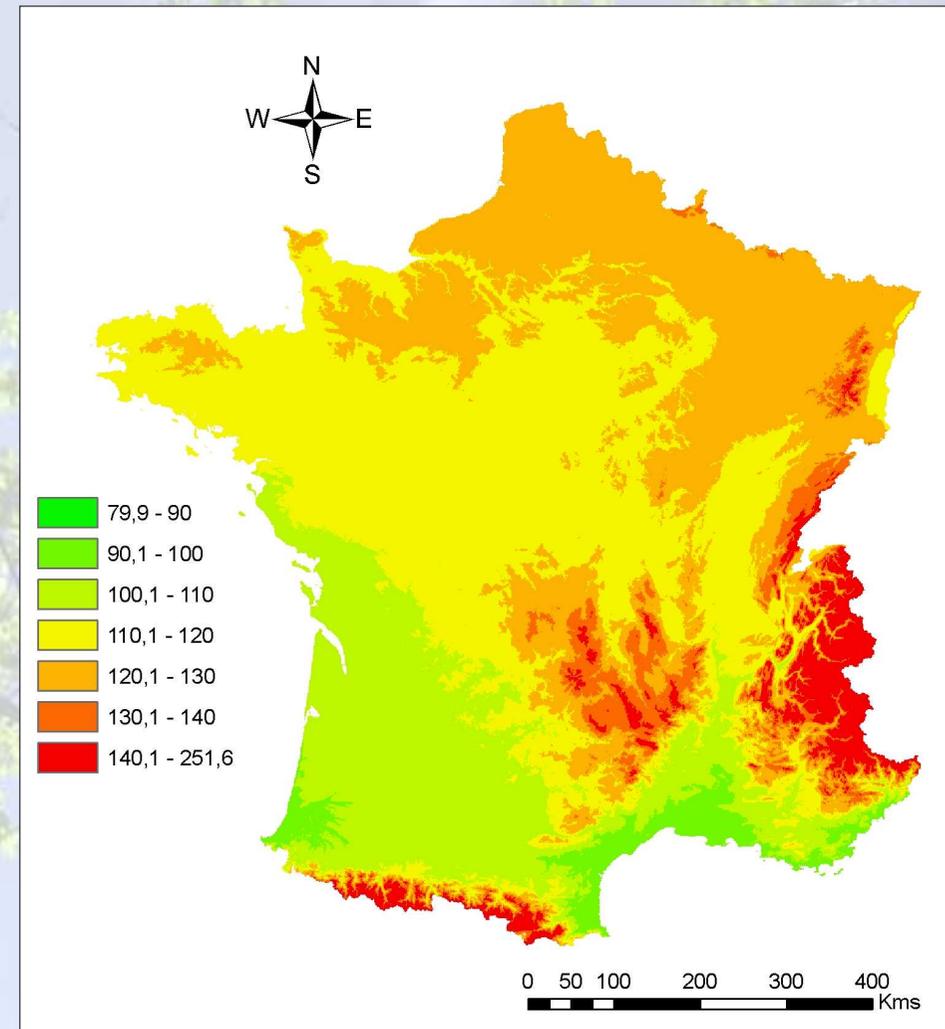
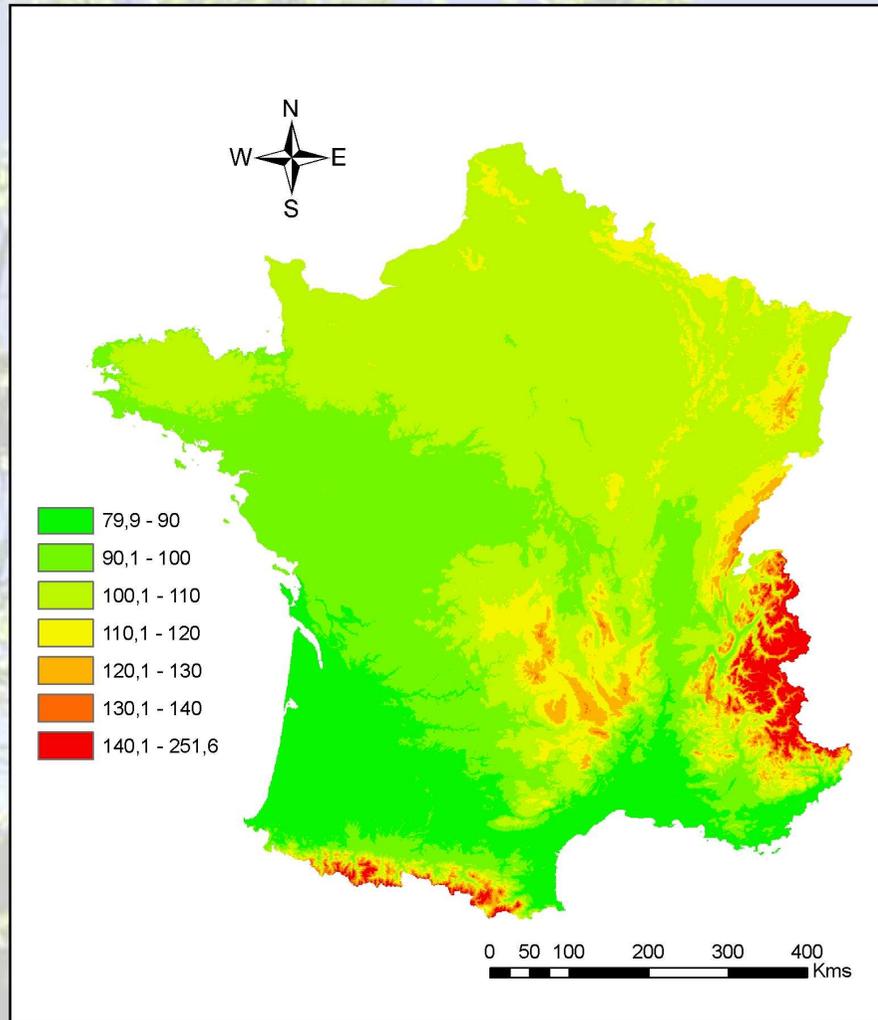
	Débourrement 10%		Débourrement 90%	
	Observations	modèle	Observations	modèle
Min:	72.6	80.0	79.6	96.0
1st Qu.:	101.3	103.0	113.7	113.0
Mean:	113.1	113.2	124.2	124.1
Median:	111.6	109.0	122.3	120.0
3rd Qu.:	126.6	123.0	134.0	134.5
Max:	148.6	143.0	156.6	151.0
Std Dev.:	16.5	14.9	15.5	13.5
Ecart moyen:		0.013		-0.013
Ecart absolu moyen :		5.71		5.91
Ecart quadrati. moyen (RMSD):		7.06		7.57

Cartographie du débourrement stade 10% (C. Piedallu, ENGREF)

$$dd10 = -9.8719 + 16.0713 (\text{esp.}) + 0.0208 (\text{alt.}) + 2.6379 (\text{Lat.}) - 1.7344 (\text{Tmoy année})$$

code esp=0 (F)

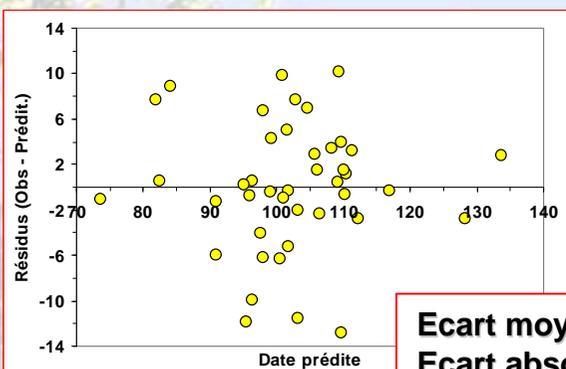
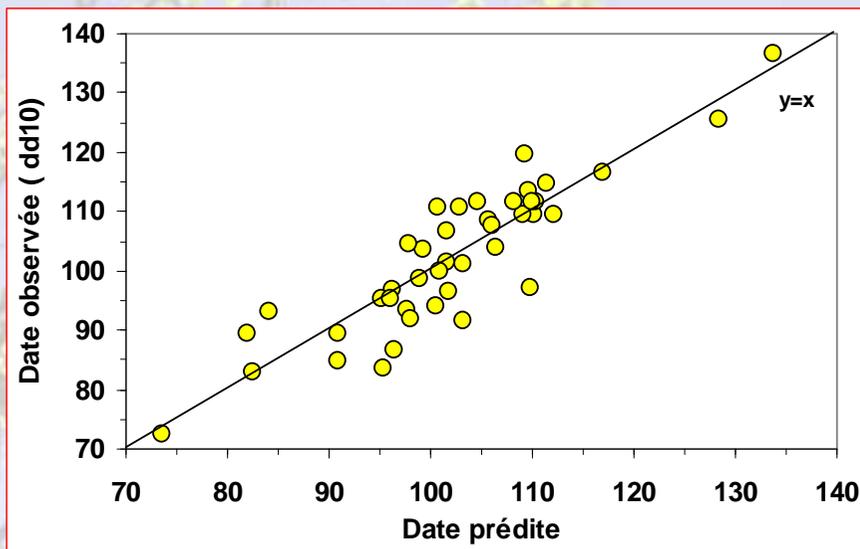
code esp=1 (R)



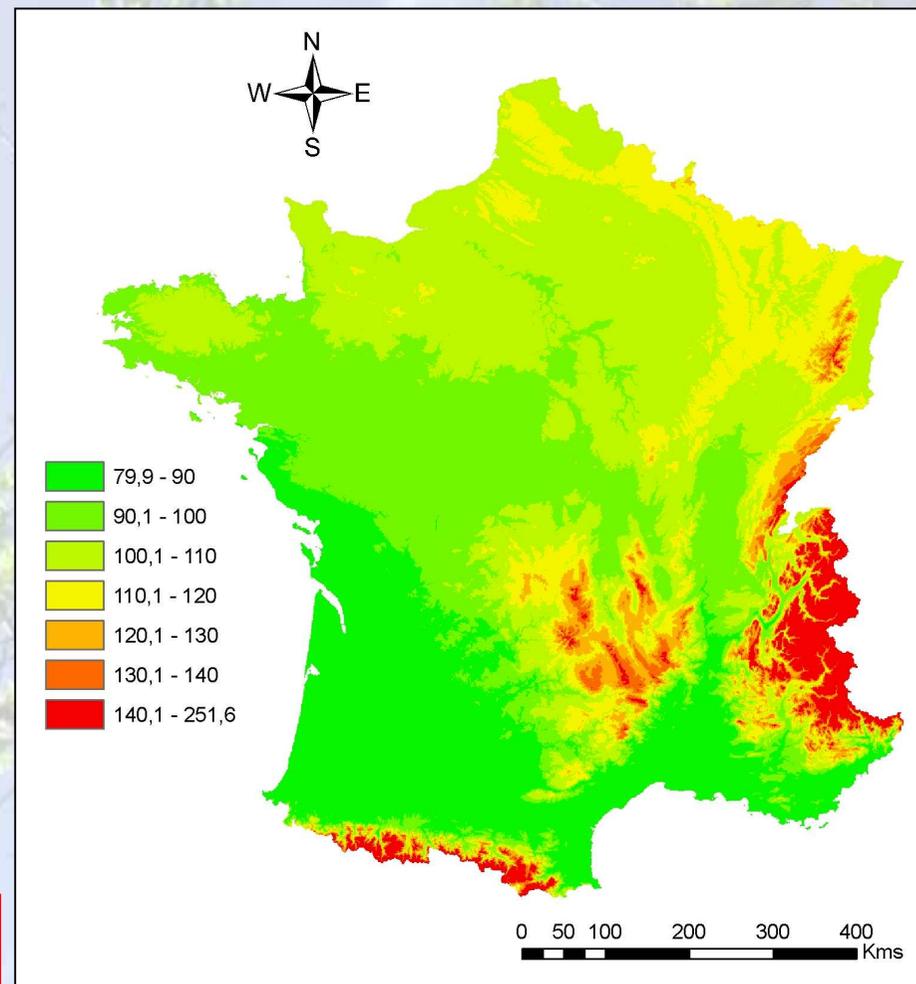
Modèle de prédiction du débourrement : feuillus (dd10 - 42 peuplements)

$$\text{dd10} = -60.677 + 3.788 (\text{lat.}) + 0.032 (\text{alt.}) - 2.394 (\text{Tmoy année})$$

$r^2=0.793$; $F = 48.58$; $\text{Pr} (F) = 0.0000$



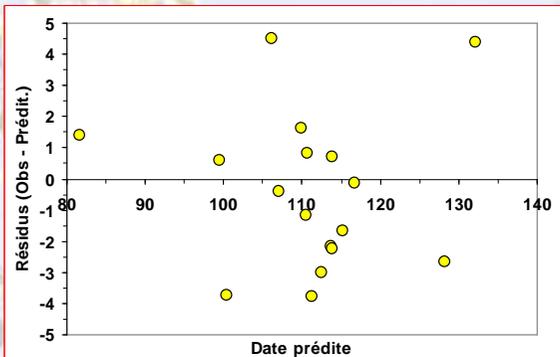
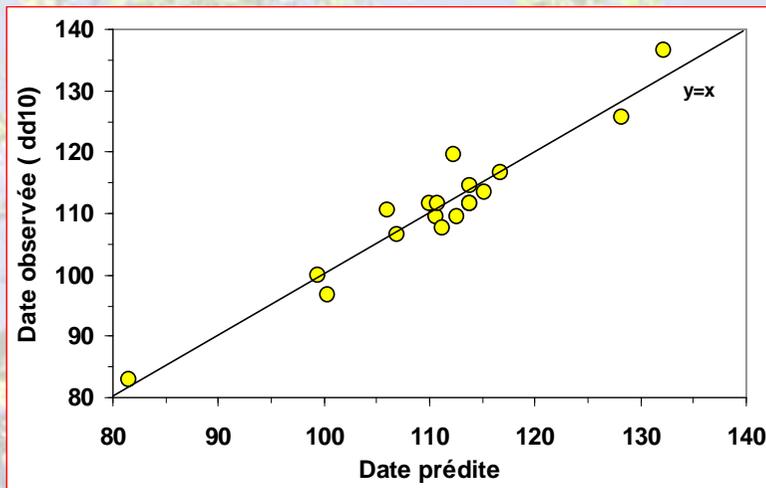
Ecart moyen : -0.08
Ecart absolu moyen : 4.3
Ecart quadrat. Moyen : 5.6



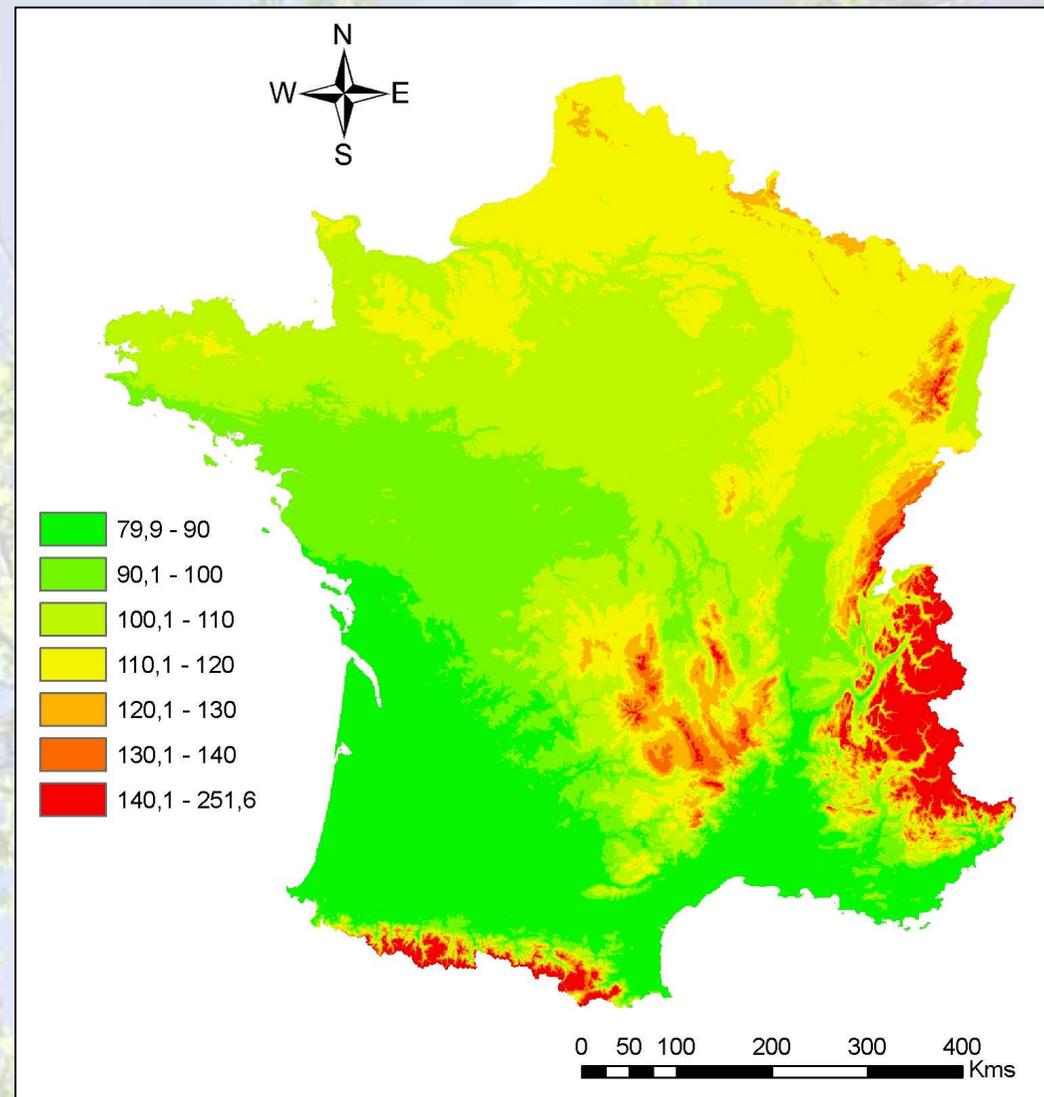
Modèle de prédiction du débourrement : hêtre (dd10 - 18 peuplements)

$$\text{dd10} = -111.769 + 4.881 (\text{lat.}) + 0.032 (\text{alt.}) - 2.164 (\text{Tmoy année})$$

$r^2=0.927$; $F = 59.1$; $\text{Pr} (F) = 0.0000$



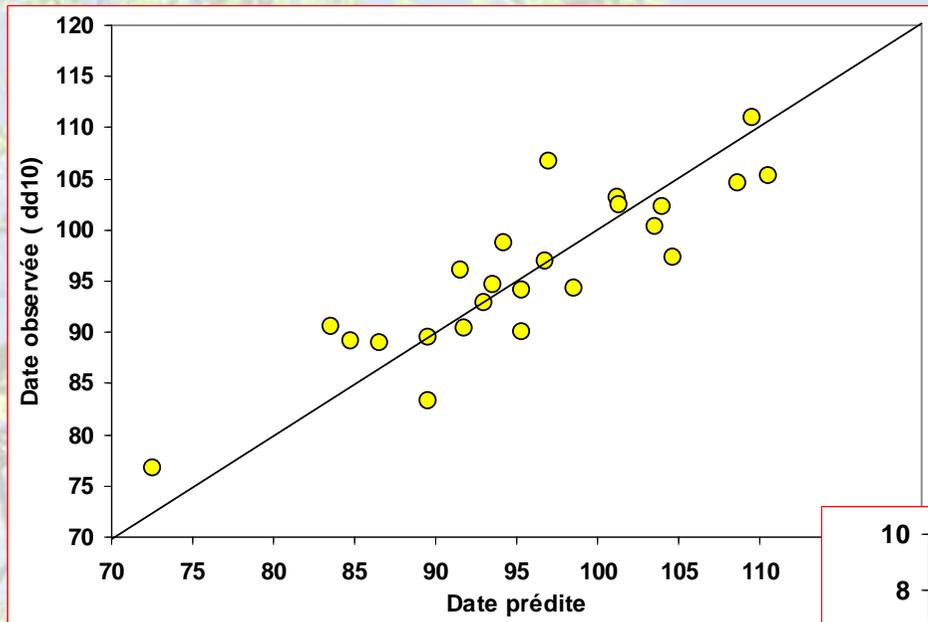
Ecart moyen : -0.02
Ecart absolu moyen : 2.3
Ecart quadrat. Moyen : 2.9



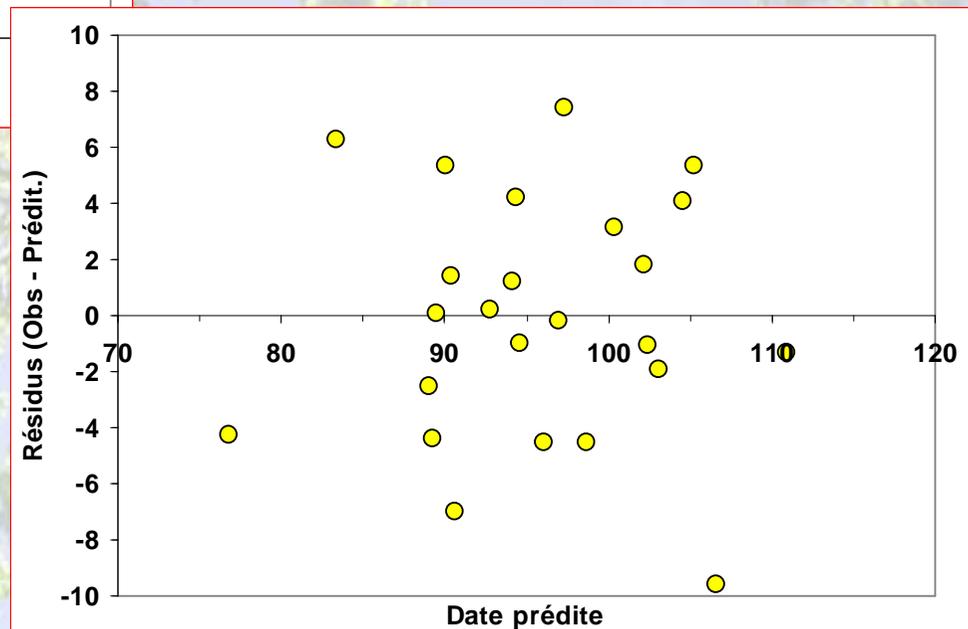
Modèle de prédiction du débourrement : chênes (dd10 - 24 peuplements)

$$\text{dd10} = -491.236 + 10.779 (\text{lat.}) + 2.466 (\text{long.}) + 0.020 (\text{Rg Jan})$$

$r^2=0.768$; $F = 22.03$; $\text{Pr} (F) = 0.0000$



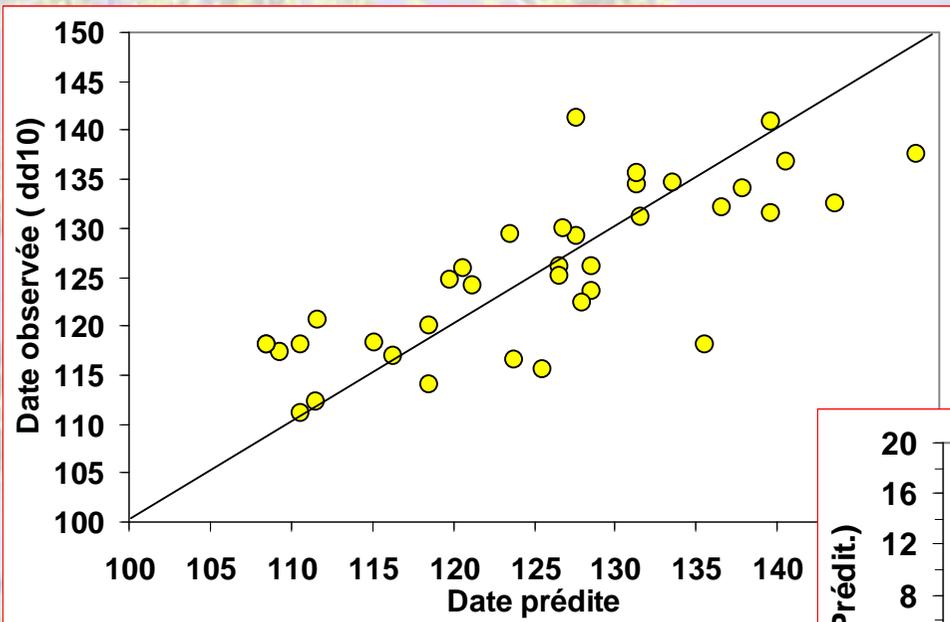
Ecart moyen	: -0.09
Ecart absolu moyen	: 3.9
Ecart quadrat. Moyen	: 4.7



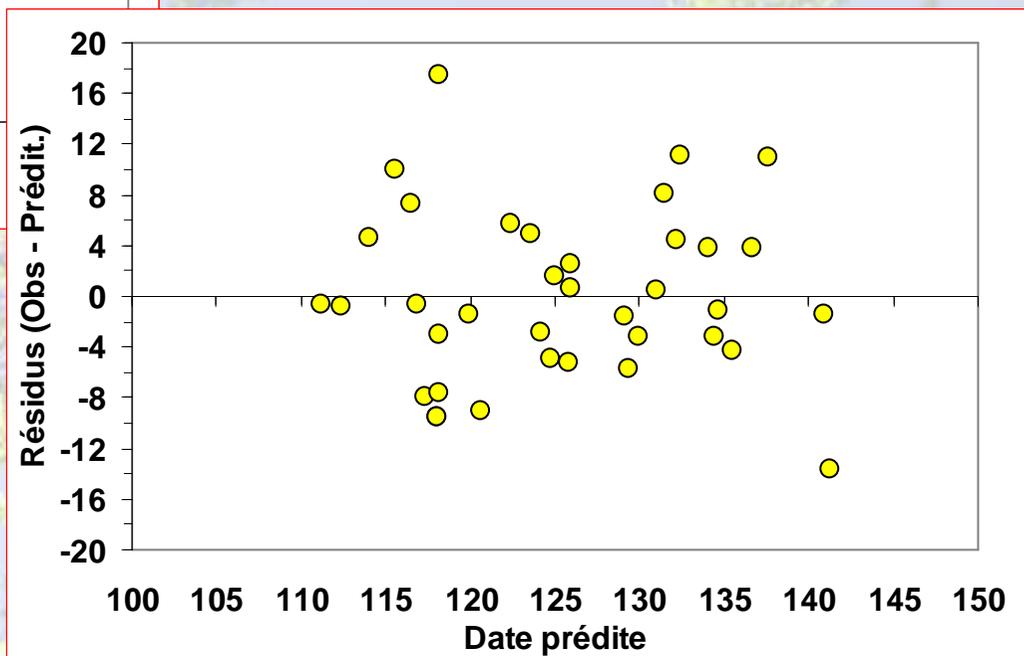
Modèle de prédiction du débourrement : résineux (dd10 - 37 peuplements)

$$\text{dd10} = 145.502 + 0.022 (\text{Alt.}) - 0.319 (\text{Insol. fév})$$

$r^2=0.605$; $F = 25.98$; $\text{Pr} (F) = 0.0000$

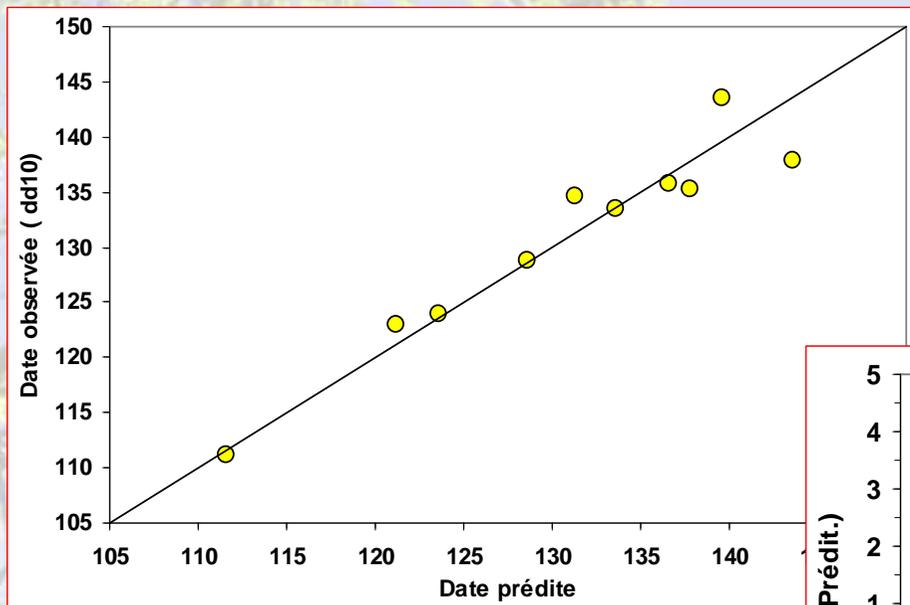


Ecart moyen	: 0.006
Ecart absolu moyen	: 5.3
Ecart quadrat. Moyen	: 6.6

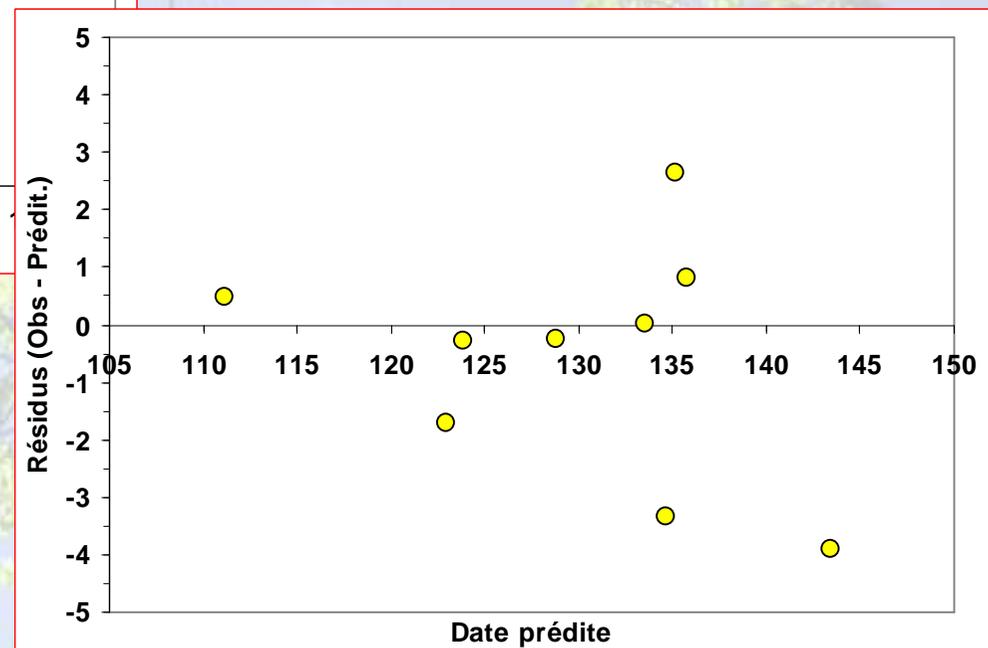


Modèle de prédiction du débourrement : sapin (dd10 - 10 peuplements)

$dd10 = 1956.894 - 31.977$ (lat.) - 3.681 (Insol. jan-fév)
 $r^2=0.919$; $F = 39.46$; $Pr(F) = 0.00015$



Ecart moyen : 0.009
Ecart absolu moyen : 1.9
Ecart quadrat. Moyen : 2.6



Conclusions....





Variabilité spatiale et temporelle

- **Début de la saison de végétation...**
 - en plaine, entre la première et troisième semaine d'avril
 - en montagne, 15 premiers jours de mai
 - gradient altitudinal : environ - 2 jours / 100 m
 - **Fin de la saison de végétation...**
 - troisième semaine d'octobre
 - plus faible variabilité que le débourrement
- => durée de 180 à 200 jours**



Cohérence avec les 60 000 observations européennes (1961-1998)

(Rötzer et Chmielewski 2001 ; Chmielewski et Rötzer 2001, 2002)

- début 10 et 25 avril (moyenne: 23 avril) (décalage un mois montagne et médit.)
- fin 28 octobre (fin plus précoce aux latitudes élevées)
- durée de moins de 180 jours (lat. ou alt. élevées) à plus de 220 jours (régions côtières, sud de la France, etc.)
- gradient altitudinal : environ - 3 jours / 100 m (déb., floraison, pousse mai, etc.)

📌 Déterminisme climatique des phénophases

- **dd10 > dd90 et jj90 > jj10**
- **rôles majeurs de ...**
 - de l'espèce
 - de la latitude (*longitude*), de l'altitude
 - du régime thermique (printanier et/ou annuel)



Cohérence avec observations européennes de Rötzer et Chmielewski 2001

- 30 à 90% du déterminisme des phénophases

Espèce	Paramètre (Y)	JJm	Equations.	R ² (%)	SE (jour)
<i>Betula pubescens</i> (n=47)	Débourrement	113	$Y = -16 + 2.8 (\text{Alt.}) + 0.7 (\text{Long}) + 2.1 (\text{Lat.})$	91	3.5
<i>Picea abies</i> (n=49)	Elongation du mois de mai	133	$Y = 3.9 + 3.1 (\text{Alt.}) + 0.4 (\text{Long}) + 2.0 (\text{Lat.})$	81	6.4
<i>Pinus sylvestris</i> (n=38)	Elongation du mois de mai	133	$Y = -20.9 + 2.6 (\text{Alt.}) + 0.4 (\text{Long}) + 2.6 (\text{Lat.})$	87	5.6
Toute espèce Saison de Vég.	Début (n=37)	111	$Y = -32.6 + 3.1 (\text{Alt.}) + 0.5 (\text{Long}) + 2.3 (\text{Lat.})$	83	5.2
	Fin (n=29)	303	$Y = 310.6 - 1.0 (\text{Alt.}) - 0.2 (\text{Long}) - 0.1 (\text{Lat.})$	32	6.5

Déterminisme climatique des phénophases

- **gradients pour le débourrement :**
 - - 2 jours / 100 m
 - - 4 jours par degré de longitude
 - + 6 jours par degré de température (printemps et/ou année)
- **gradients pour la saison de végétation :**
 - - 3 jours / 100 m
 - + 10 jours par degré de température (printemps et/ou année)
- **les modèles :**
 - 2 à 6 paramètres
 - r^2 entre 0,32 et 0,92
 - qualité de prédiction du...
 - débourrement : 2 à 6 jours
 - jaunissement : 5 à 8 jours
 - durée saison de végétation : 9 à 12 jours

Merci de votre IMMENSE attention !