



HAL
open science

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).

François F. Lebourgeois, Philippe Godfroy, J-Claude J.-C. Pierrat

► **To cite this version:**

François F. Lebourgeois, Philippe Godfroy, J-Claude J.-C. Pierrat. 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).. 15. Réunion du réseau CATAENAT, Mar 2006, Anglet, France. 42 p. hal-02814901

HAL Id: hal-02814901

<https://hal.inrae.fr/hal-02814901>

Submitted on 6 Jun 2020

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.



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

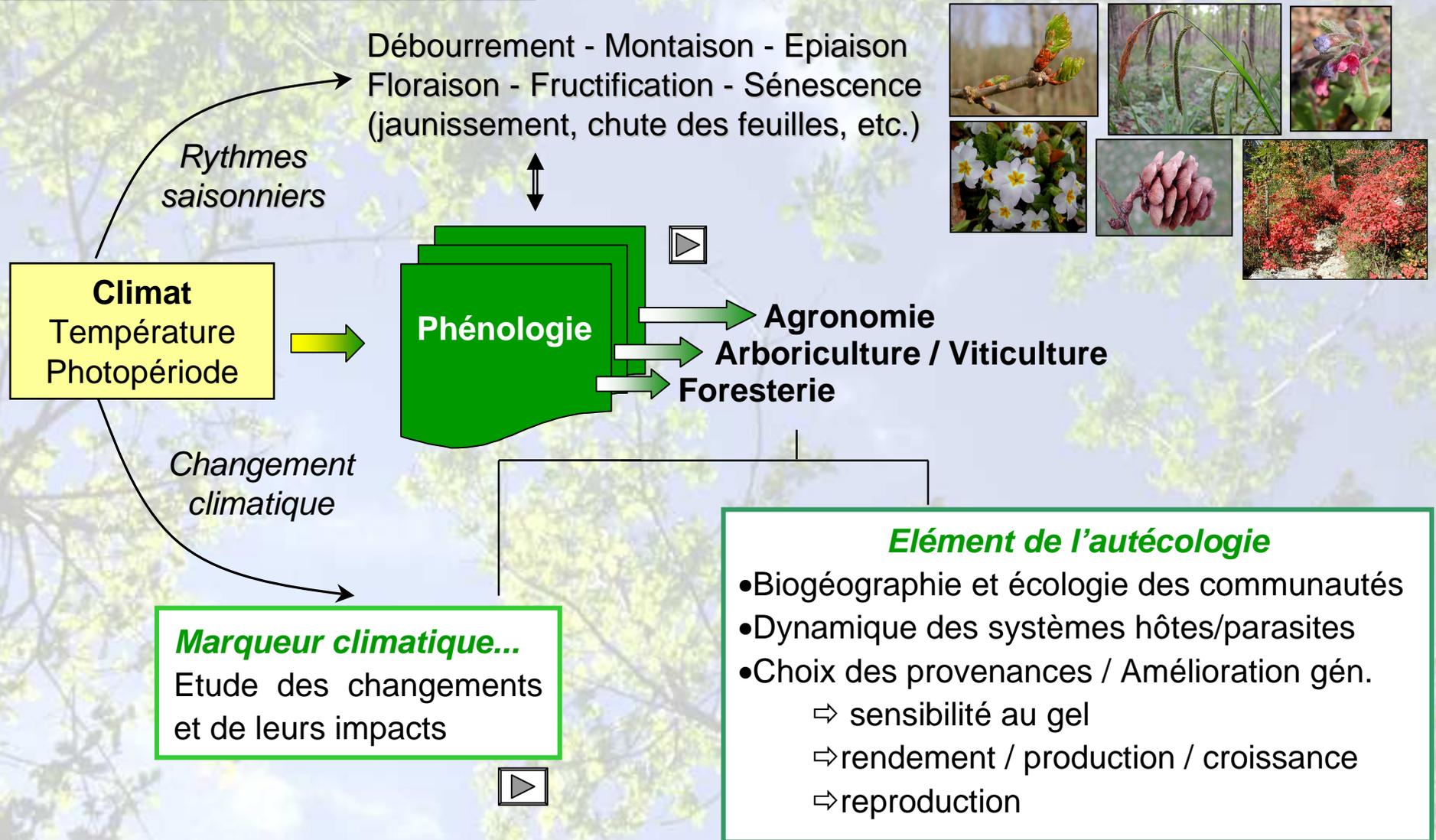
Observations phénologiques : concepts, intérêts et problématiques actuelles

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

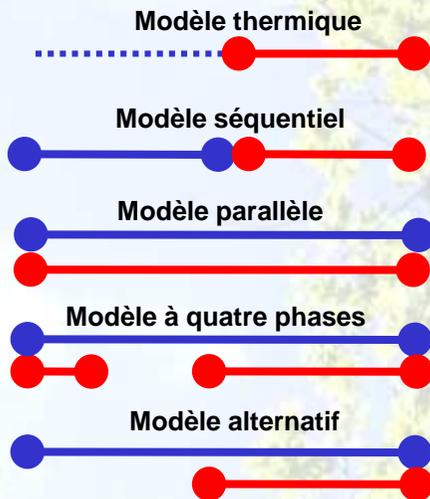
printemps



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

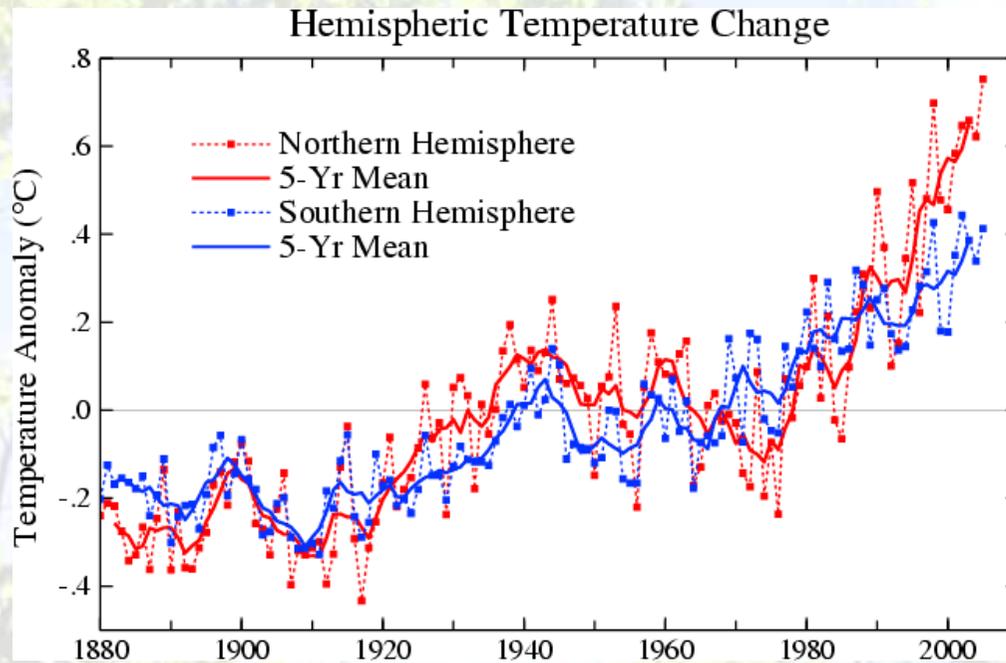
Satisfaction **des besoins en chaleur** : accumulation d'unités de croissance (*forcing units*) permettant aux bourgeons d'éclater

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

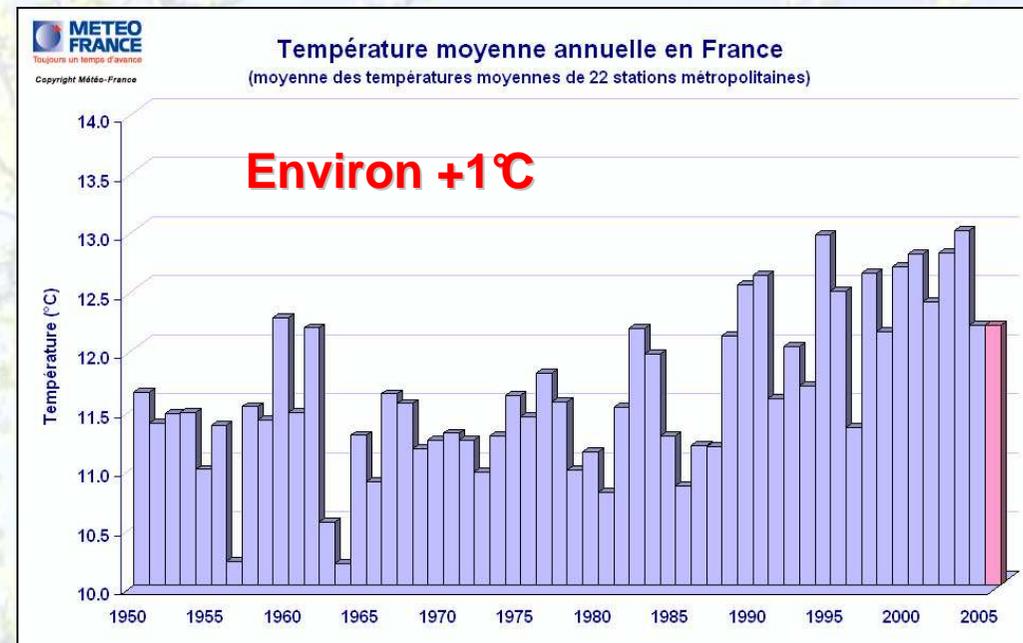


Dans le monde.... **+0,7°C**



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 ?

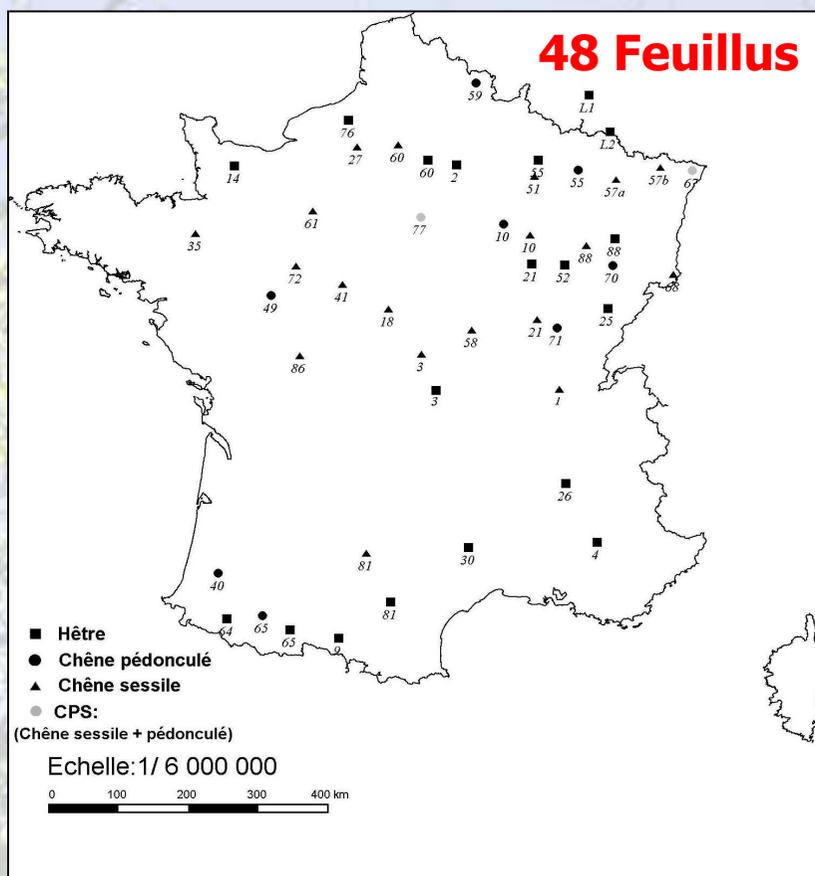
B. Quelle est la variabilité spatiale ?

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

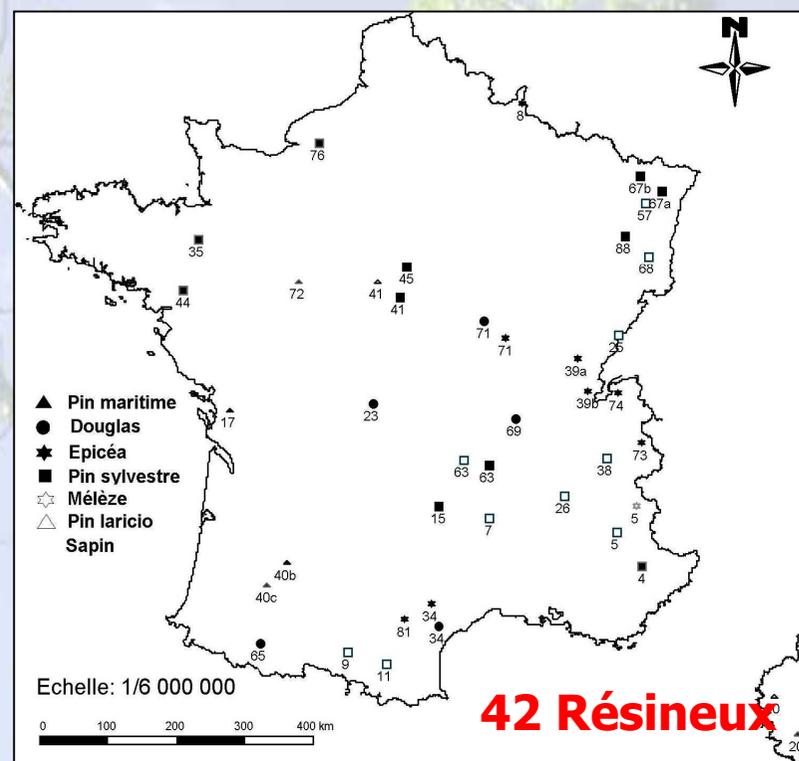
D. Peut-on construire des modèles « simples » à l'échelle de la France permettant d'expliquer ces variabilités ?

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

LSV19

LSV91

LSV99

jj1



jj9



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

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

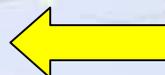
- **journalières de 1997-2003**
 - Tmin, Tmax, Tmoy, Durée insolation
- 20 stations RENECOFOR
- 58 stations Météo-France
 - => 79 peuplements (42 Fe/37 Re)
- **modélisées sous SIG (Piedallu, 2005)**
 - radiations globales (MJ/m²)



Objectifs de l'étude

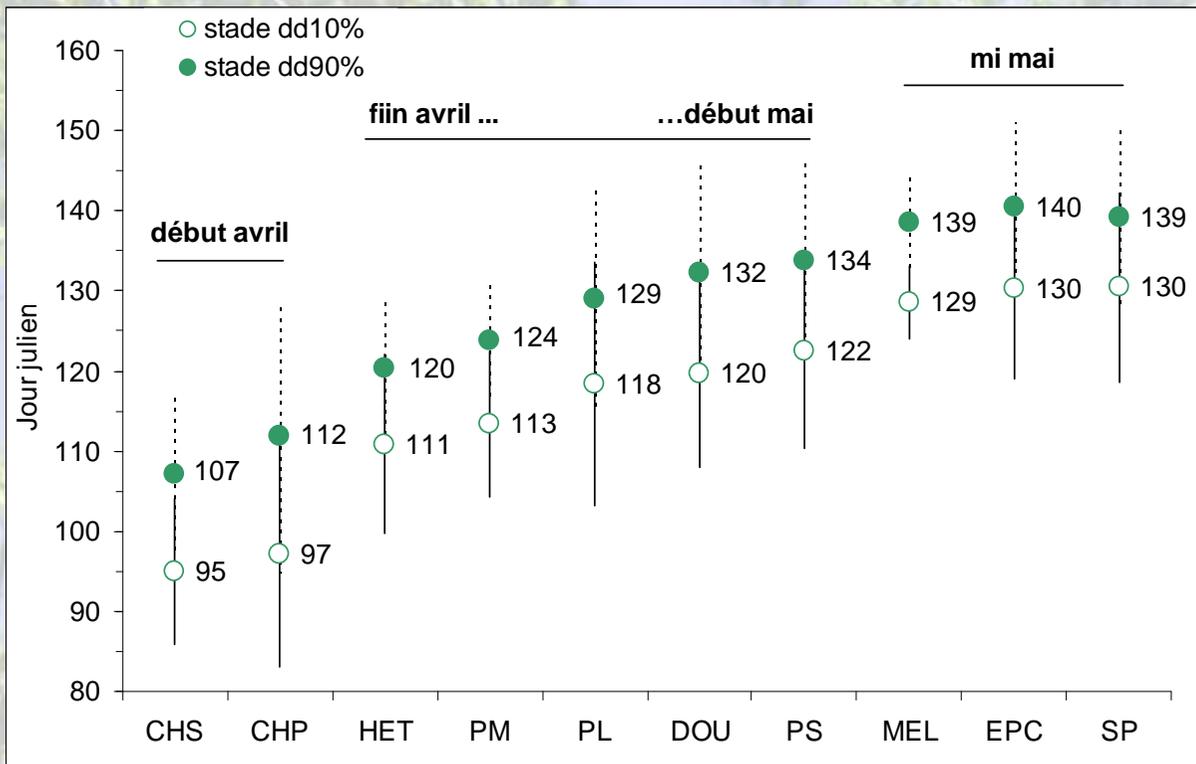
- moyenne 1997-2003
- variabilité régionale
- variabilité inter-espèces
- modèles de prédictions

- Taux d'explication les plus élevés (R^2)
- Ecart de prédiction les plus faibles
- Biologiquement pertinents
- Facilement applicables



Quelle est la variabilité interspécifique ?





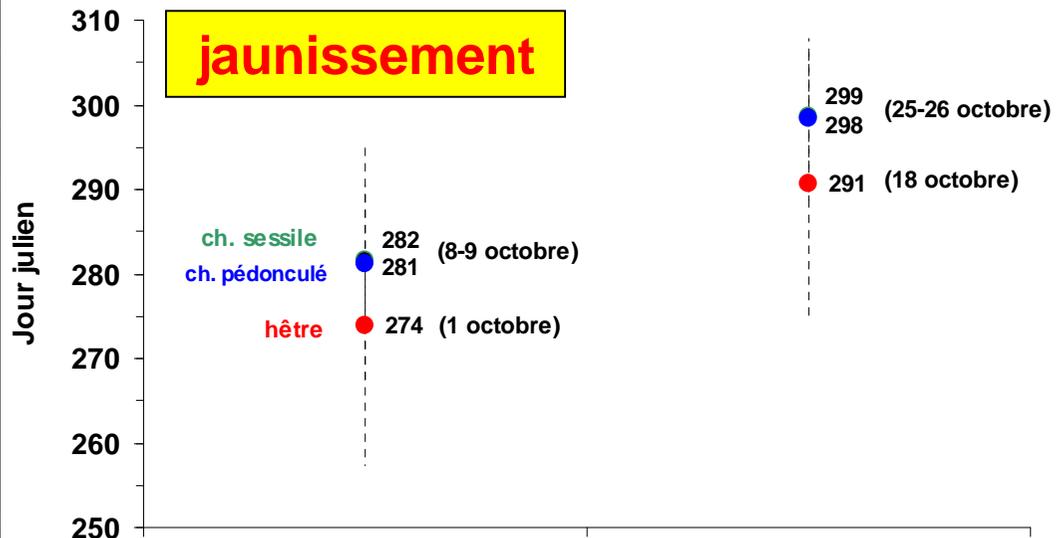
variabilité inter-espèce

débourrement

} $\Delta = 10$ jours



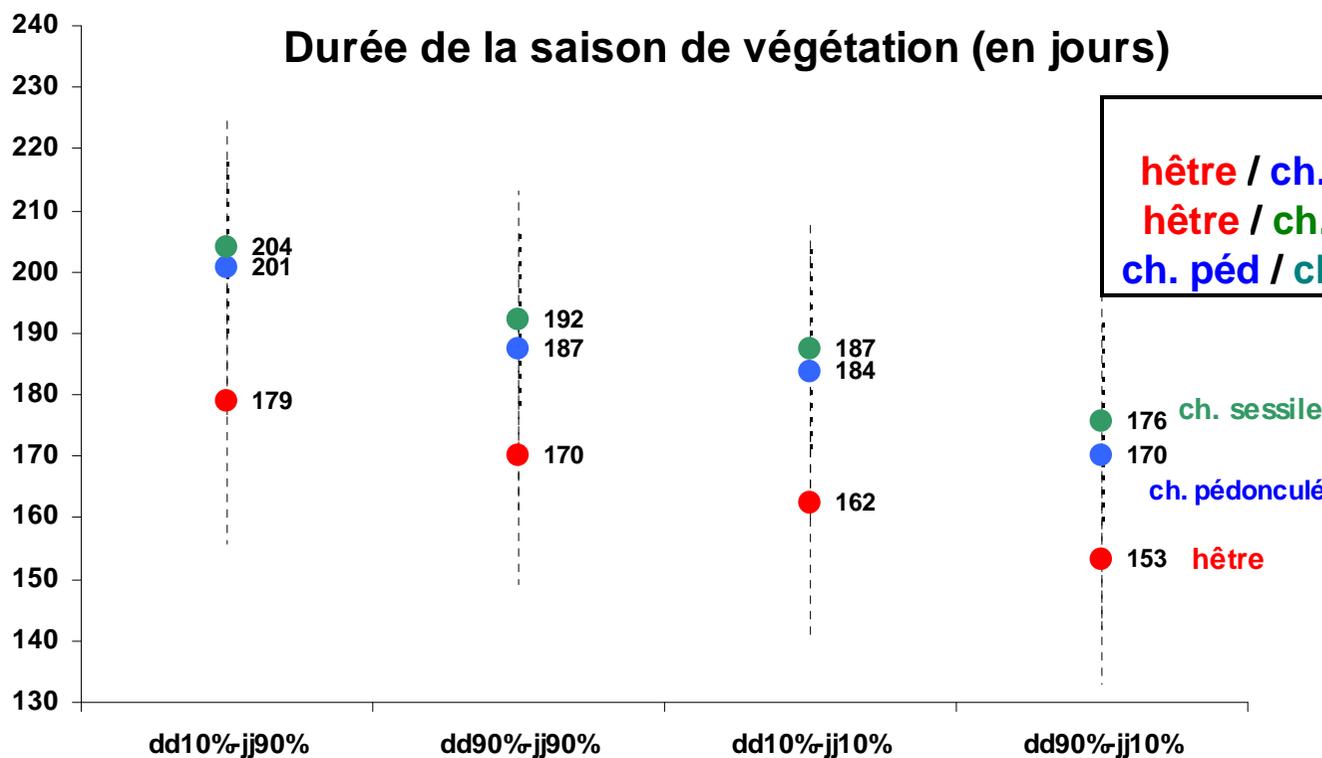
jaunissement



variabilité inter-espèce



Durée de la saison de végétation (en jours)

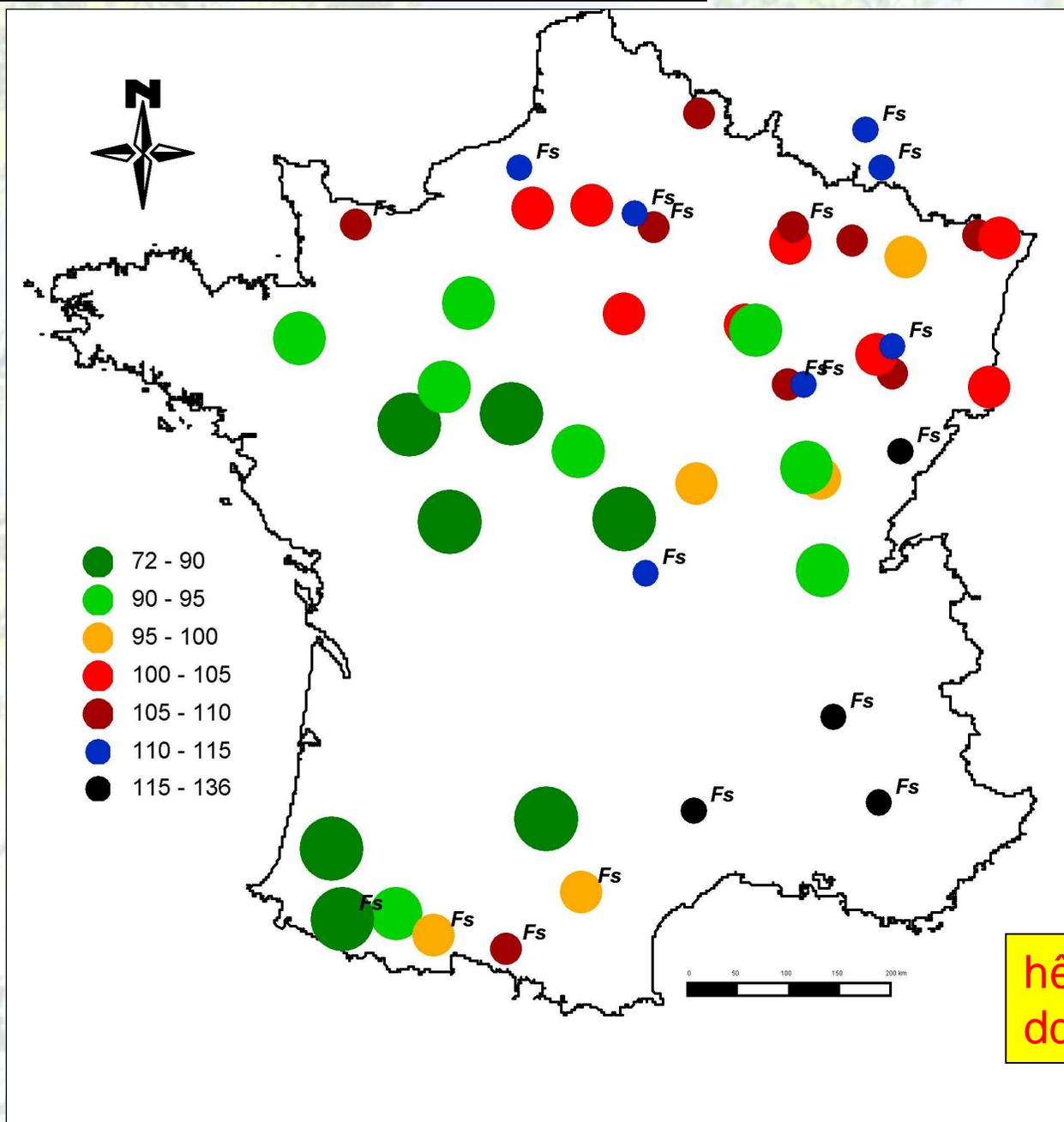


| Δ durée | |
|-------------------|------------|
| hêtre / ch. péd | - 19 jours |
| hêtre / ch. ses | - 24 jours |
| ch. péd / ch. ses | - 4 jours |

Quelle est la variabilité spatiale ?



variabilité régionale du débourrement

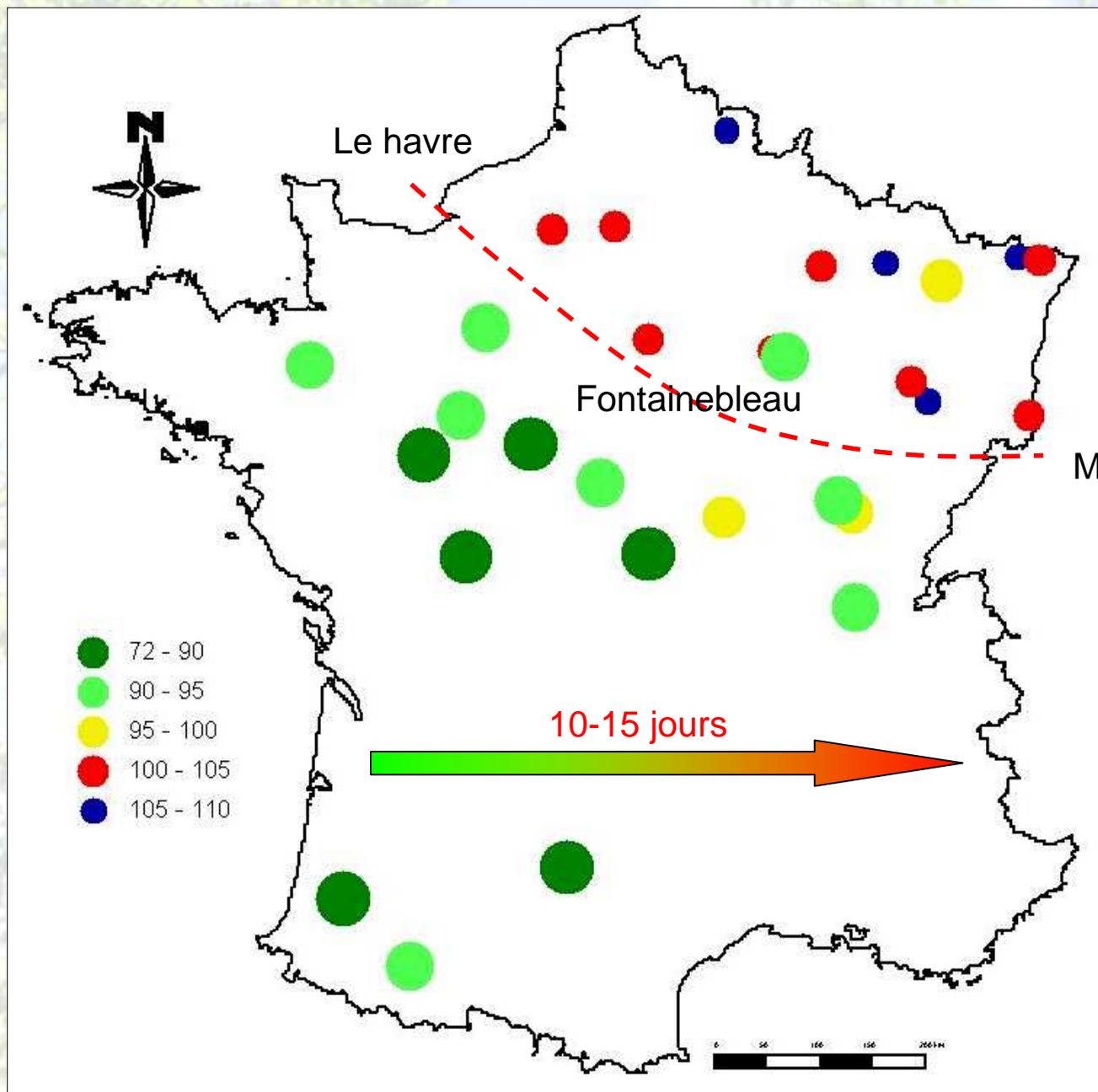


hêtre et chênes
dd10

variabilité régionale du débourrement



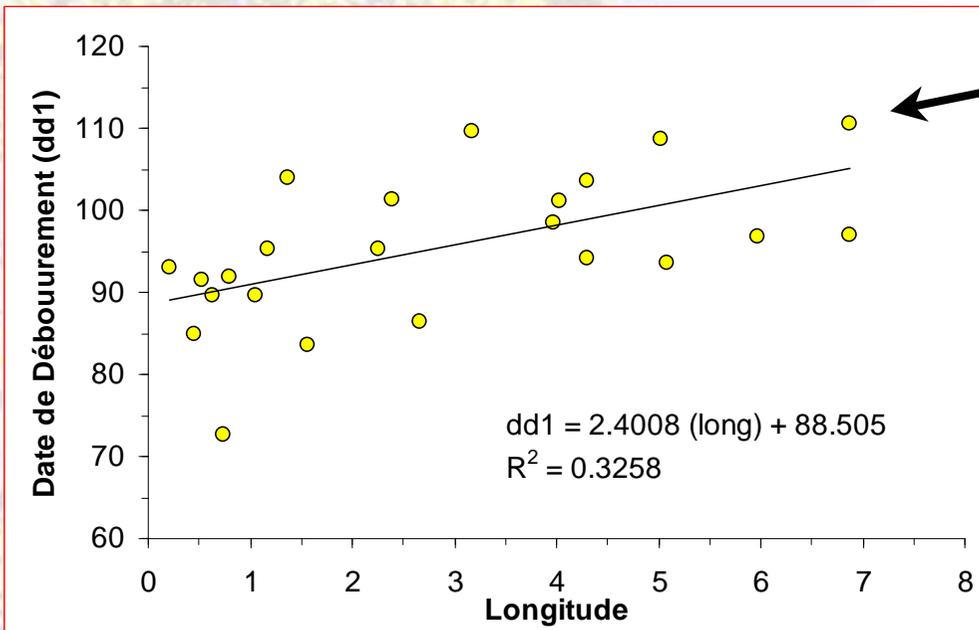
**chênes
dd10**



Relations directes entre les variables du milieu et les phénophases



Relations directes avec la longitude



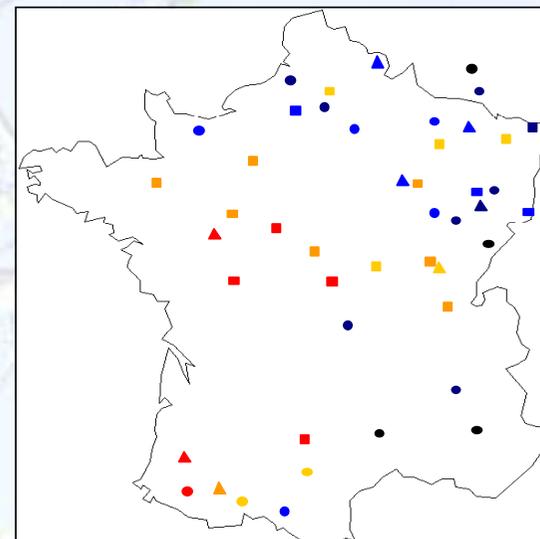
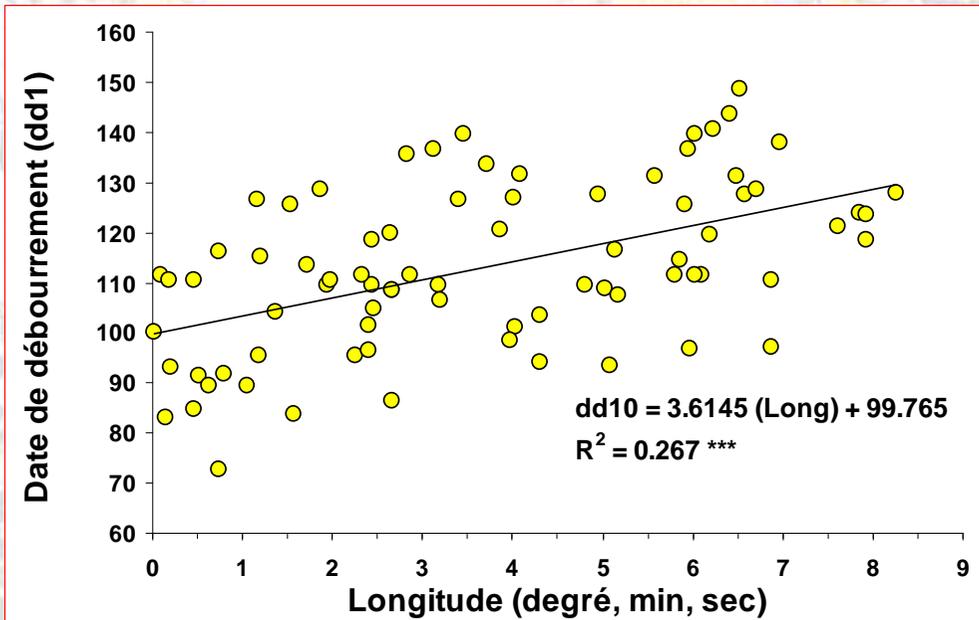
Un point = moyenne 1997-2003
pour un peuplement

Chênes

Débour. : - 2,4 jours / degré

Toutes les espèces

Débour. : - 4 jours / degré



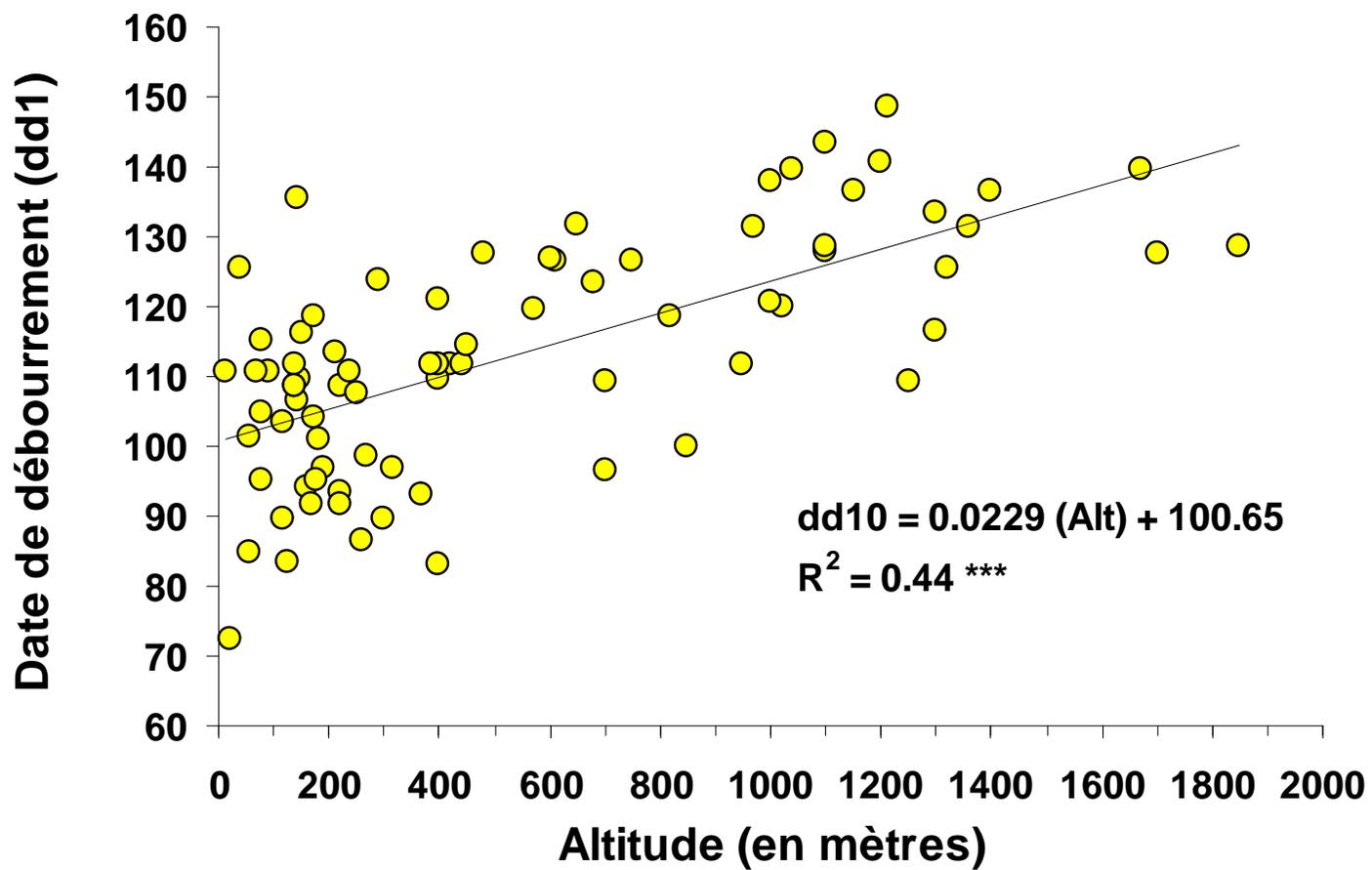
het65, dou65, het64, het14.....sp67, sp68

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 |

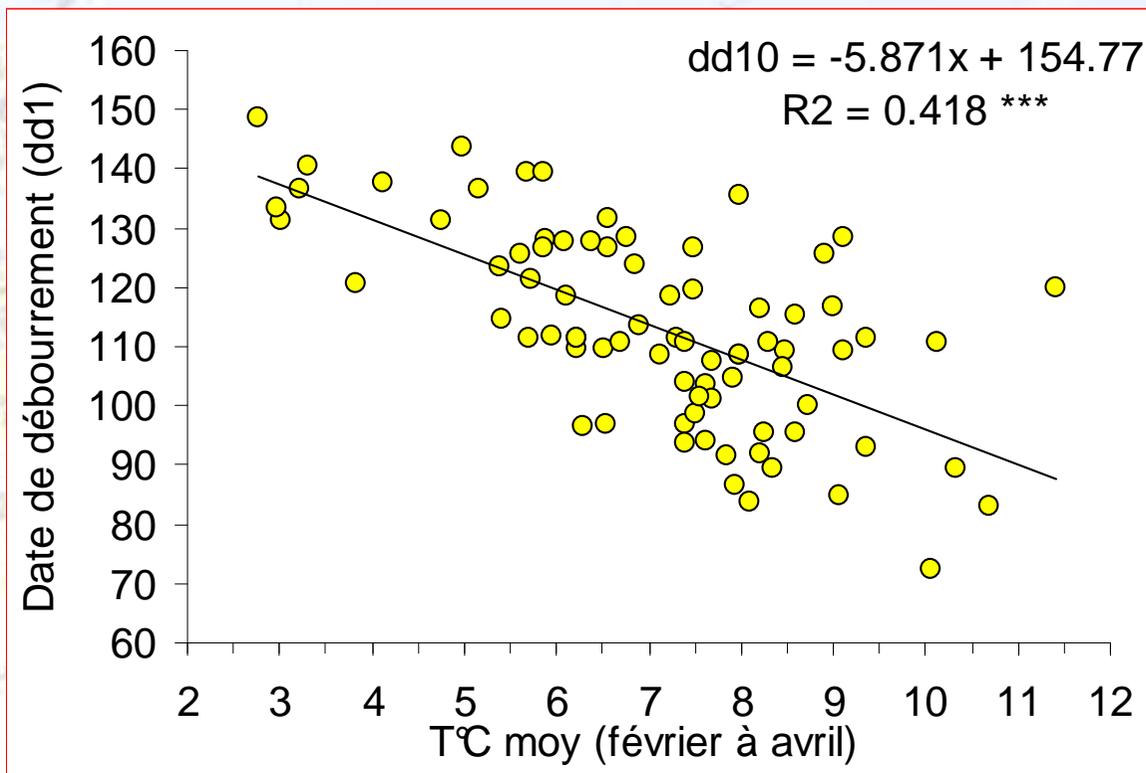
Débour. : - 2 jours / 100 m



Relations directes avec la température

Pour le débourrement

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

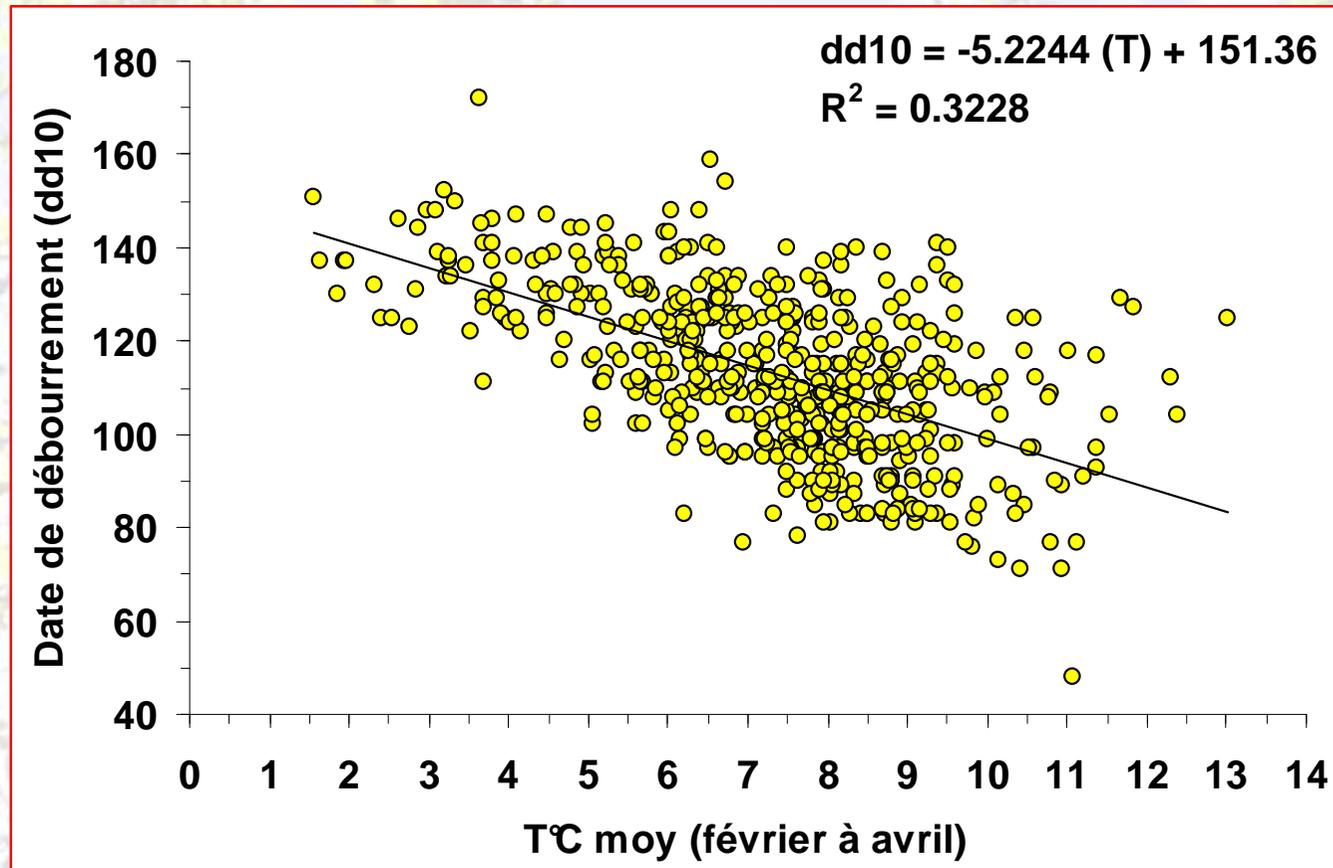


Débourrement : avancé de 6 jours / °C

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

Relations directes avec la température

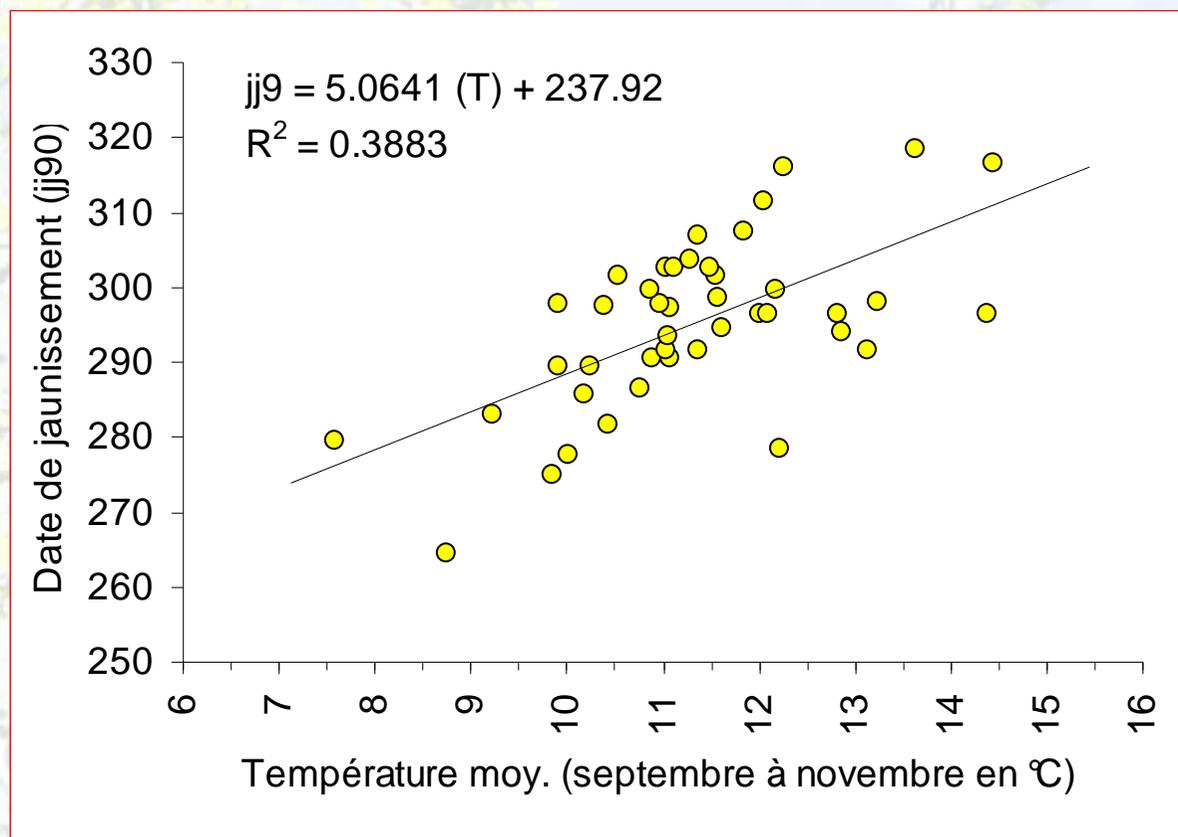
Pour le débourrement (avec 553 données)



Débourrement : avancé de 5 jours / °C

Relations directes avec la température

Pour le jaunissement (uniquement 42 feuillus)

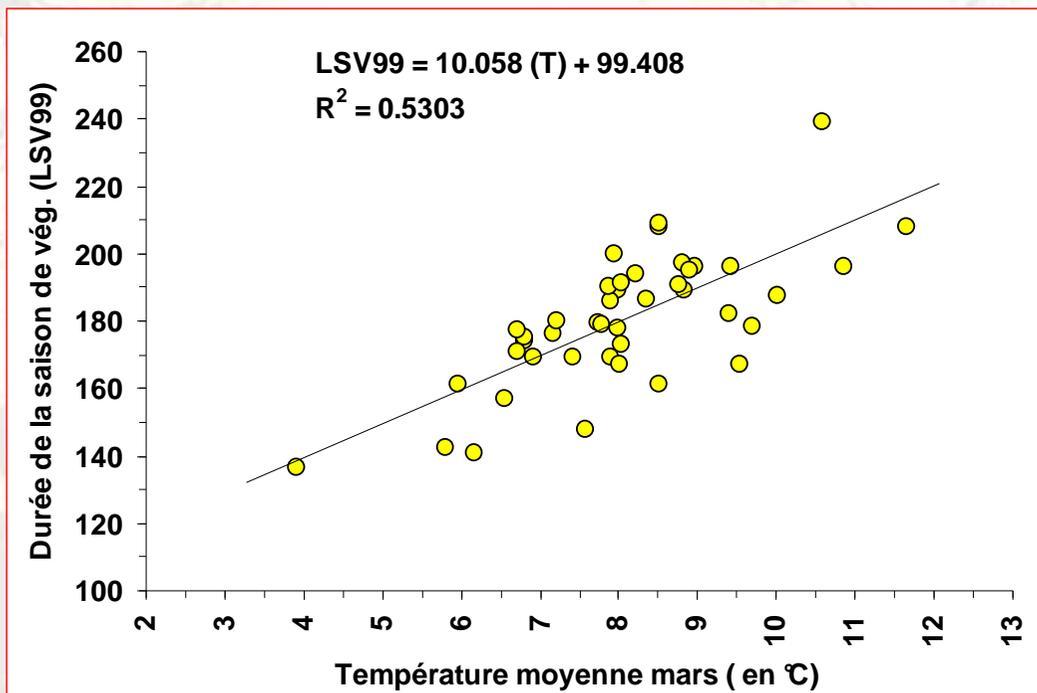


Jaunissement : retard de 5 jours / °C

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

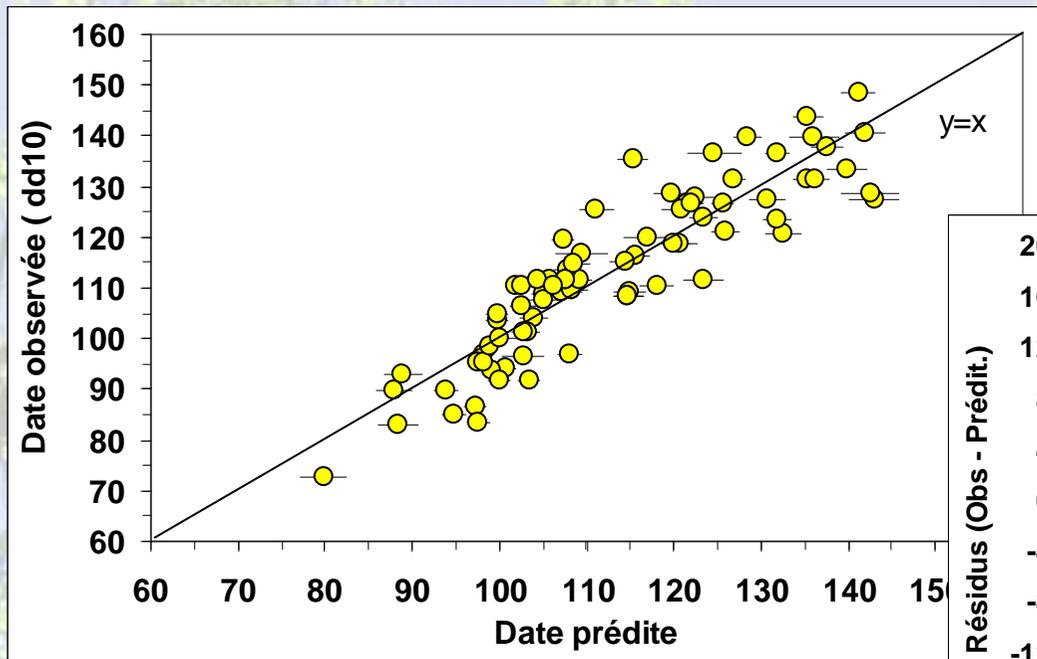
Peut-on construire des modèles à l'échelle de la France entière ?



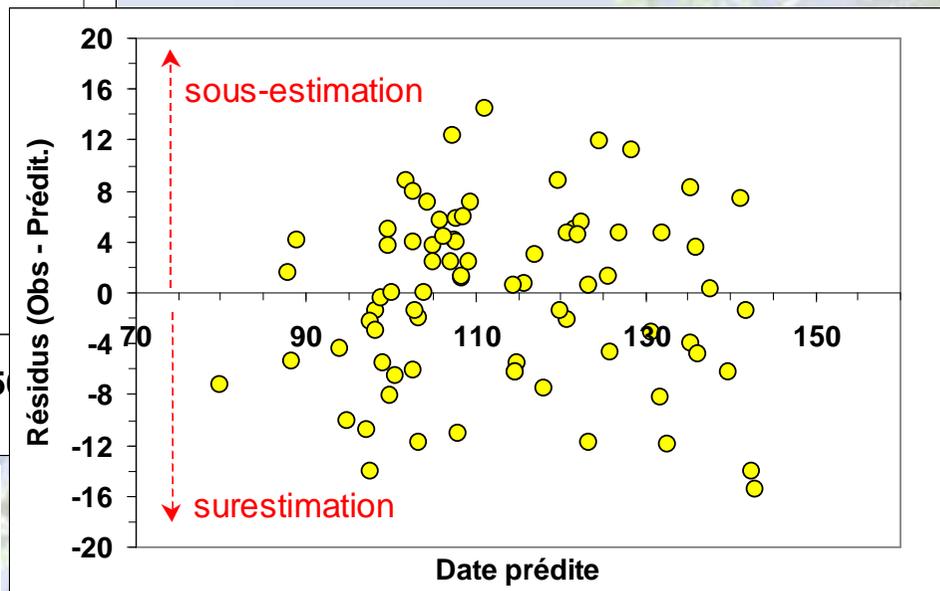
Modèle de prédiction du débourrement : global (dd10 - 79 peuplements)

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

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



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



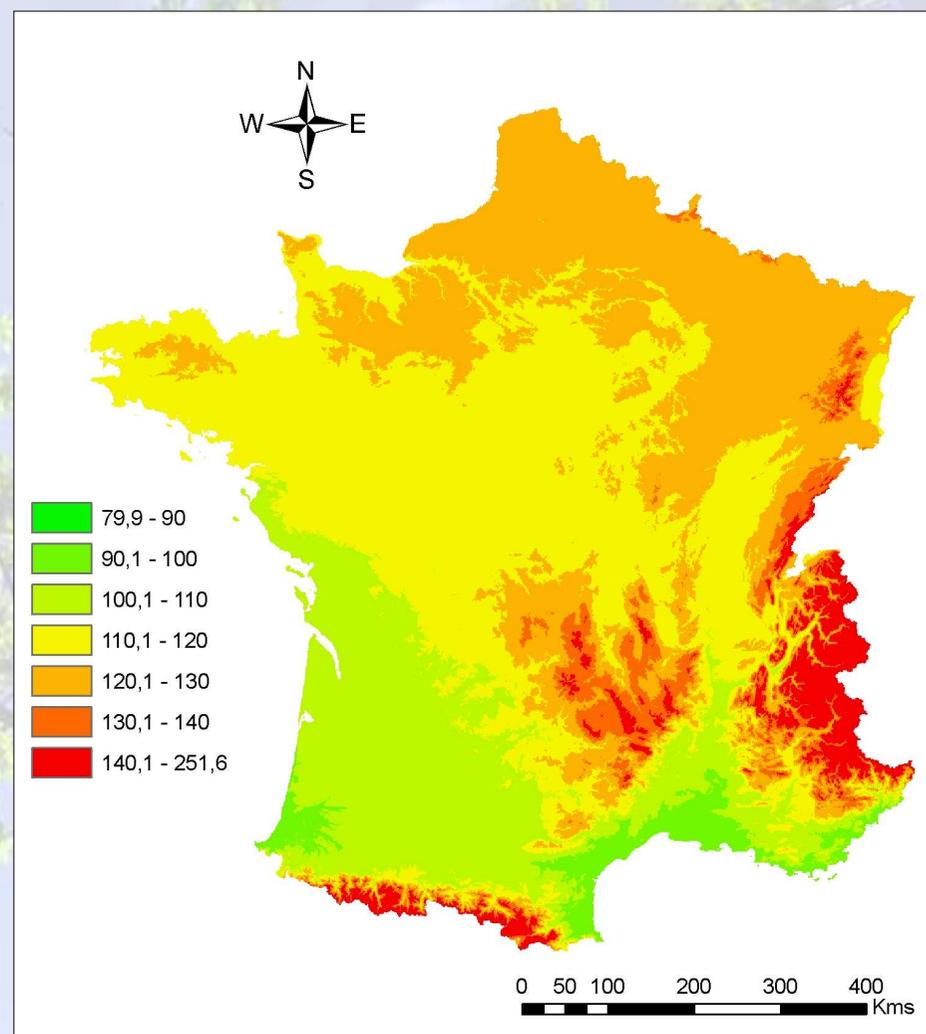
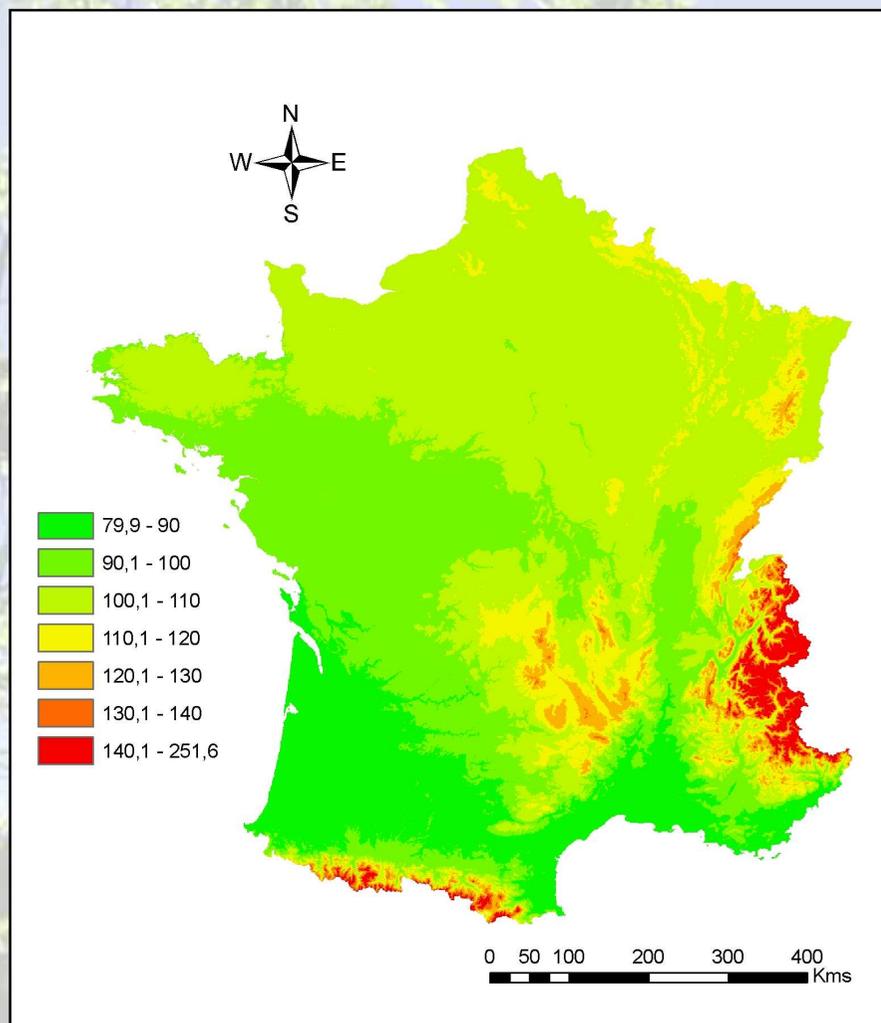
| | Débourrement 10% | | Débourrement 90% | |
|-------------------------------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | Observations | modèle | Observations | modèle |
| Min: | 72.6 | 80.0 | 79.6 | 96.0 |
| 1st Qu.: | 101.3 | 103.0 | 113.7 | 113.0 |
| Mean: | 113.1 | 113.2 | 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)

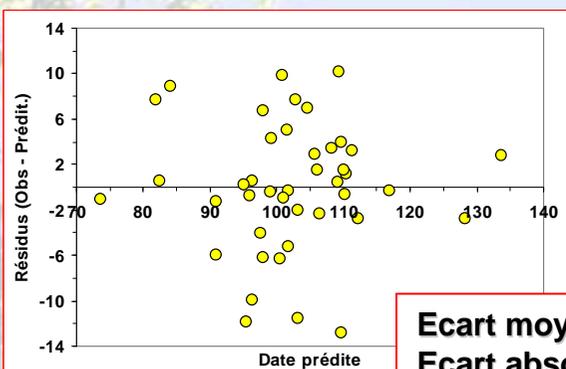
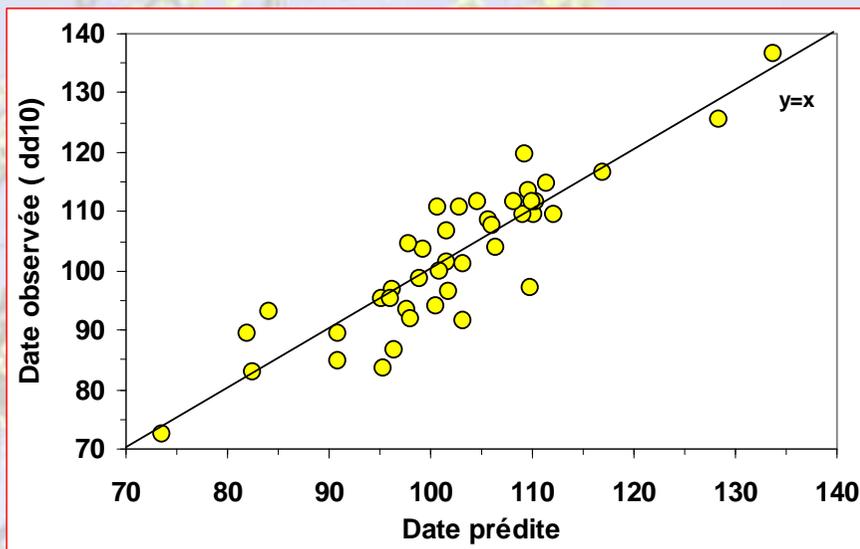
code esp=1(R)



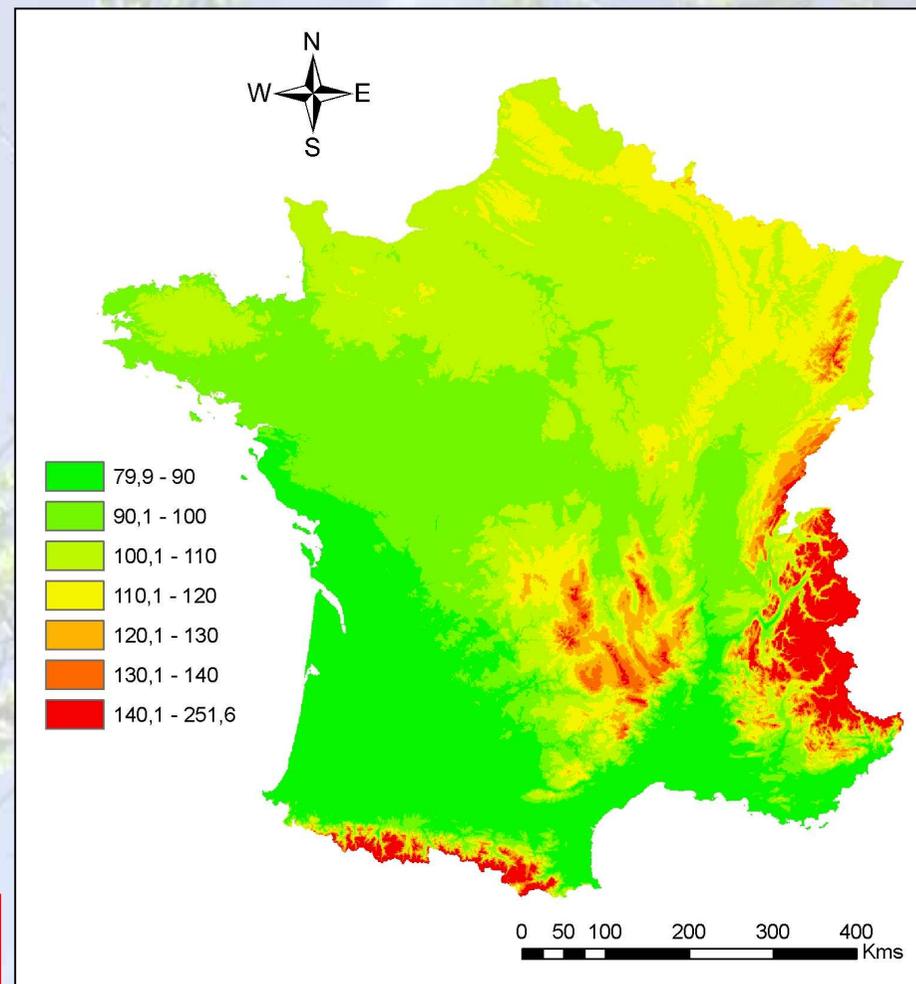
Modèle de prédiction du débourrement : feuillus (dd10 - 42 peuplements)

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

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



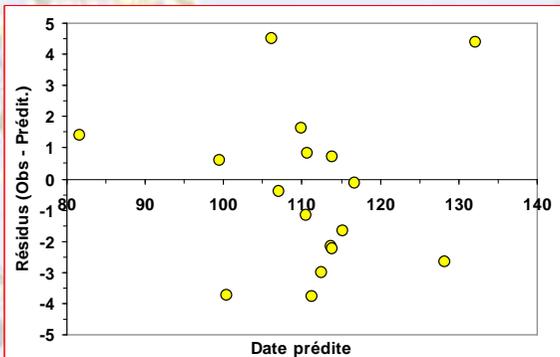
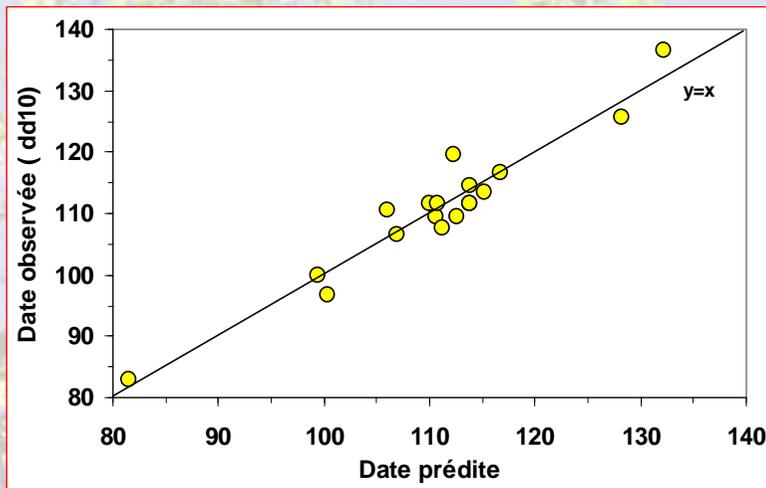
Ecart moyen : -0.08
Ecart absolu moyen : 4.3
Ecart quadrat. Moyen : 5.6



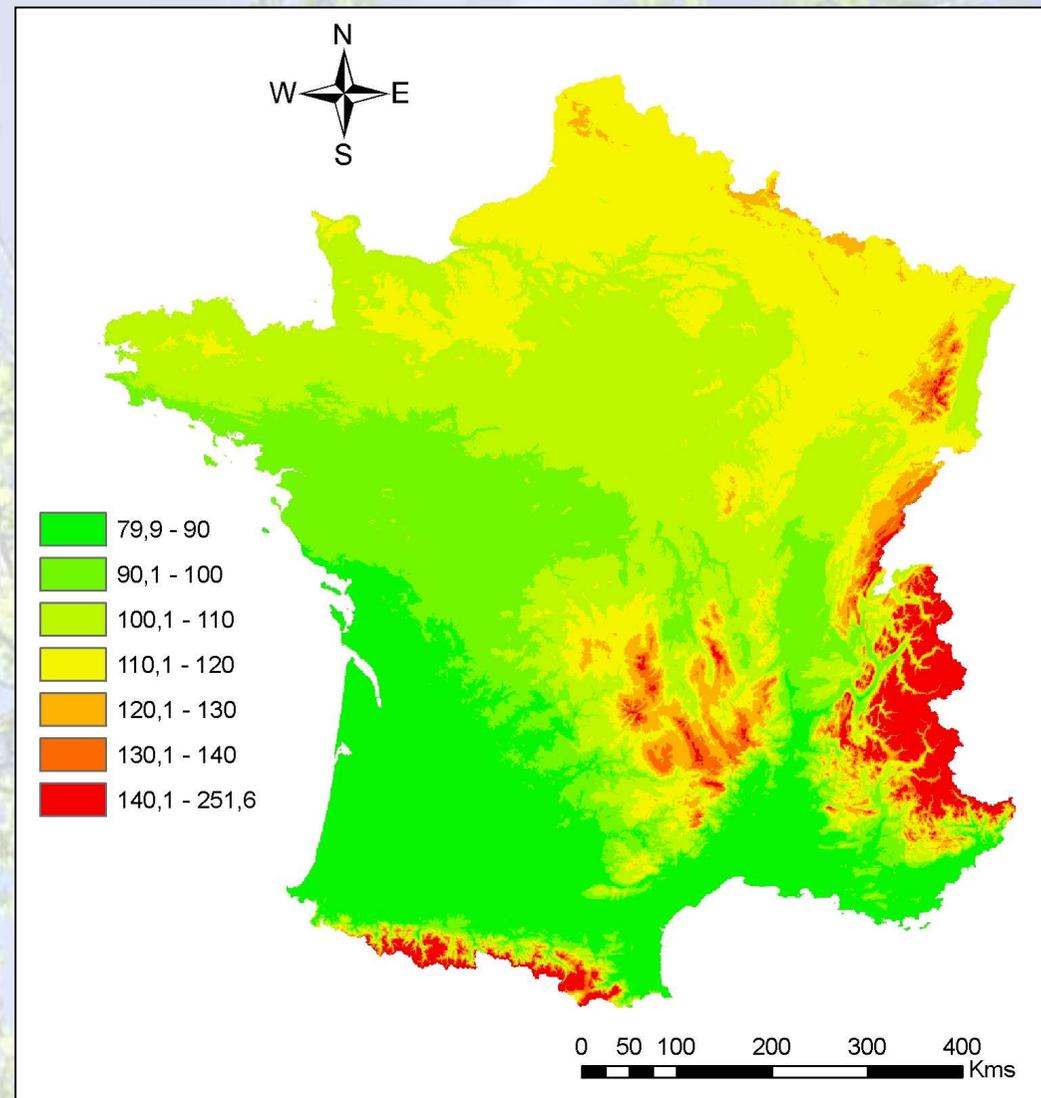
Modèle de prédiction du débourrement : hêtre (dd10 - 18 peuplements)

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

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



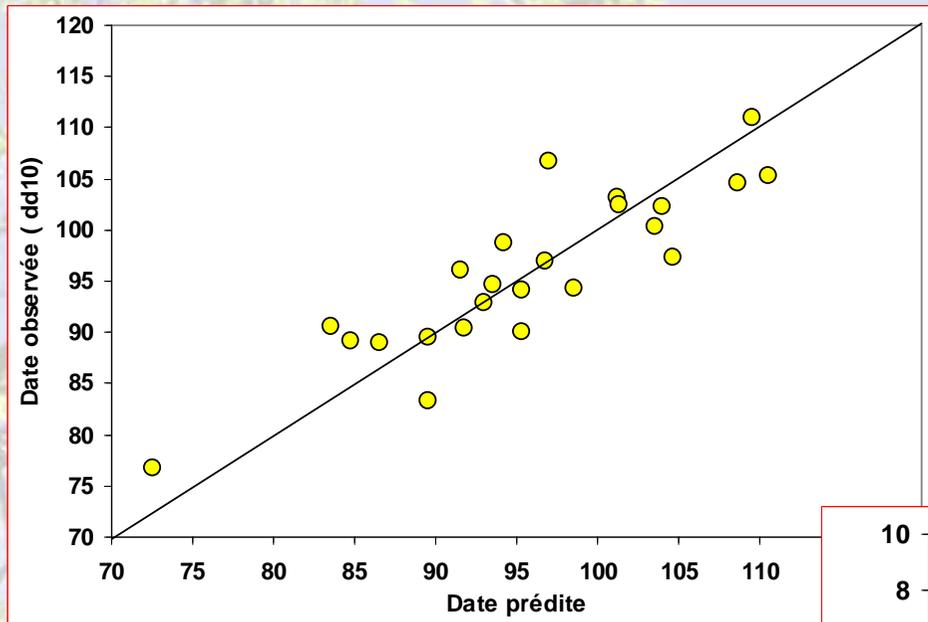
Ecart moyen : -0.02
Ecart absolu moyen : 2.3
Ecart quadrat. Moyen : 2.9



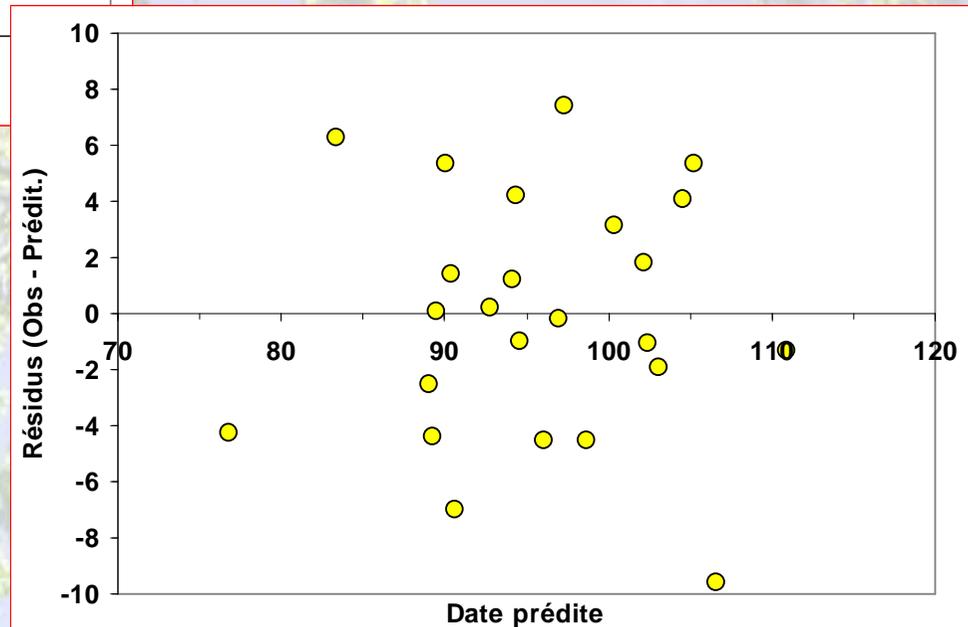
Modèle de prédiction du débournement : chênes (dd10 - 24 peuplements)

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

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



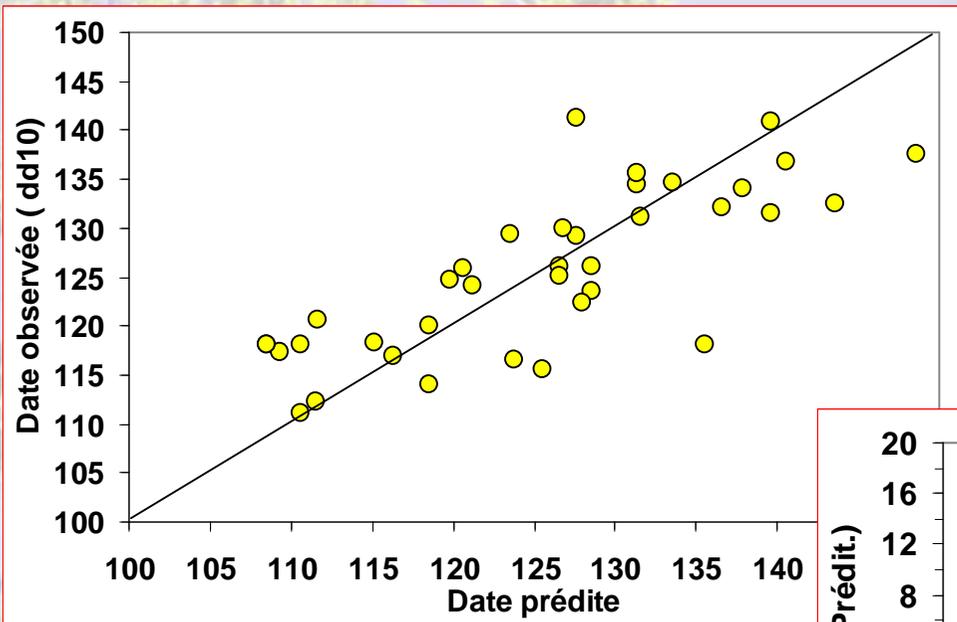
| | |
|-----------------------------|----------------|
| Ecart moyen | : -0.09 |
| Ecart absolu moyen | : 3.9 |
| Ecart quadrat. Moyen | : 4.7 |



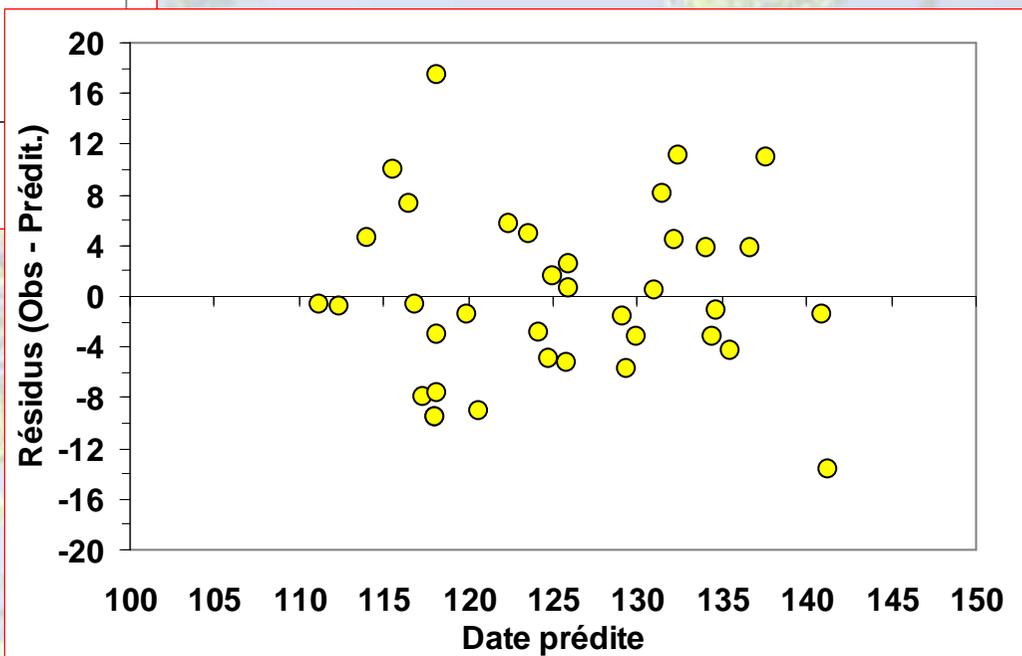
Modèle de prédiction du débourrement : résineux (dd10 - 37 peuplements)

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

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



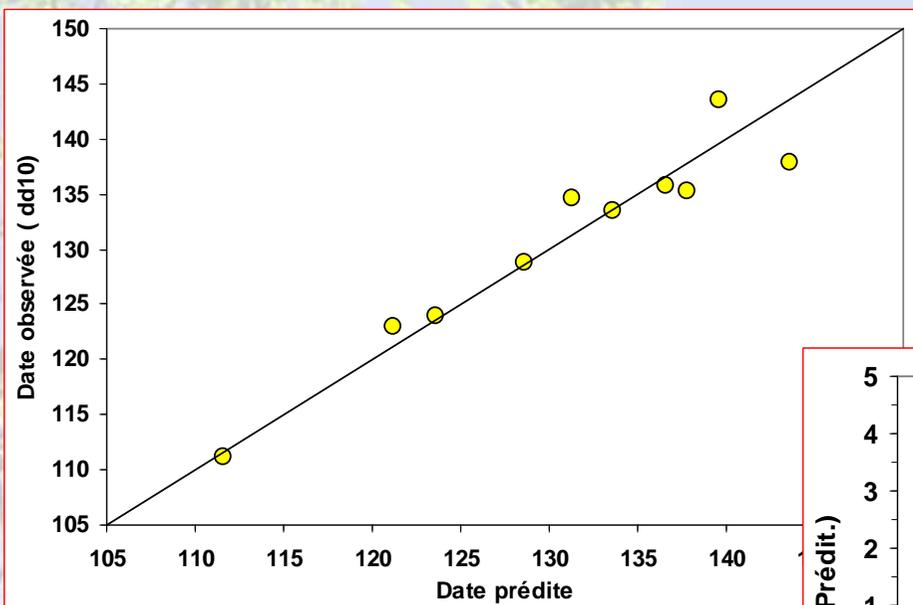
| | |
|----------------------|---------|
| Ecart moyen | : 0.006 |
| Ecart absolu moyen | : 5.3 |
| Ecart quadrat. Moyen | : 6.6 |



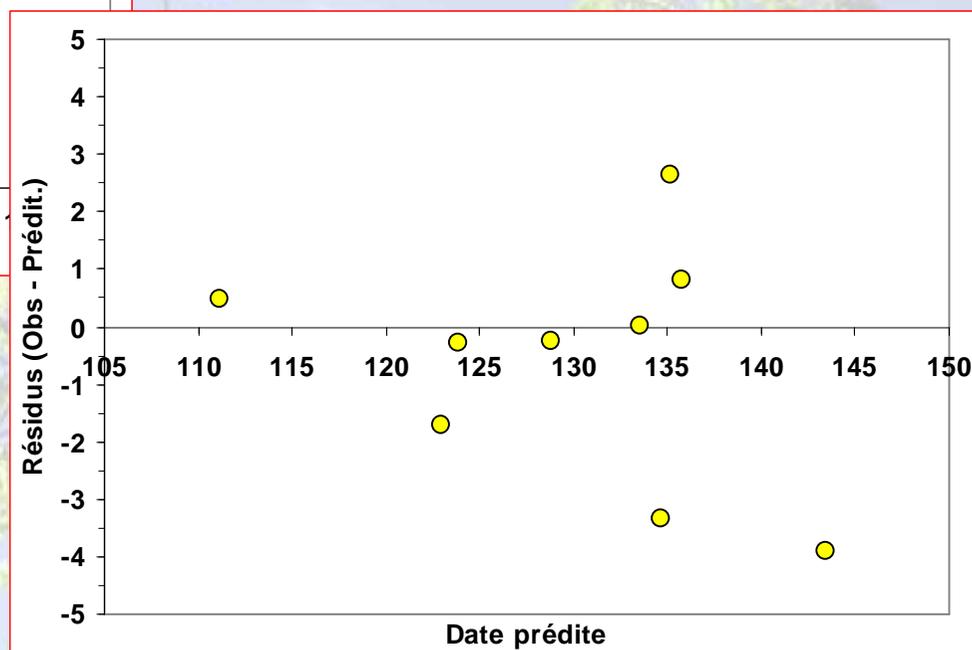
Modèle de prédiction du débourrement : sapin (dd10 - 10 peuplements)

$$\text{dd10} = 1956.894 - 31.977 (\text{lat.}) - 3.681 (\text{Insol. jan-fév})$$

$r^2=0.919$; $F = 39.46$; $\text{Pr} (F) = 0.00015$



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 !