



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.

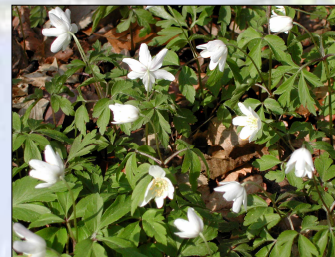
# Sommaire

## 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

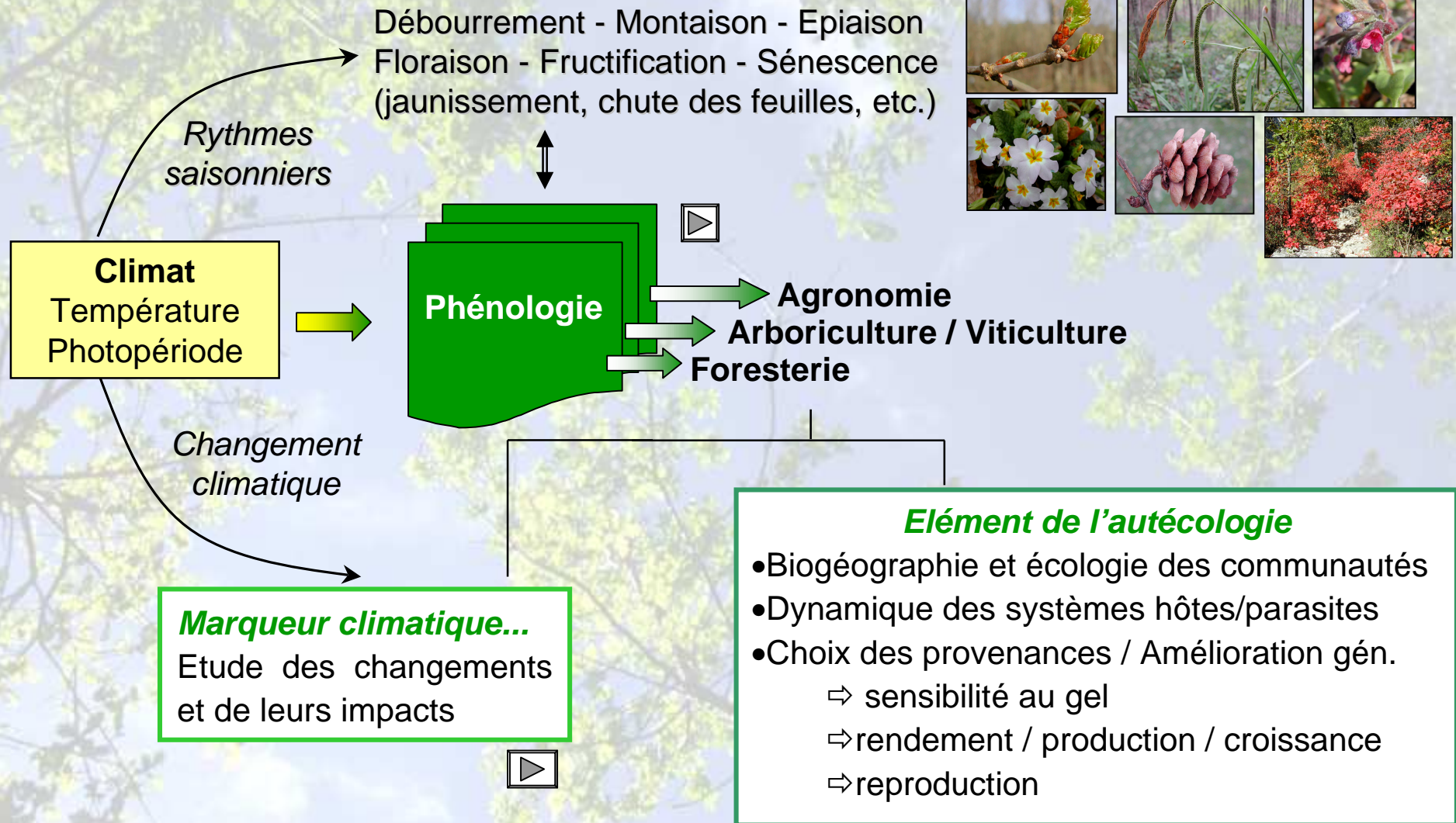
## **Observations phénologiques : concepts, intérêts et problématiques actuelles**

**A. Définitions et domaines d 'application de la phénologie**

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

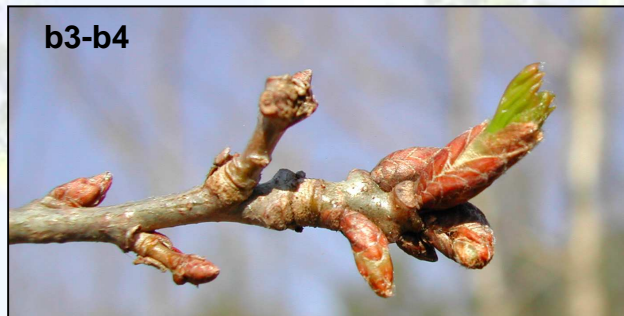
**C. Y-a-t-il eu des évolutions récentes des rythmes saisonniers ?**

## A. Définitions et domaines d'application



**A. Définitions et domaines d'application**

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





## Température... un facteur clé

hiver

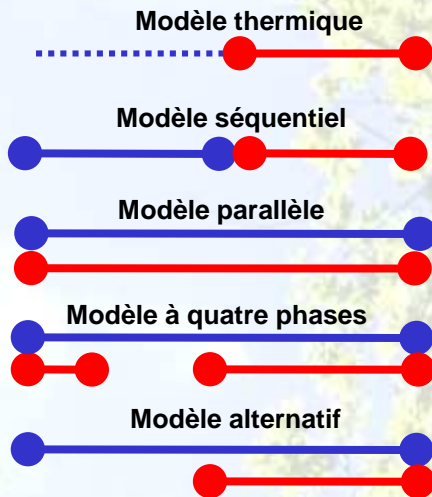
printemps



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

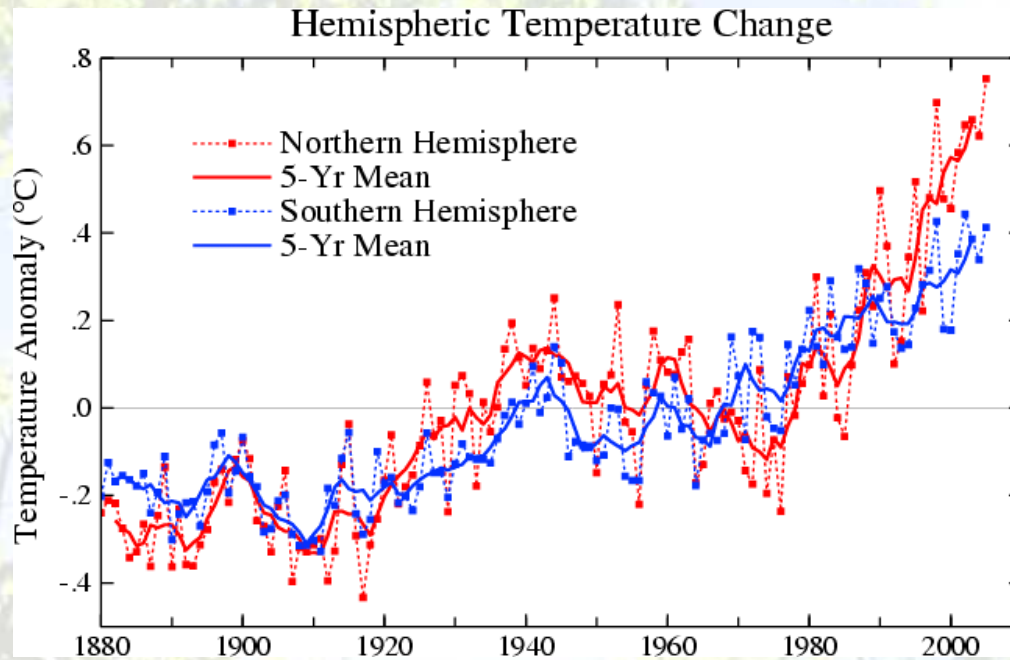
Satisfaction **des besoins en chaleur** : accumulation d'unités de croissance (*forcing units*) permettant aux bourgeons d'éclater

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

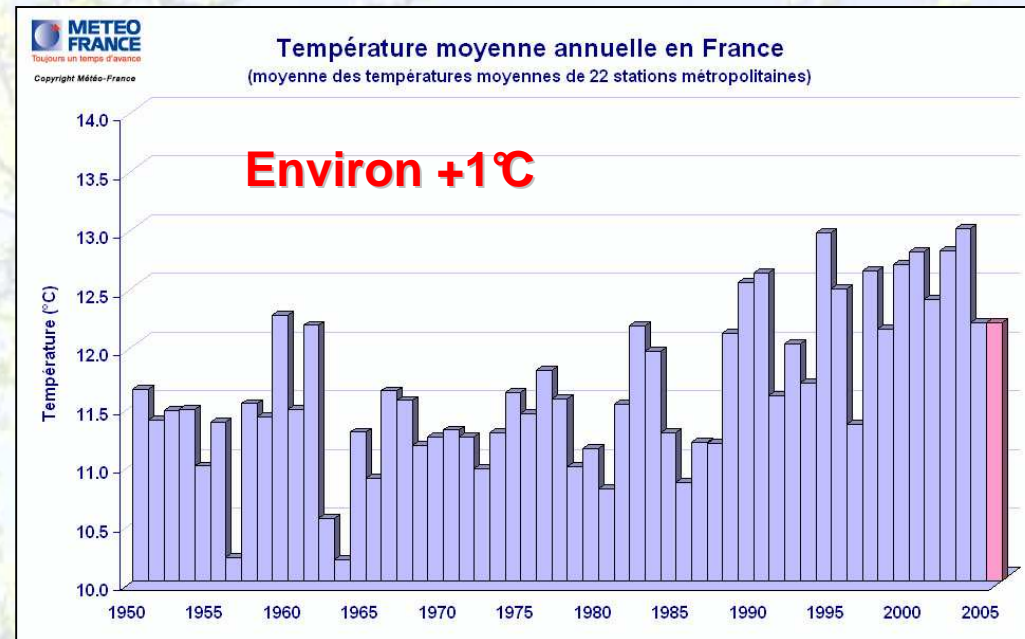
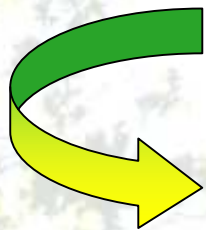


Dans le monde.... +0,7°C



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)

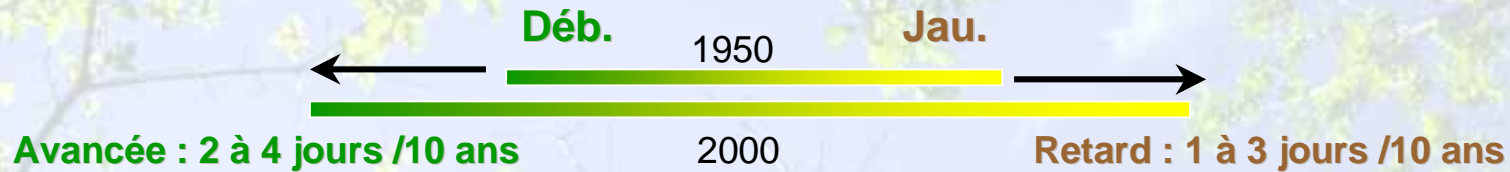


## C. Evolution du rythme saisonnier dans le contexte du réchauffement global

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 CO<sub>2</sub> 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

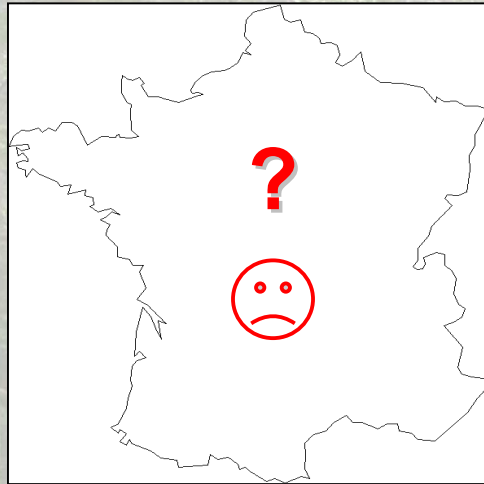


| Région                  | Phénophase     | Nb esp. | Variation moy.<br>Nb jours/décennie | Période   | Référence              |
|-------------------------|----------------|---------|-------------------------------------|-----------|------------------------|
| Europe                  | spring events  | 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) |
|                         |                |         | <b>-2.8</b>                         |           |                        |

### Chute des feuilles

| Espèce              | Région          | Période   | Variation moy.<br>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) |
|                     |                 |           | <b>-3.0</b>                         |                            |

## 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 ?

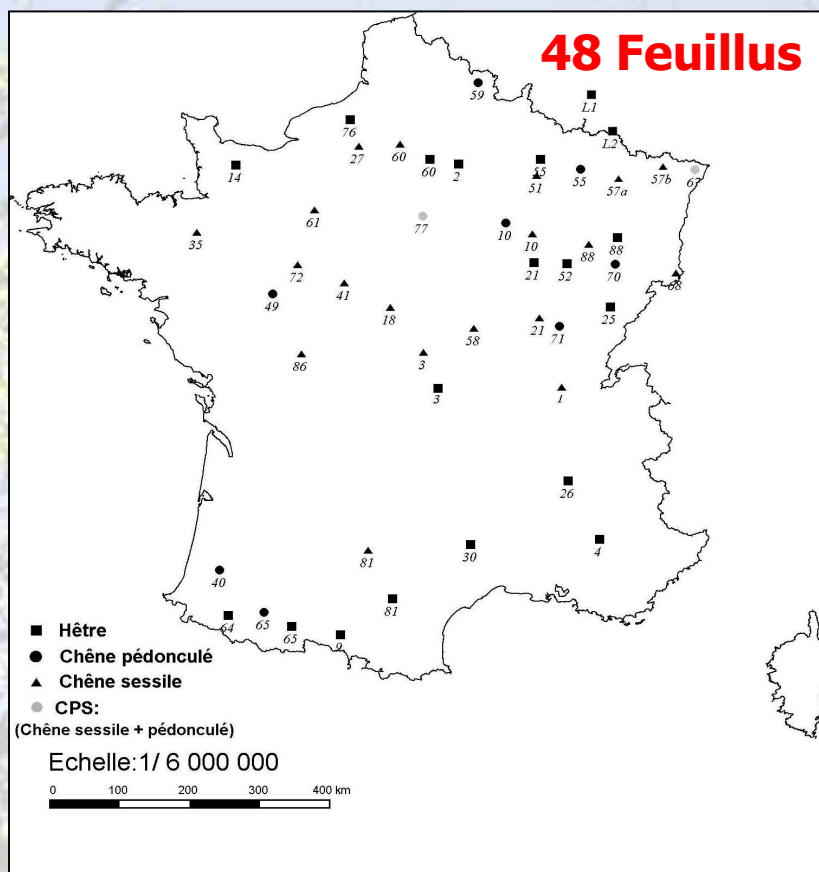
**B.** Quelle est la variabilité spatiale ?

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

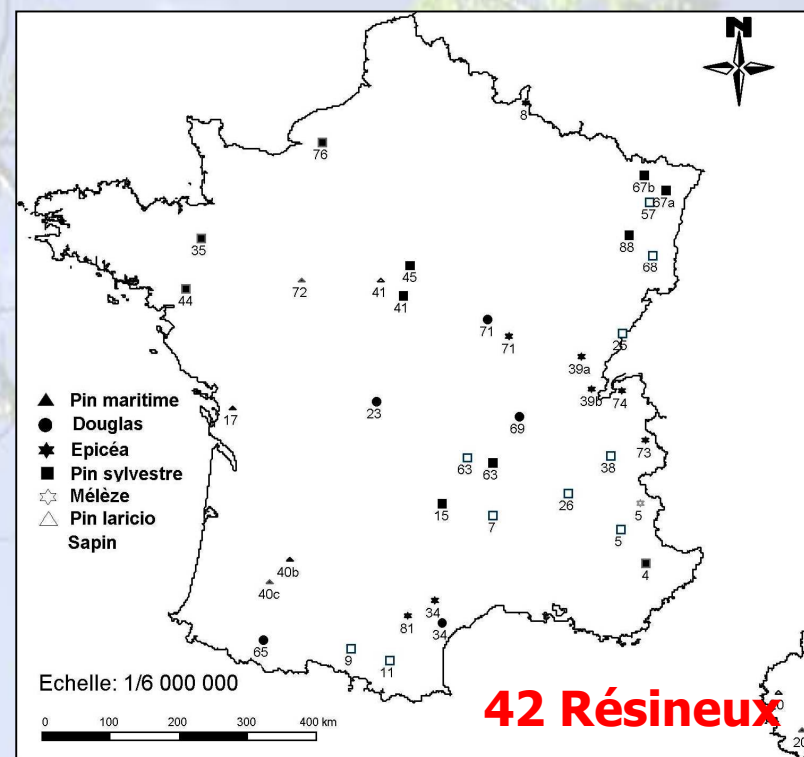
**D.** Peut-on construire des modèles « simples » à l'échelle de la France permettant d'expliquer ces variabilités ?

## 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

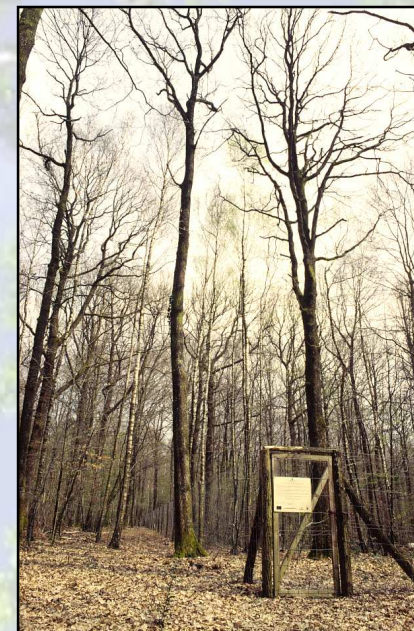


## Renecofor : le protocole des observations

- 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/m<sup>2</sup>)



## Objectifs de l'étude

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

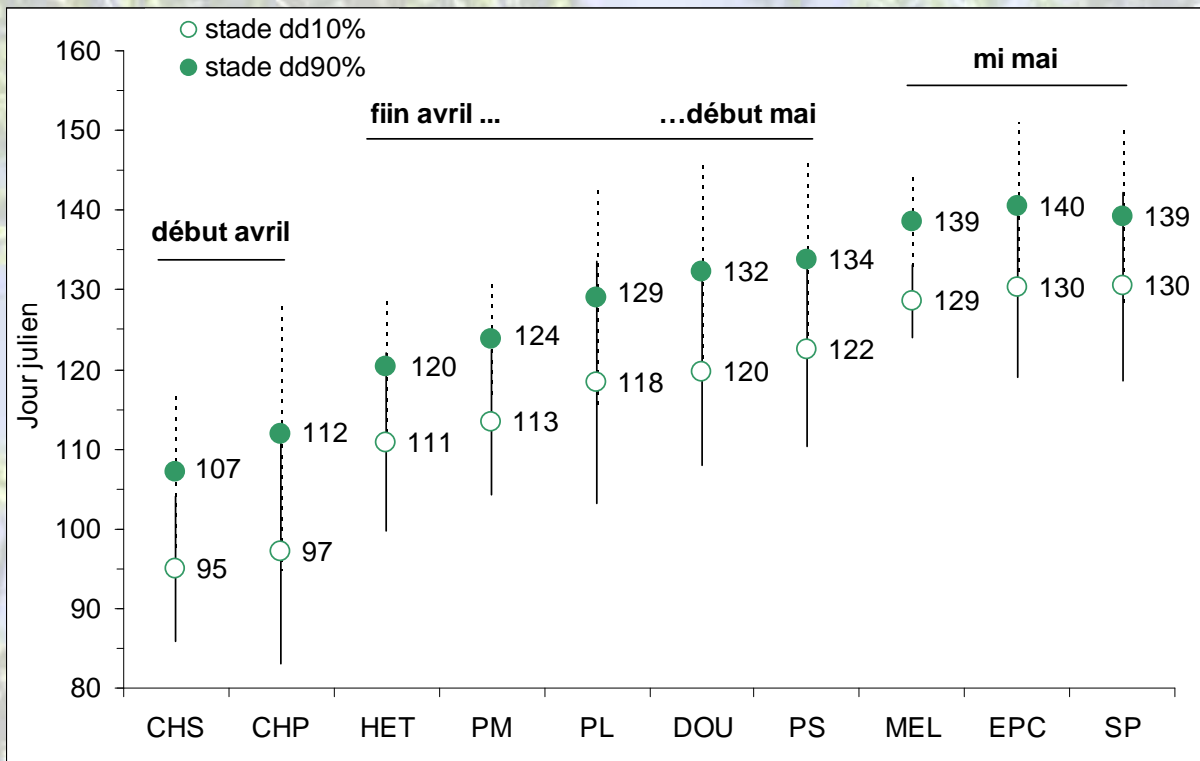
- Taux d'explication les plus élevés (R<sup>2</sup>)
- Ecart de prédiction les plus faibles
- Biologiquement pertinents
- Facilement applicables





**Quelle est la variabilité interspécifique ?**

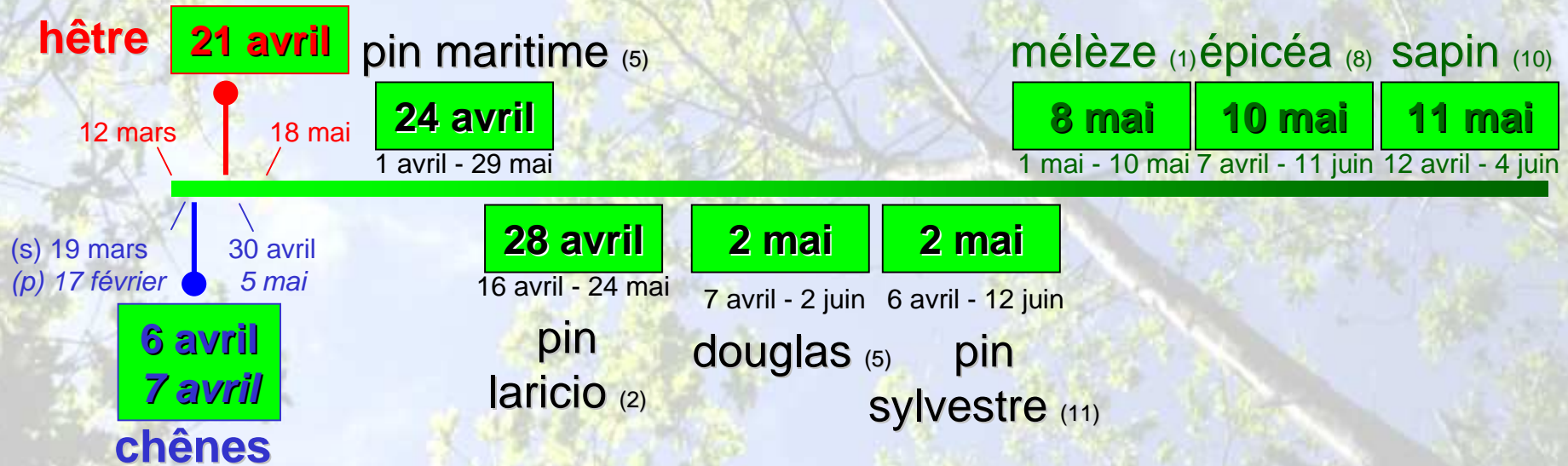




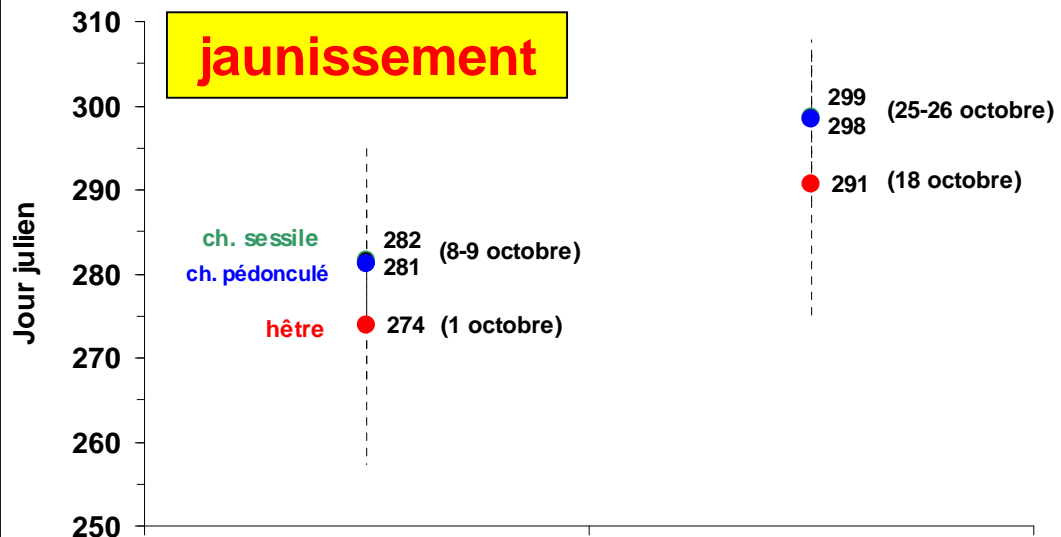
**variabilité inter-espèce**

**débourrement**

}  $\Delta = 10$  jours



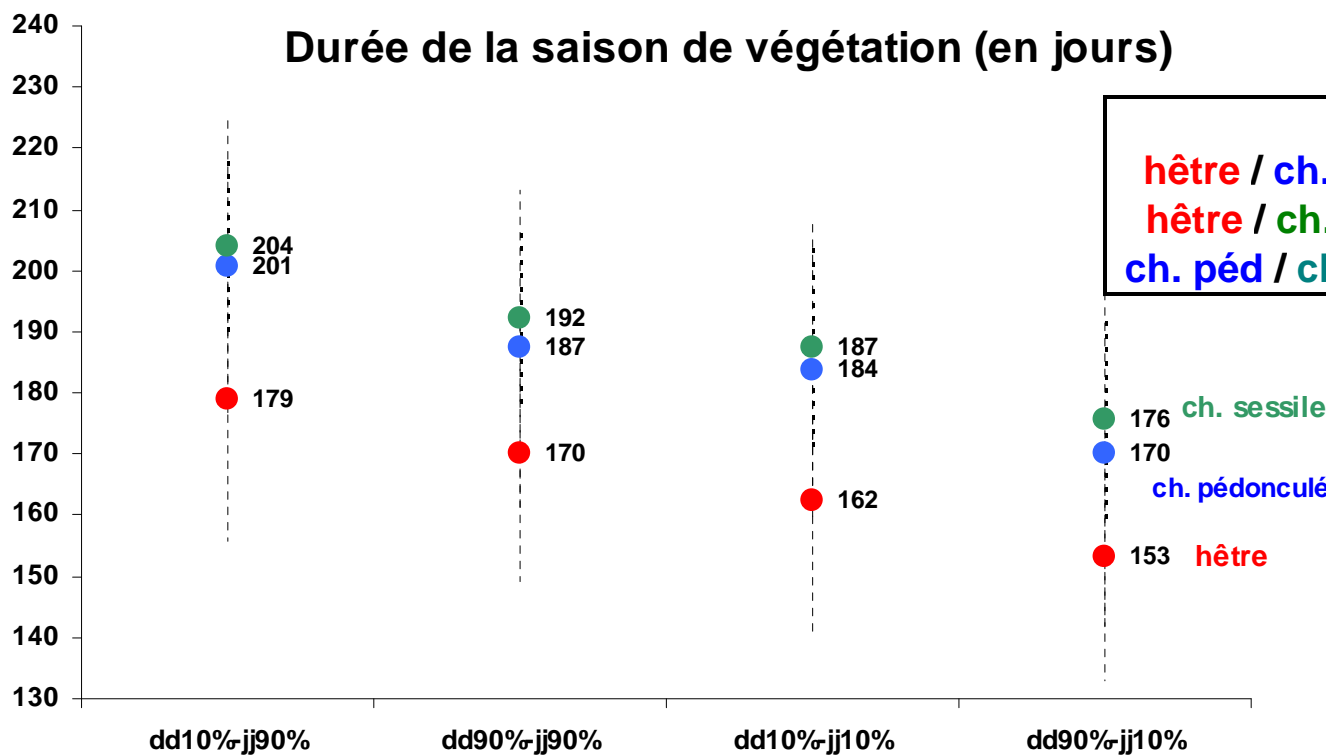
## jaunissement



## variabilité inter-espèce



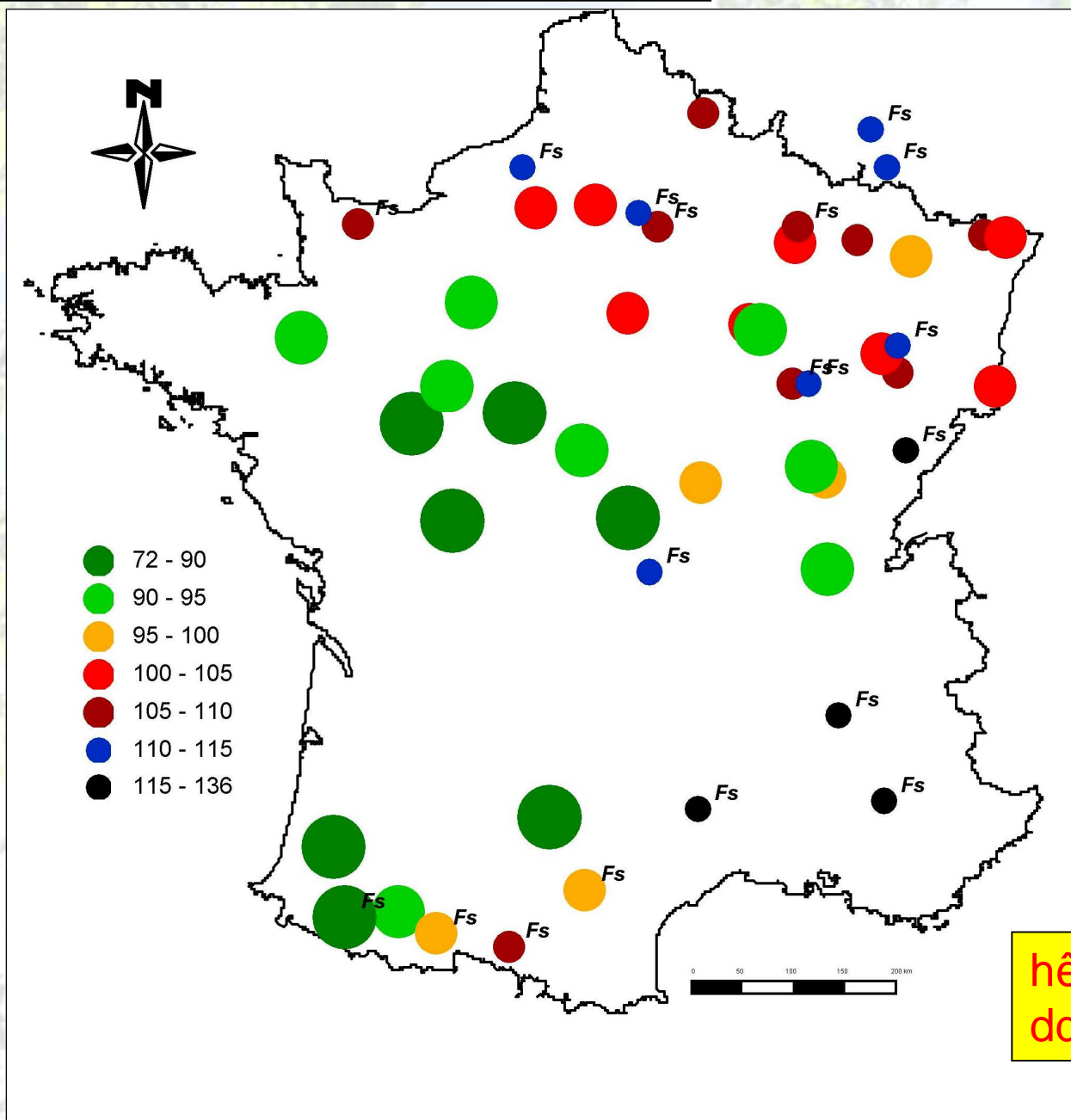
## Durée de la saison de végétation (en jours)



# Quelle est la variabilité spatiale ?



# variabilité régionale du débourrement

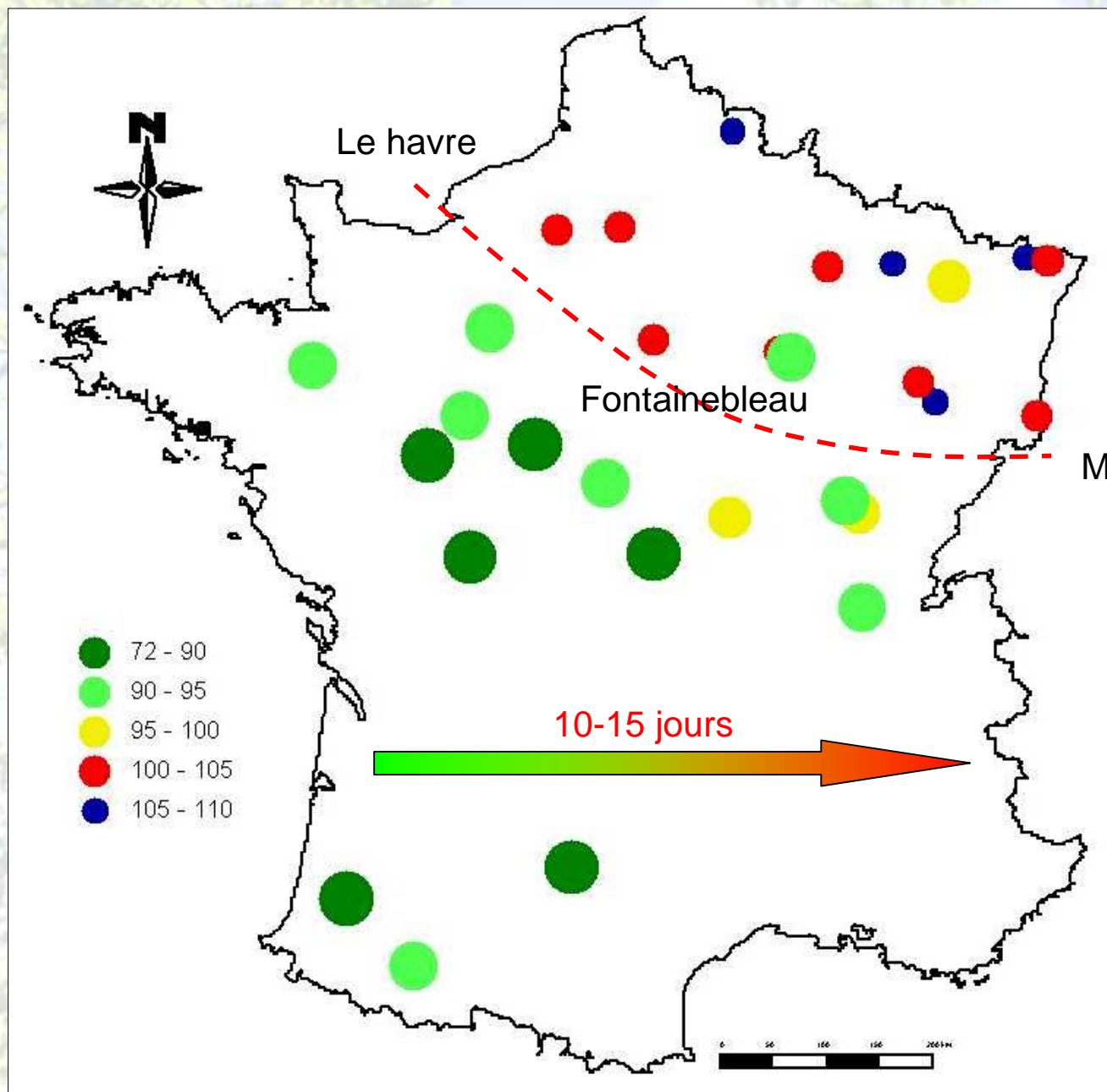


hêtre et chênes  
dd10

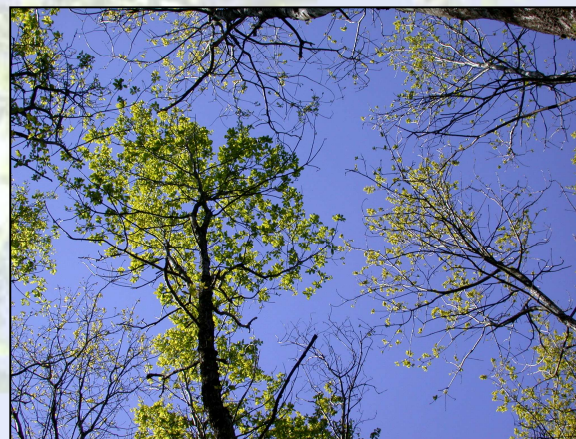
# variabilité régionale du débourrement



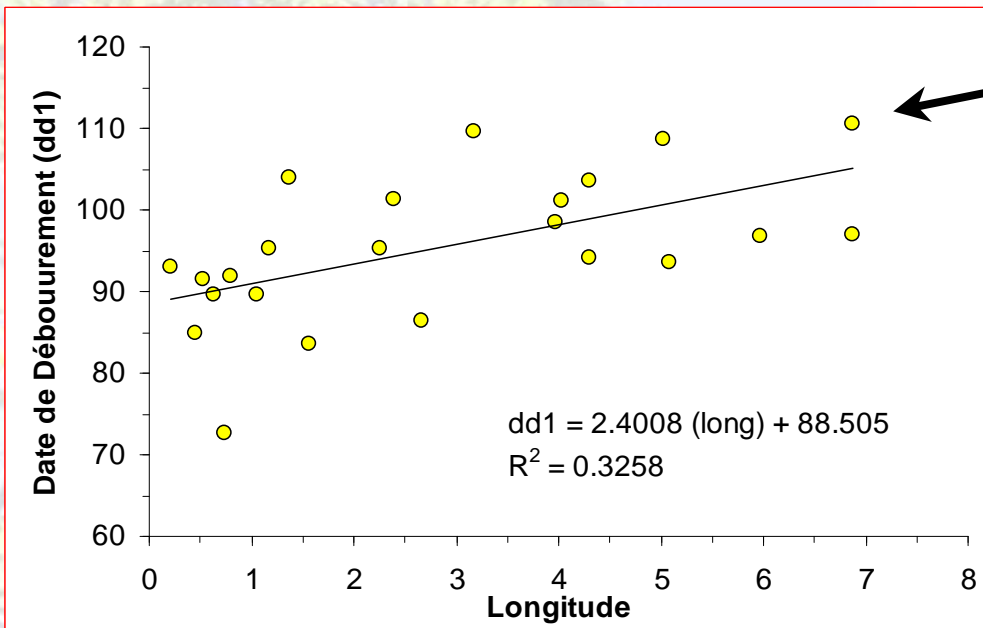
**chênes  
dd10**



## Relations directes entre les variables du milieu et les phénophases



## Relations directes avec la longitude



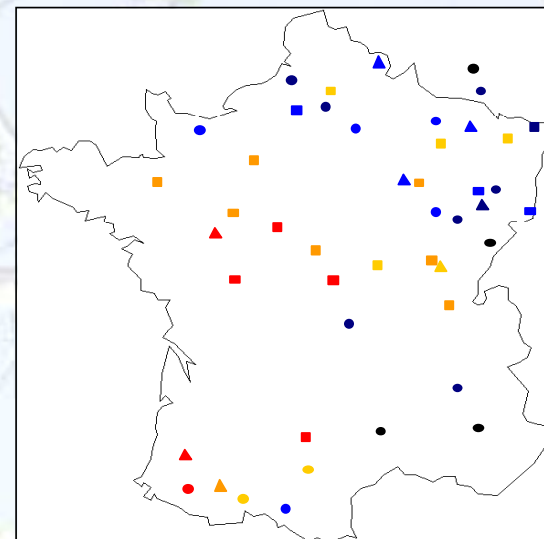
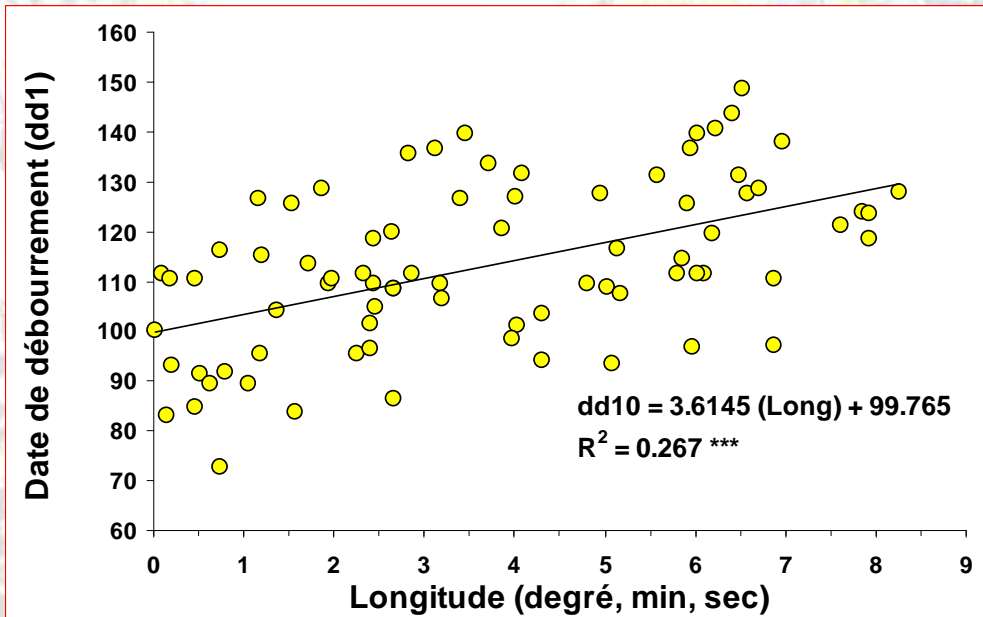
Un point = moyenne 1997-2003  
pour un peuplement

**Chênes**

**Débour. : - 2,4 jours / degré**

**Toutes les espèces**

**Débour. : - 4 jours / degré**



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

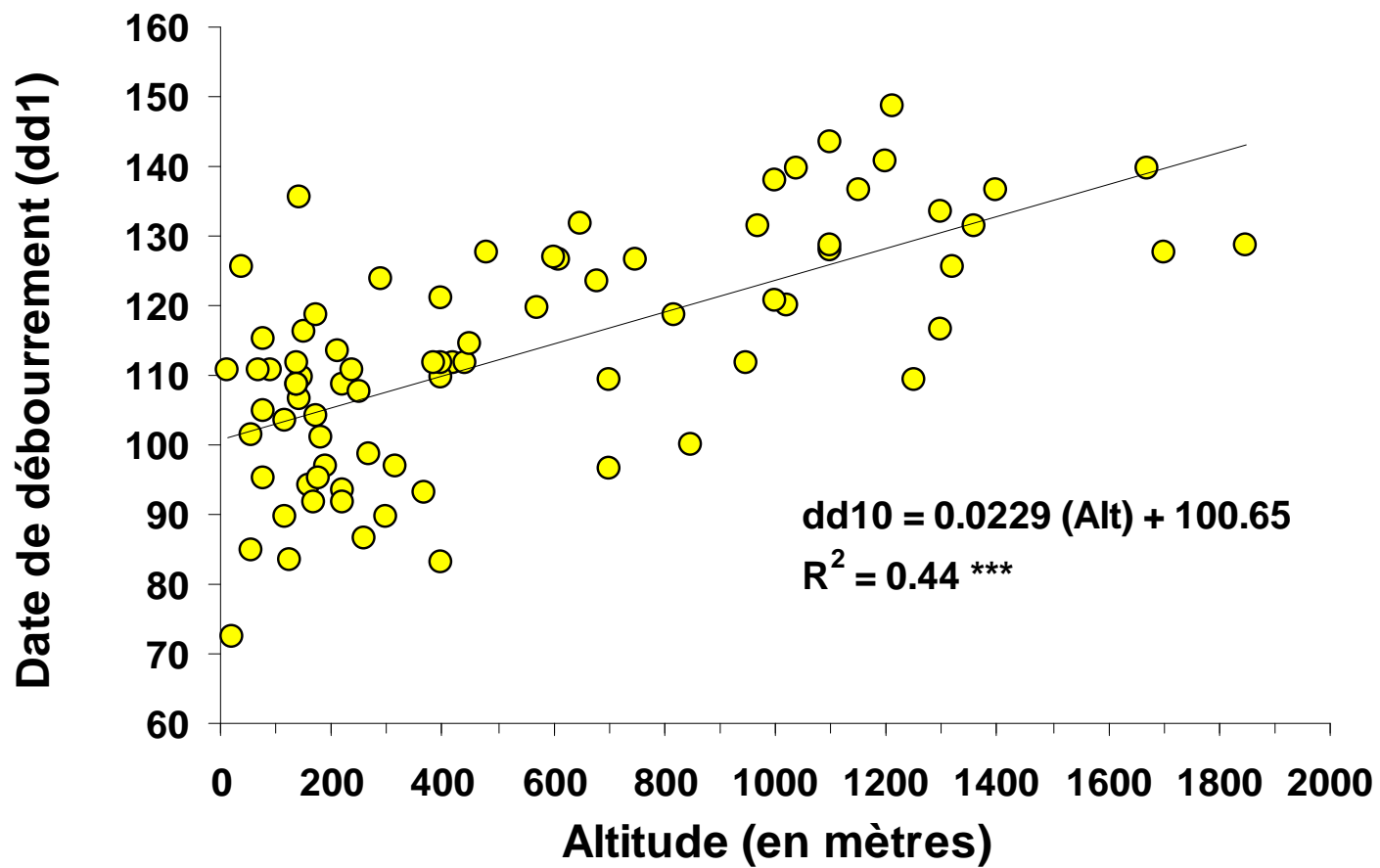
79 placettes - moyenne 1997-2003



## 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 |

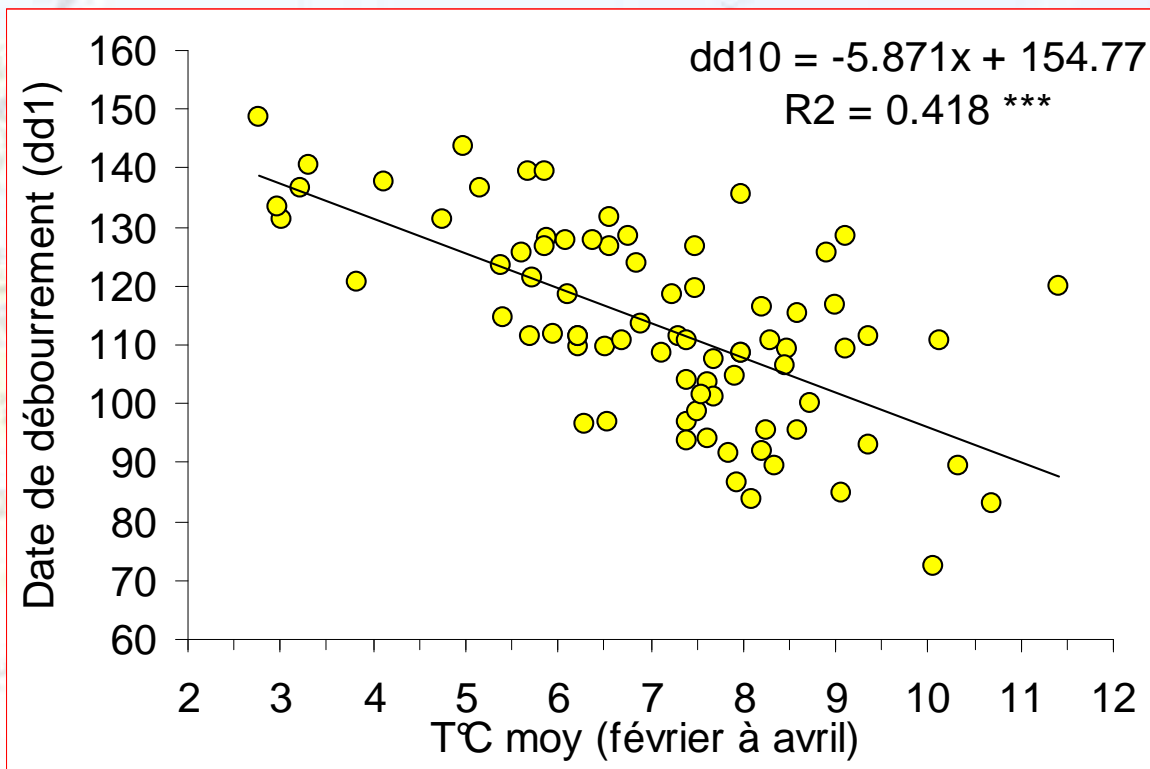
Débour. : - 2 jours / 100 m



## Relations directes avec la température

### *Pour le débournement*

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

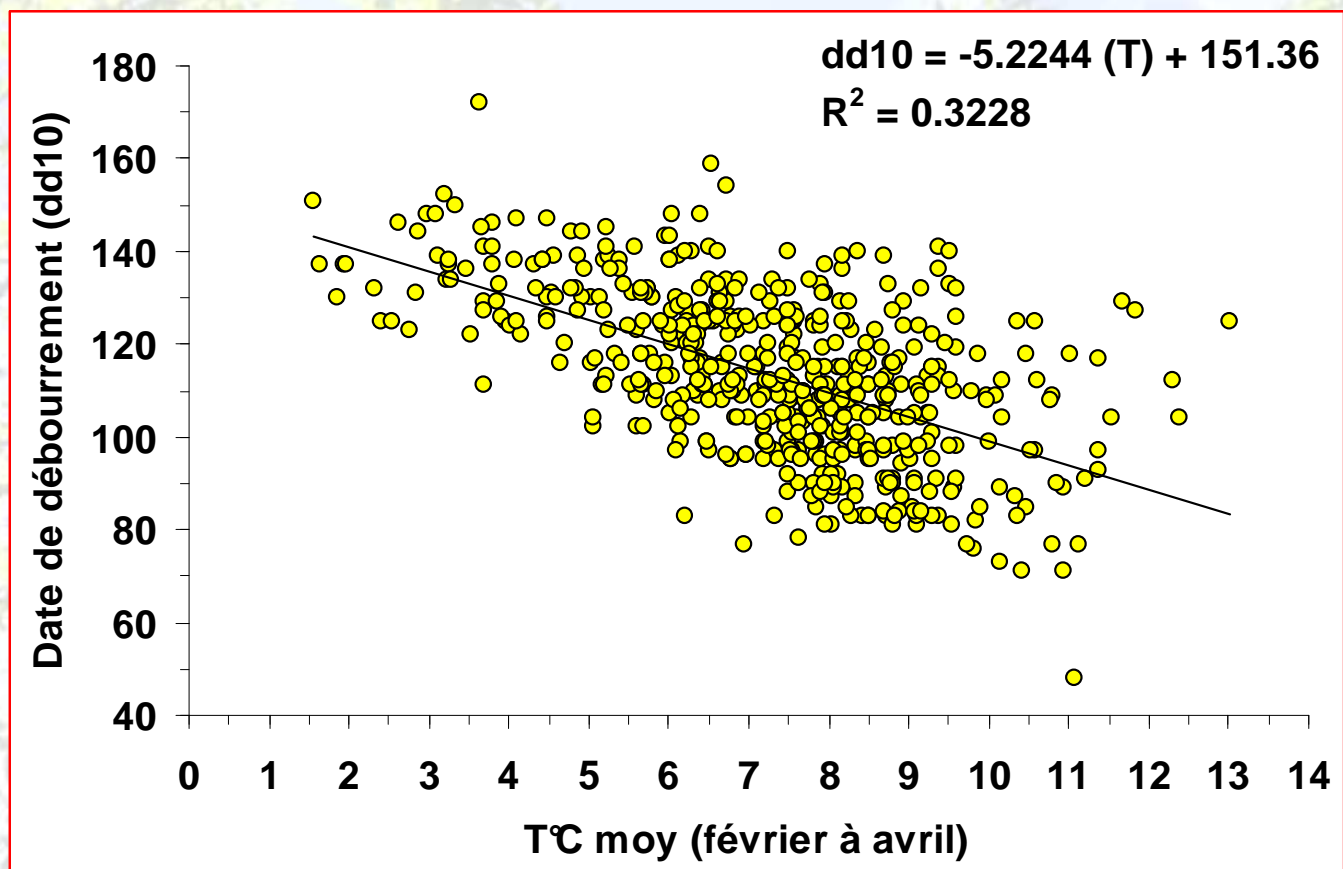


**Débournement : avancé de 6 jours / °C**

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

## Relations directes avec la température

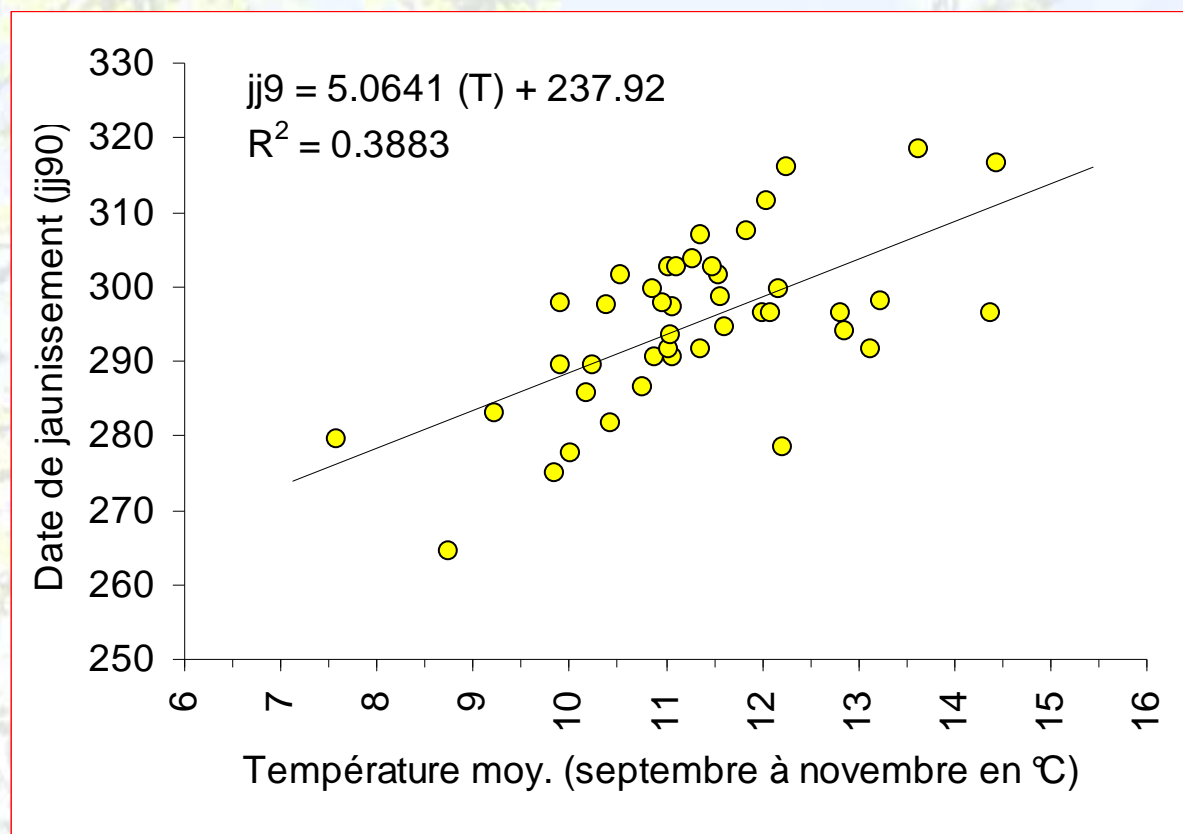
**Pour le débourrement** (avec 553 données)



**Débourrement : avancé de 5 jours / °C**

## Relations directes avec la température

*Pour le jaunissement (uniquement 42 feuillus)*

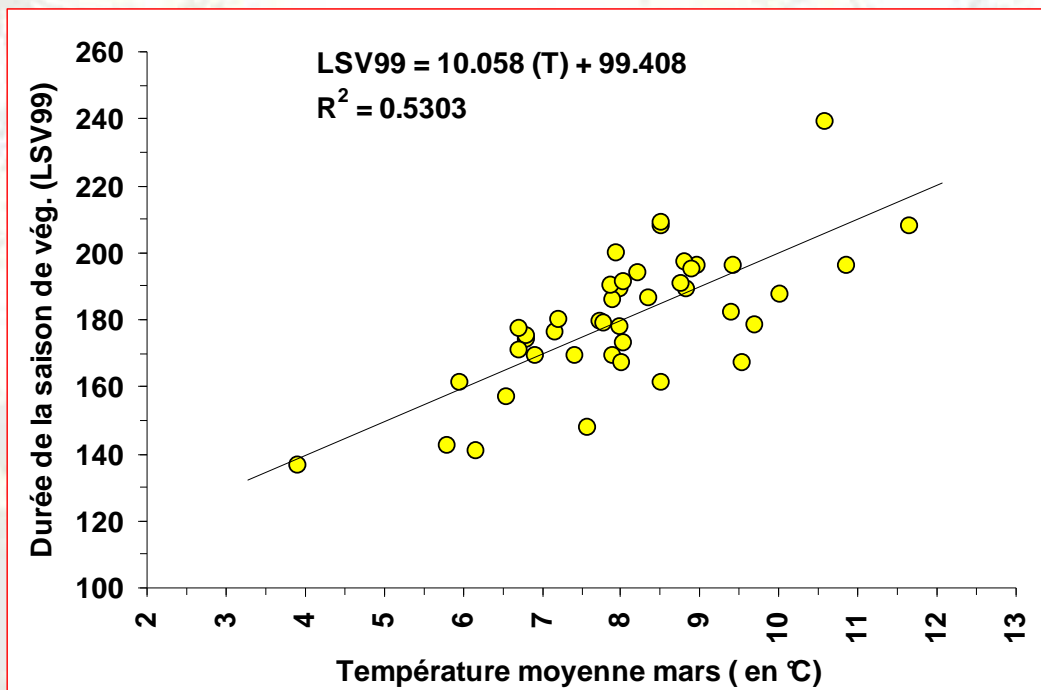


**Jaunissement : retard de 5 jours / °C**

## 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 <sup>2</sup> ) |                                   |
|-----------|--------------------------------------|-----------------------------------|
|           | 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

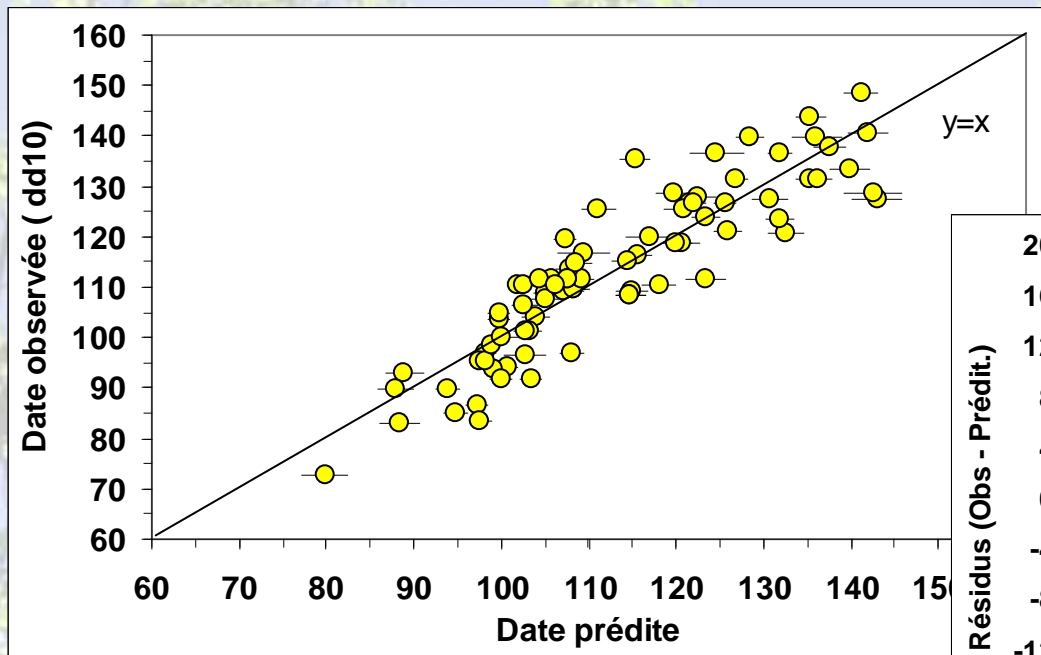
**Peut-on construire des modèles à l'échelle de la France entière ?**



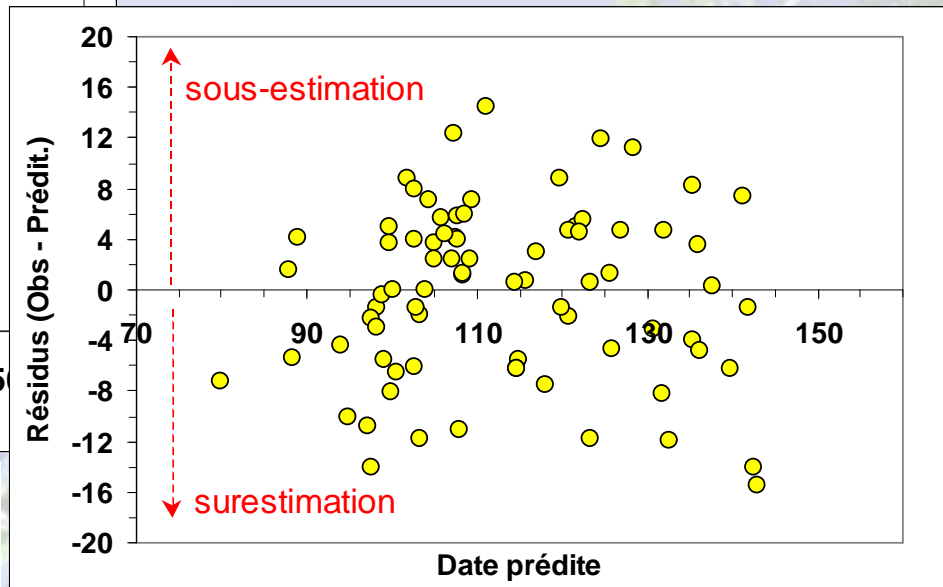
# Modèle de prédiction du débourrement : global (dd10 - 79 peuplements)

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

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



$T_{max}$  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        |
| <b>Mean:</b>                  | <b>113.1</b>     | <b>113.2</b> | <b>124.2</b>     | <b>124.1</b> |
| 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        |
| <b>Std Dev.:</b>              | <b>16.5</b>      | <b>14.9</b>  | <b>15.5</b>      | <b>13.5</b>  |
| Ecart moyen:                  |                  | 0.013        |                  | -0.013       |
| Ecart absolu moyen :          |                  | 5.71         |                  | 5.91         |
| Ecart quadrati. moyen (RMSD): |                  | 7.06         |                  | 7.57         |

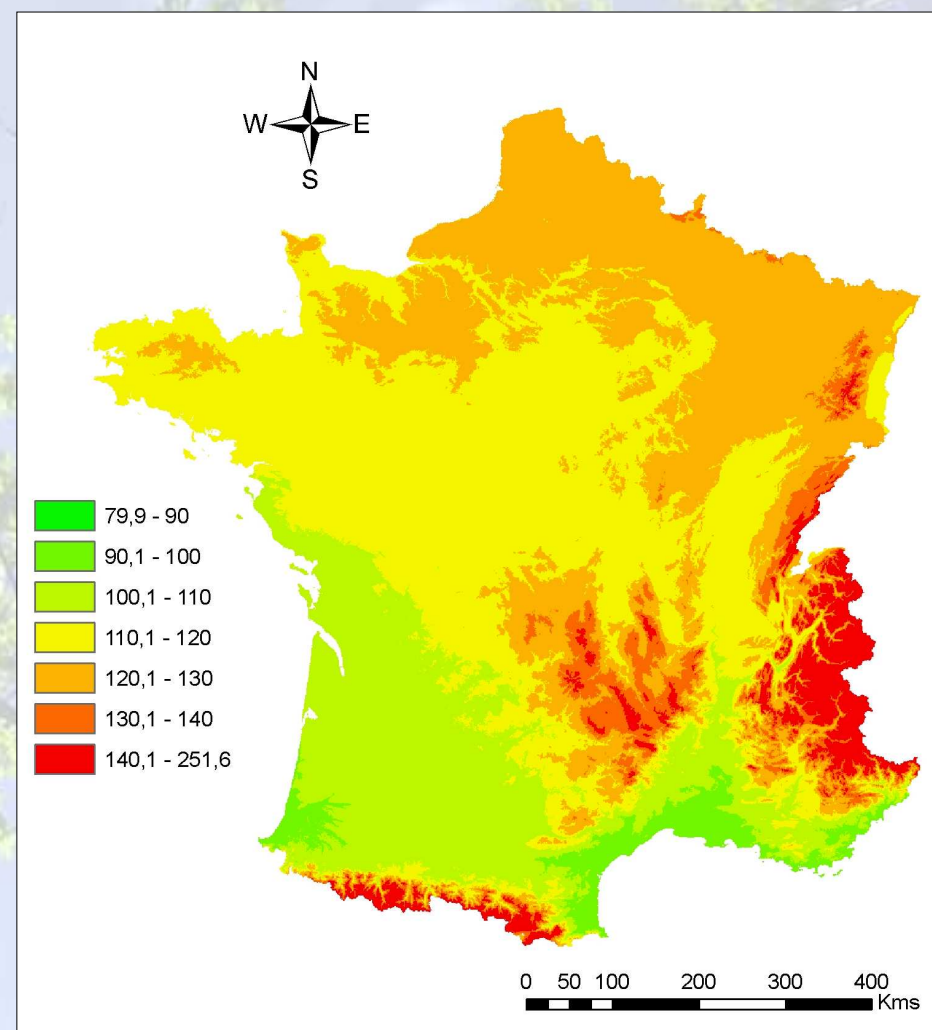
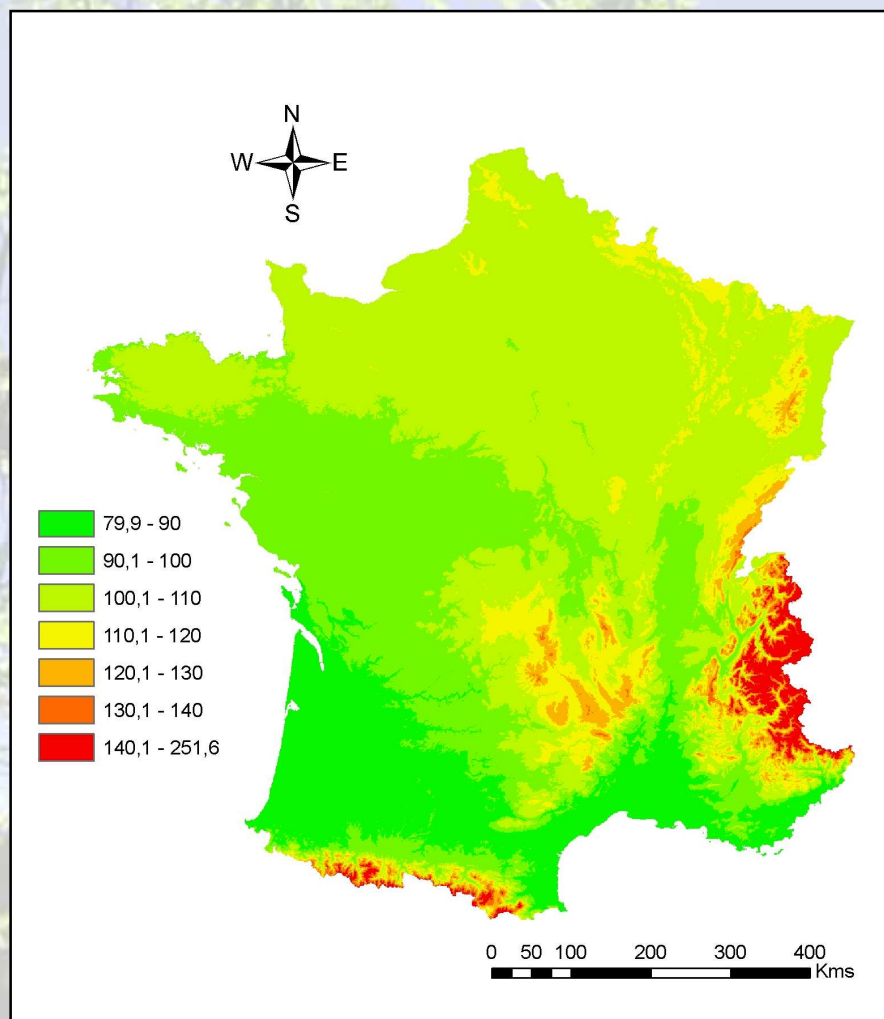


## Cartographie du débourrement stade 10% (C. Piedallu, ENGREF)

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

code esp=0 (F)

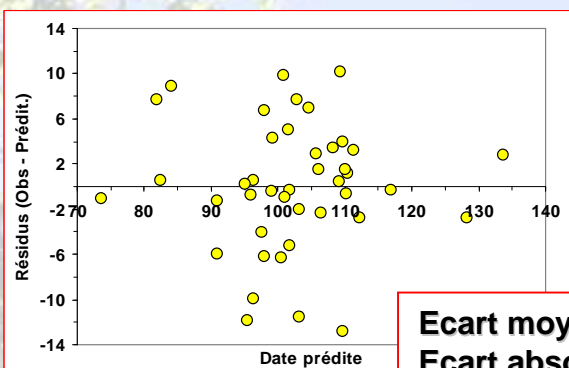
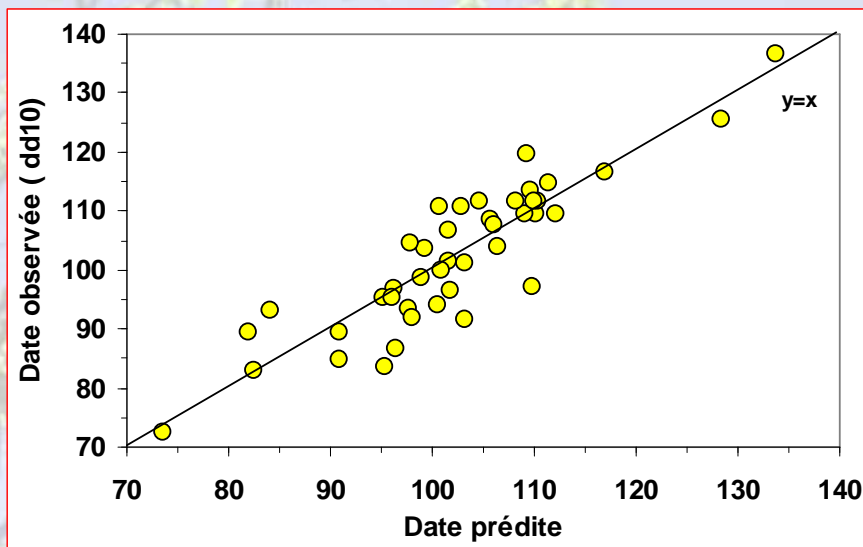
code esp=1 (R)



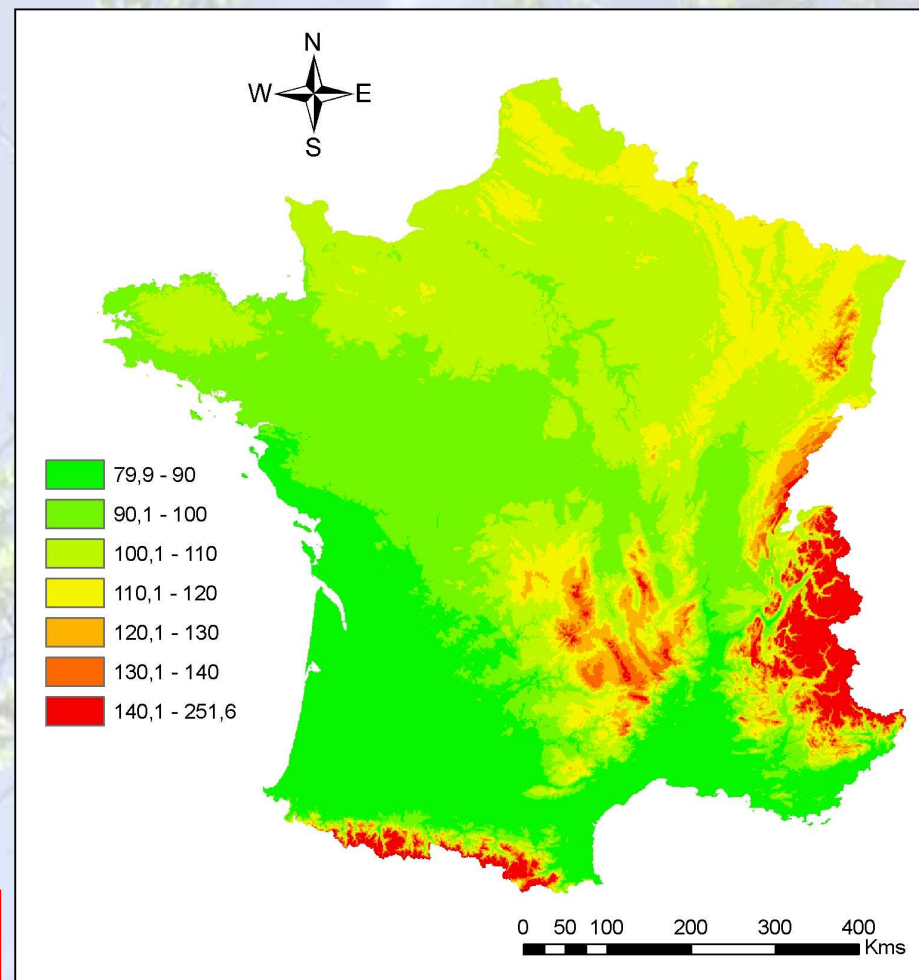
## Modèle de prédiction du débourrement : feuillus (dd10 - 42 peuplements)

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

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



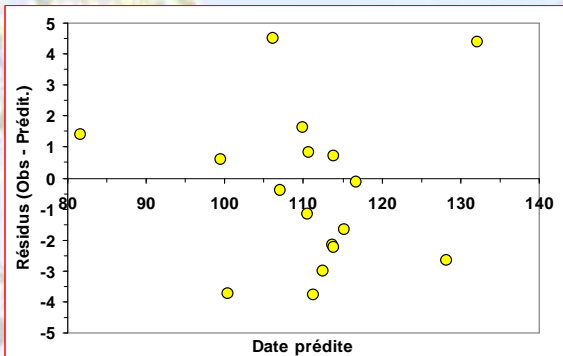
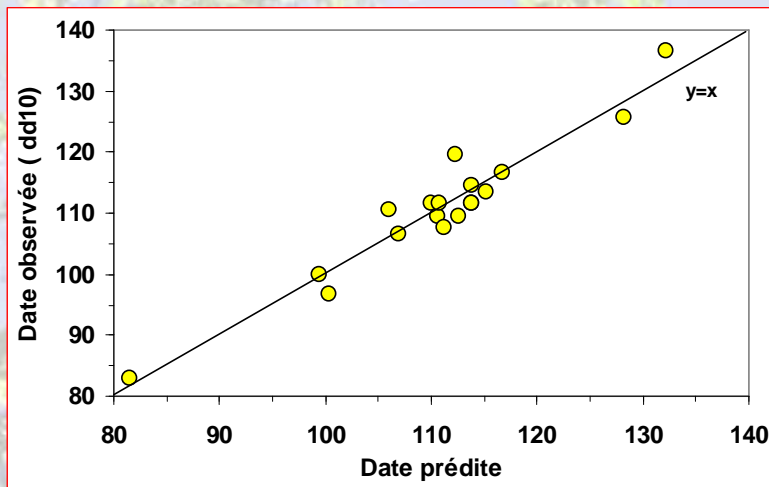
**Ecart moyen** : -0.08  
**Ecart absolu moyen** : 4.3  
**Ecart quadrat. Moyen** : 5.6



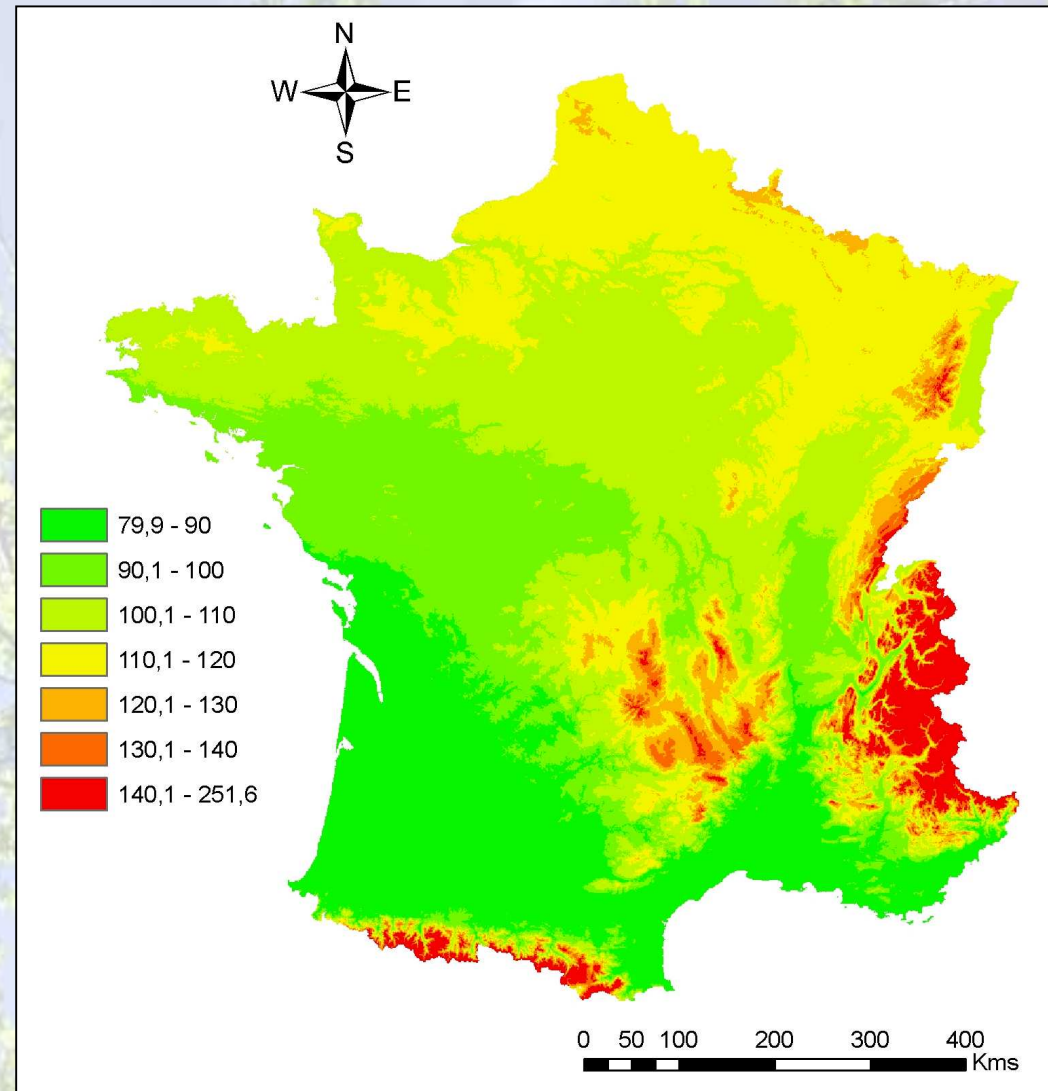
## Modèle de prédiction du débourrement : hêtre (dd10 - 18 peuplements)

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

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



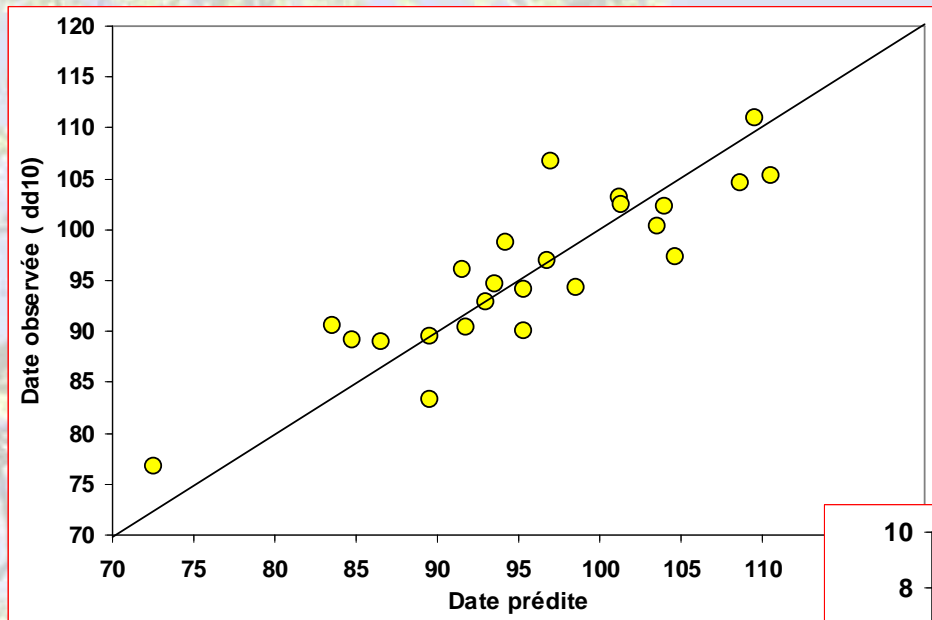
**Ecart moyen** : -0.02  
**Ecart absolu moyen** : 2.3  
**Ecart quadrat. Moyen** : 2.9



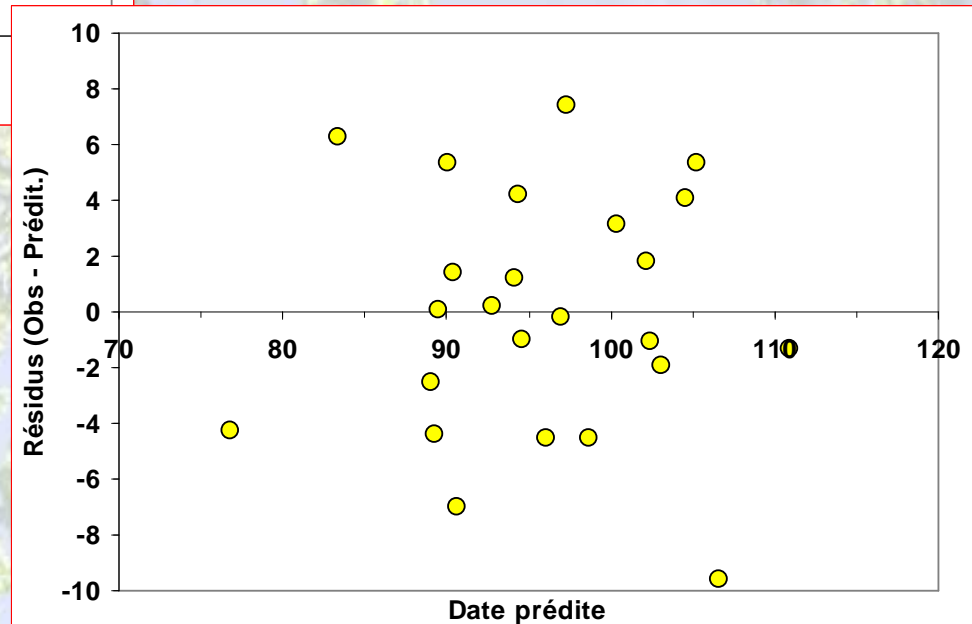
## Modèle de prédiction du débourrement : chênes (dd10 - 24 peuplements)

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

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



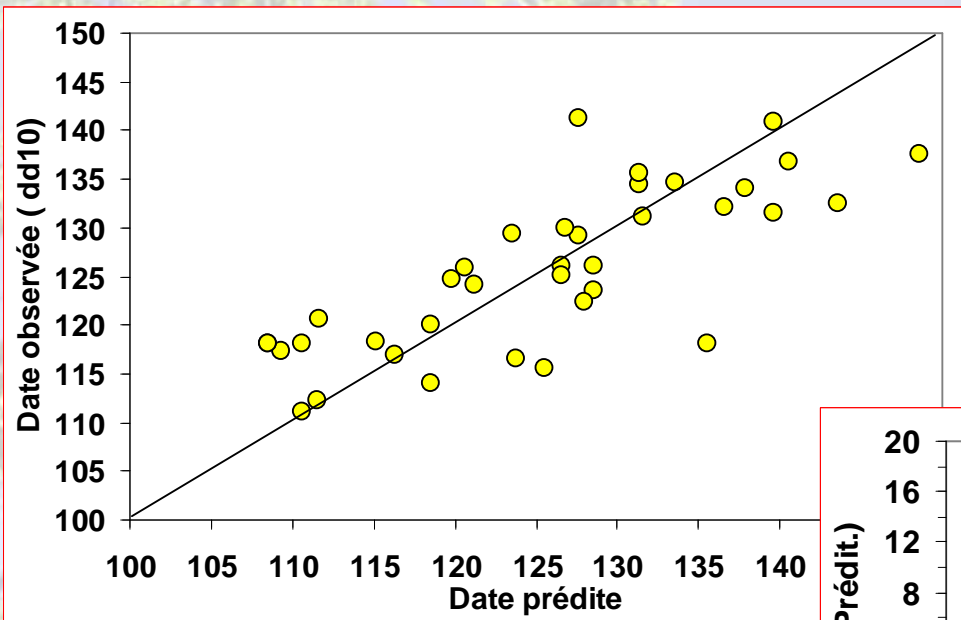
|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| <b>Ecart moyen</b>          | <b>: -0.09</b> |
| <b>Ecart absolu moyen</b>   | <b>: 3.9</b>   |
| <b>Ecart quadrat. Moyen</b> | <b>: 4.7</b>   |



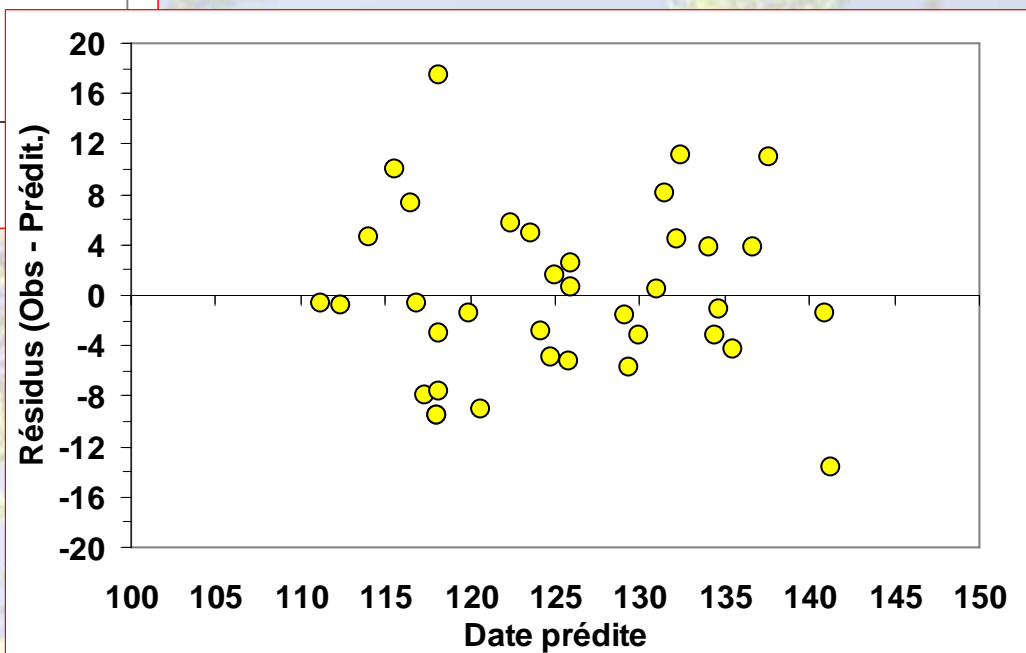
## Modèle de prédiction du débourrement : résineux (dd10 - 37 peuplements)

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

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



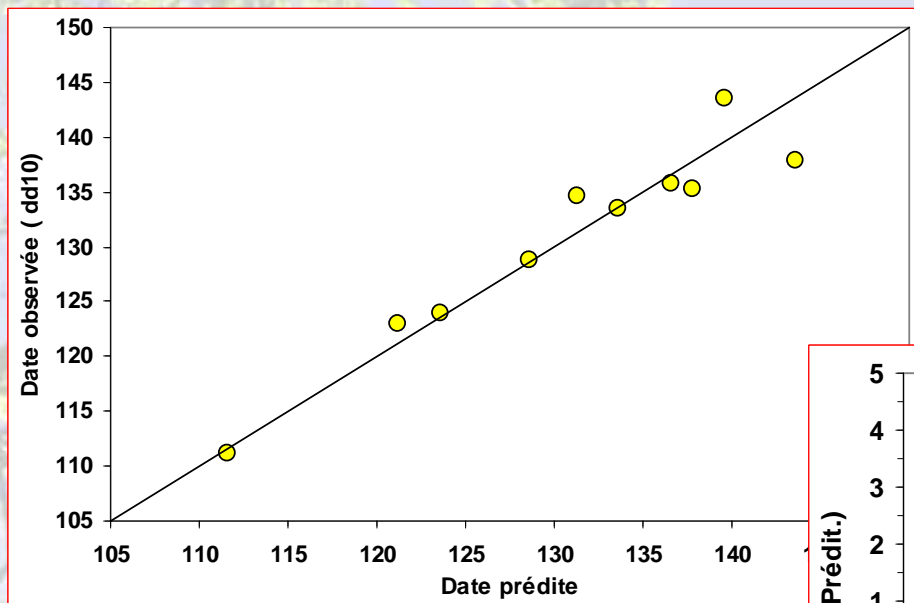
|                      |         |
|----------------------|---------|
| Ecart moyen          | : 0.006 |
| Ecart absolu moyen   | : 5.3   |
| Ecart quadrat. Moyen | : 6.6   |



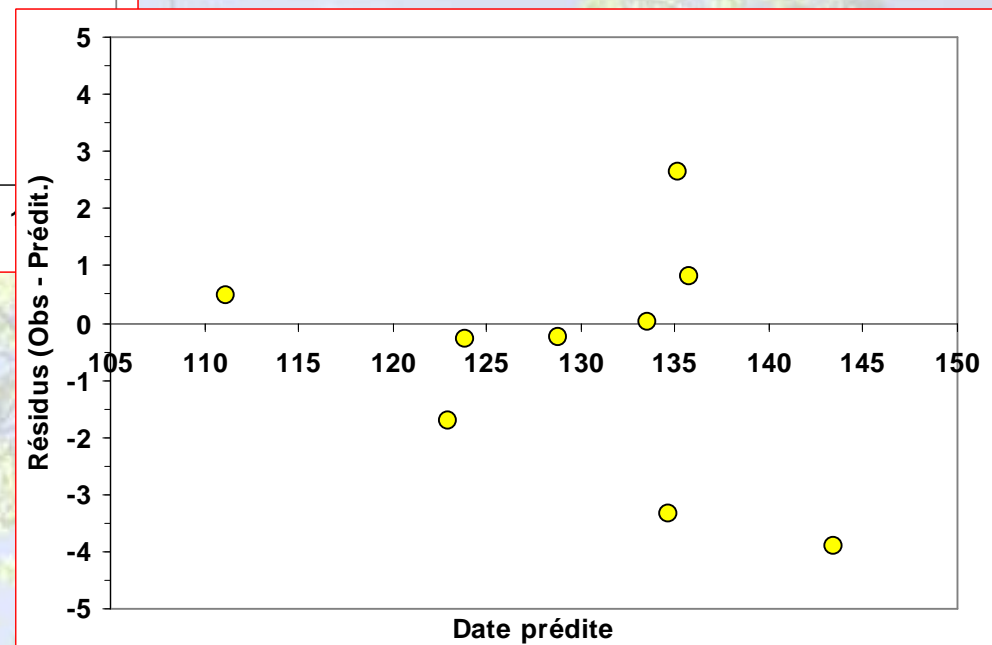
## Modèle de prédiction du débourrement : sapin (dd10 - 10 peuplements)

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

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



**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 <sup>2</sup><br>(%) | SE<br>(jour) |
|-----------------------------------|------------------------------|-----|---|-----------------------|--------------|
| <i>Betula pubescens</i><br>(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><br>(n=49)      | Elongation du<br>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><br>(n=38) | Elongation du<br>mois de mai | 133 | $Y = -20.9 + 2.6 (\text{Alt.}) + 0.4 (\text{Long}) + 2.6 (\text{Lat.})$ | 87                    | 5.6          |
| Toute espèce<br>Saison de Vég.    | Début<br>(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 !**