

# Modélisation de l'expansion d'un insecte forestier sous l'effet du changement climatique

Christelle ROBINET  
INRA Orléans, Zoologie forestière

## La Processionnaire du Pin



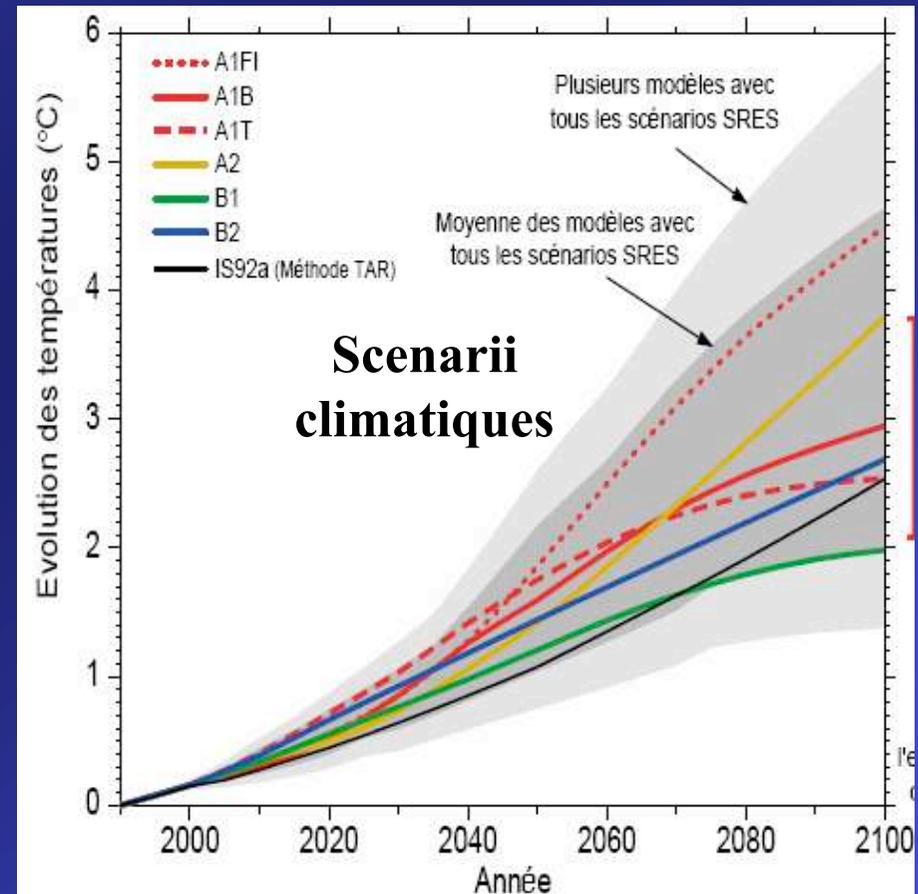
# Changement climatique

- \_ CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>,...
- \_ température
- \_ précipitation
- \_ insolation
- \_ événements climatiques extrêmes

**+0.6°C en un siècle**

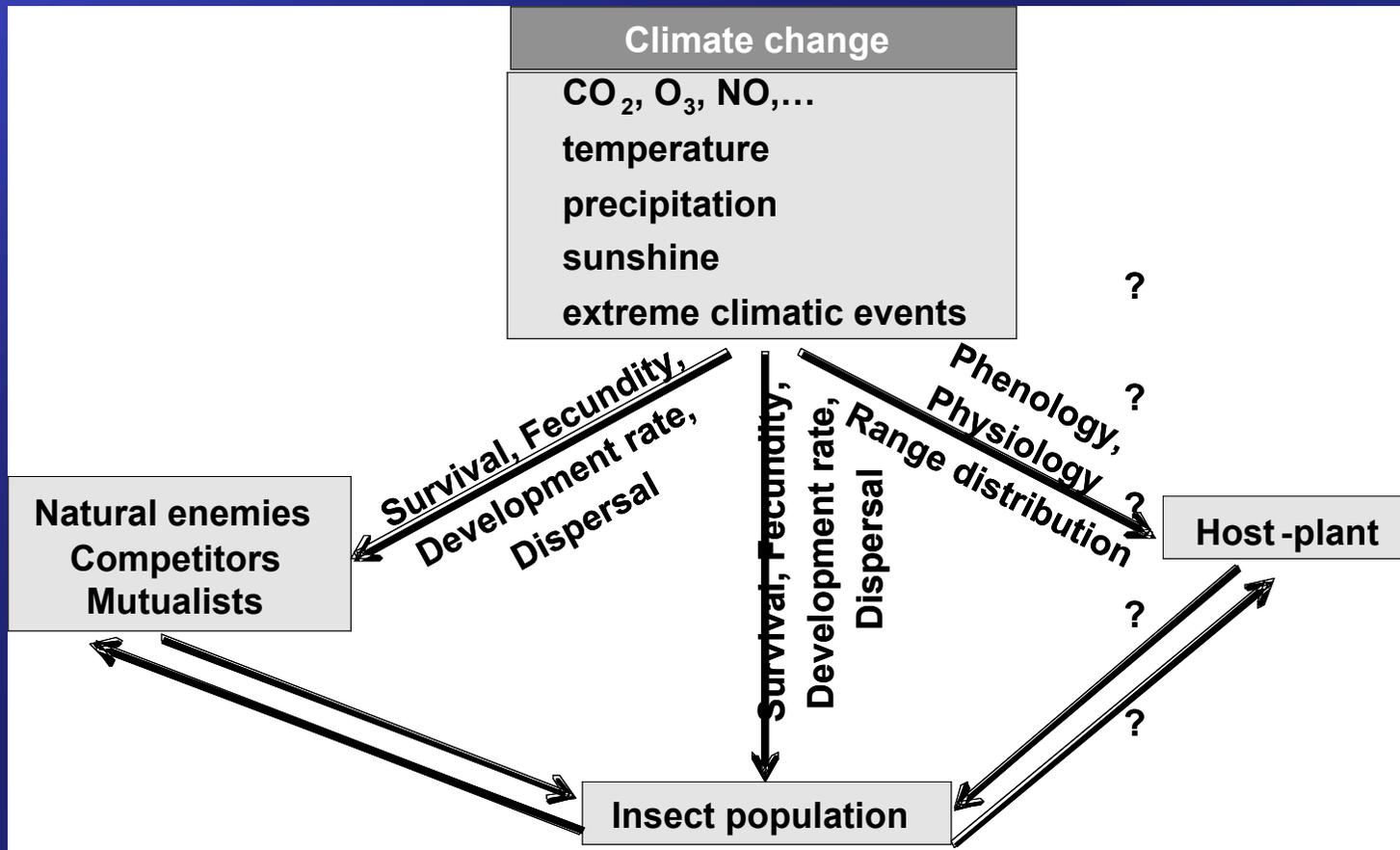
**Prévisions pour 2100:  
+1.8-4.0°C**

IPCC (2001, 2007)



# Impacts du changement climatique

- Survie, vitesse de développement, fécondité, dispersion,..
- Écosystème: ennemis naturels, compétiteurs, proies, plante-hôte,...



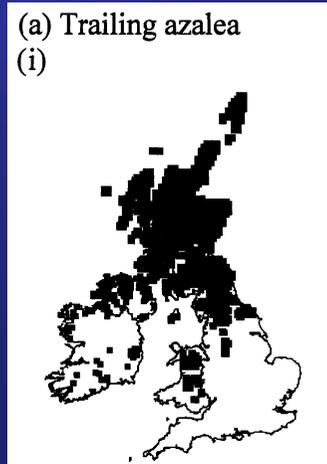
# Impacts du changement climatique

- Survie, vitesse de développement, fécondité, dispersion,..
- Écosystème: ennemis naturels, compétiteurs, proies, plante-hôte,...

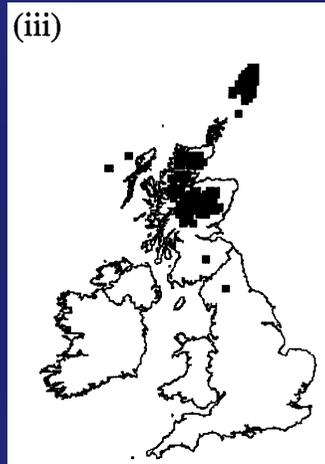
## - AIRE DE DISTRIBUTION DES ESPECES

déterminée en grande partie par les conditions climatiques:

- > rétraction
- > expansion



présent



2050s

Berry et al.. 2001



présent



2050s

# Impacts du changement climatique

- **Survie, vitesse de développement, fécondité, dispersion,..**
- **Écosystème: ennemis naturels, compétiteurs, proies, plante-hôte,..**

## - **AIRE DE DISTRIBUTION DES ESPECES**

**déterminée en grande partie par les conditions climatiques:**

- > **rétraction**
- > **expansion**

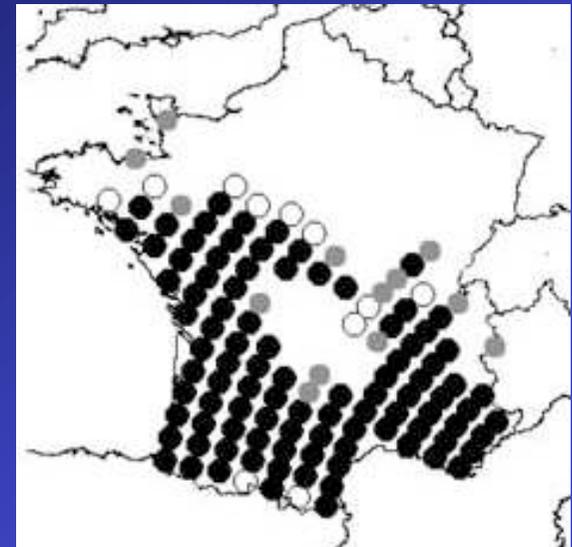
**=> progression vers les pôles et en altitude**

**63% de papillons européens non migrants ont progressé vers le Nord de 35-240 km en un siècle (Parmesan et al. 1999).**

# Impacts du changement climatique sur les aires de distribution

Pour évaluer l'impact du changement climatique,  
la méthode couramment utilisée consiste à déterminer  
**l'enveloppe bioclimatique.**

- Déterminer les conditions climatiques permettant la survie de l'espèce (données présence / absence)
- Projeter ces contraintes afin de définir l'aire de répartition potentielle de l'espèce
- Utiliser divers scénarii (climatiques) afin de prévoir l'aire de répartition potentielle de l'espèce dans les années futures



Distribution de la PP en 1970-80 (GAM)

Robinet et al. 2007

# **Impacts du changement climatique sur les aires de distribution**

**Pour évaluer l'impact du changement climatique,  
la méthode couramment utilisée consiste à déterminer  
l'enveloppe bioclimatique.**

**Cette méthode permet d'évaluer rapidement l'impact du changement  
climatique sur une espèce donnée sans connaître la biologie en détail**

**MAIS :**

- 1- elle ne tient pas compte des capacités de dispersion  
et des barrières à la progression**
- 2- elle ne permet pas de montrer rigoureusement le rôle  
du changement climatique**

# Impacts du changement climatique sur les aires de distribution

Il est indispensable :

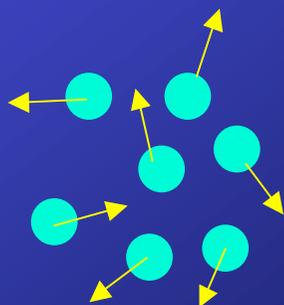
- 1- de comprendre le mécanisme biologique sous-jacent
- 2- d'inclure les capacités de dispersion pour prévoir l'évolution de l'aire de répartition de manière plus réaliste.



Étude spécifique de l'effet des conditions climatiques  
&  
Choix du noyau de dispersion

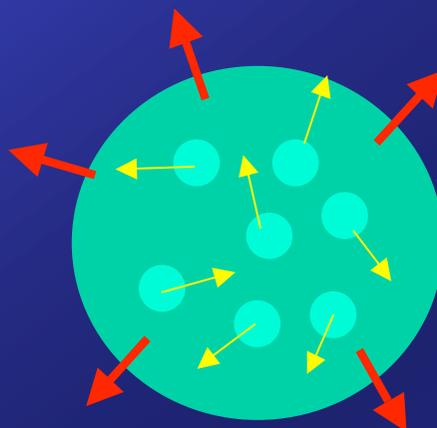
# Processus de dispersion

individu  
particule



dispersion aléatoire  
mouvement brownien

population  
agrégat

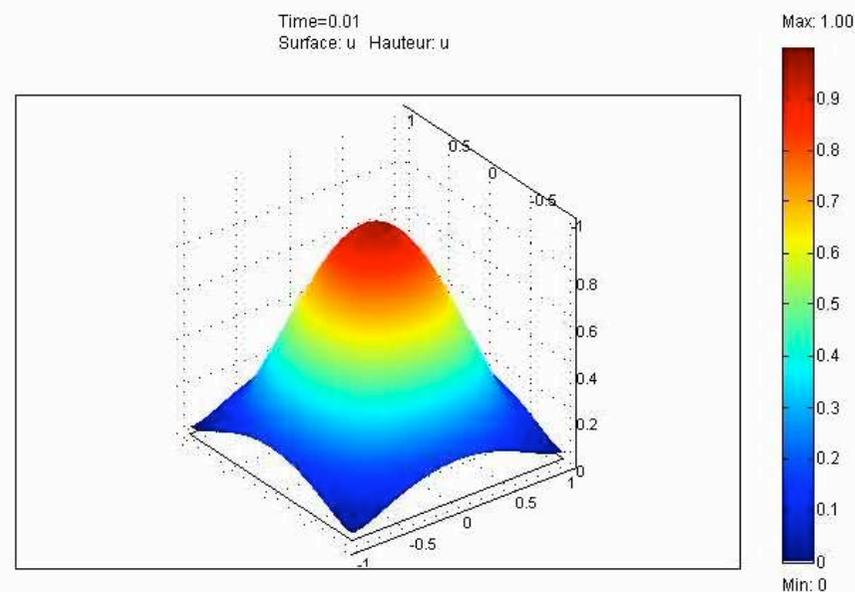


**DIFFUSION**

**Modèle de réaction-diffusion:**

dispersion plantes et animaux

flux de chaleur, patterns chimiques...

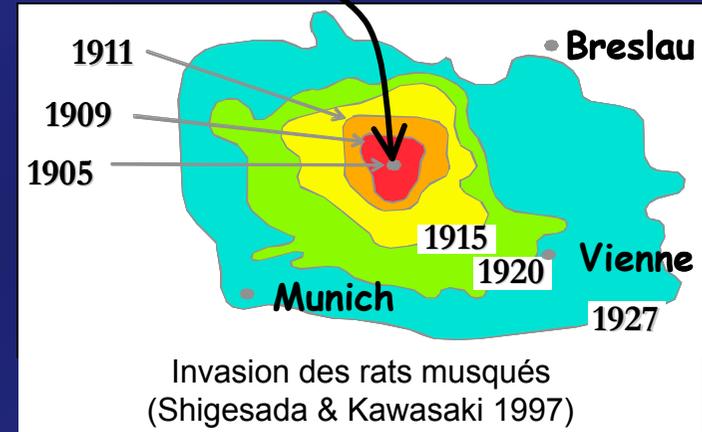


# Modèle de réaction-diffusion

- **Modèle de Skellam (1951):**  
progression des rats musqués

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \underbrace{\left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{f(N)}_{\text{Réaction (croissance)}}$$

Amérique du Nord (fourrure)



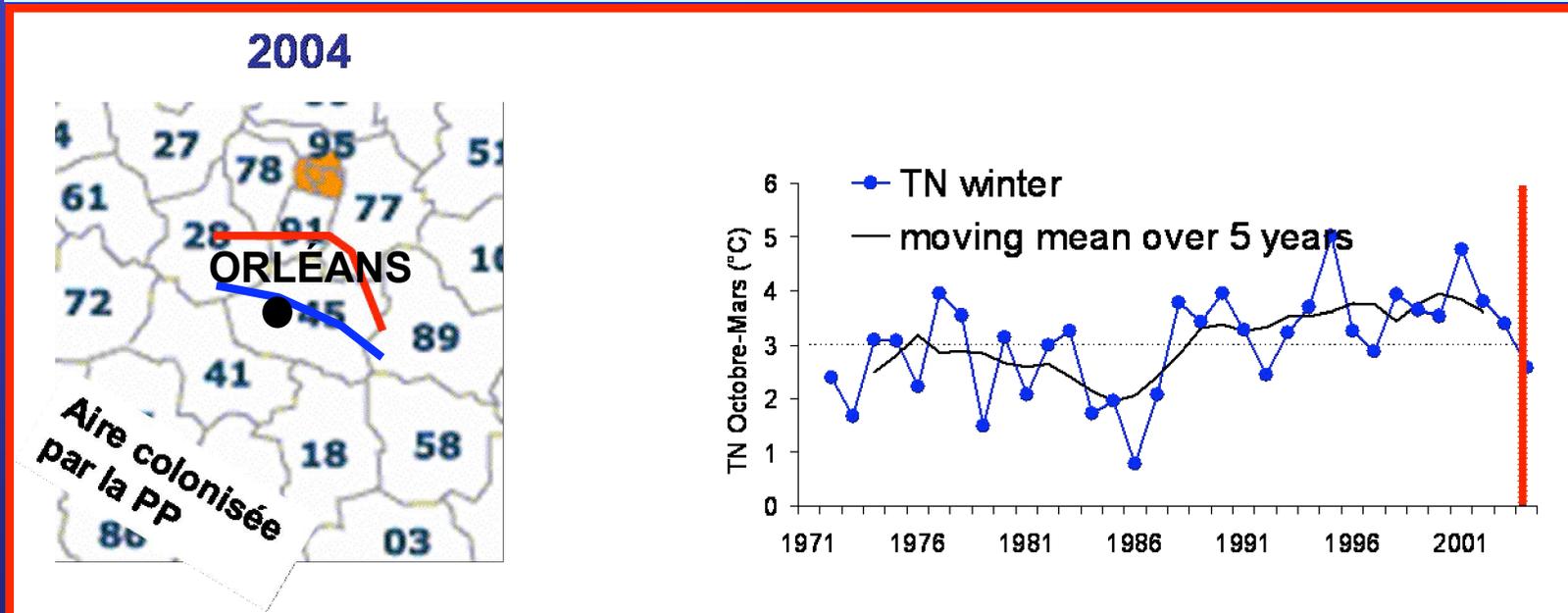
$$f(N) = \epsilon N$$

Pour la processionnaire du pin:

- 1- Mise en place d'études expérimentales pour déterminer les contraintes climatiques
- 2- Développement d'un modèle de diffusion couplé avec ces contraintes

# Évolution de l'aire de distribution de la chenille processionnaire du pin

## Évolution réelle du front

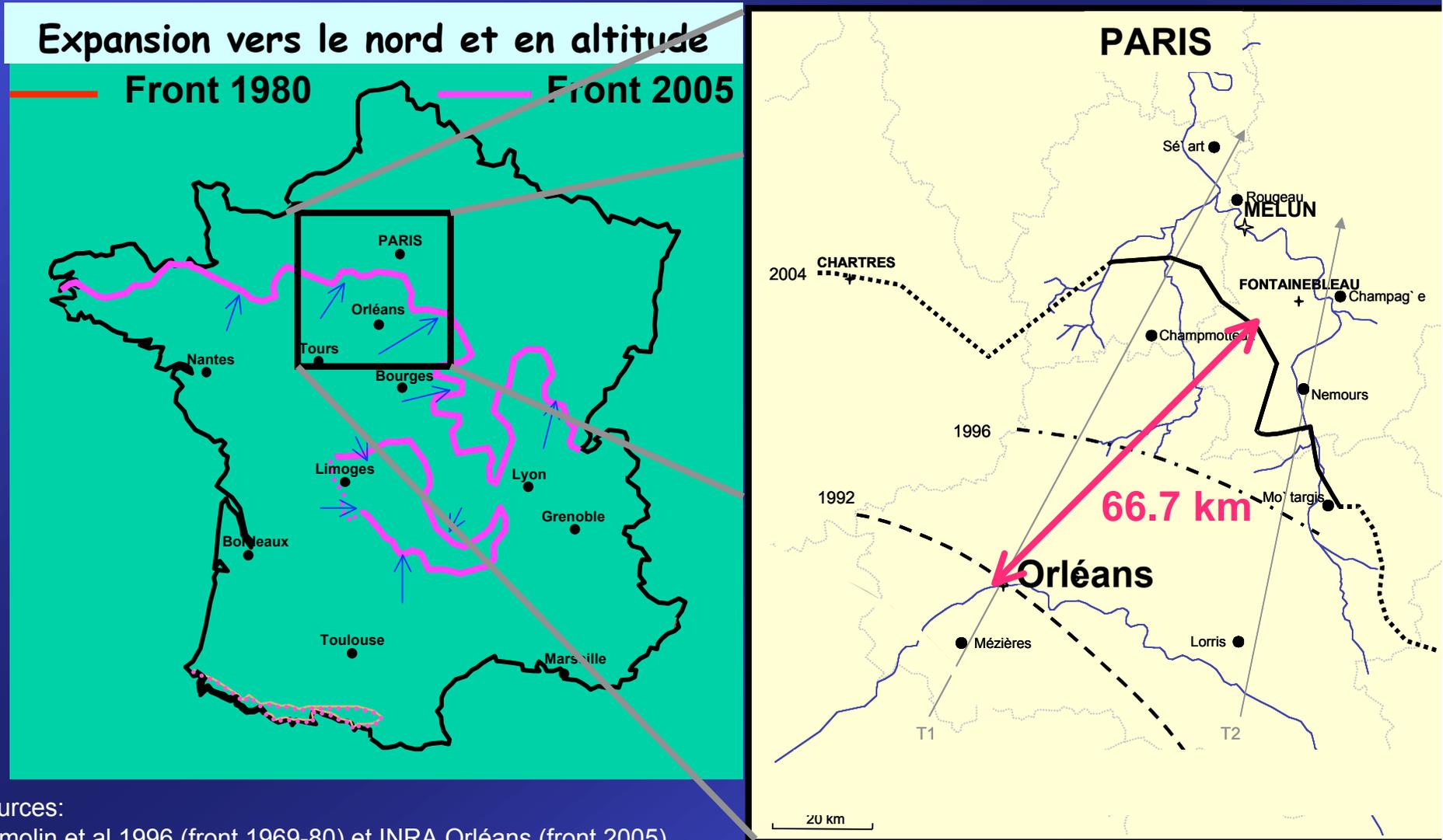


— limite septentrionale historique de la population  
(~ Loire & forêt d'Orléans)

Fronts approximatifs retracés  
d'après les cartes d'Abgrall 2001

Moyenne des températures minimales  
d'octobre à mars à Orléans  
(source: Météo-France)

# Évolution de l'aire de distribution de la chenille processionnaire du pin



Sources:  
Démolin et al 1996 (front 1969-80) et INRA Orléans (front 2005)

# Évolution de l'aire de distribution de la chenille processionnaire du pin



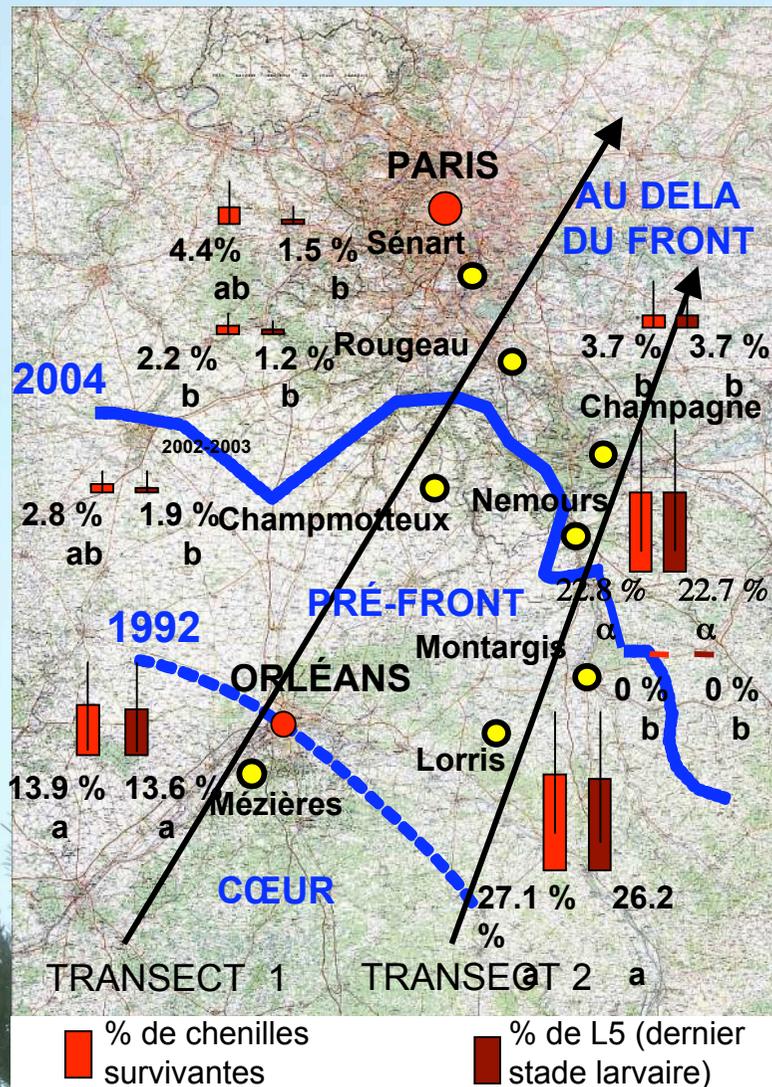
Modéliser l'évolution de l'aire de distribution afin de:

- 1 - Montrer le rôle du réchauffement climatique
- 2 - Fournir une prévision pour les années à venir

Sources:  
Démolin et al 1996 (front 1969-80) et INRA Orléans (front 2005)

# Études expérimentales

## Étude expérimentale : greffage le long de transects



- 8 sites le long de 2 transects
- 10 colonies par site: calcul de leur survie
- données climatiques sur chaque site

- décroissance de la survie
- survie au-delà du front
- effet indirect du climat sur les capacités de survie via l'alimentation

# Rôle de l'alimentation



T nid > 9°C  
(jour)

T°C d'activation

+



T air > 0°C  
(nuit suivante)

T°C d'alimentation  
potentielle

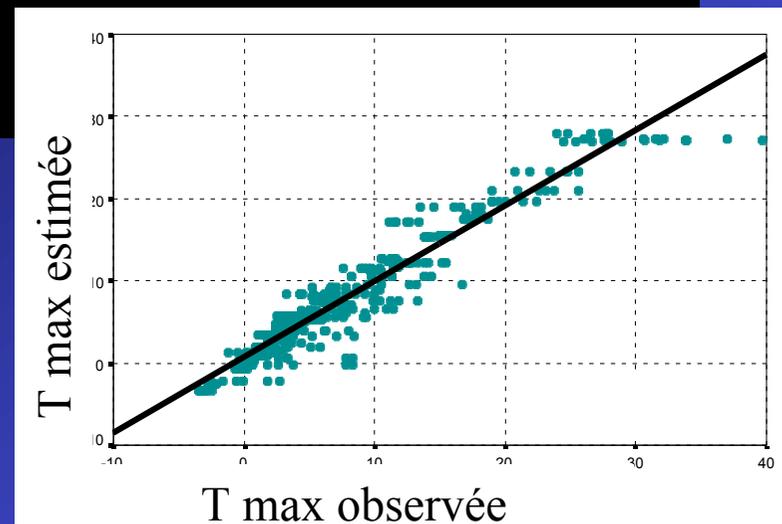


Battisti et al. (2005)

## Reconstruction de Tmax dans le nid:

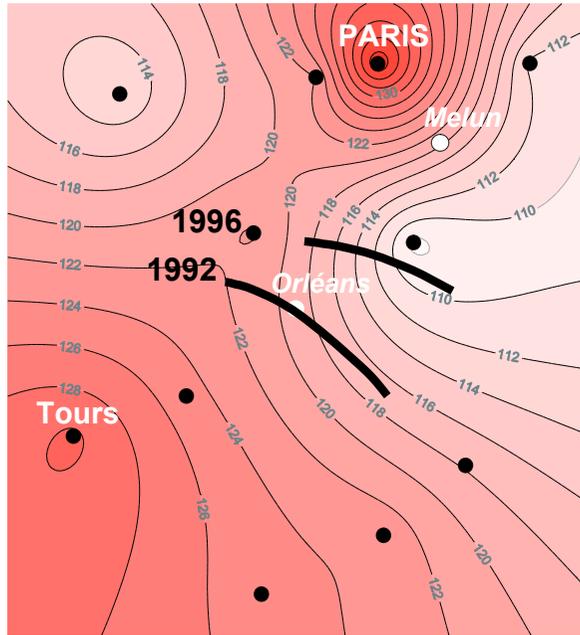
$$TX_{nest} = 0.552 + 0.902 \times TX_{air} + 0.003 \times SRad$$

R<sub>2</sub> = 0.90 \*\*\*



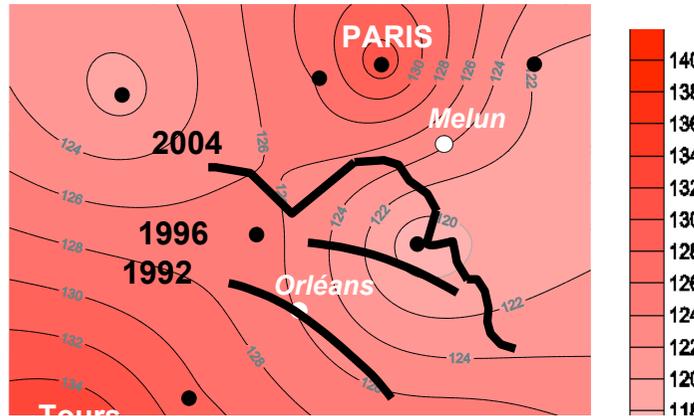
# Rôle de l'alimentation

1992-1996



Nombre moyen de jours d'ali

2000-2004

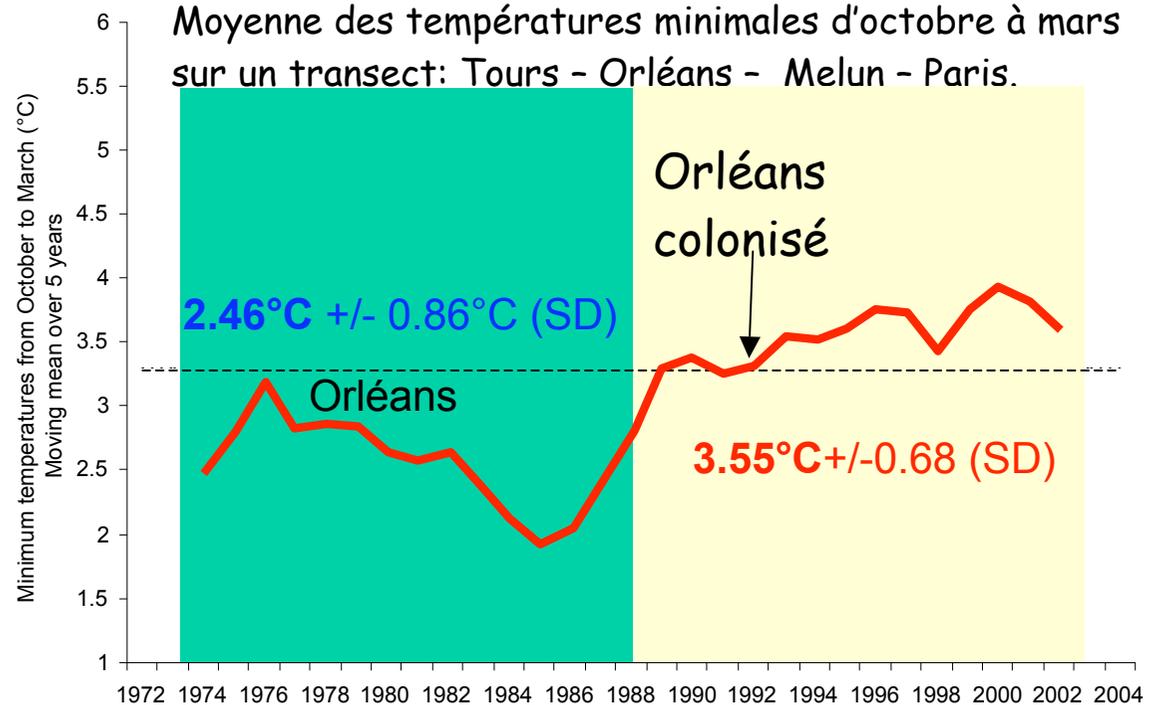


11 stations

Calcul sous R

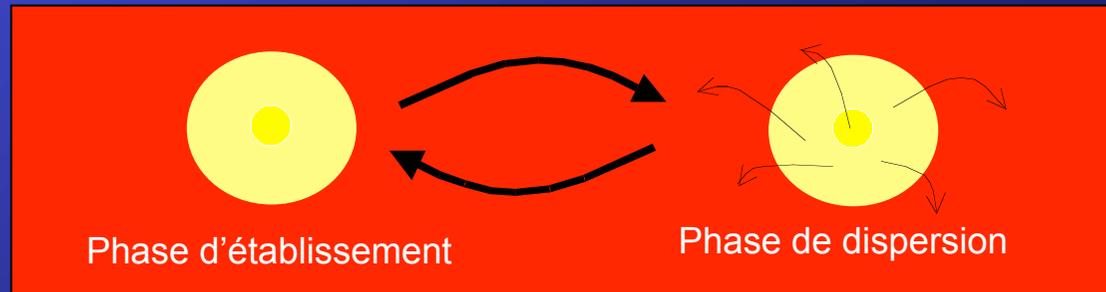
Résultat kriggé  
sous Surfer

Moyenne des températures minimales d'octobre à mars sur un transect: Tours - Orléans - Melun - Paris.



Variable explicative:  
Tmin Oct-Mars ( $R_{-}=0.77^{***}$ )

# Construction du modèle complet



- **Expansion :**

- **processus de dispersion: diffusion**
- **capacité d'établissement: survie dans de nouvelles conditions climatiques**

**Variable explicative:**  
**Tmin Oct-Mars**

**Intégrée dans le modèle  
complet d'expansion**

# Construction du modèle complet

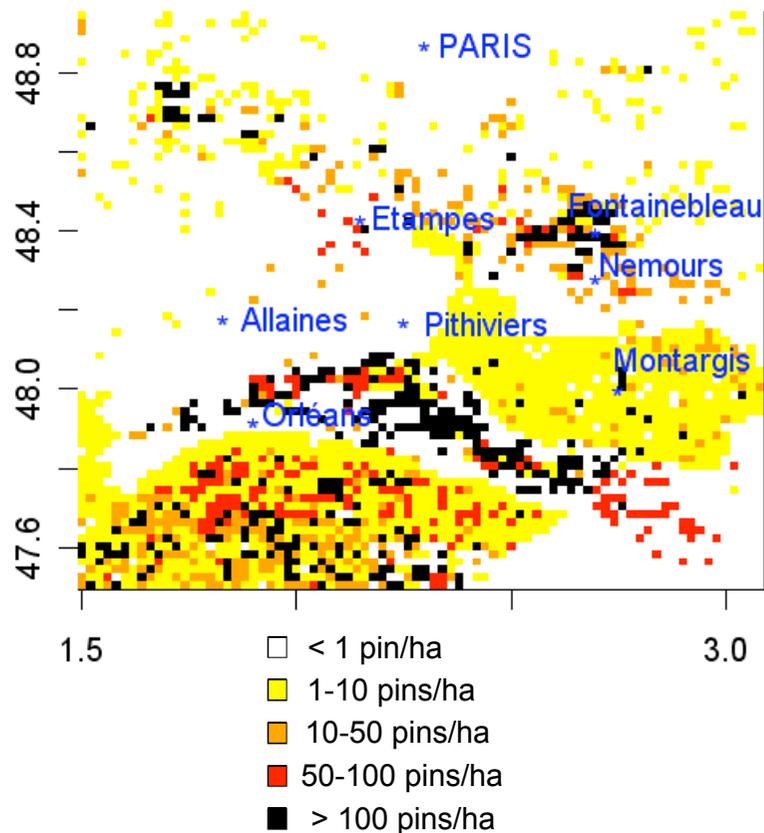
Population initiale  $N_0$

$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

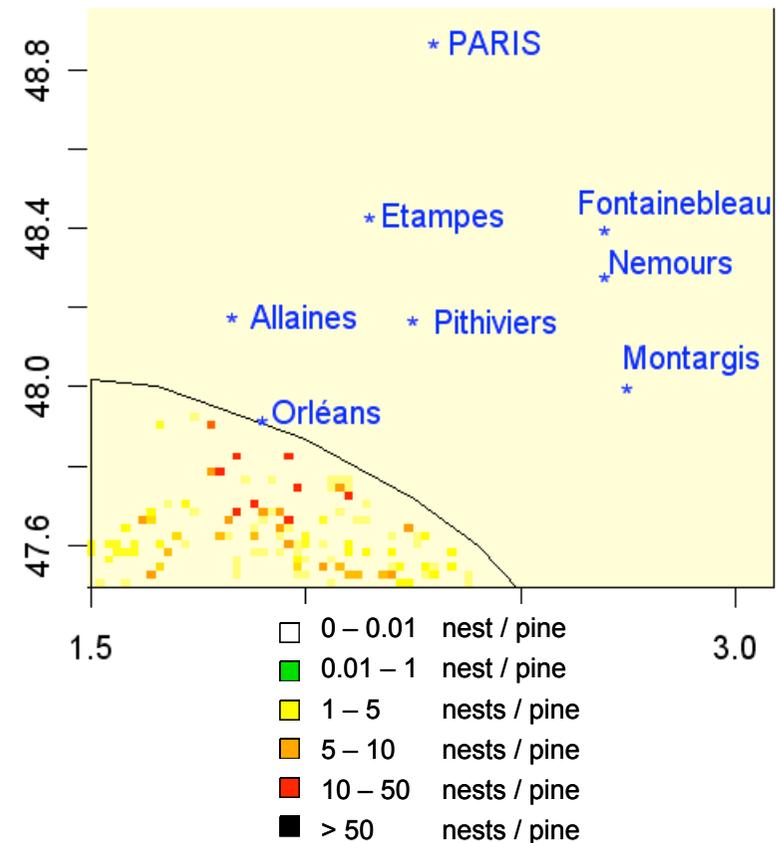
$K = 1$  nid / pin

Population supposée en équilibre  $=K(X)$

Densité de pins



population de 1992



# Construction du modèle complet

Population initiale  $N_0$

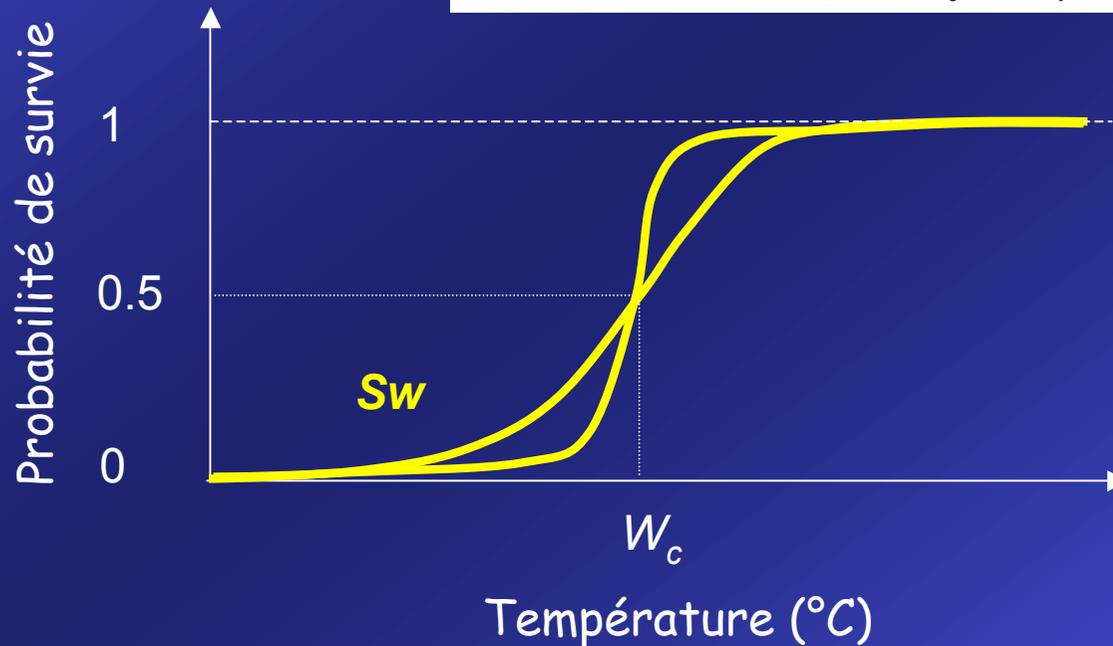
$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

Mortalité hivernale  
(limitant la progression)

$$\bar{N}_t(X) = Sw(X, t) \times \tilde{N}_t(X)$$

$Sw$ : probabilité de survie  
liée à  $T_{min}$  Oct-Mars

$$Sw(X, t) = \frac{1}{1 + \exp[s(W_c - W_t(X))]}$$



**$T_{min}$  d'octobre à mars  
=> alimentation  
=> survie**

# Construction du modèle complet

Population initiale  $N_0$

$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

Mortalité hivernale  
(limitant la progression)

$$\bar{N}_t(X) = Sw(X, t) \times \tilde{N}_t(X)$$

$Sw$ : probabilité de survie  
liée à  $T_{min}$  Oct-Mars

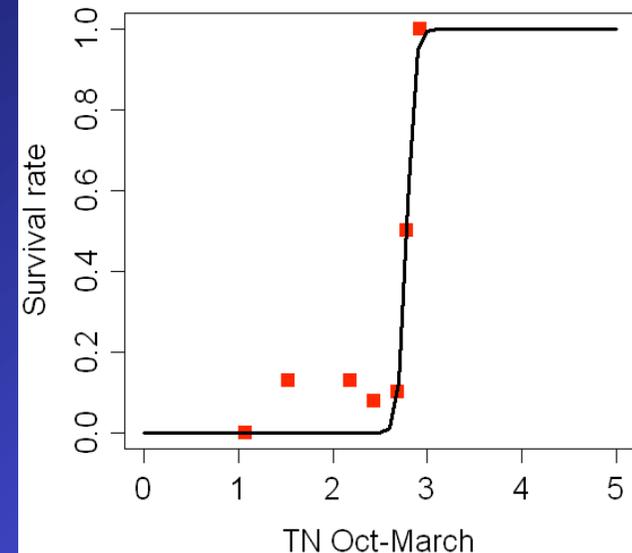
$$Sw(X, t) = \frac{1}{1 + \exp[s(W_c - W_t(X))]}$$

Étude de terrain:

$W_c = 2.78^\circ\text{C}$  ( $P < 0.001$ , hautement significatif)

$s = 24.30$  ( $P = 0.07$  non significatif)

$R_- = 0.98$  ( $P < 0.001$ )



# Construction du modèle complet

Population initiale  $N_0$

$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

Mortalité hivernale  
(limitant la progression)

$$\bar{N}_t(X) = Sw(X, t) \times \tilde{N}_t(X)$$

Diapause  
prolongée

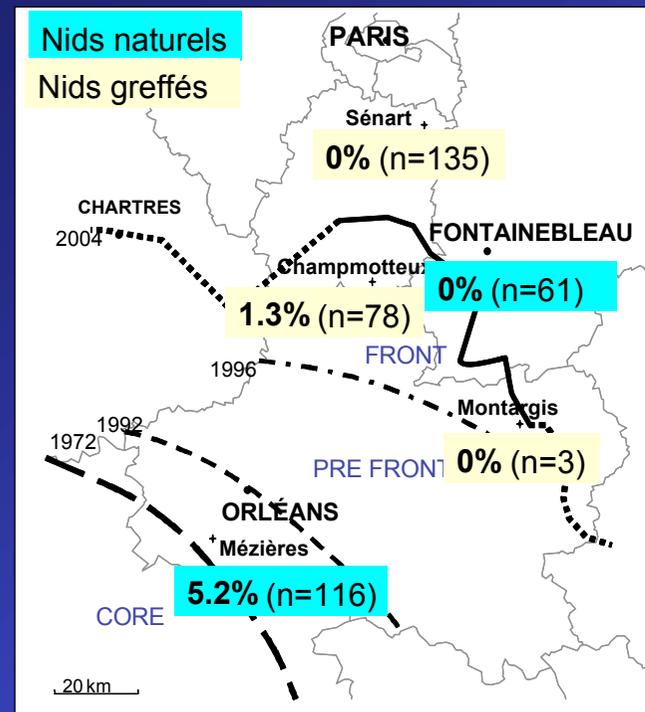
$$E(X, \tau = 0) = (1 - a) \bar{N}_t(X) + a \bar{N}_{t-1}(X)$$

$a$ : proportion de diapause prolongée



Expérience été 2005:

$$\Rightarrow a = 0$$



# Construction du modèle complet

Population initiale  $N_0$

$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

Mortalité hivernale  
(limitant la progression)

$$\bar{N}_t(X) = Sw(X, t) \times \tilde{N}_t(X)$$

Diapause  
prolongée

$$E(X, \tau = 0) = (1 - a) \cdot \bar{N}_t(X) + a \cdot \bar{N}_{t-1}(X)$$

population émergente  $\tau=0$

**DIFFUSION**  
Dispersion des papillons

$$\frac{\partial E}{\partial \tau}(X, \tau) = D \cdot \Delta E(X, \tau), \tau = 0..1$$

- Résolution numérique
- $D$ =constante, déterminée a posteriori

population après dispersion  $\tau=1$

$$D = \frac{\langle rd \rangle^2}{\pi \tau}$$

$rd$  = capacité de dispersion  
Shigesada & Kawasaki 1997



INRA Station de Zoologie Forestière

# Construction du modèle complet

Population initiale  $N_0$

$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

Mortalité hivernale  
(limitant la progression)

$$\bar{N}_t(X) = Sw(X, t) \times \tilde{N}_t(X)$$

Diapause  
prolongée

$$E(X, \tau = 0) = (1 - a) \cdot \bar{N}_t(X) + a \cdot \bar{N}_{t-1}(X)$$

DIFFUSION  
Dispersion des papillons

$$\frac{\partial E}{\partial \tau}(X, \tau) = D \cdot \Delta E(X, \tau), \tau = 0..1$$

Population dispersée

CROISSANCE  
(Modèle de Ricker avec retard)



# Construction du modèle complet

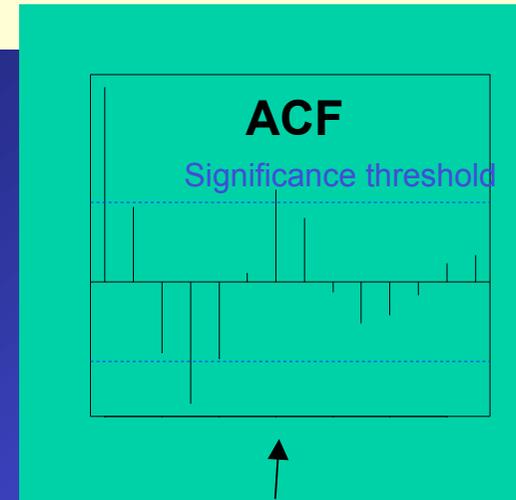
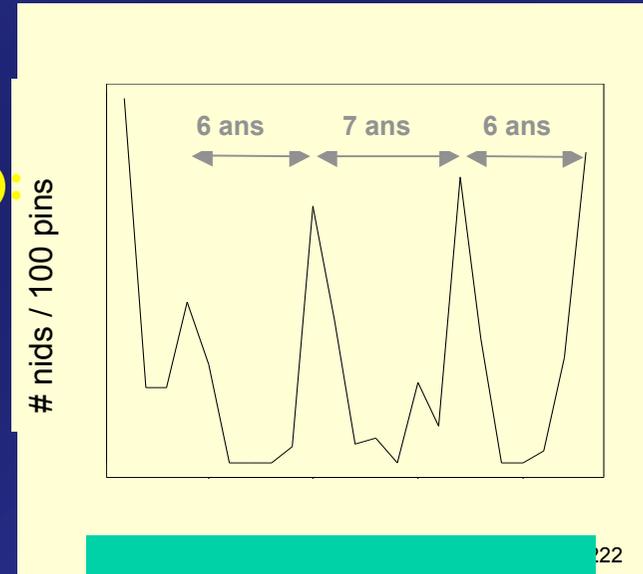
## Modèle de croissance

**Modèle non linéaire (modèle de Ricker avec retard):**

$$N_{t+1} = N_t \times \exp \left[ r \left( 1 - \frac{N_{t-1}}{K} \right) \right]$$

r : taux de croissance

K : capacité biotique



# Construction du modèle complet

## Modèle de croissance

**Modèle non linéaire (modèle de Ricker avec retard):**

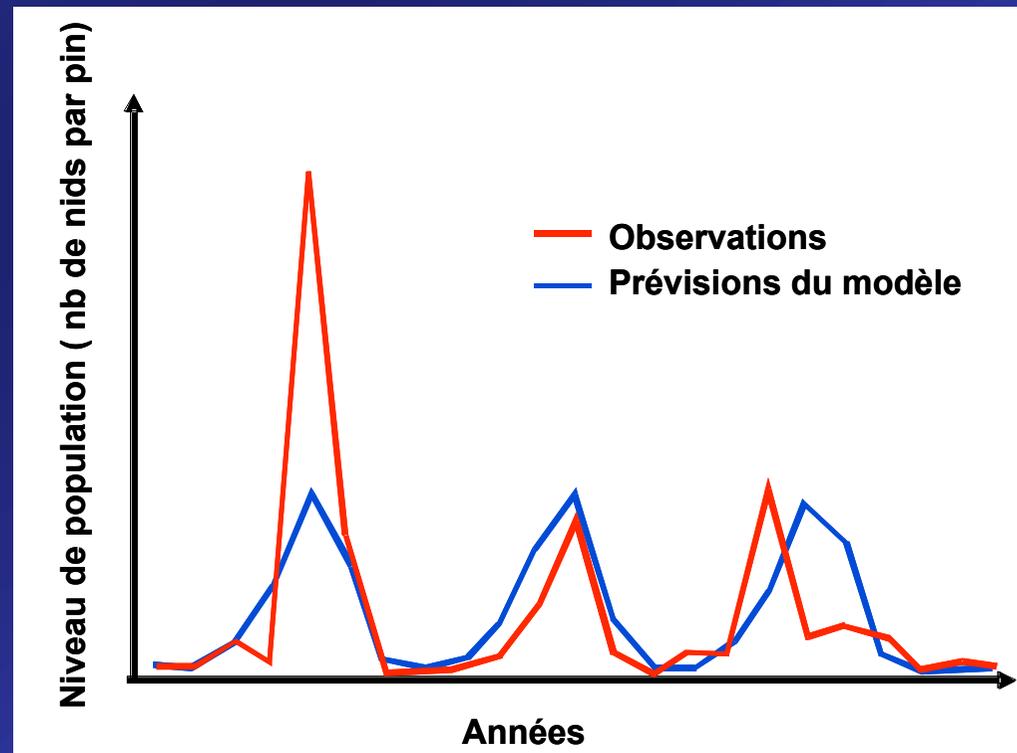
$$N_{t+1} = N_t \times \exp \left[ r \left( 1 - \frac{N_{t-1}}{K} \right) \right]$$

$r$  : taux de croissance

$K$  : capacité biotique

**$r = 1$  (périodicité de 6 ans,  
Murray 2002)**

**$K \sim 1$  nid par pin  
dans le Loiret (45)**



# Construction du modèle complet

Population initiale  $N_0$

$$\tilde{N}_t(X) = N_0(X)$$

Mortalité hivernale  
(limitant la progression)

$$\bar{N}_t(X) = Sw(X, t) \times \tilde{N}_t(X)$$

Diapause  
prolongée

$$E(X, \tau = 0) = (1 - a) \cdot \bar{N}_t(X) + a \cdot \bar{N}_{t-1}(X)$$

DIFFUSION  
Dispersion des papillons

$$\frac{\partial E}{\partial \tau}(X, \tau) = D \cdot \Delta E(X, \tau), \tau = 0..1$$

Population dispersée

CROISSANCE  
Régulation avec retard

$$\tilde{N}_{t+1}(X) = N(X) \exp \left[ r \left( 1 - \frac{\bar{N}_{t-1}(X)}{K(X)} \right) \right]$$

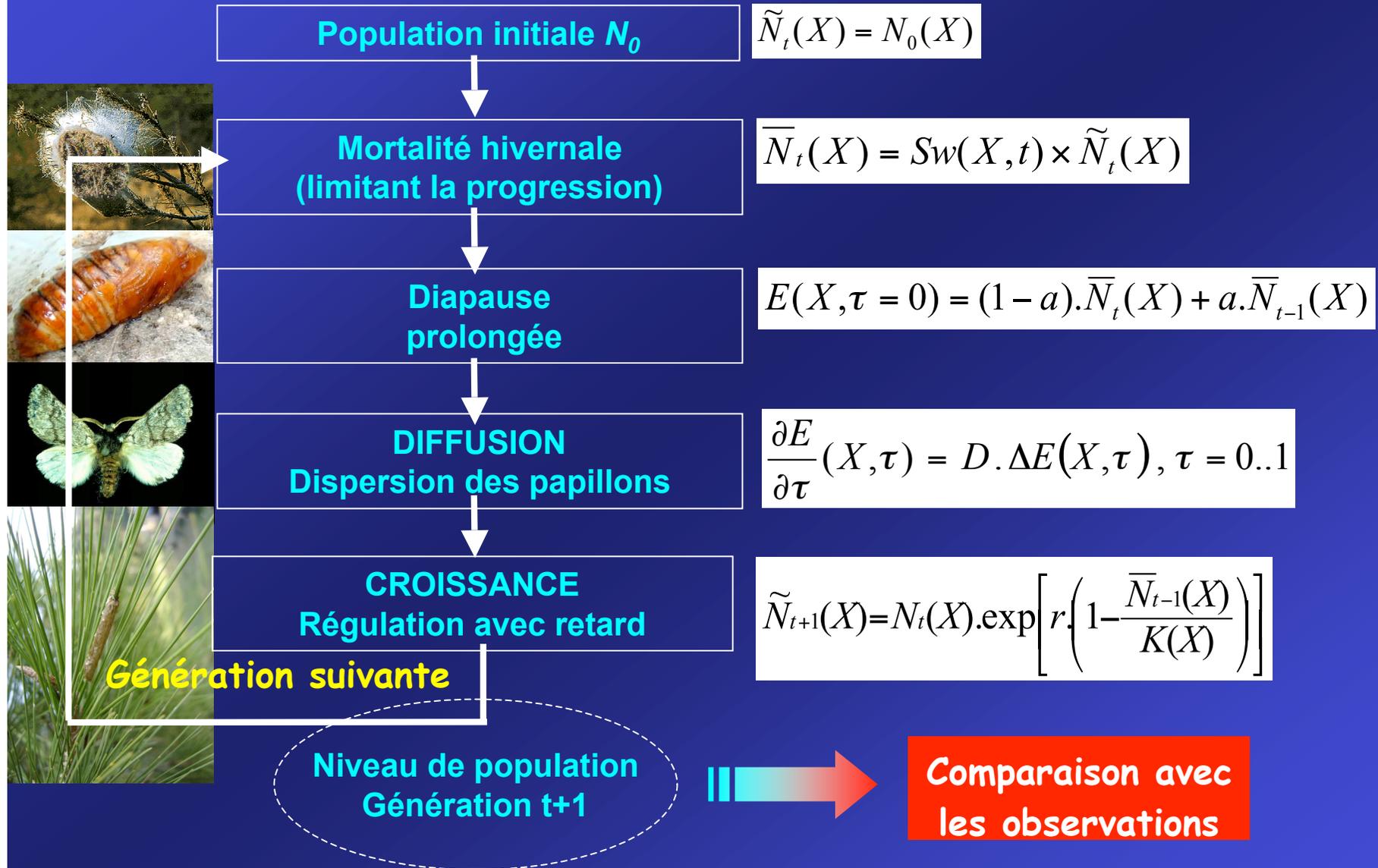
Génération suivante

Niveau de population  
Génération t+1

$r=1$  &  $K=1$  nid par pin



# Construction du modèle complet



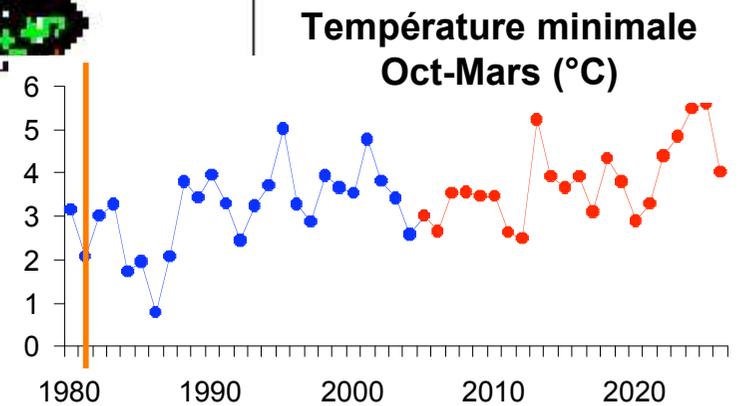
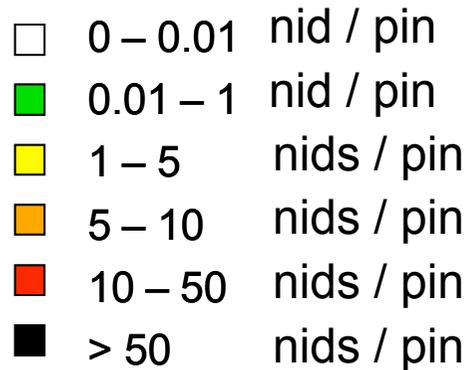
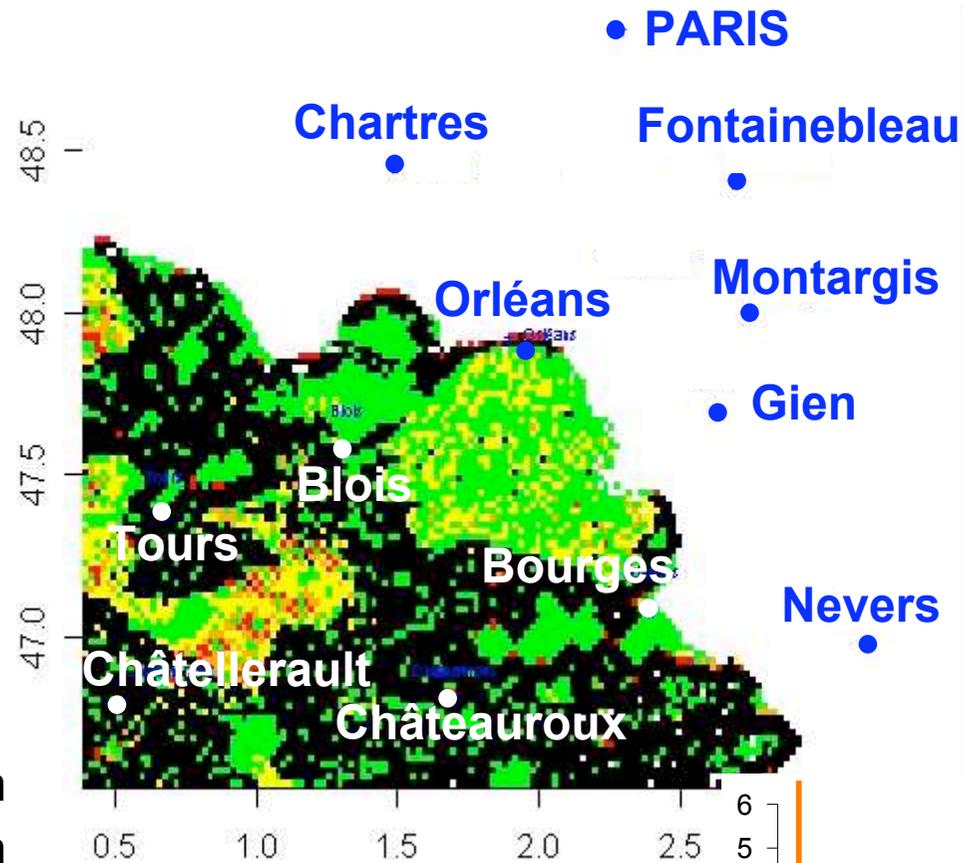


## Scénario 1981-2005

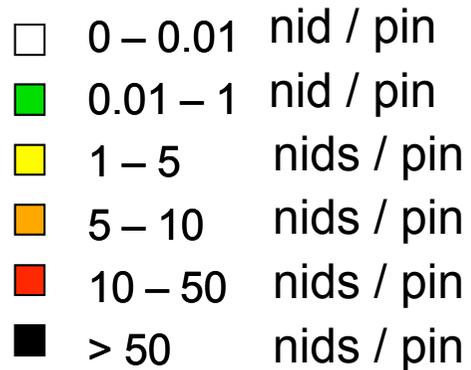
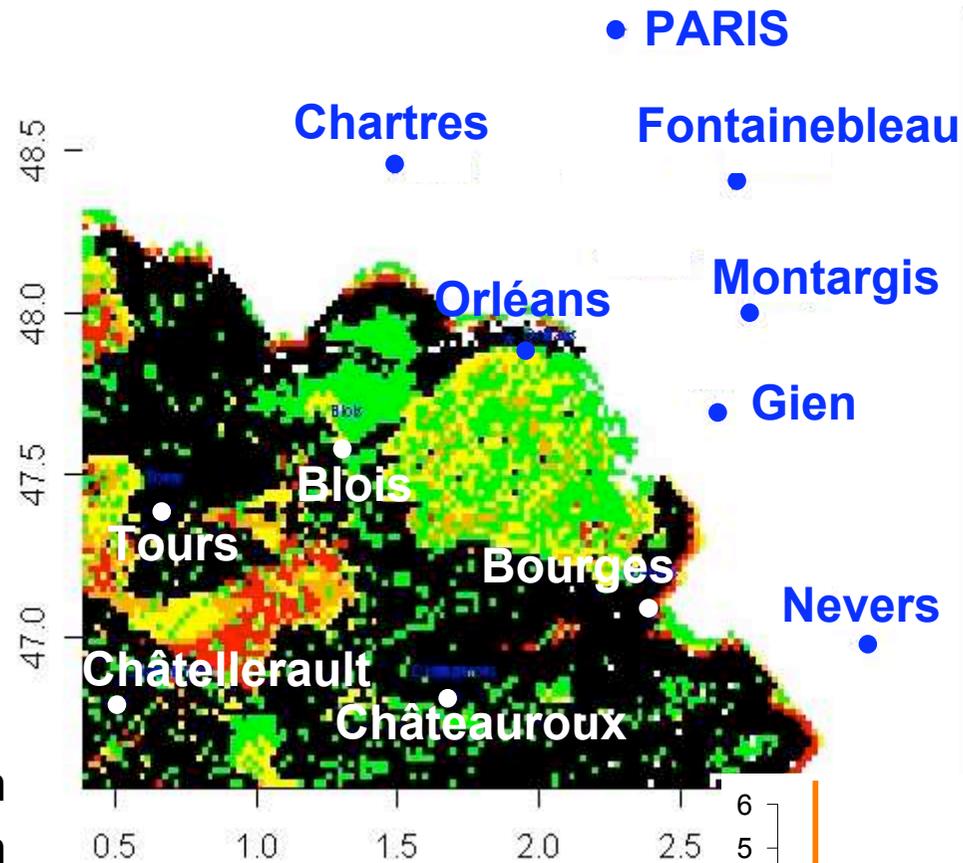


Rd= 3 km

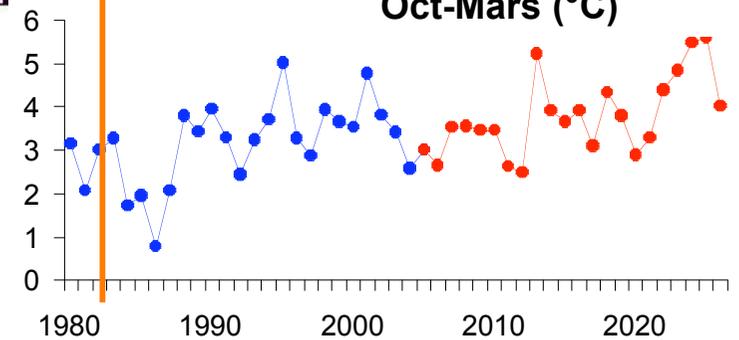
# Reconstruction par le modèle Année 1981



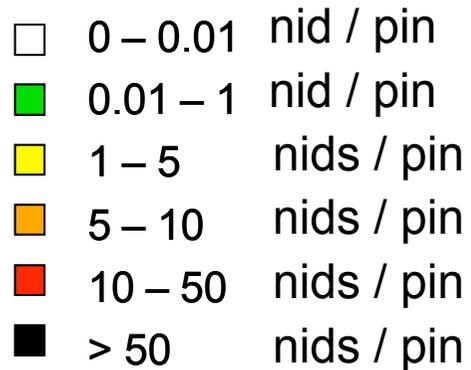
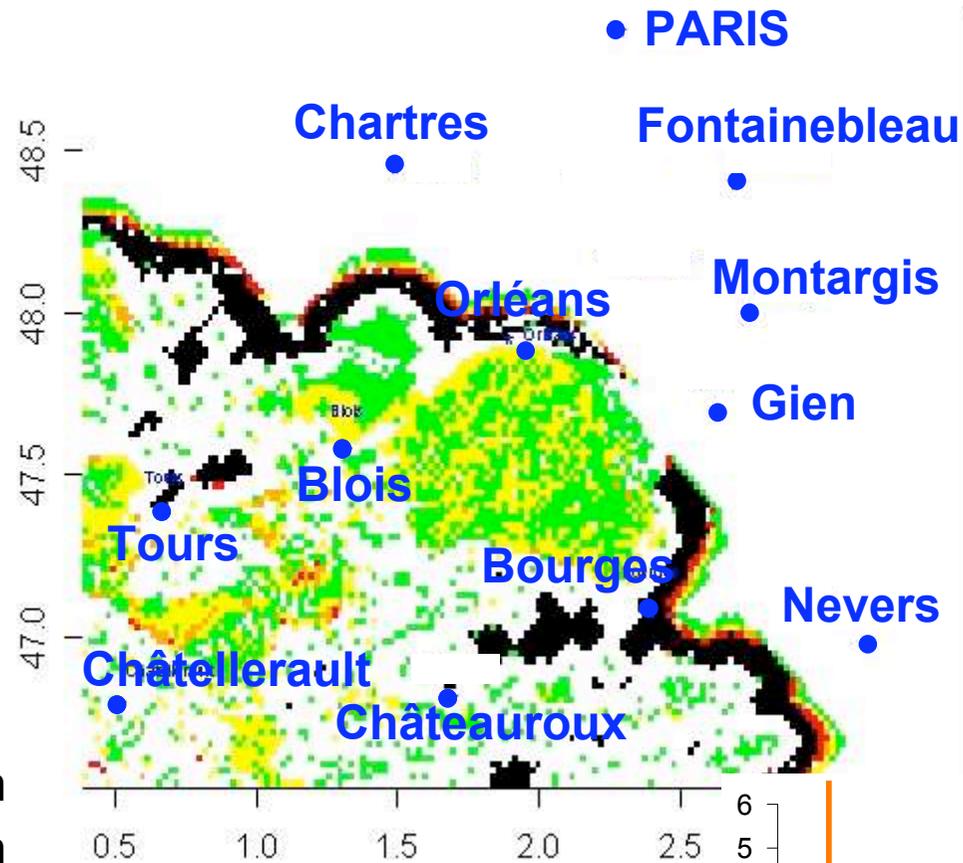
# Reconstruction par le modèle Année 1982



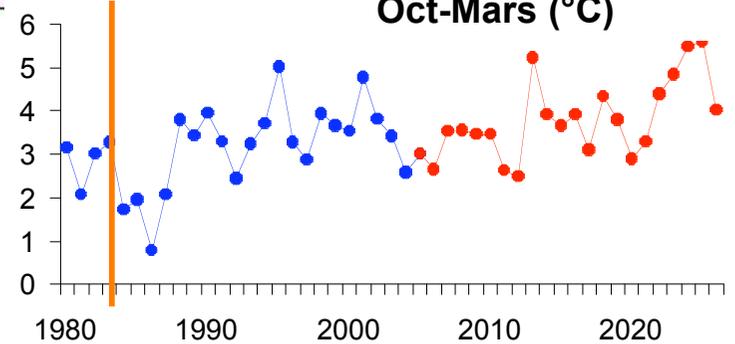
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



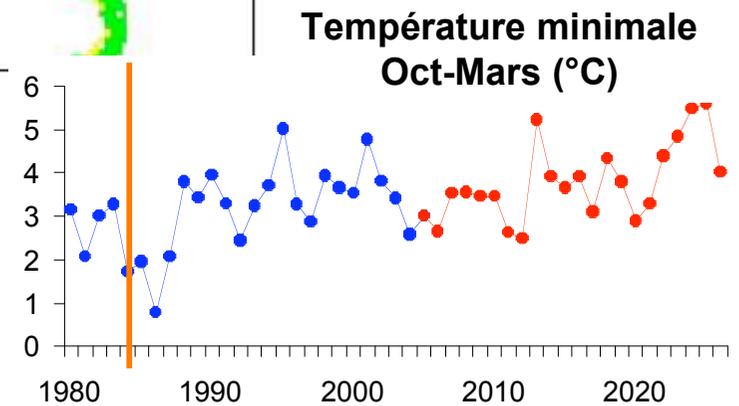
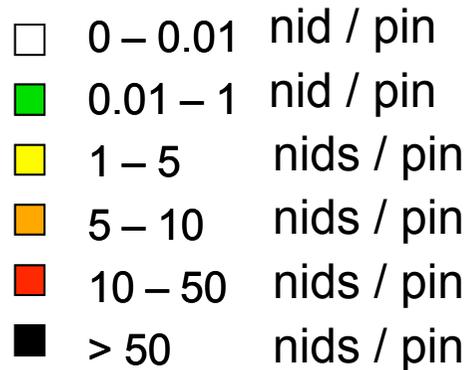
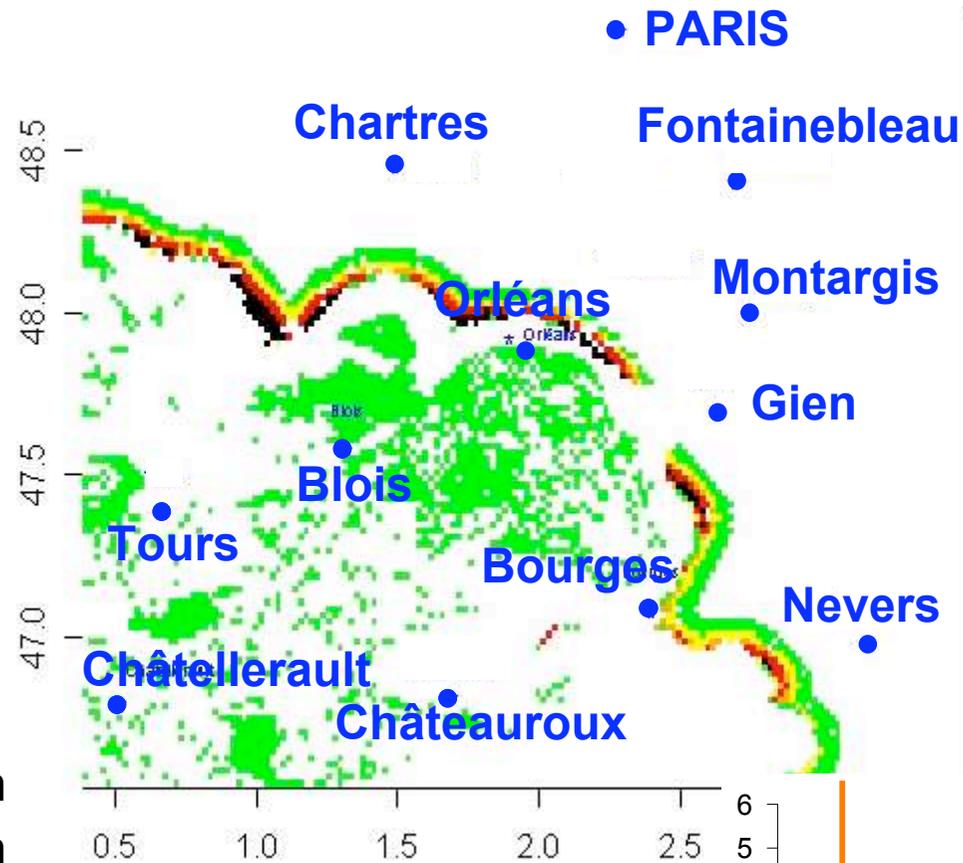
# Reconstruction par le modèle Année 1983



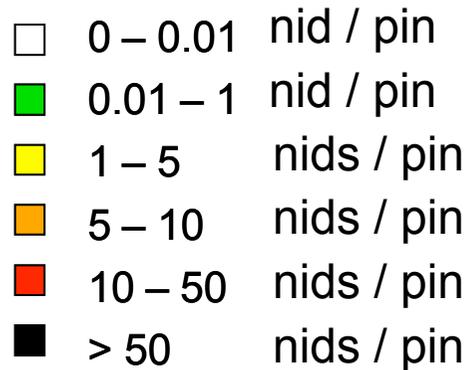
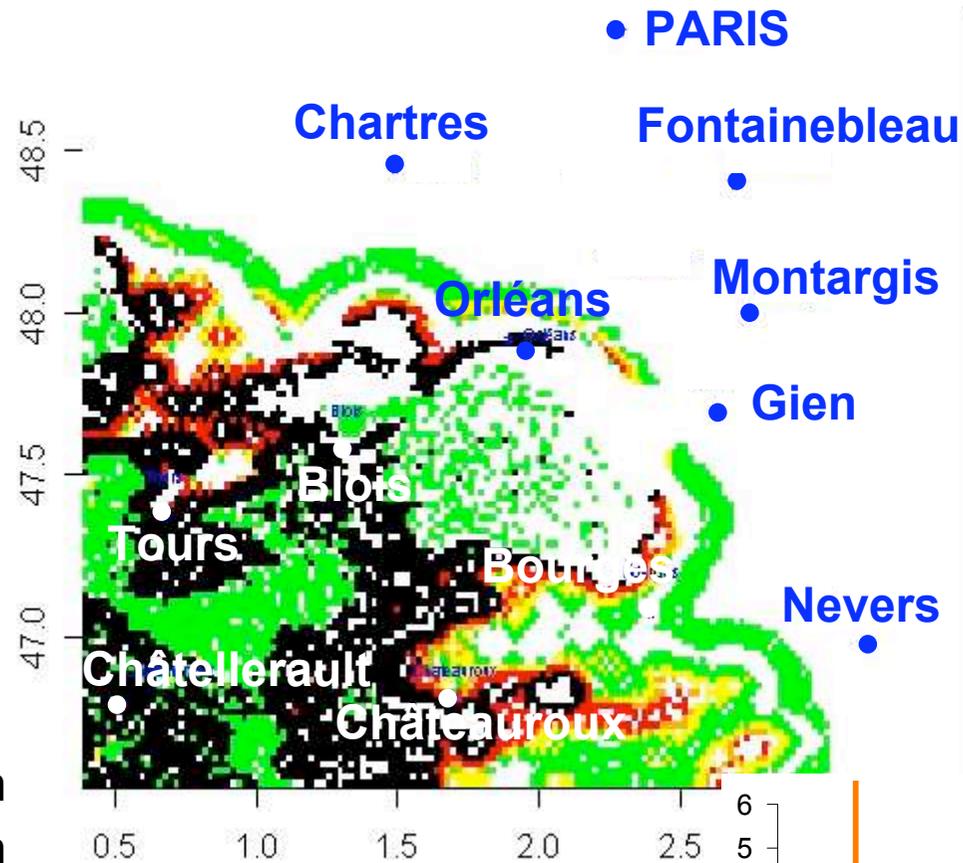
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



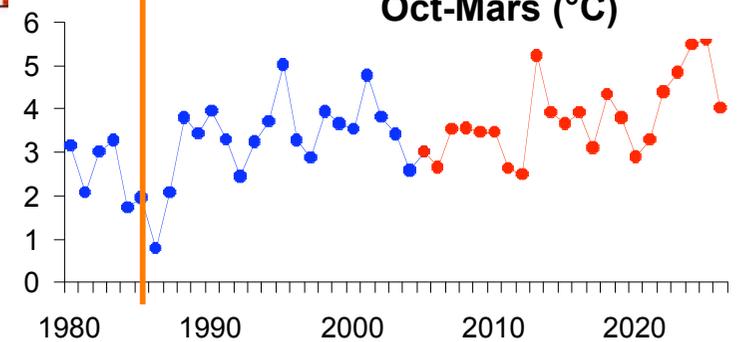
# Reconstruction par le modèle Année 1984



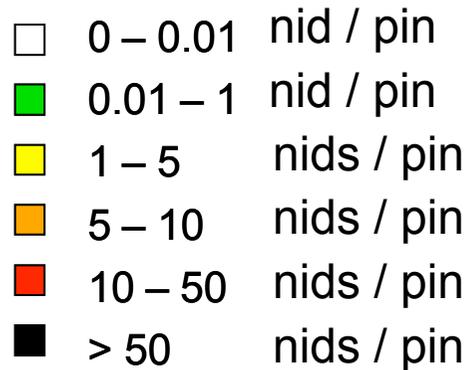
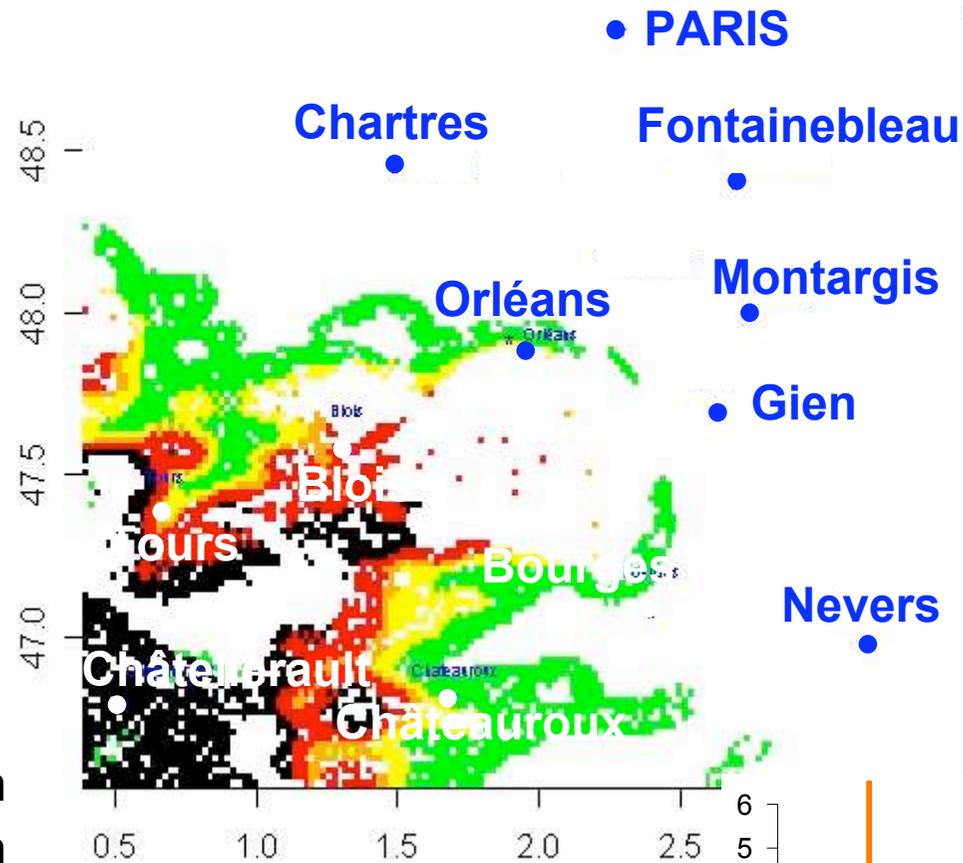
# Reconstruction par le modèle Année 1985



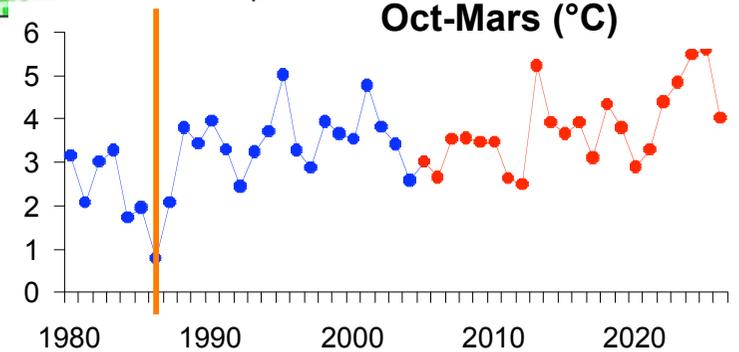
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



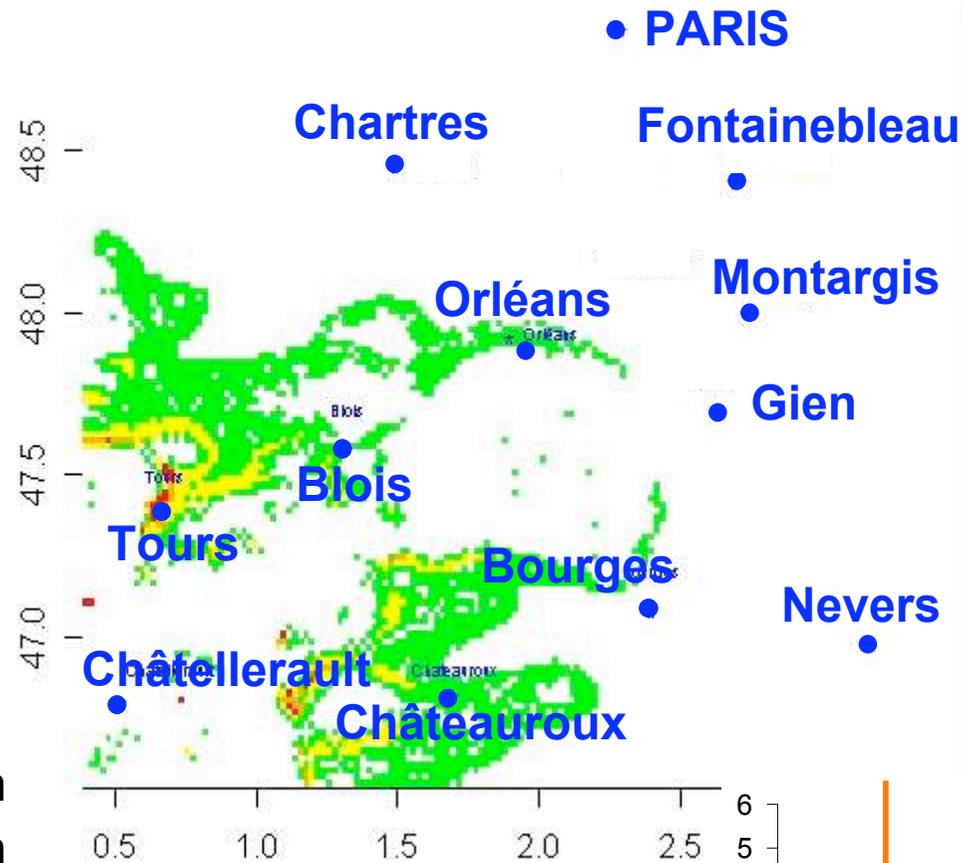
# Reconstruction par le modèle Année 1986



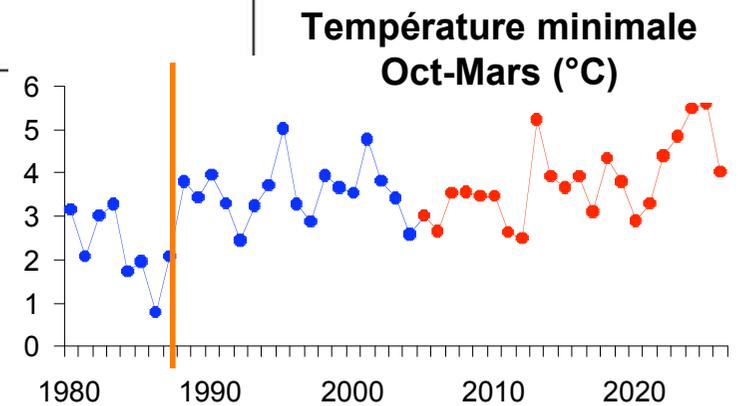
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



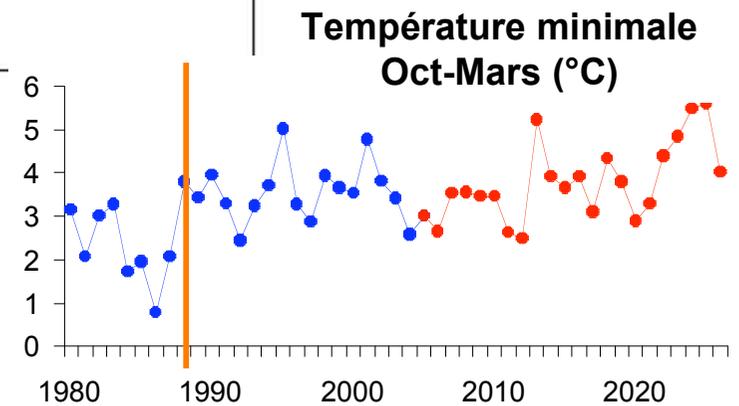
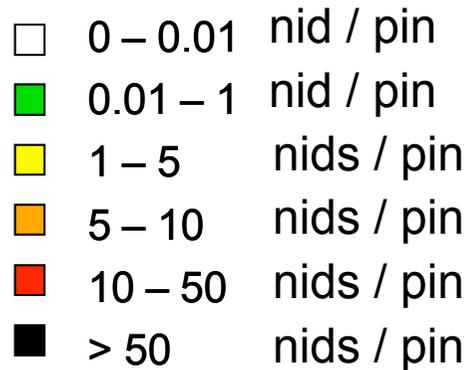
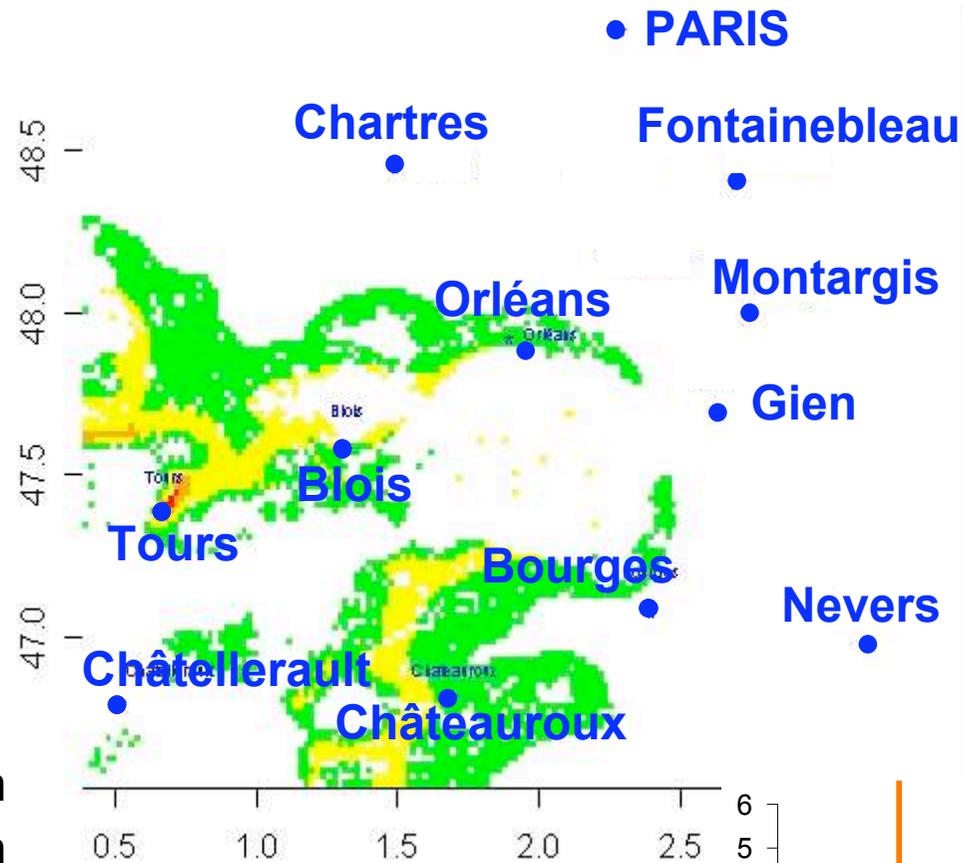
# Reconstruction par le modèle Année 1987



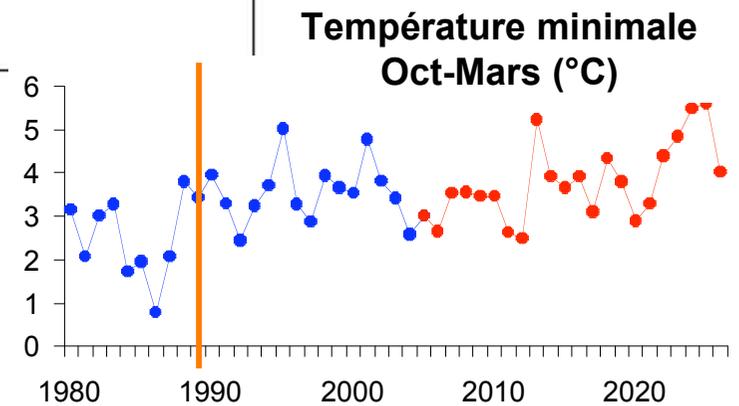
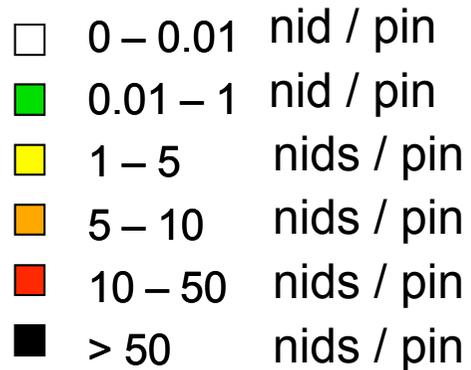
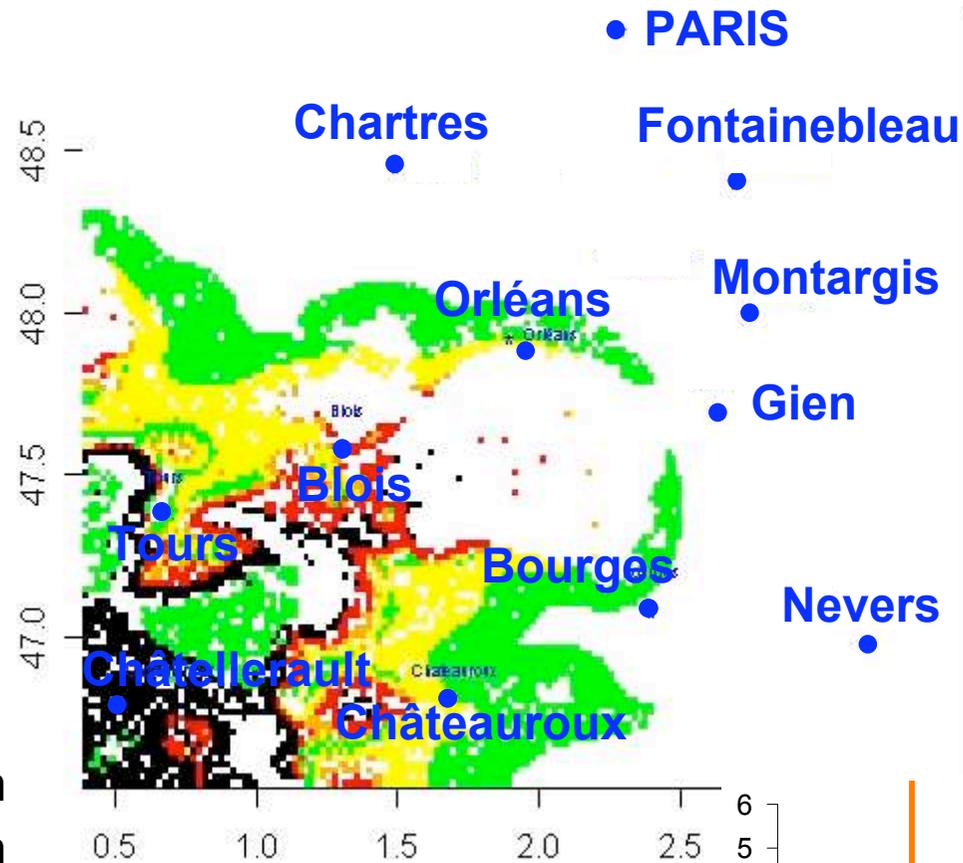
- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin



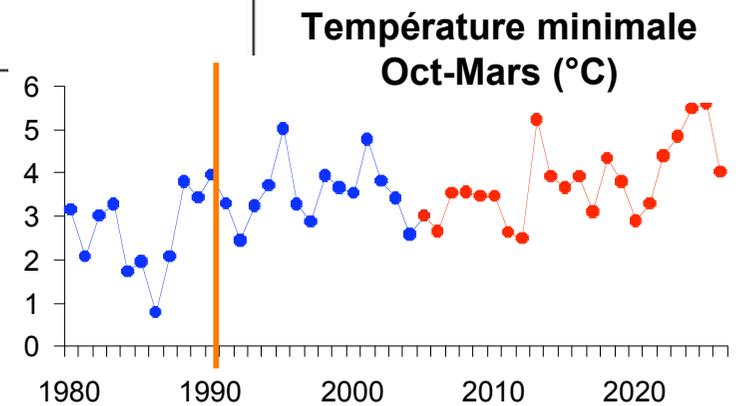
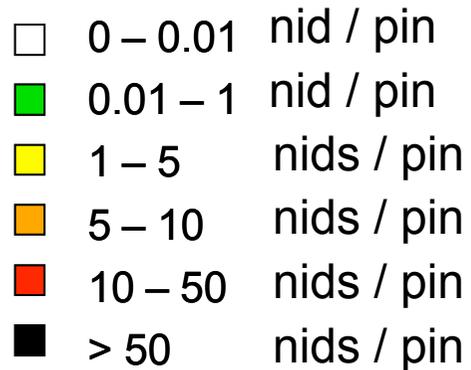
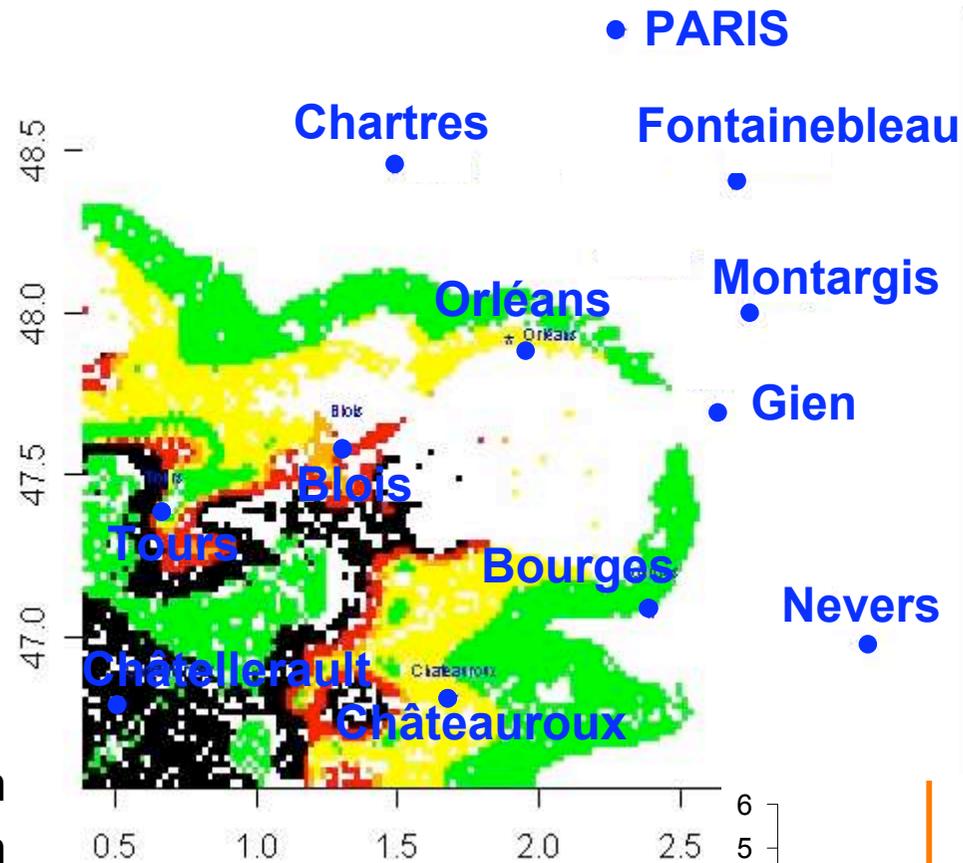
# Reconstruction par le modèle Année 1988



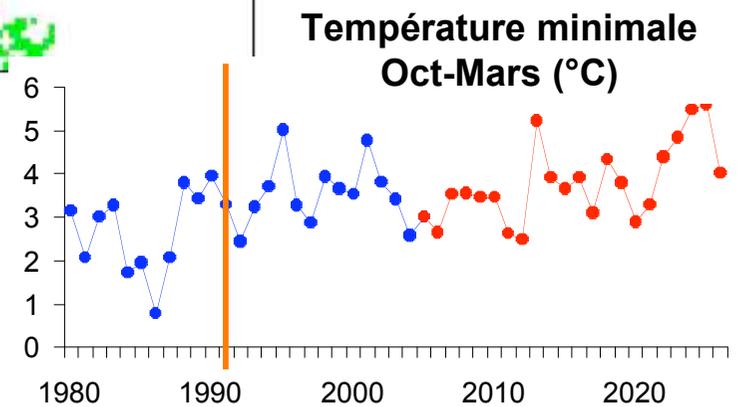
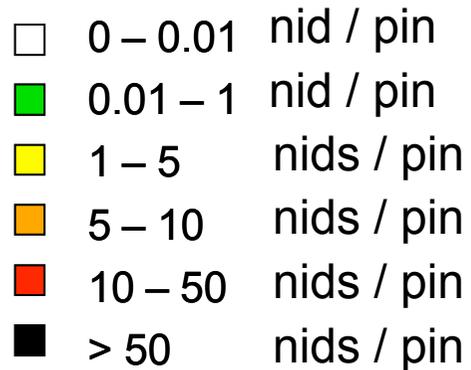
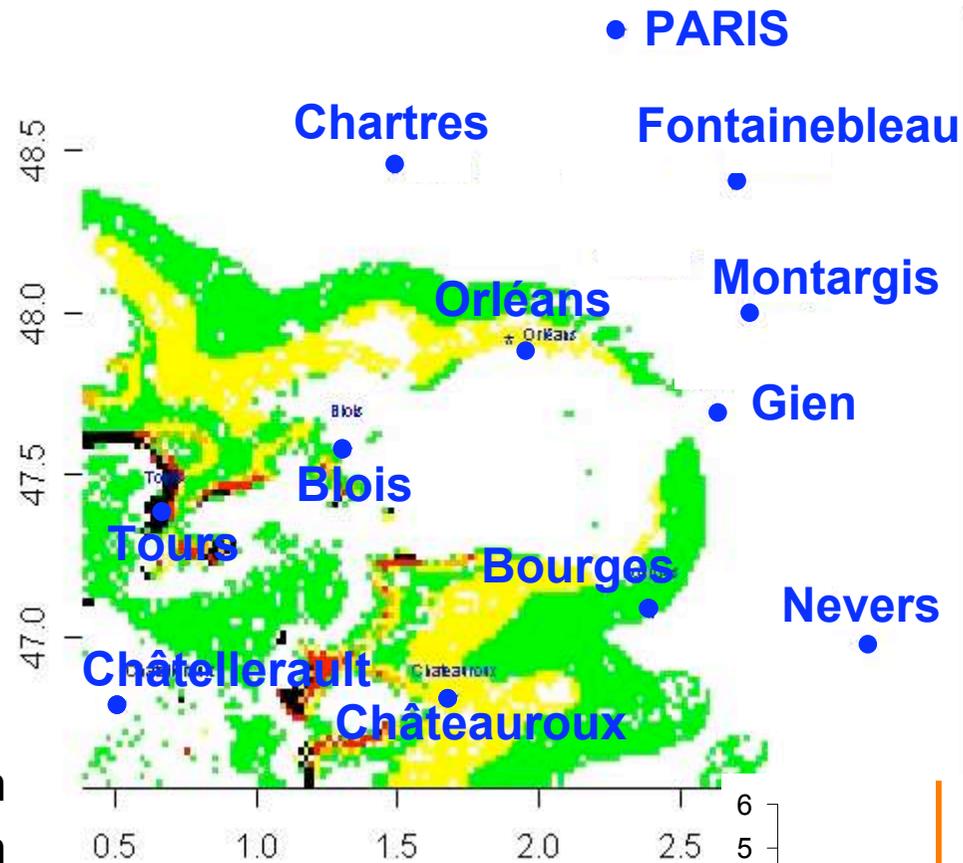
# Reconstruction par le modèle Année 1989



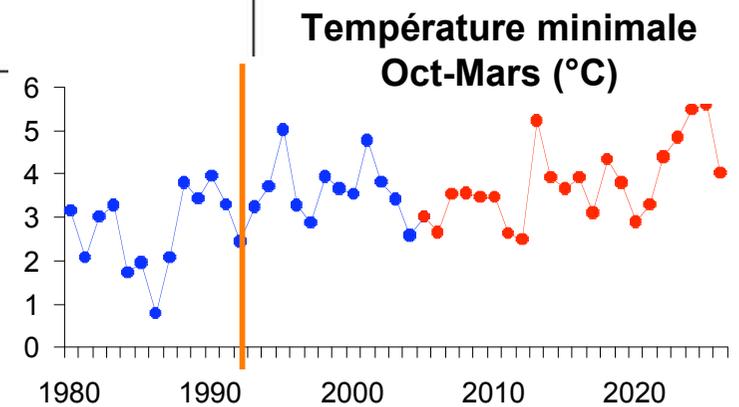
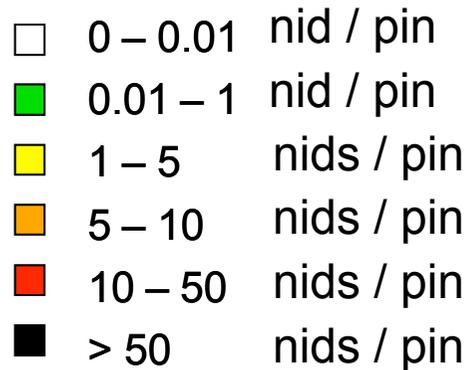
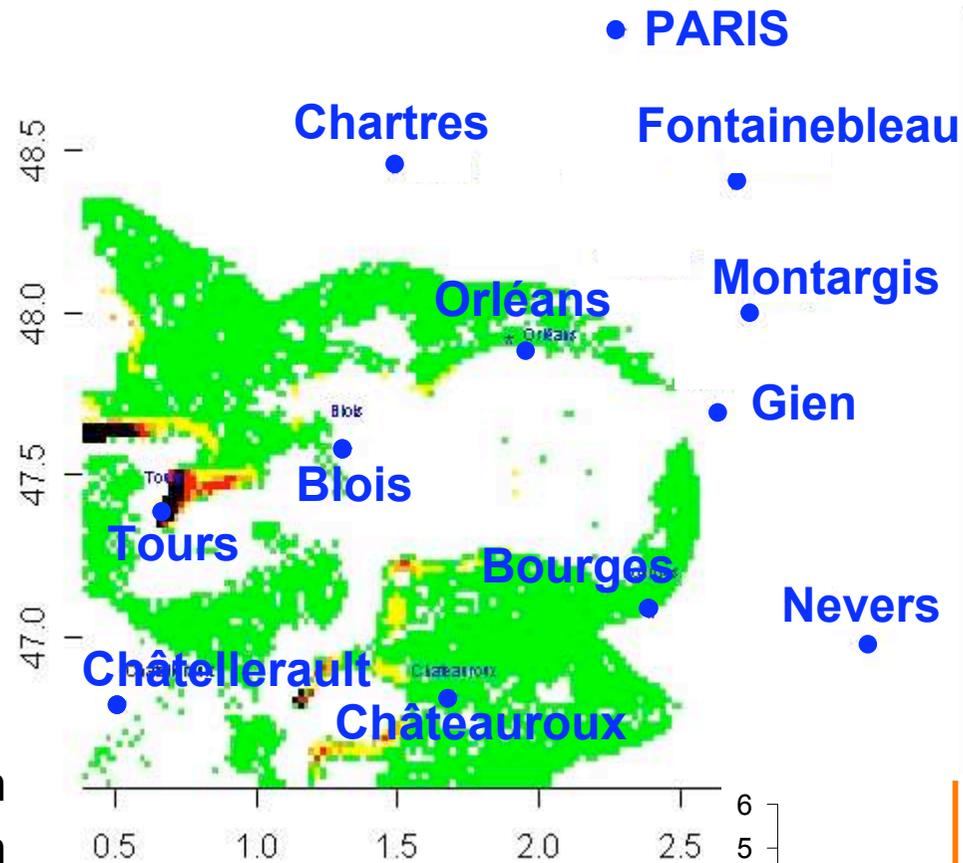
# Reconstruction par le modèle Année 1990



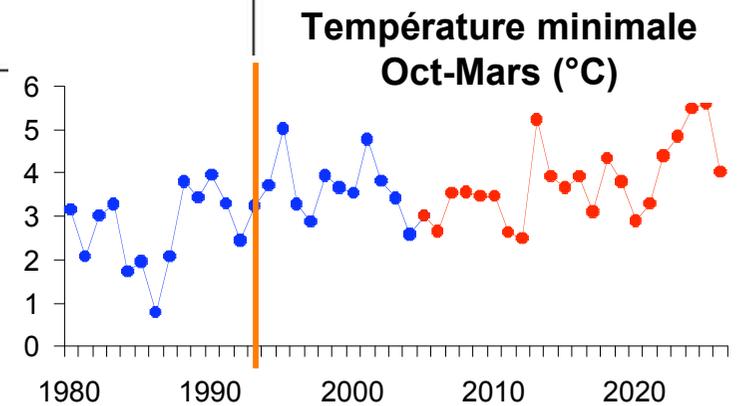
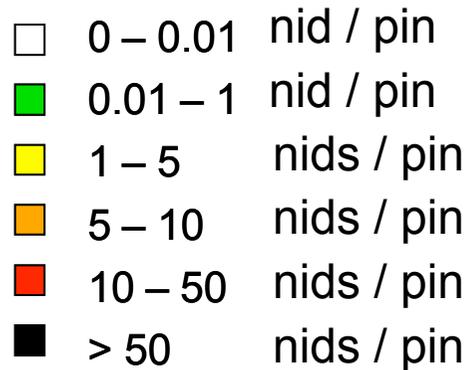
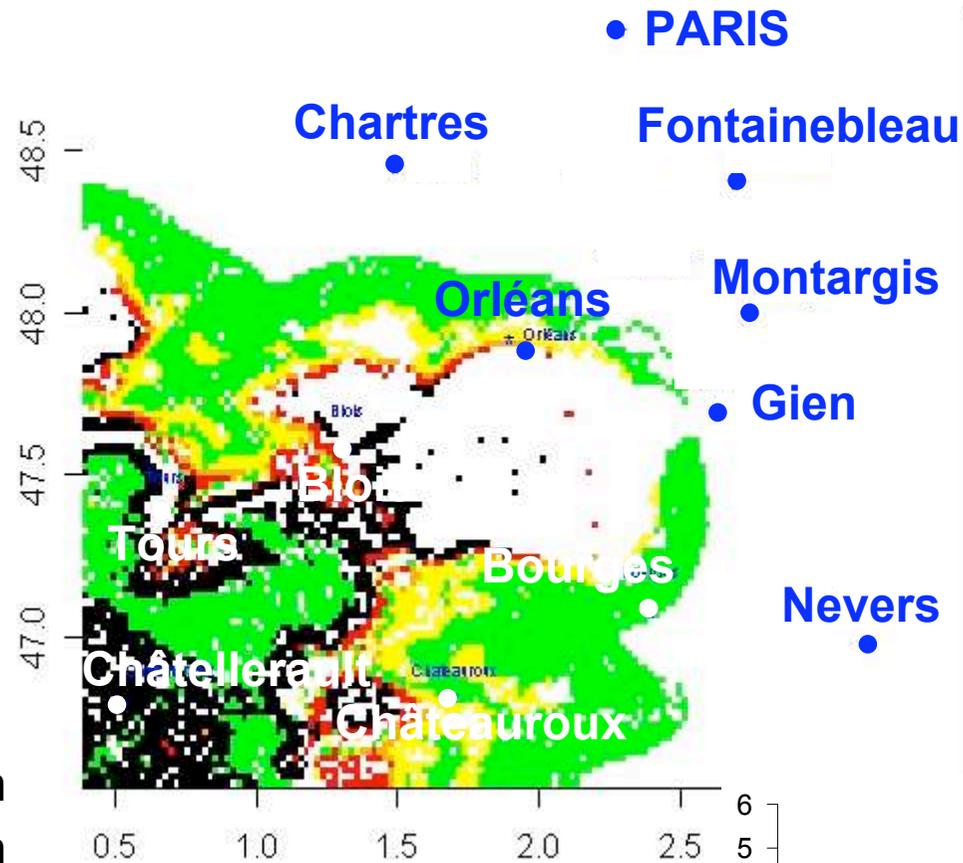
# Reconstruction par le modèle Année 1991



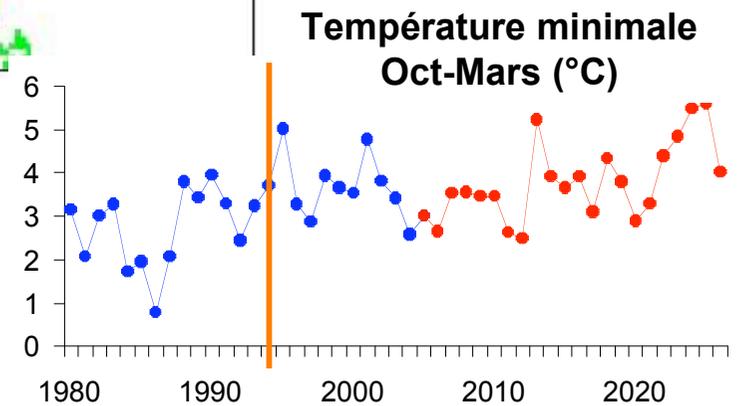
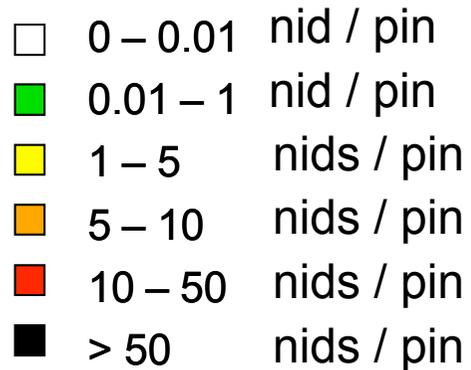
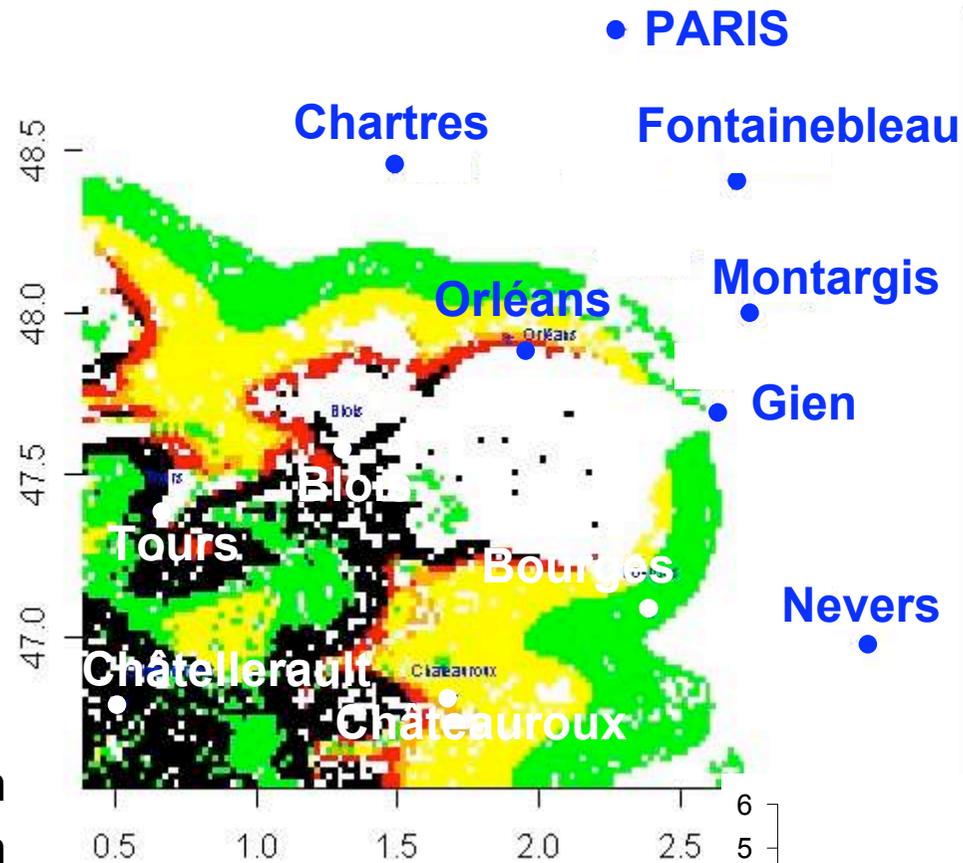
# Reconstruction par le modèle Année 1992



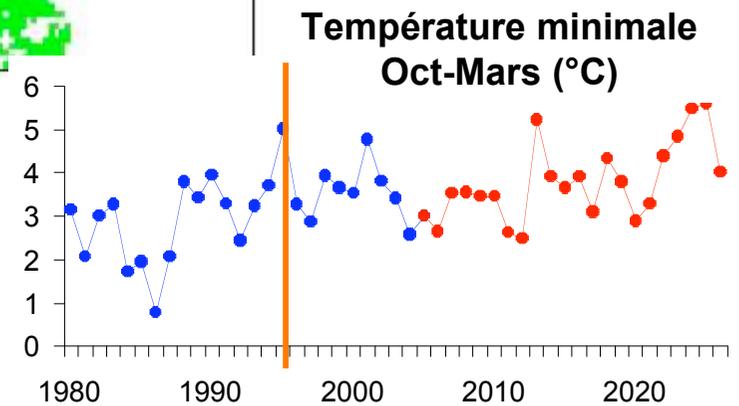
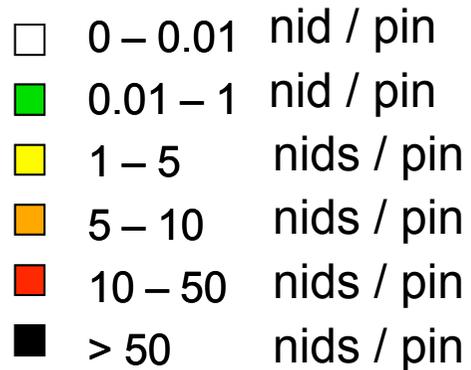
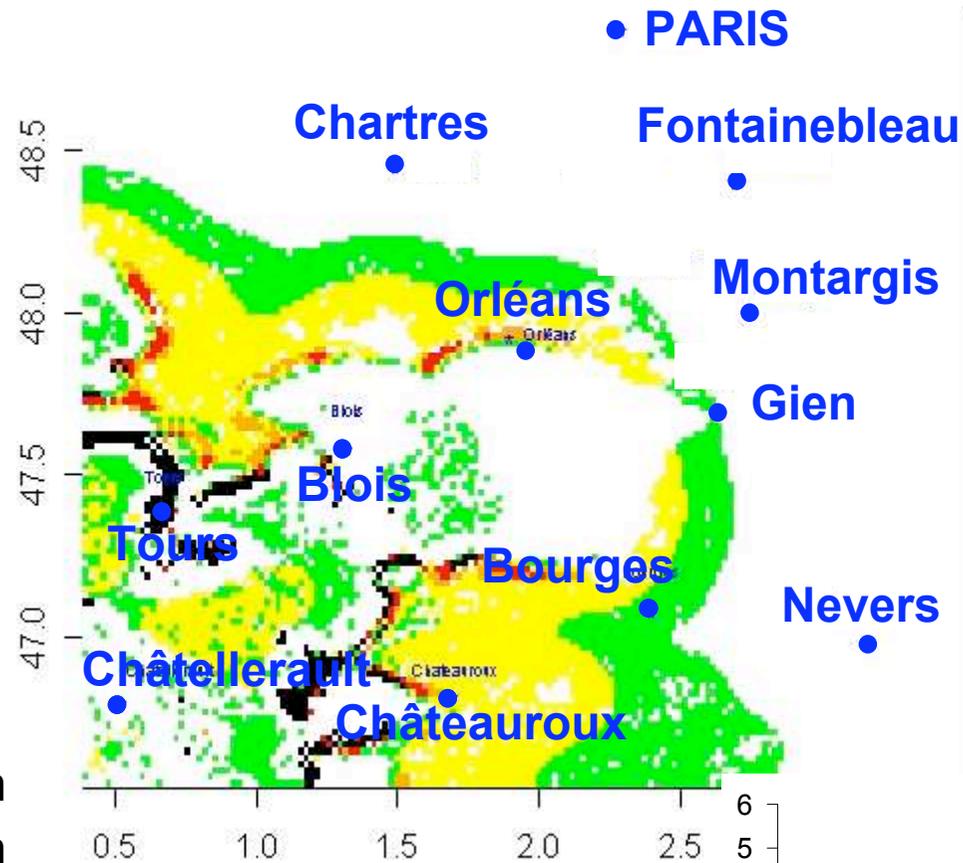
# Reconstruction par le modèle Année 1993



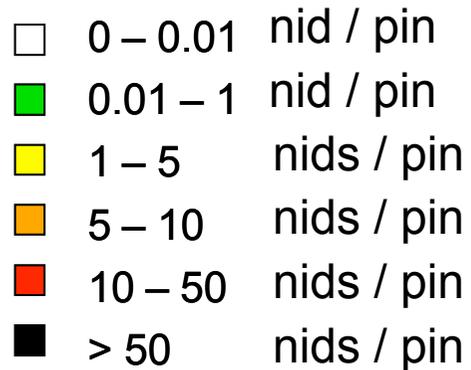
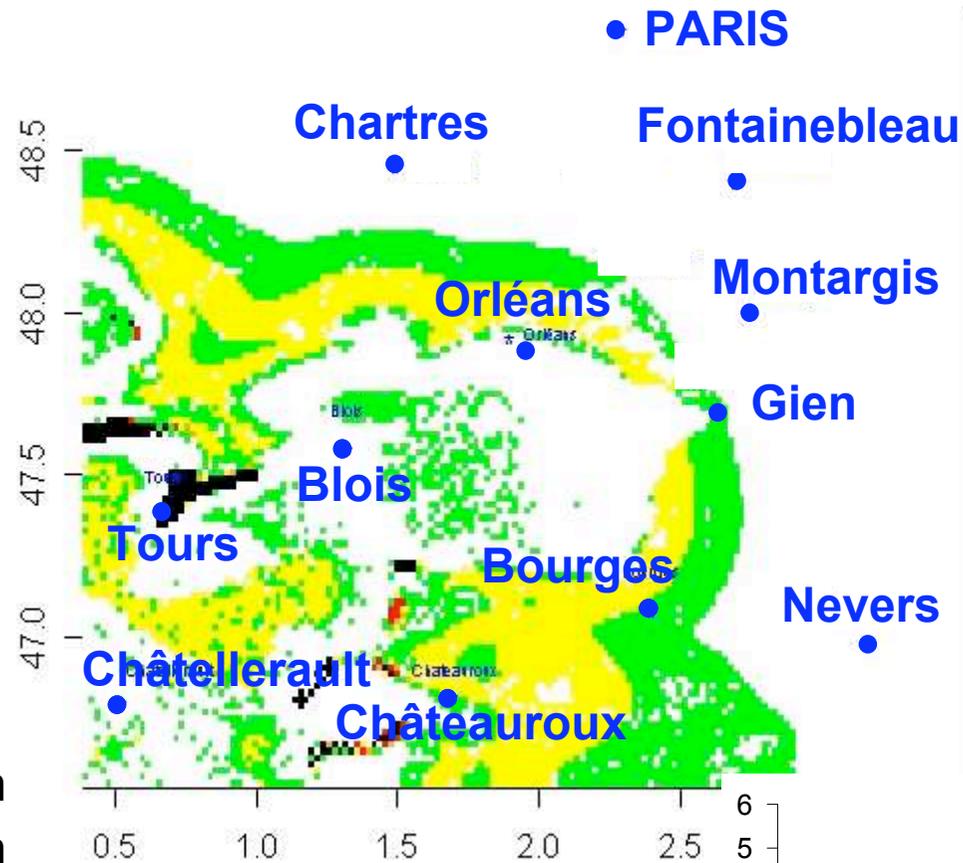
# Reconstruction par le modèle Année 1994



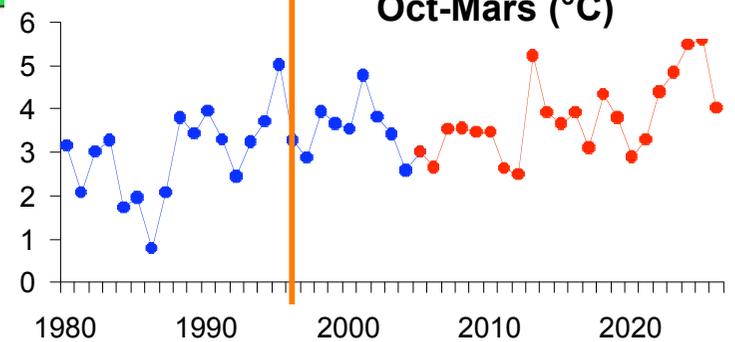
# Reconstruction par le modèle Année 1995



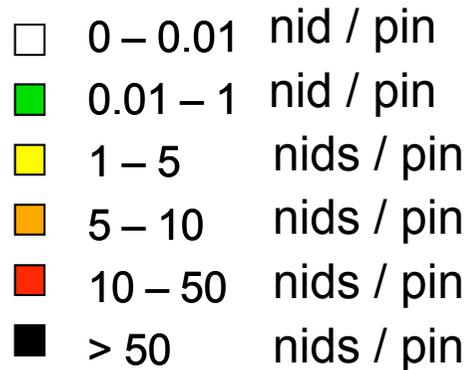
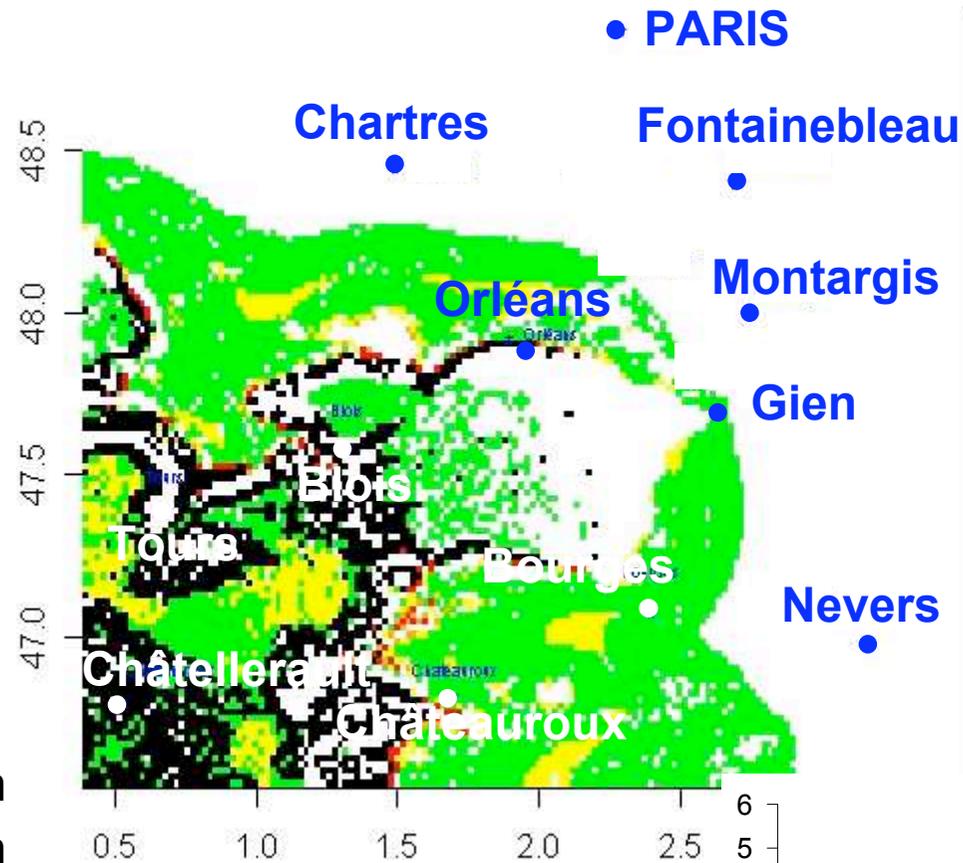
# Reconstruction par le modèle Année 1996



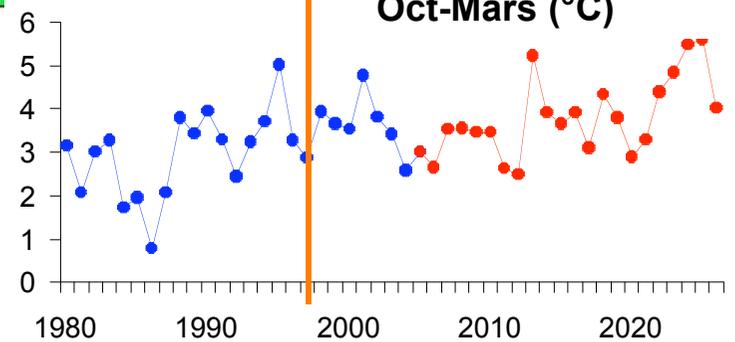
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



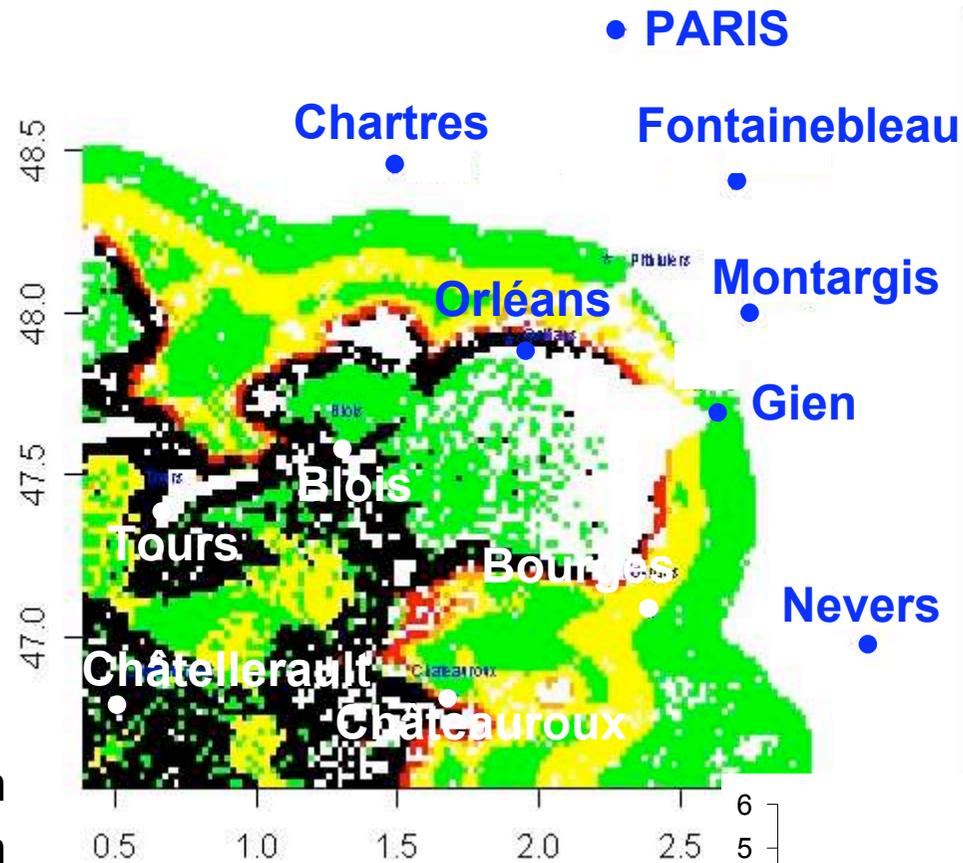
# Reconstruction par le modèle Année 1997



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

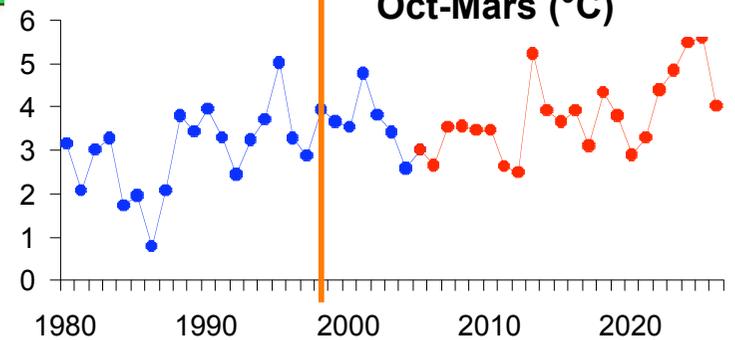


# Reconstruction par le modèle Année 1998

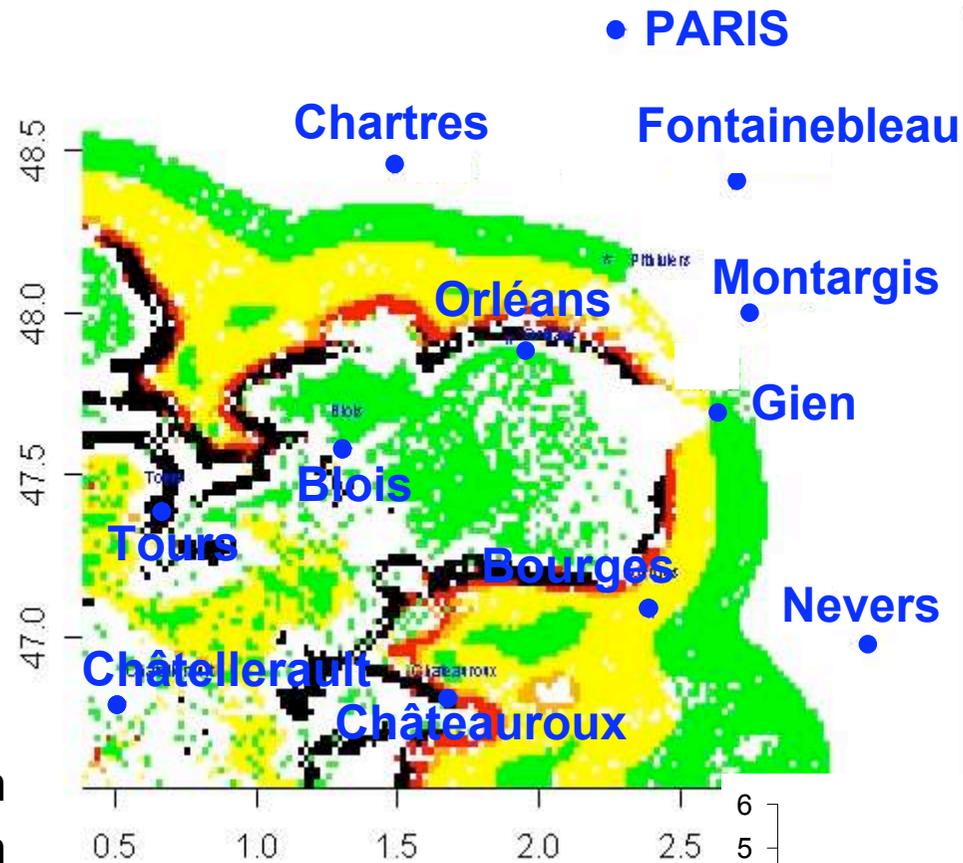


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

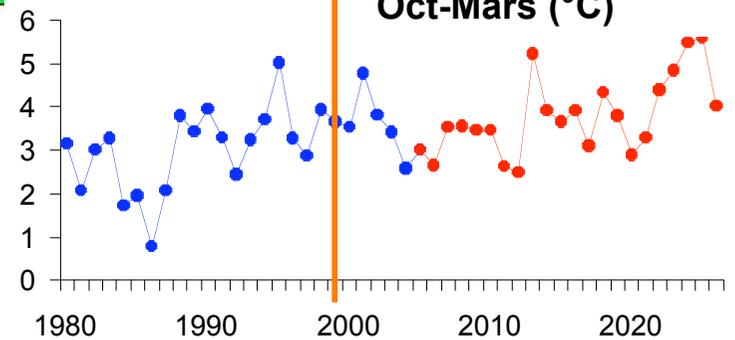


# Reconstruction par le modèle Année 1999

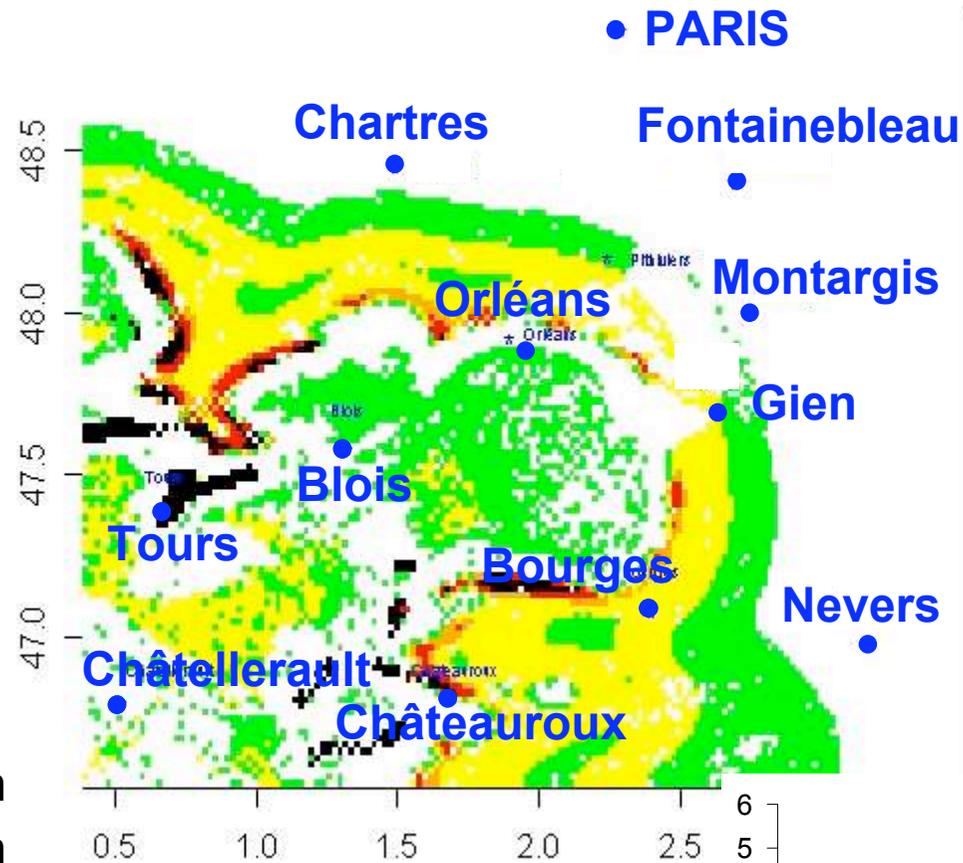


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

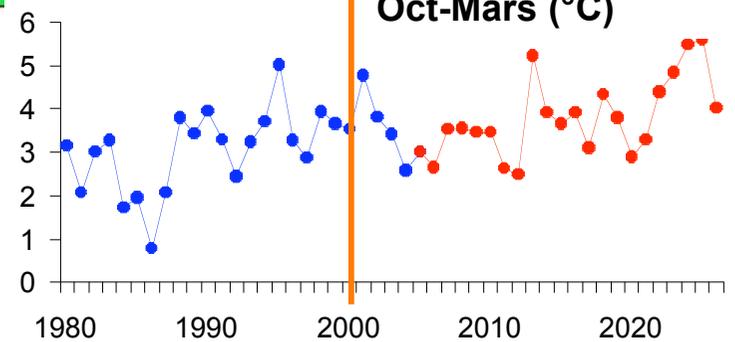


# Reconstruction par le modèle Année 2000

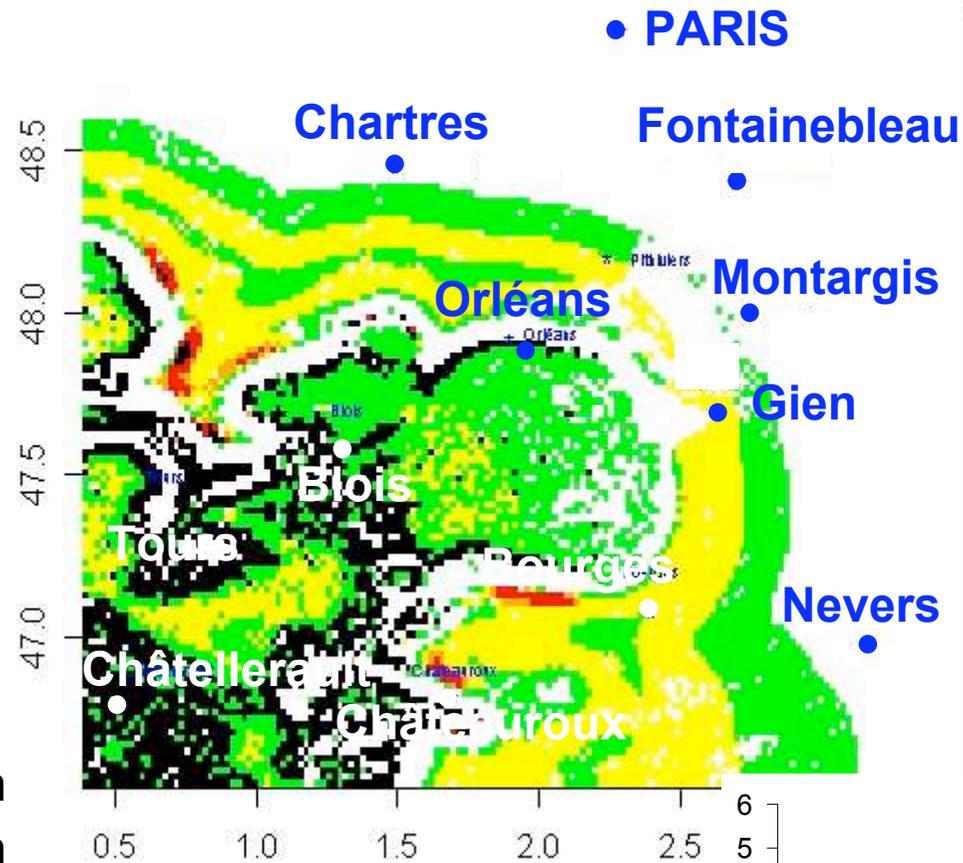


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

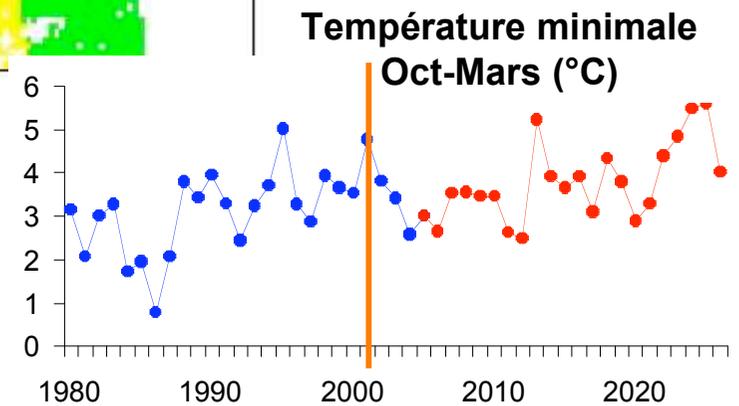
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



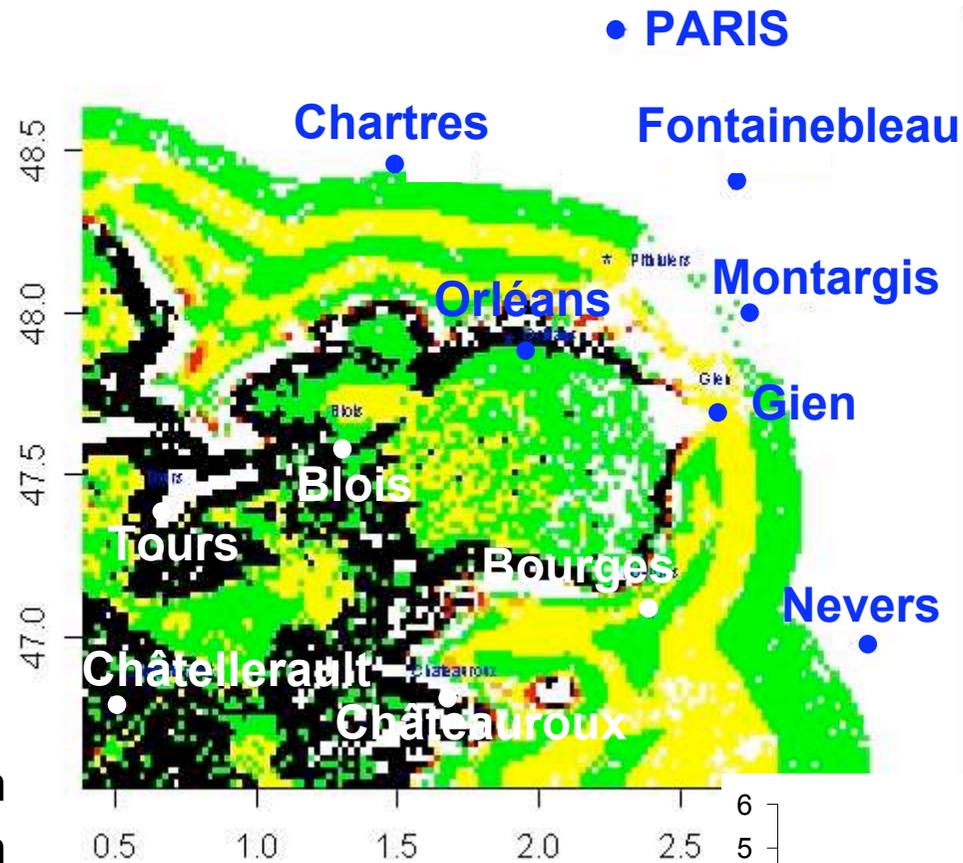
# Reconstruction par le modèle Année 2001



- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

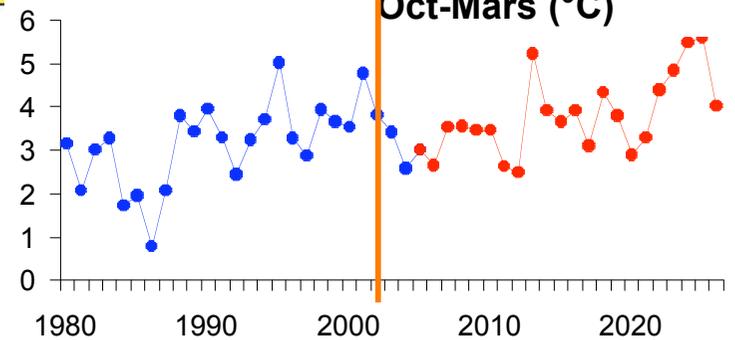


# Reconstruction par le modèle Année 2002

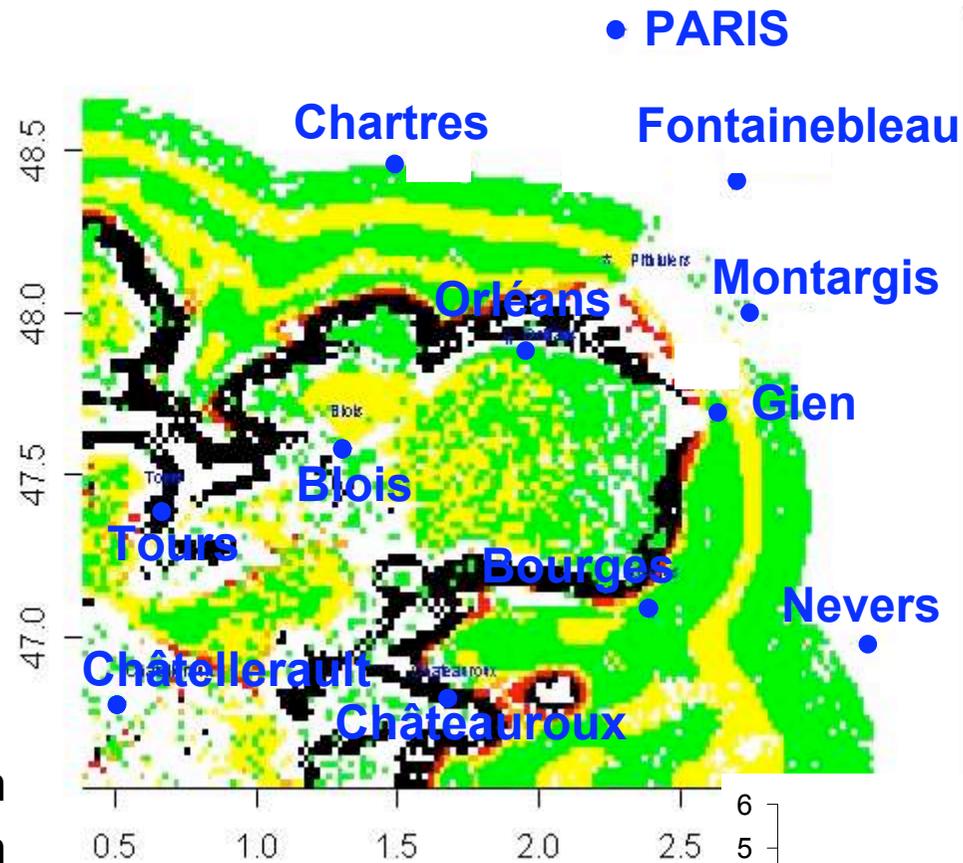


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

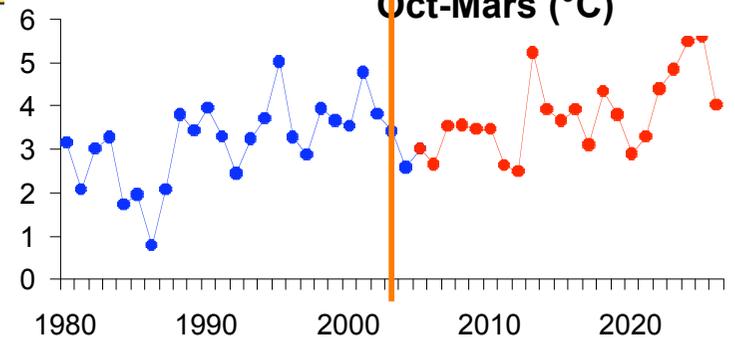


# Reconstruction par le modèle Année 2003

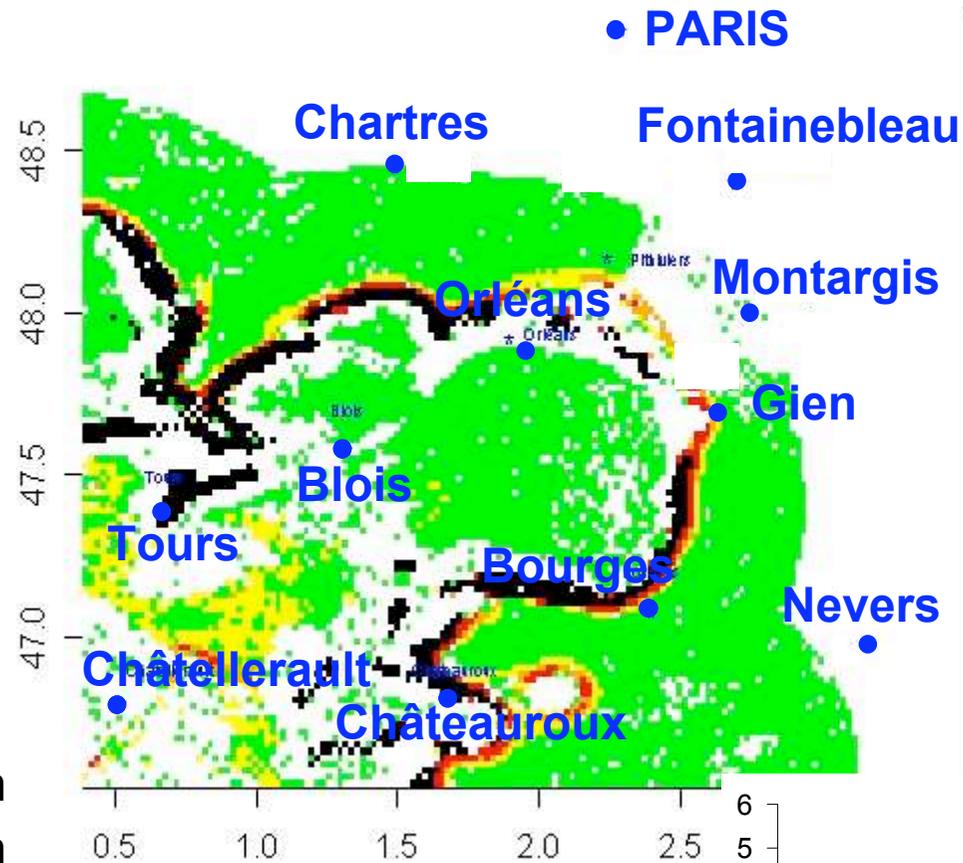


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

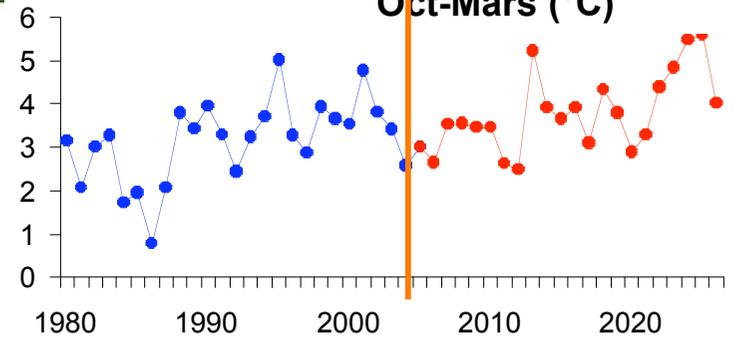


# Reconstruction par le modèle Année 2004

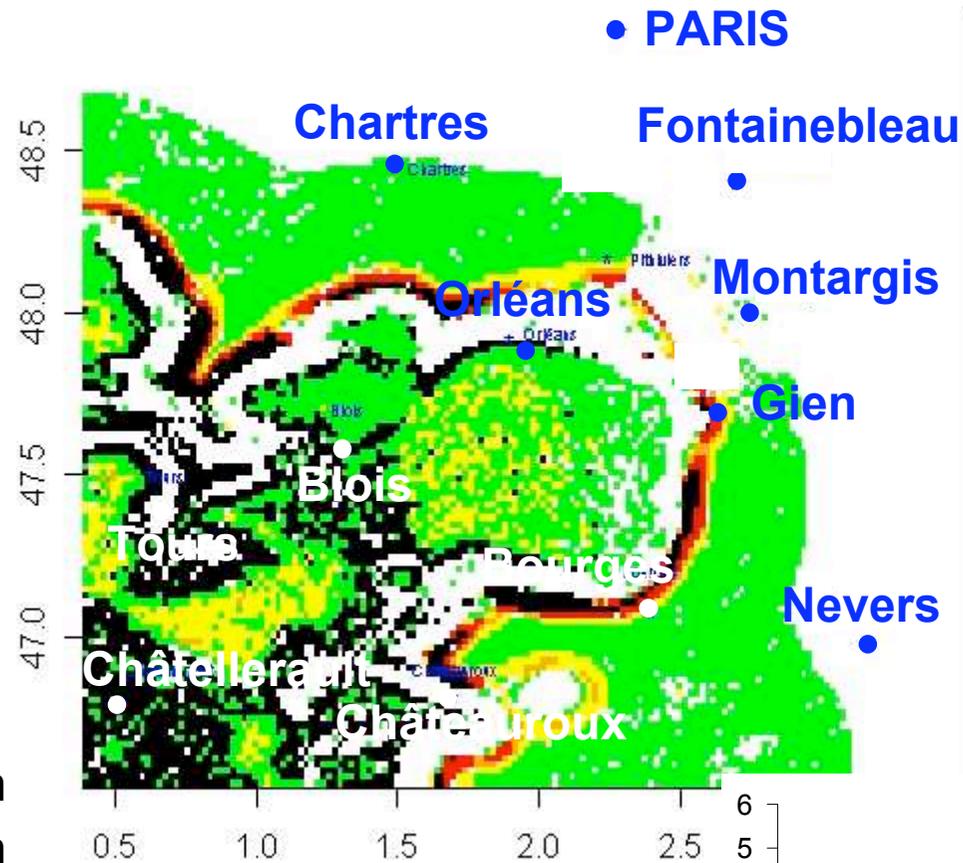


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

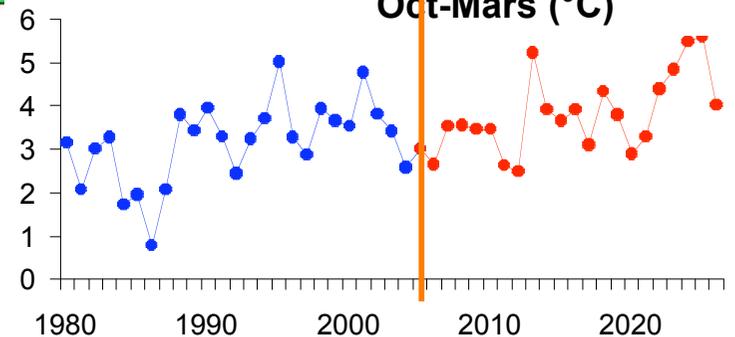


# Reconstruction par le modèle Année 2005



- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

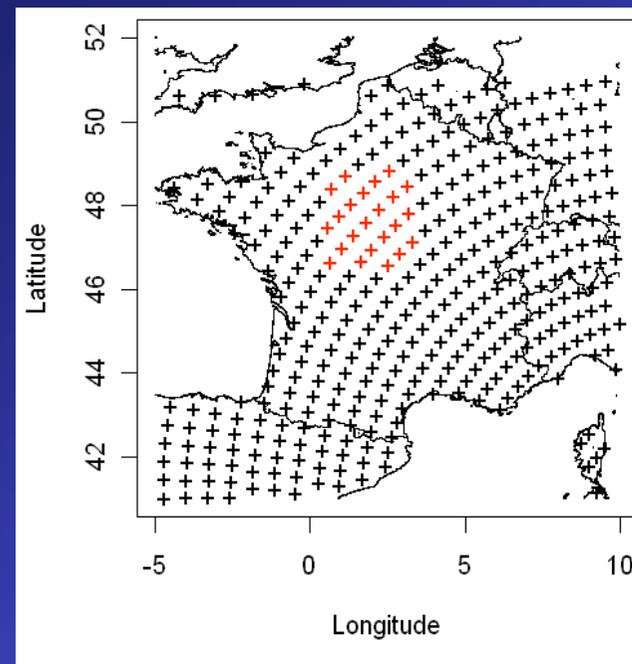
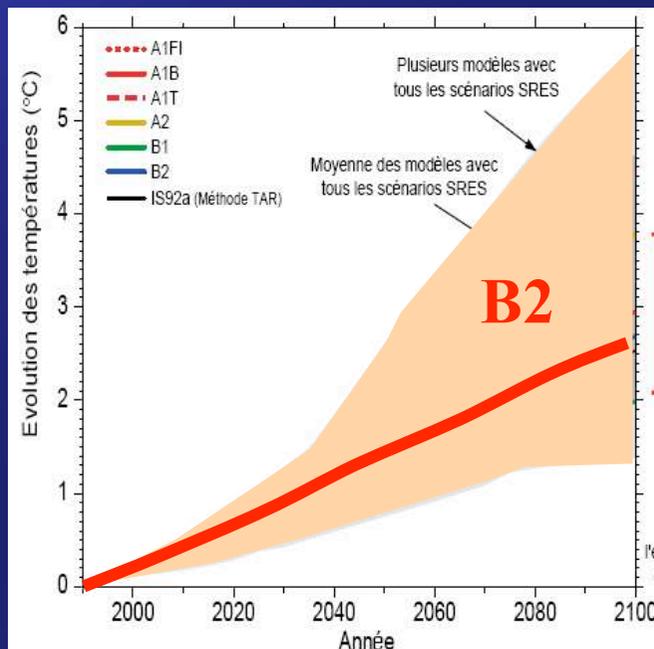


## Scénario climatique ARPEGE-Climat de Météo-France: régionalisé

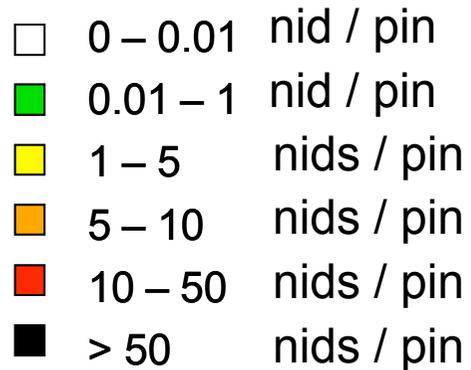
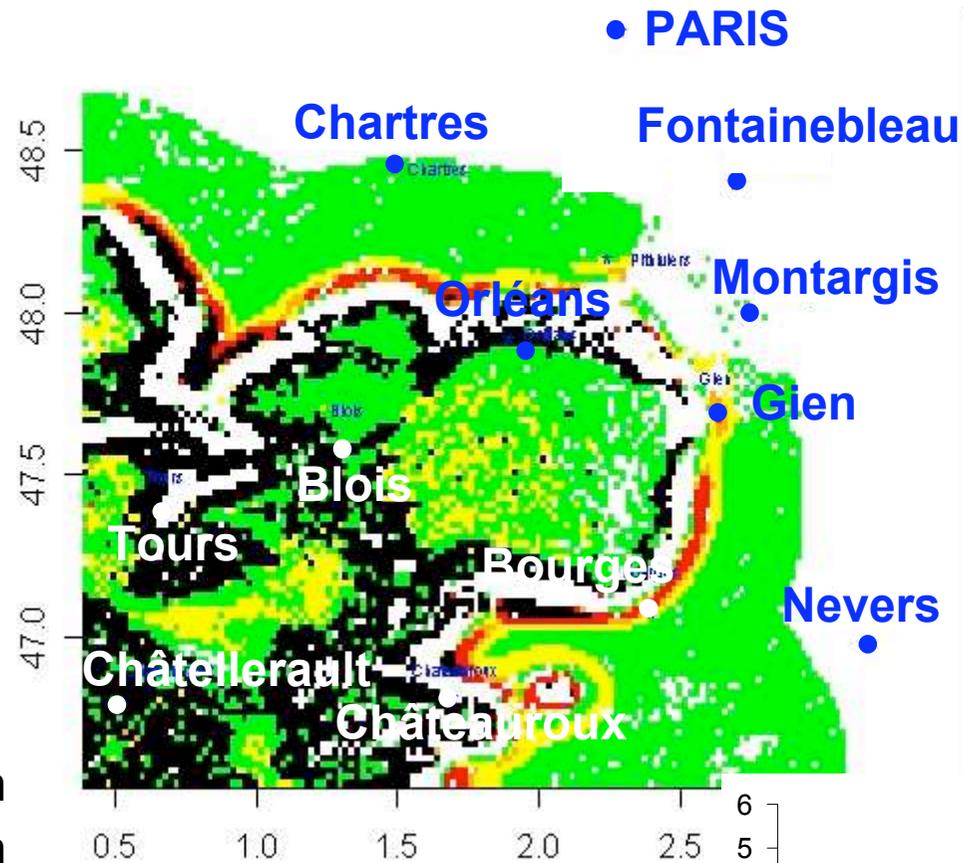
### Scénario 2006-2026

#### Hypothèses modérées:

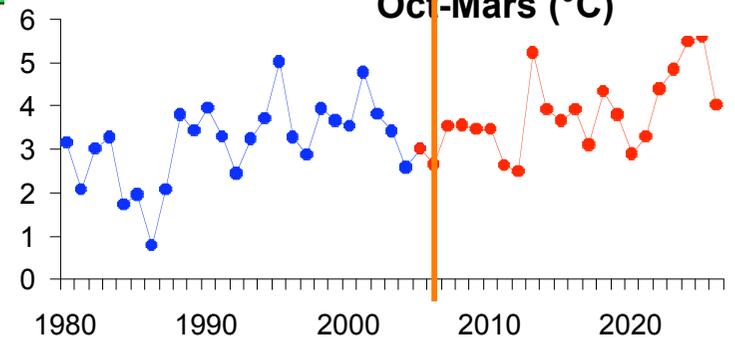
- taux de CO<sub>2</sub> x 2 entre 1975 et 2100
- hausse des températures moyennes de l'ordre de 3°C entre 1960 et 2100 dans la zone d'étude



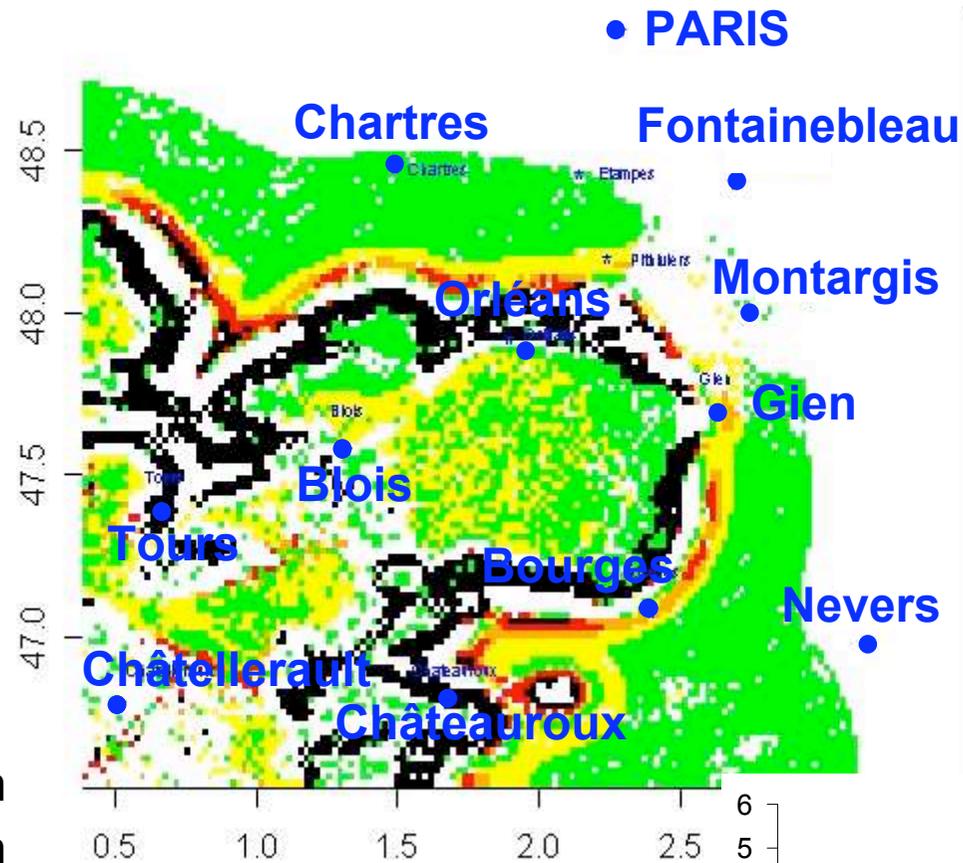
# Prévision du modèle Année 2006



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

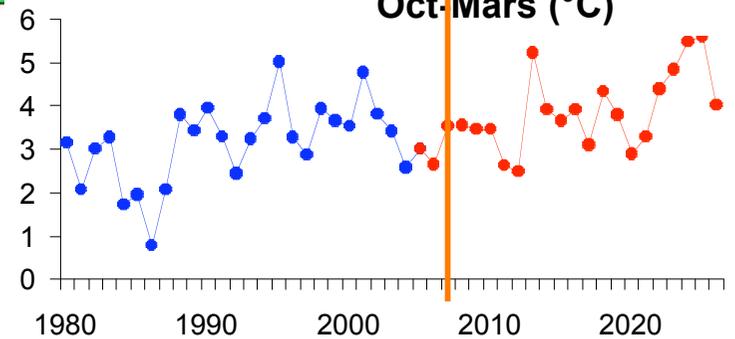


# Prévision du modèle Année 2007

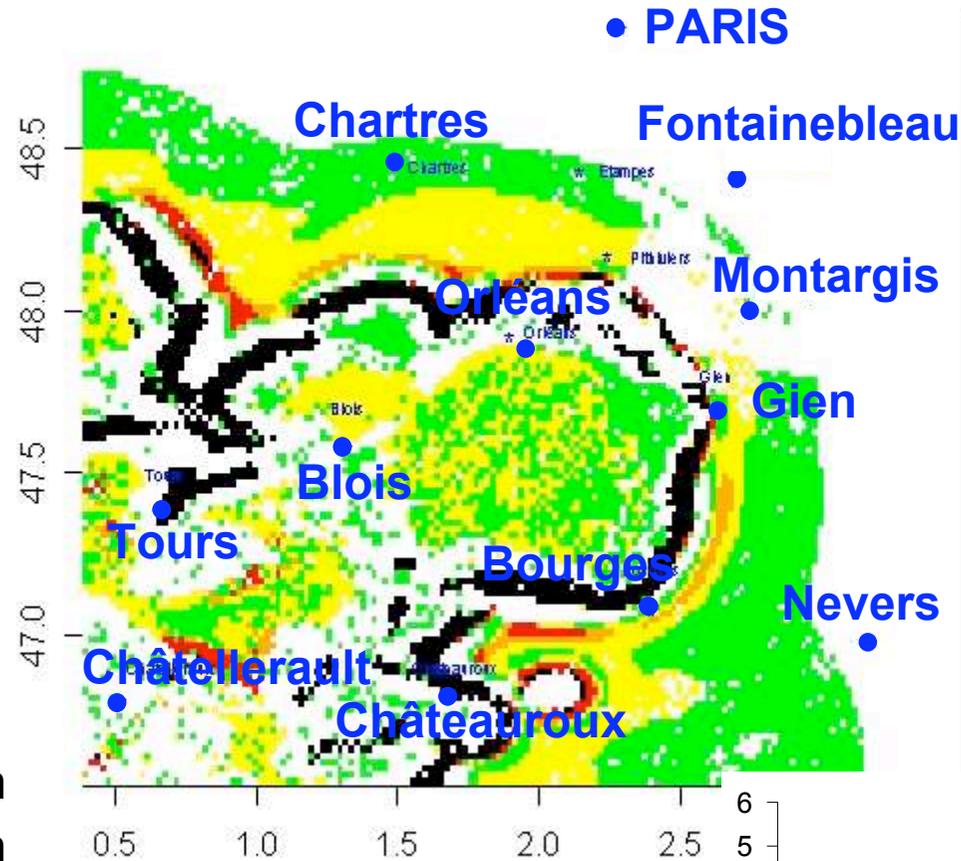


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

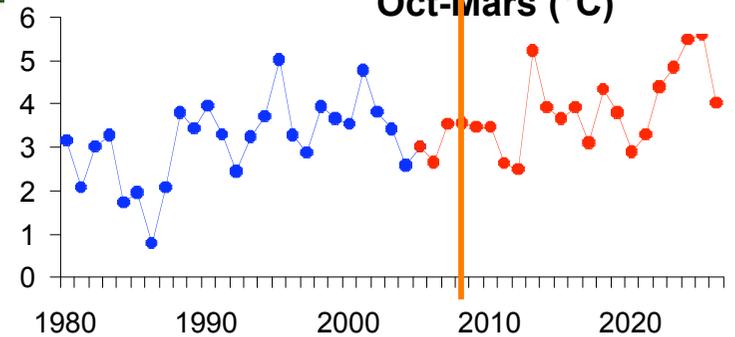


# Prévision du modèle Année 2008

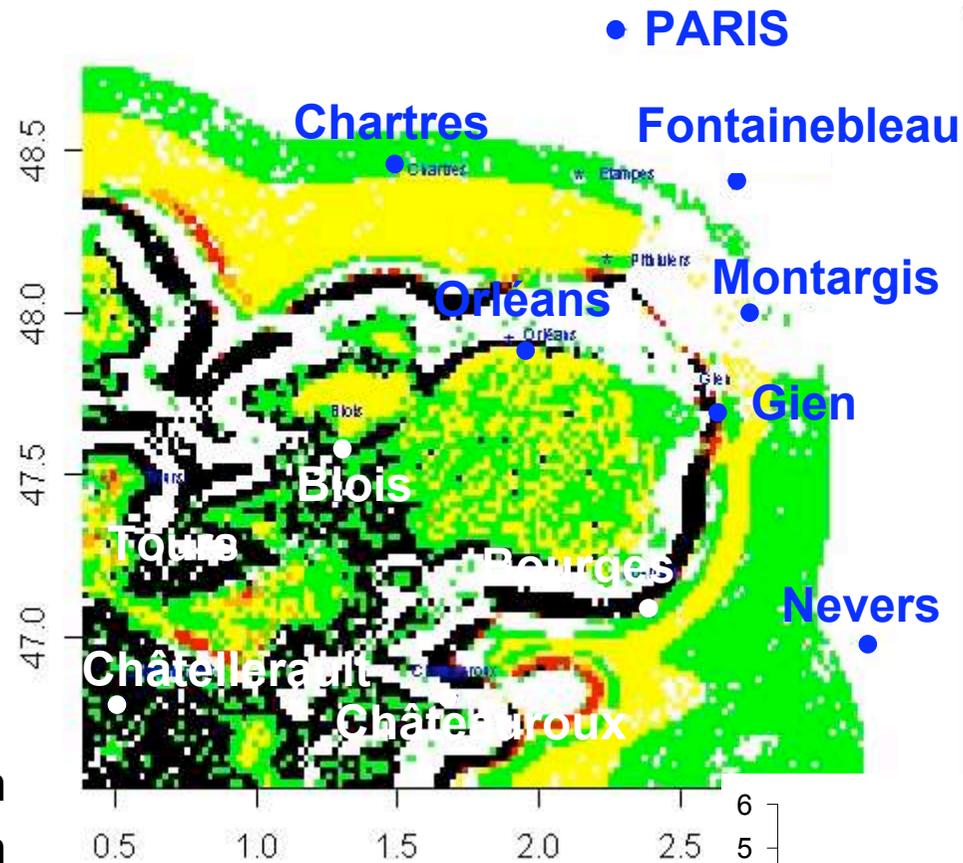


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

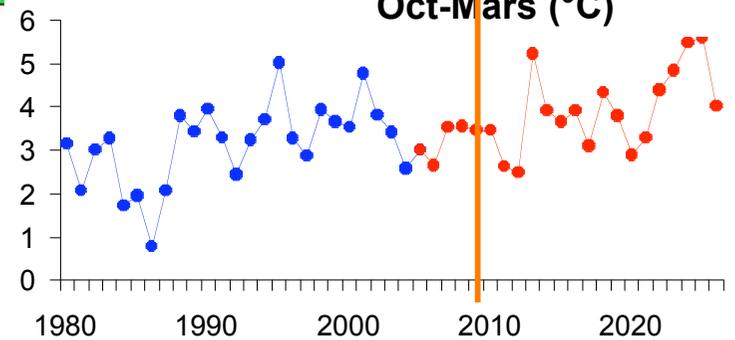


# Prévision du modèle Année 2009

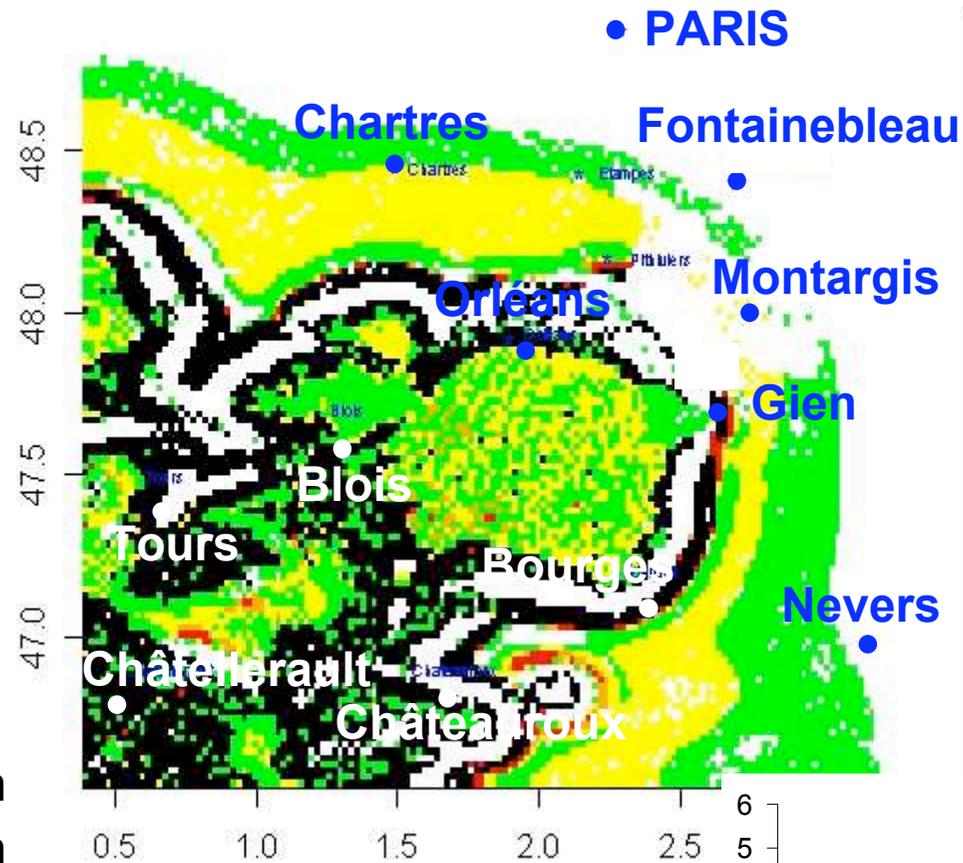


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

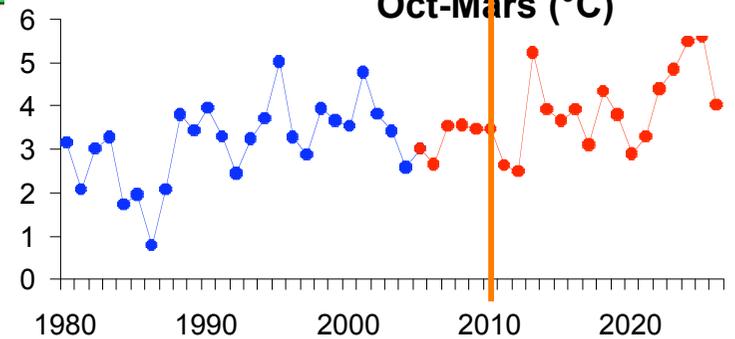


# Prévision du modèle Année 2010

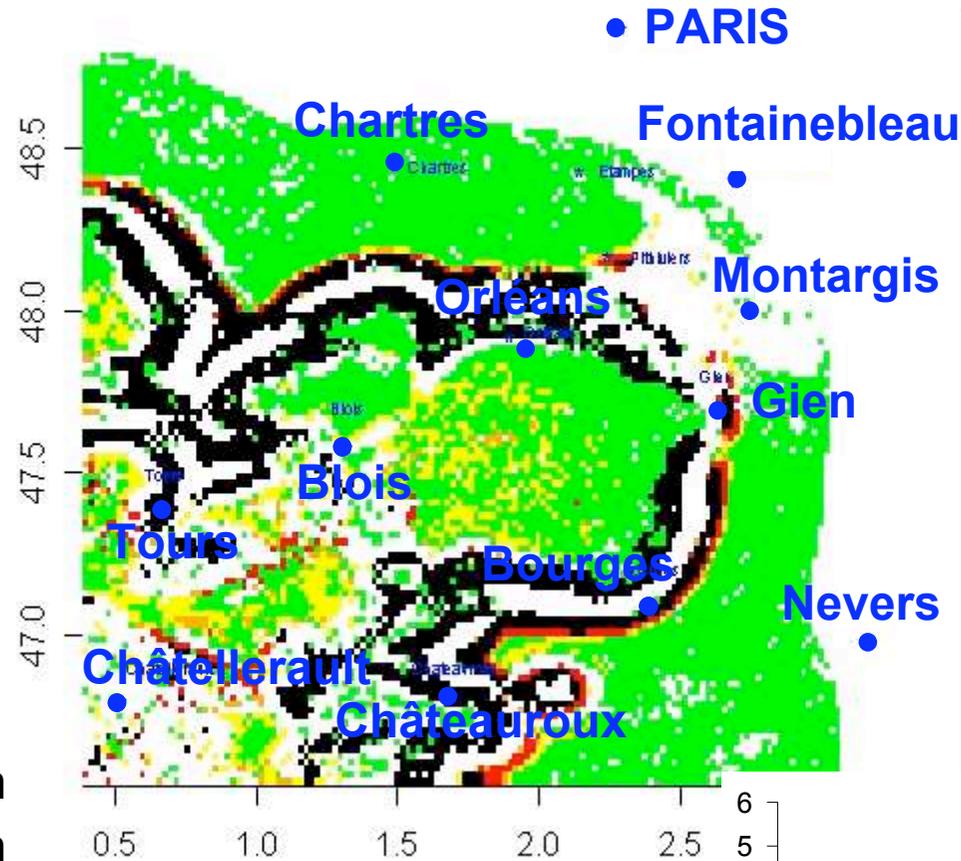


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

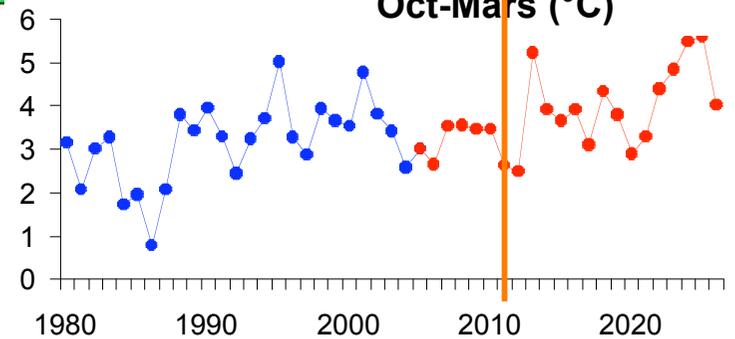


# Prévision du modèle Année 2011

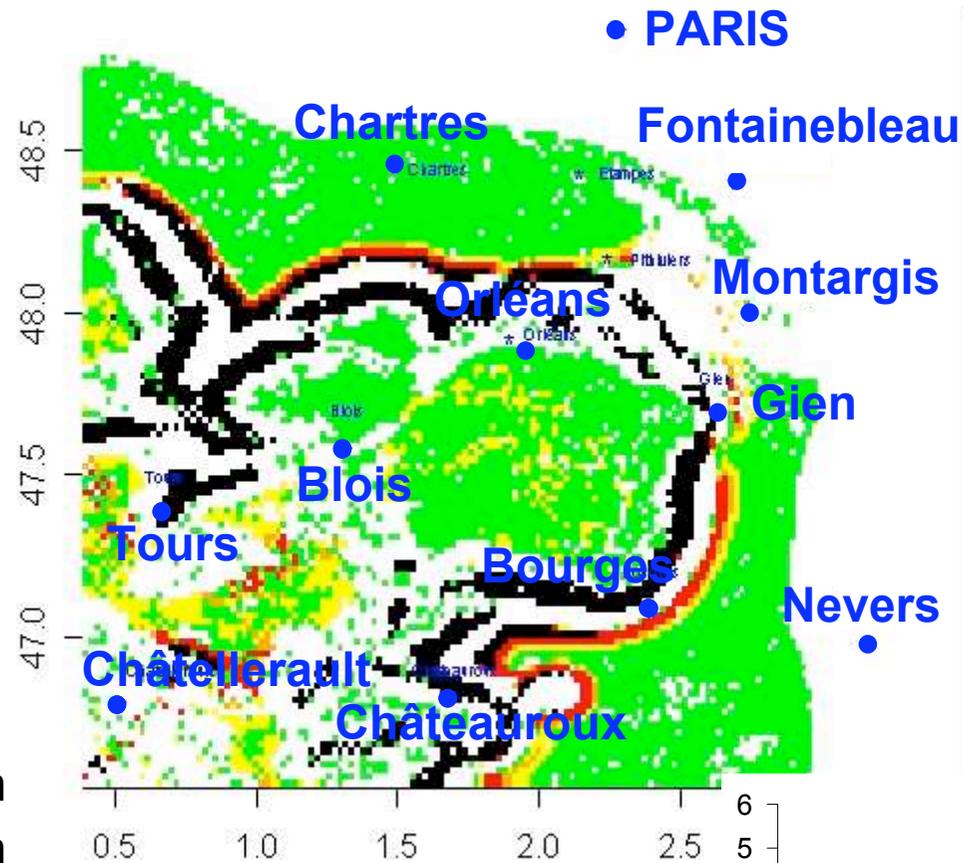


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

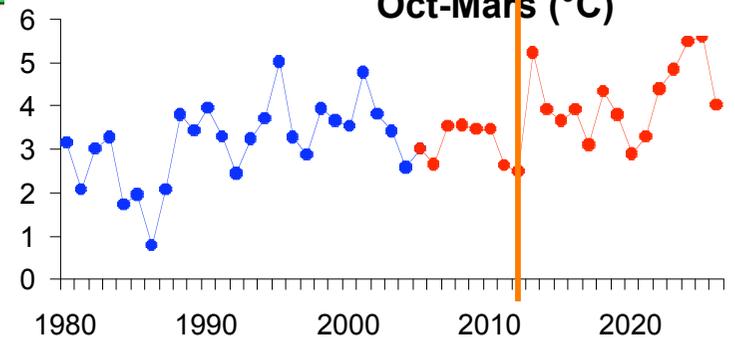


# Prévision du modèle Année 2012

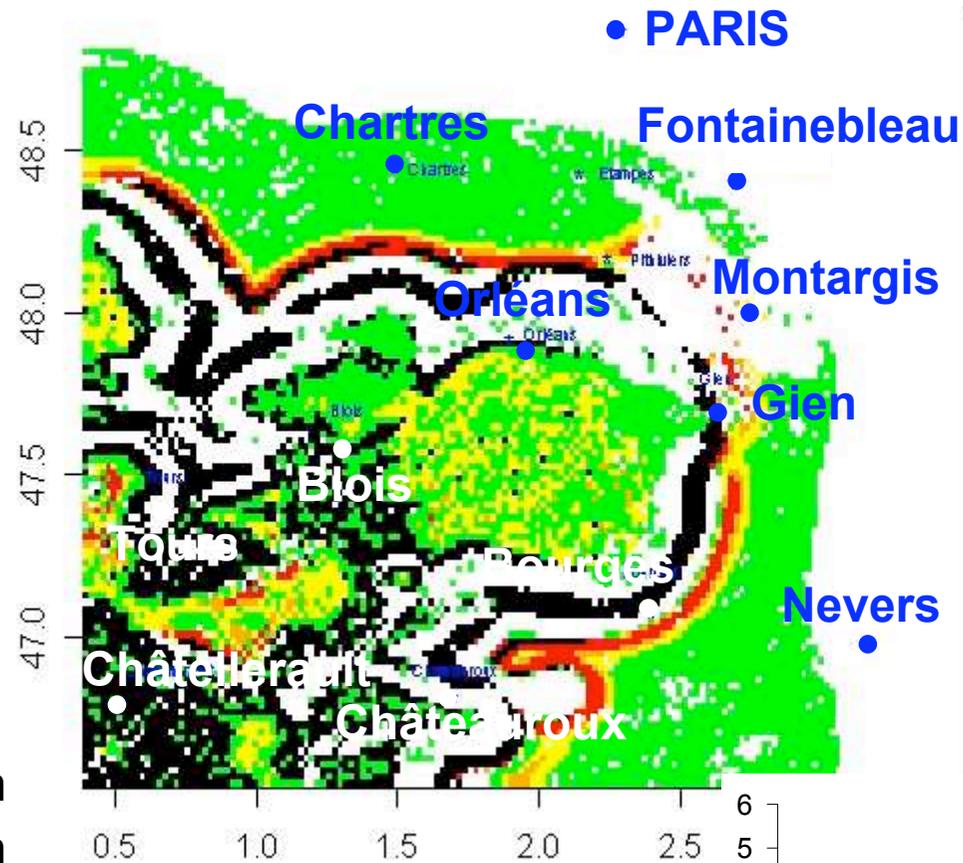


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

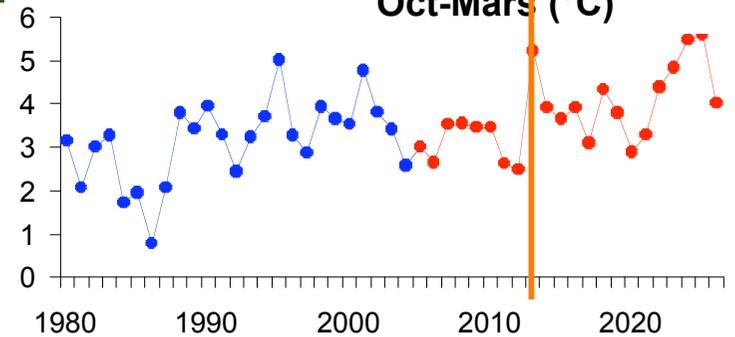


# Prévision du modèle Année 2013

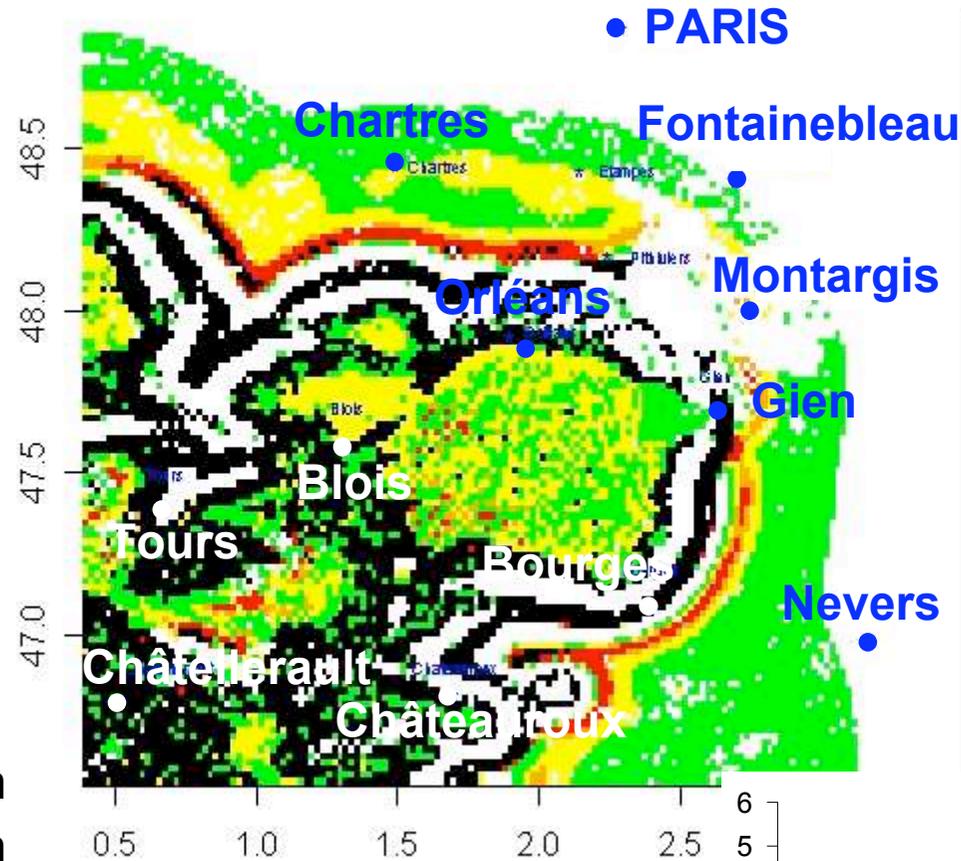


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

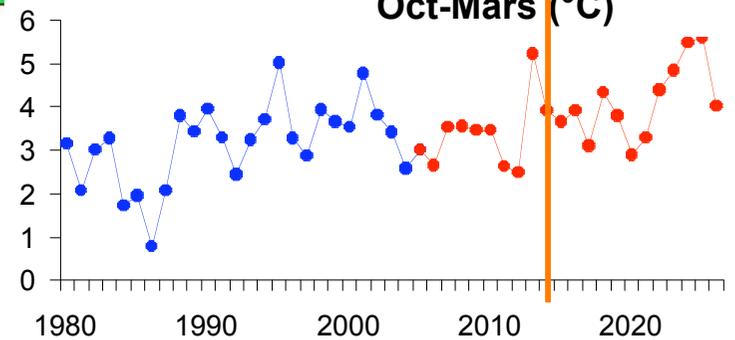


# Prévision du modèle Année 2014

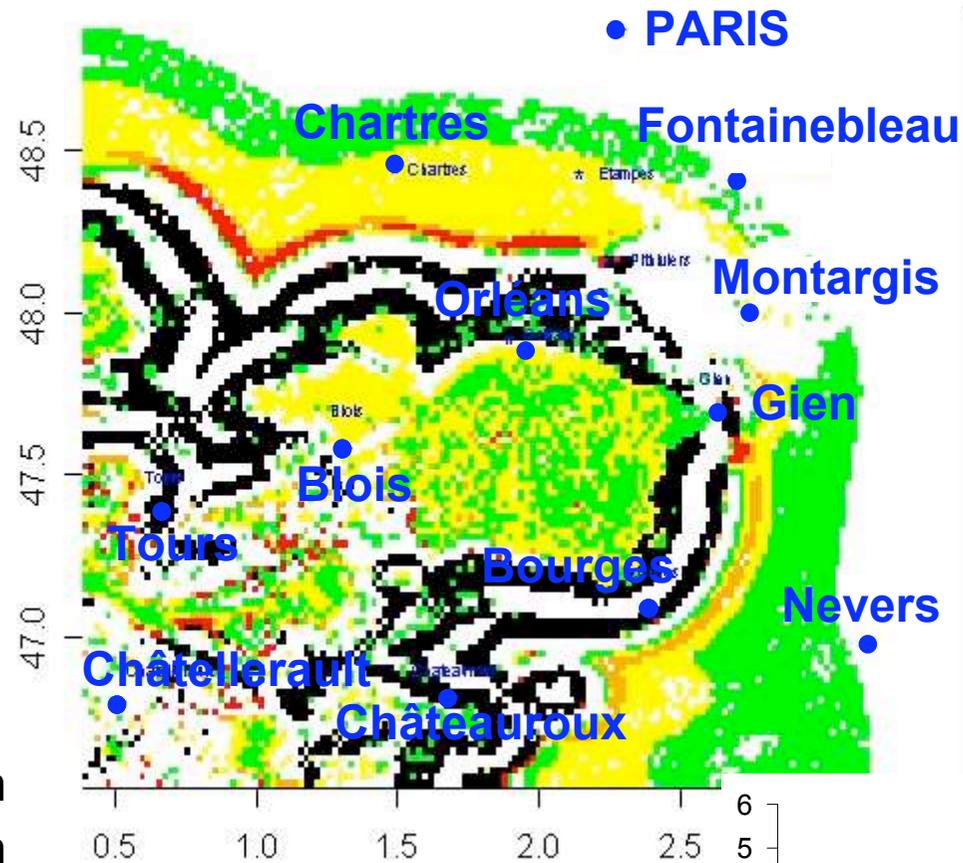


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

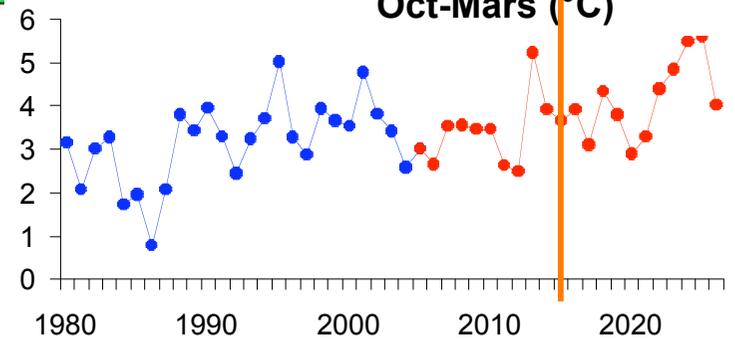


# Prévision du modèle Année 2015

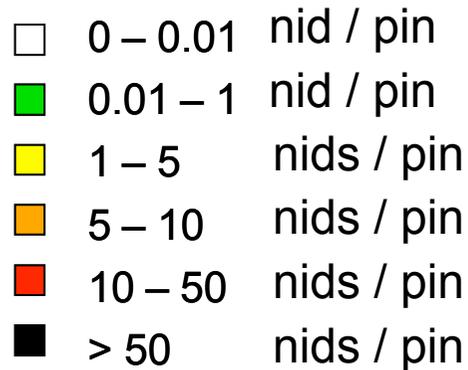
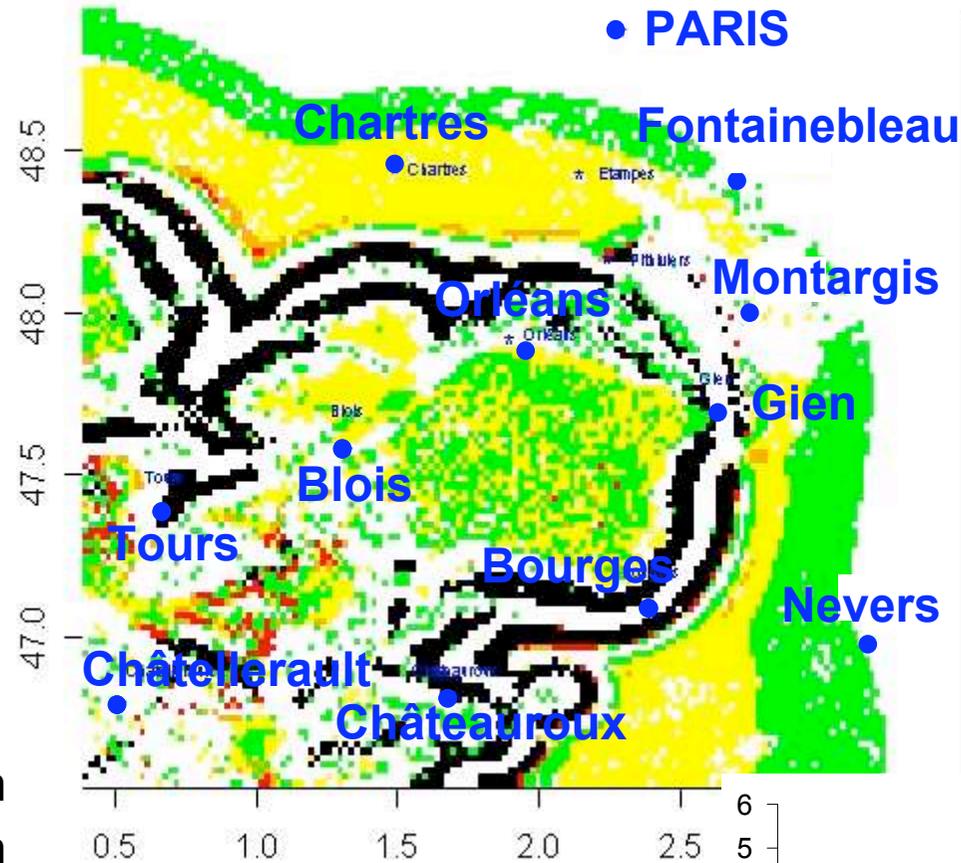


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

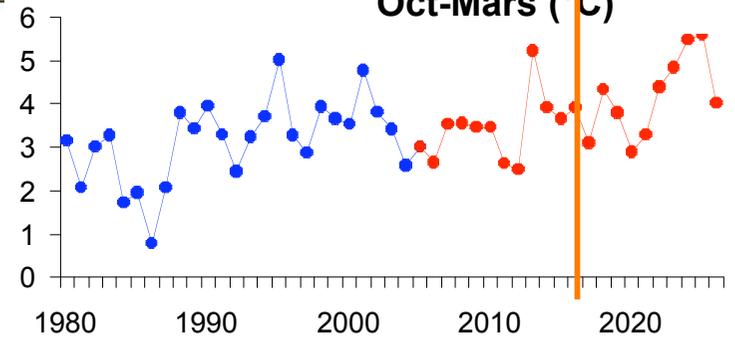
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



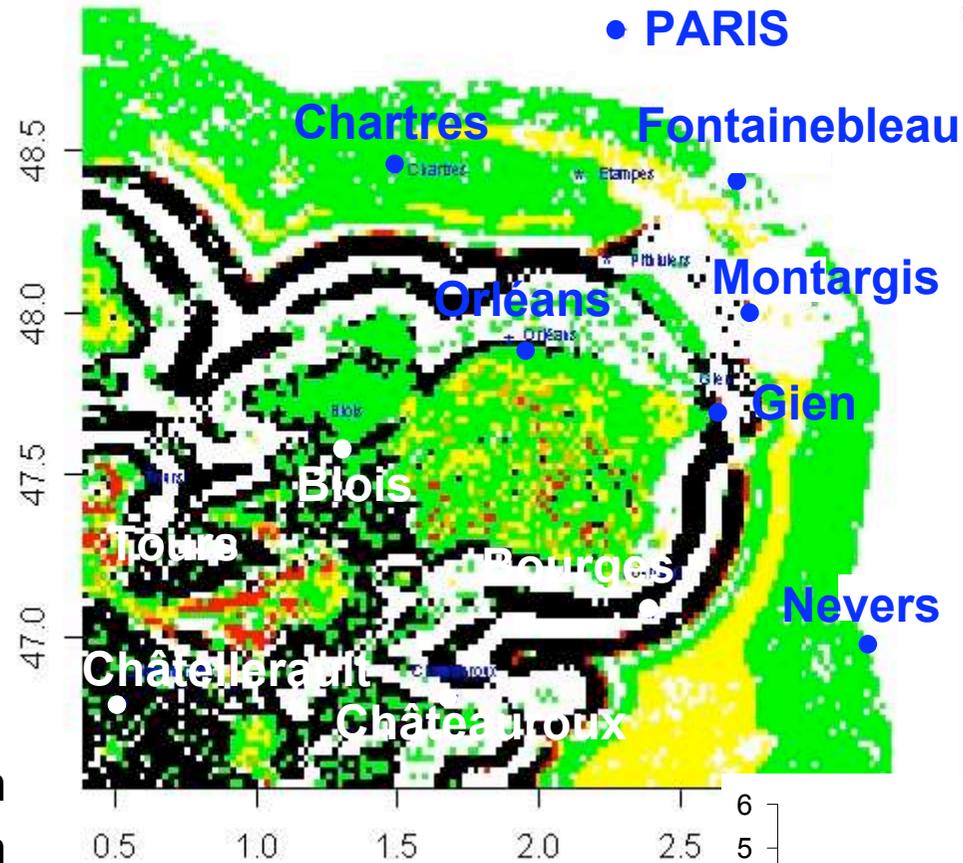
# Prévision du modèle Année 2016



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

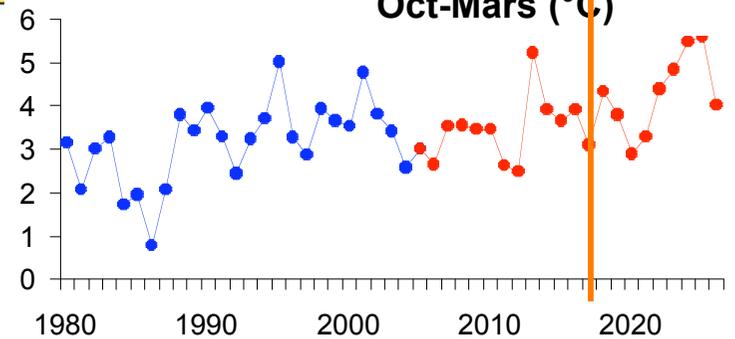


# Prévision du modèle Année 2017

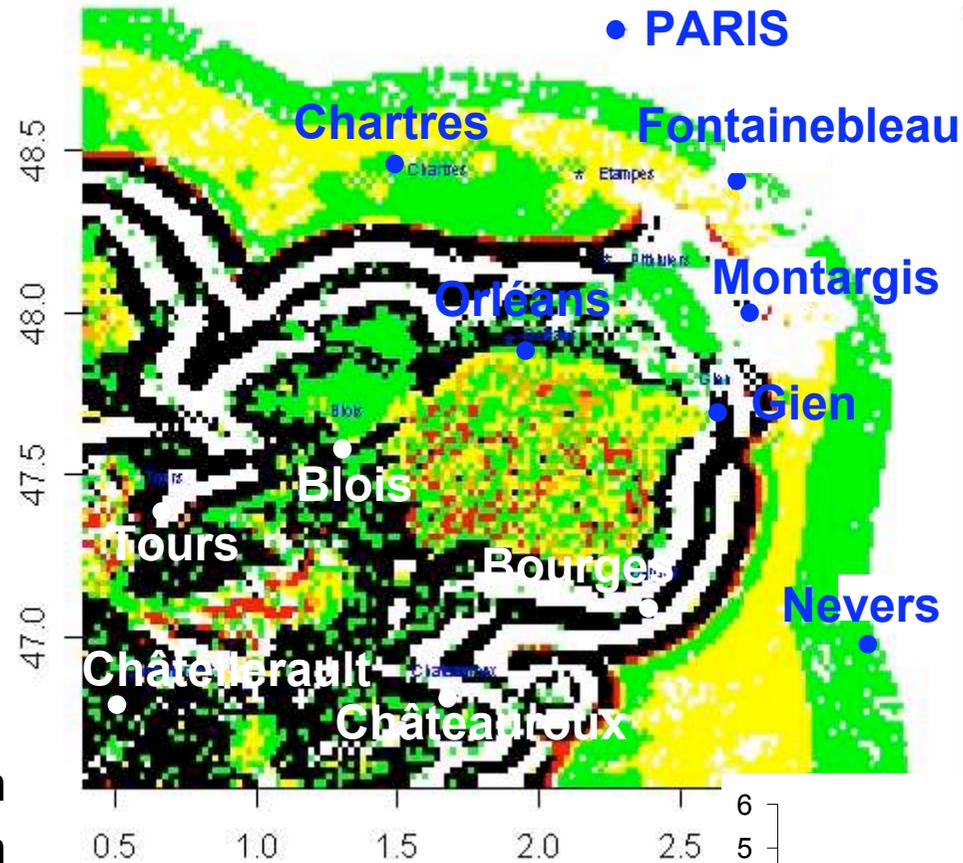


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

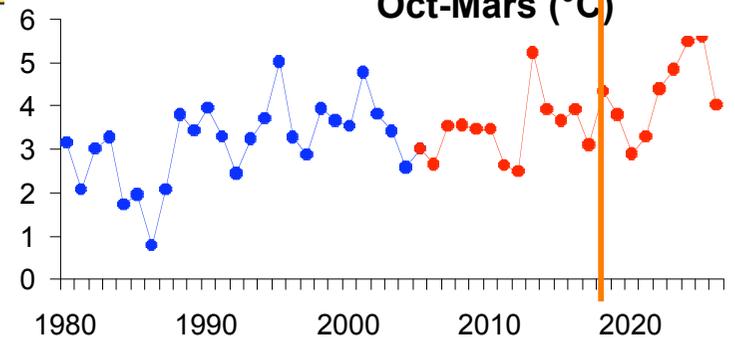


# Prévision du modèle Année 2018

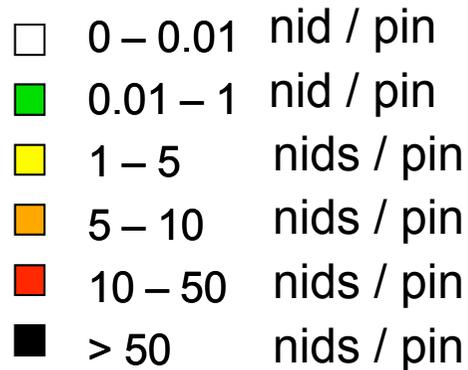
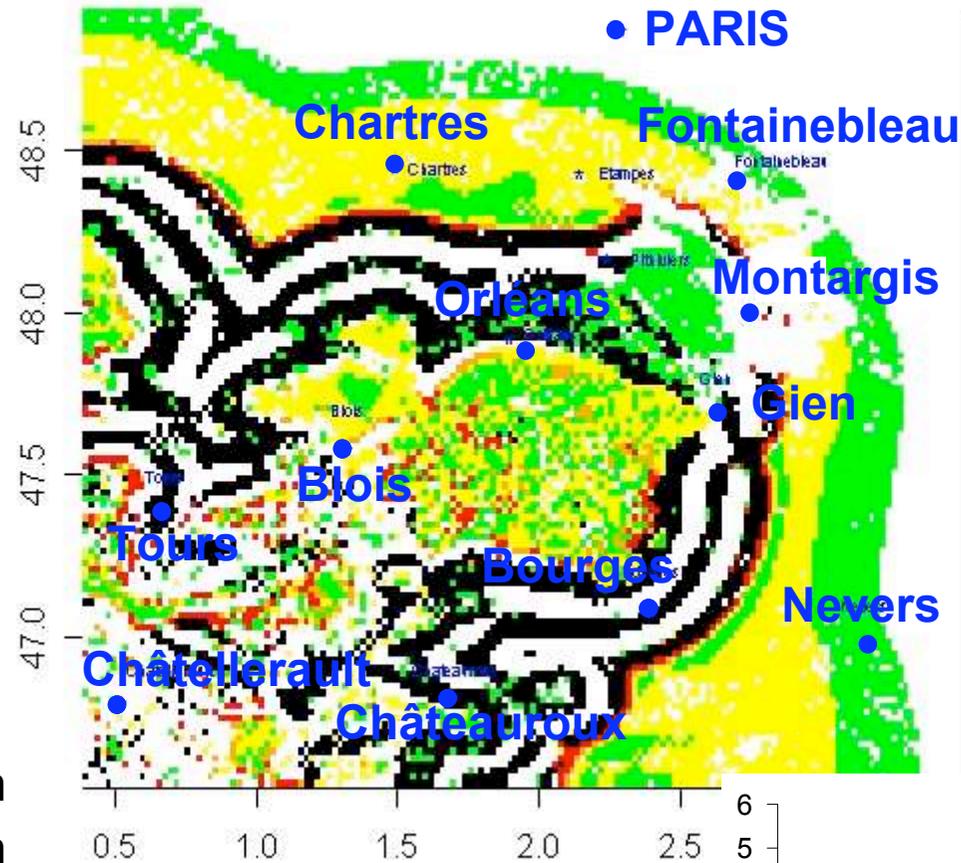


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

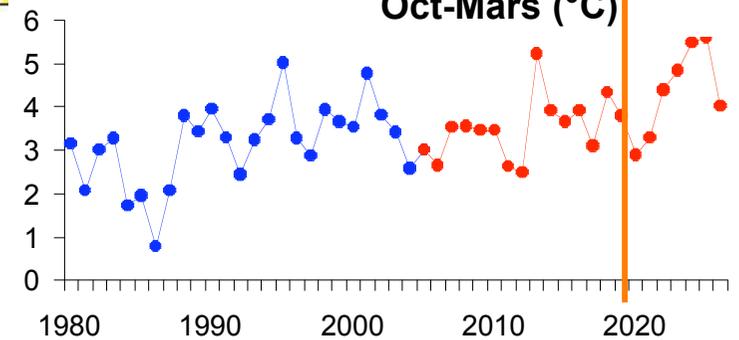
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



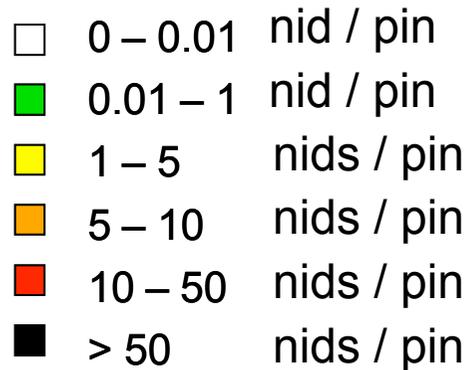
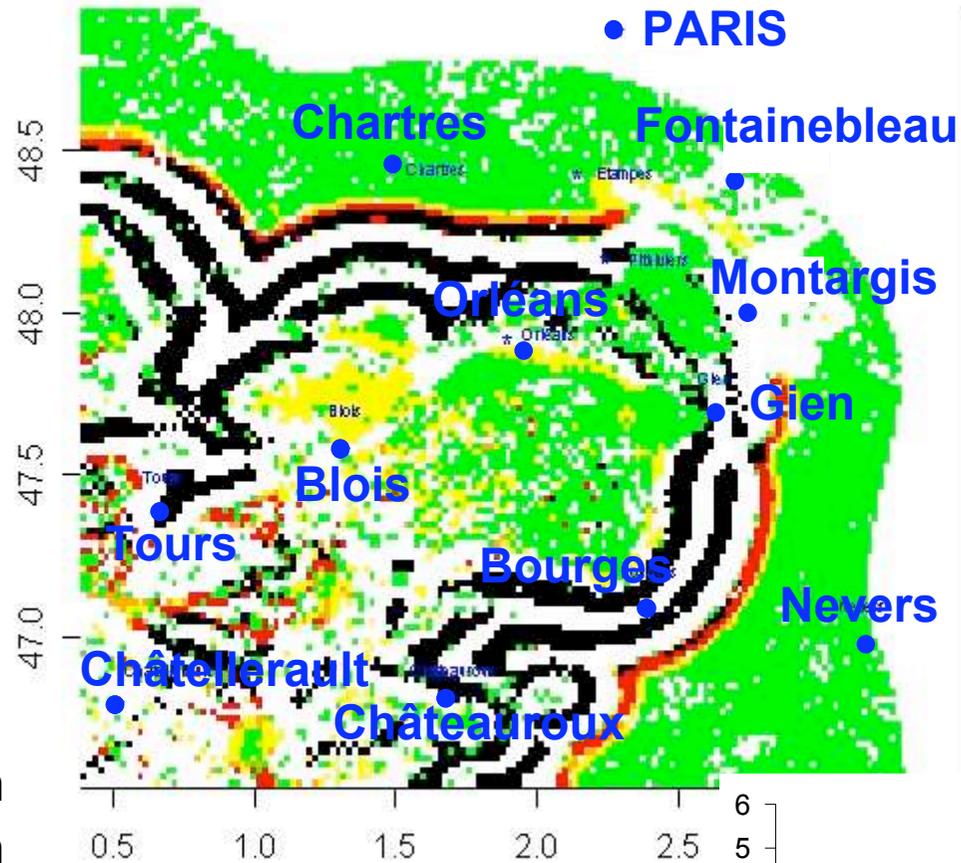
# Prévision du modèle Année 2019



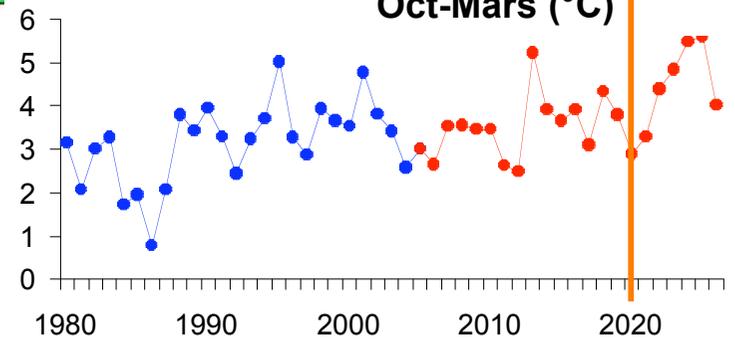
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



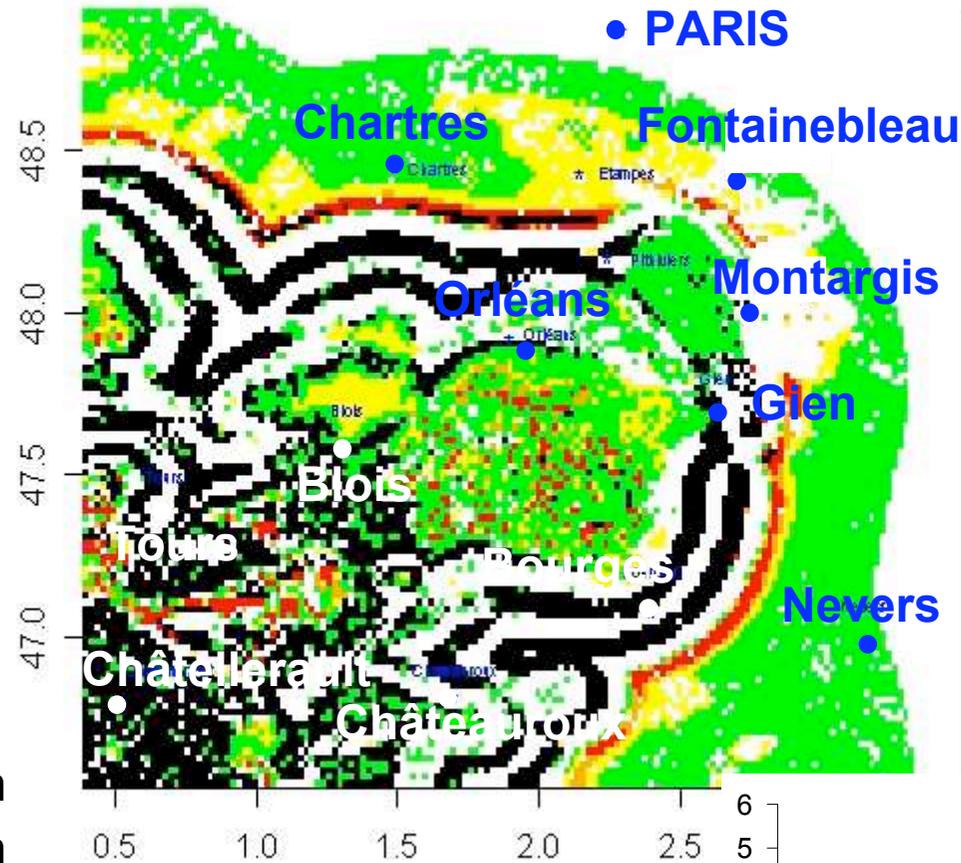
# Prévision du modèle Année 2020



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

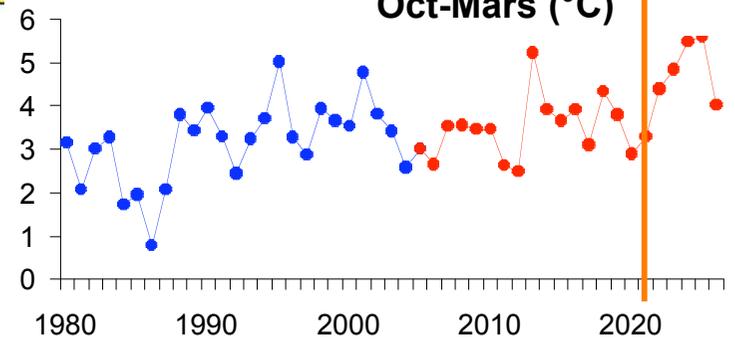


# Prévision du modèle Année 2021

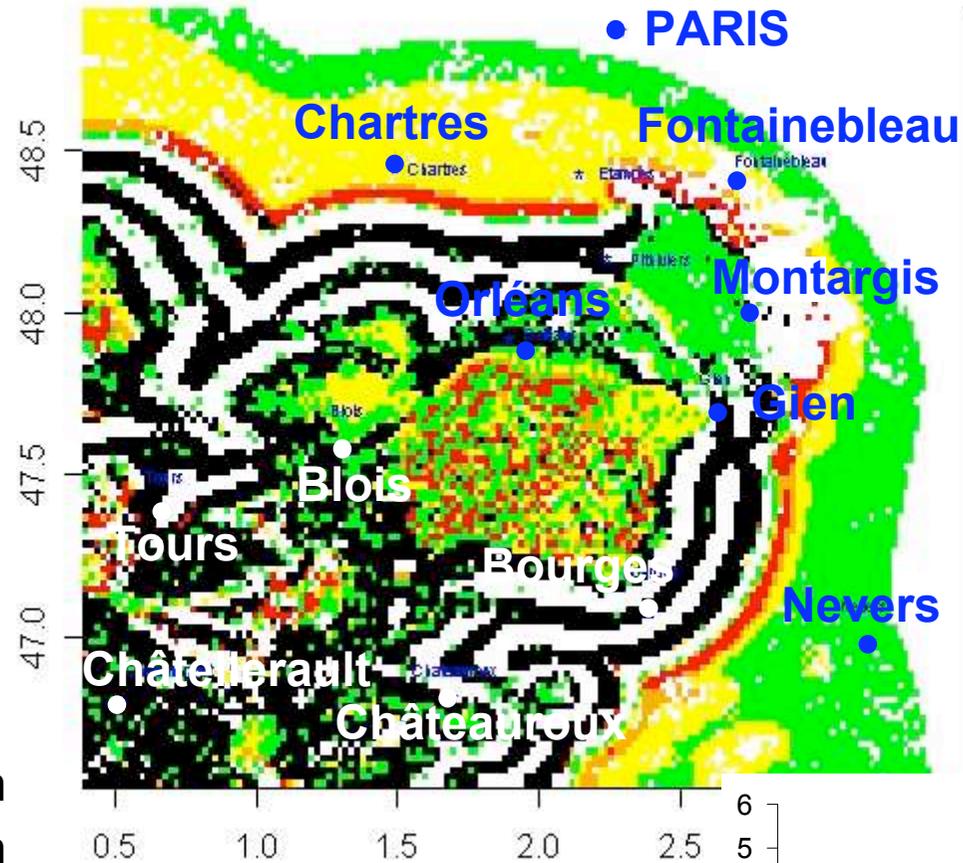


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

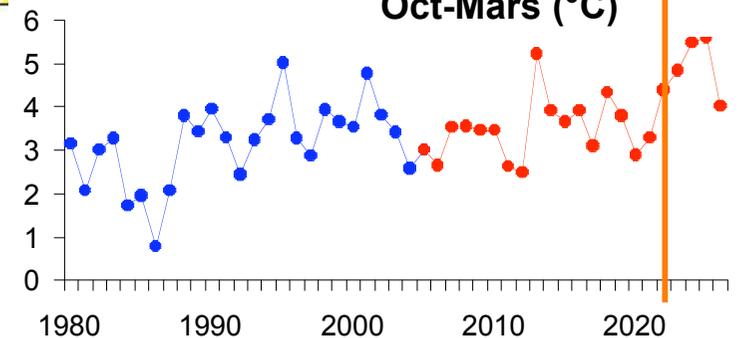


# Prévision du modèle Année 2022

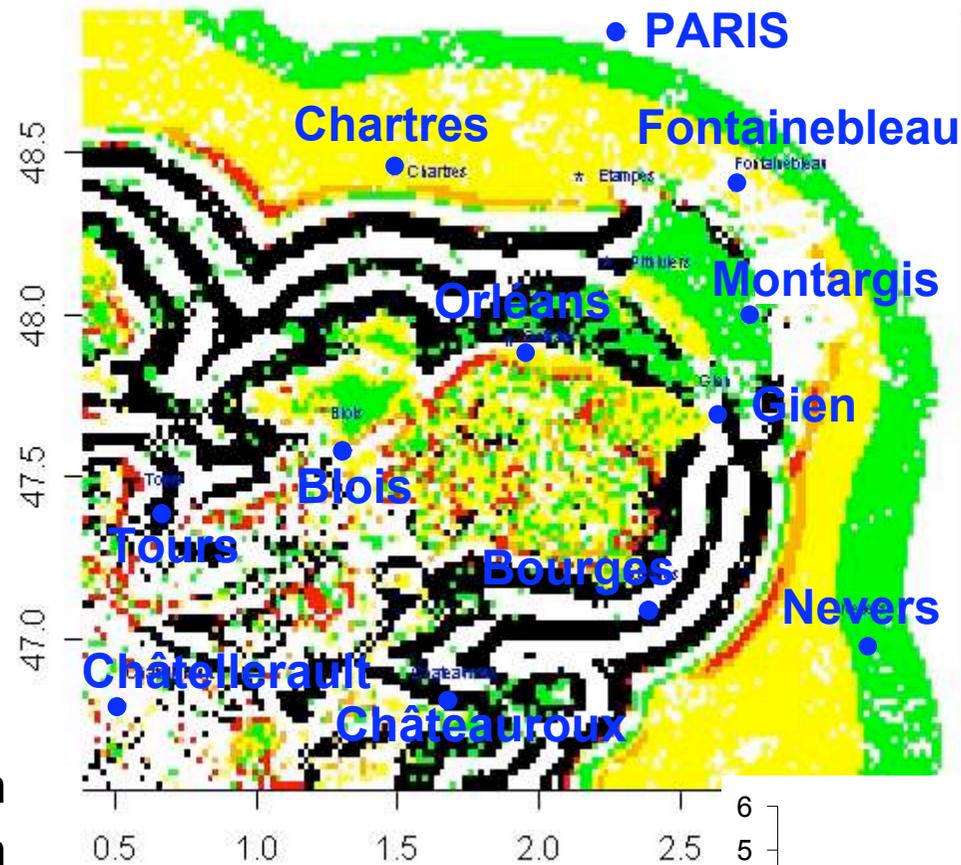


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

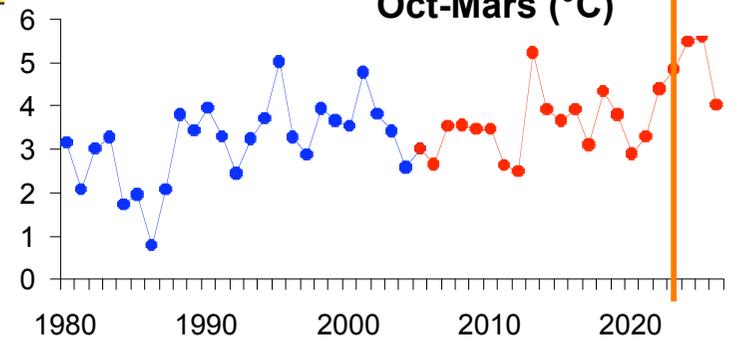


# Prévision du modèle Année 2023

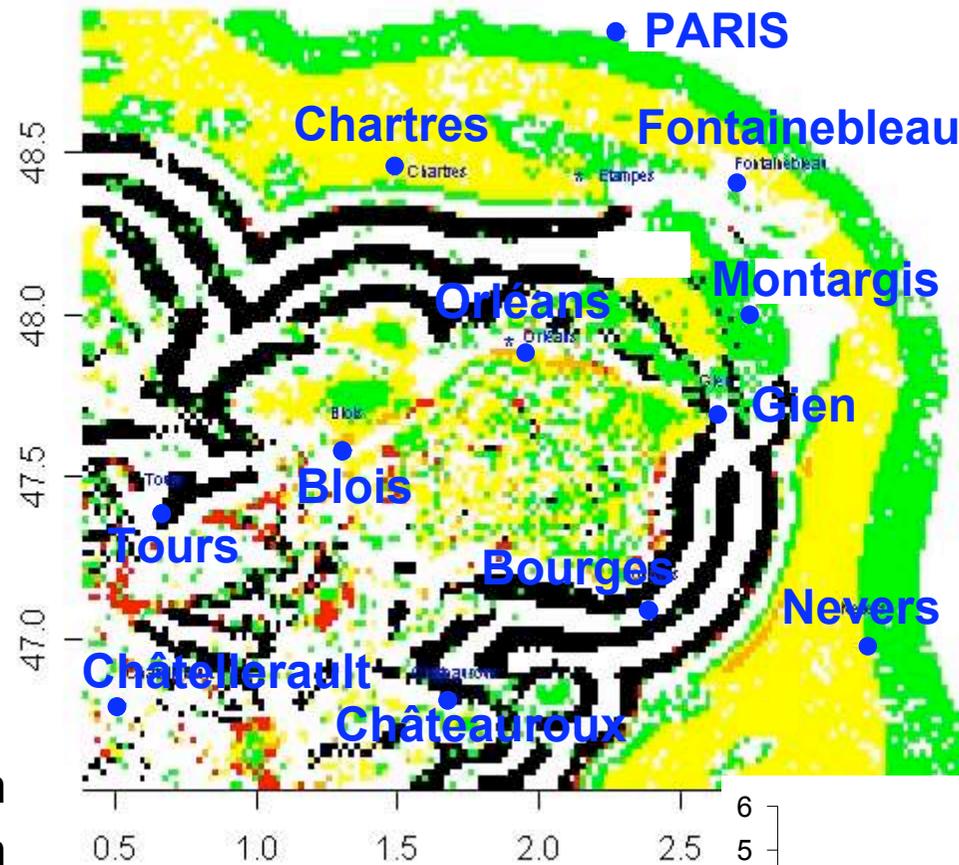


- |   |          |            |
|---|----------|------------|
| □ | 0 – 0.01 | nid / pin  |
| ■ | 0.01 – 1 | nid / pin  |
| ■ | 1 – 5    | nids / pin |
| ■ | 5 – 10   | nids / pin |
| ■ | 10 – 50  | nids / pin |
| ■ | > 50     | nids / pin |

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

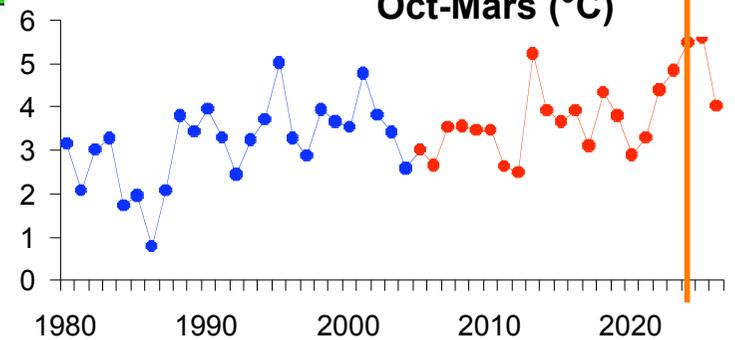


# Prévision du modèle Année 2024



- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

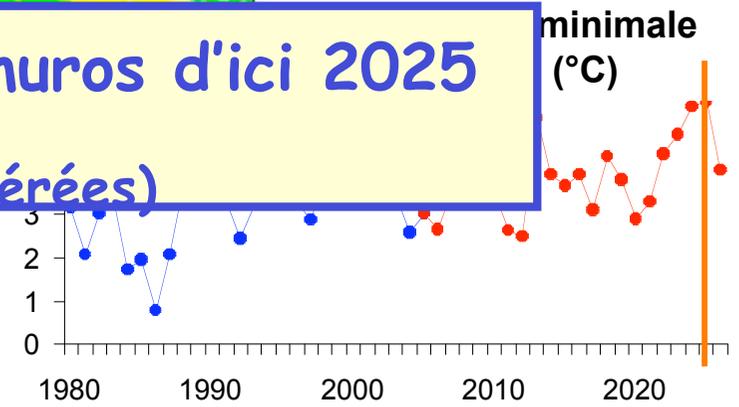


# Prévision du modèle Année 2025



- 0 – 0.01
- 0.01 – 1
- 1 – 5
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

**Colonisation de Paris intra-muros d'ici 2025**  
(sous hypothèses modérées)



## Scénario 2006-2026

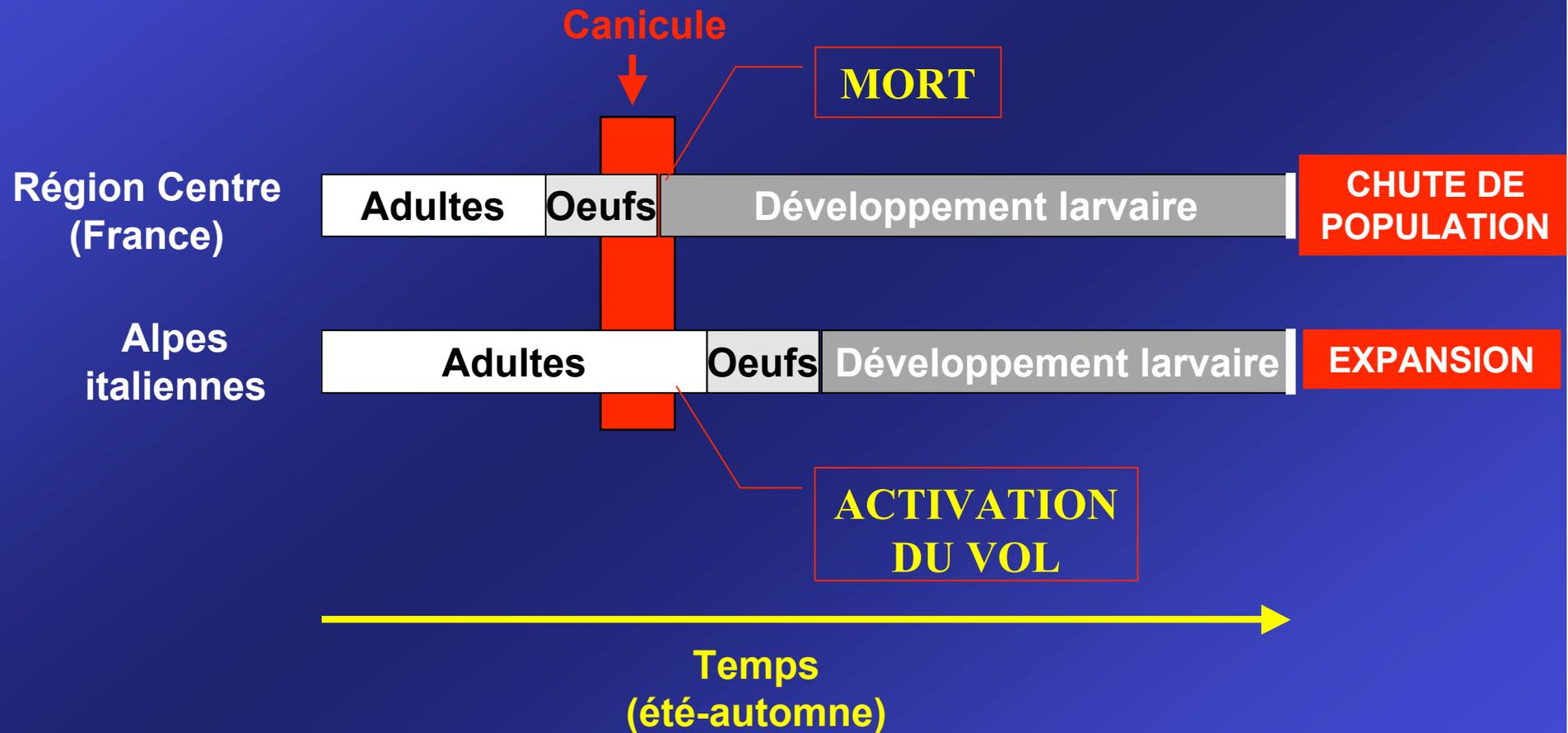
**=> Grand potentiel  
de progression**



**Et ce n'est que le début  
du réchauffement  
climatique ...**

- **prévision modérée : capacité de dispersion > 3 km ?**
- **transport accidentel = dispersion longue distance ?  
=> expansion plus rapide**
- **effet des conditions climatiques extrêmes???**

# Effets contrastés de la canicule de l'été 2003

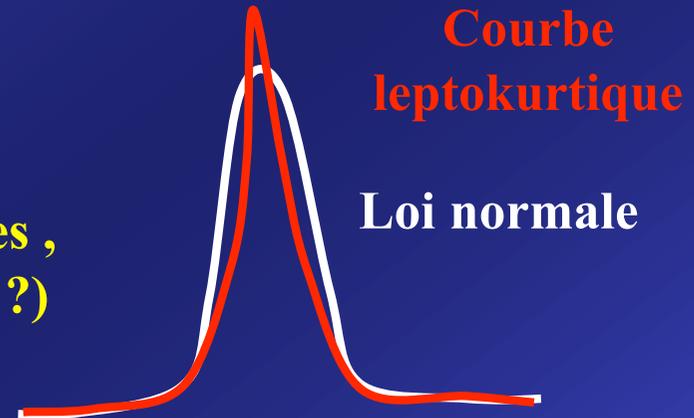


**Perspectives immédiates ...**

# 1- Caractérisation plus fine du noyau de dispersion

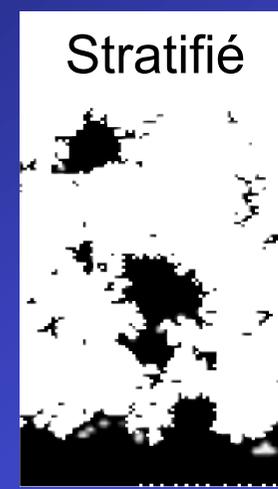
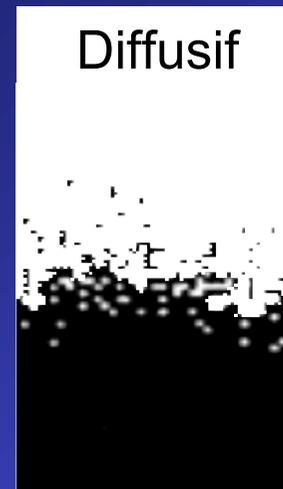
## Dispersion à courte distance:

Quantification du pic (courbes leptokurtiques, kurtosis  $> 0$  ou platykurtiques, kurtosis  $< 0$  ?)



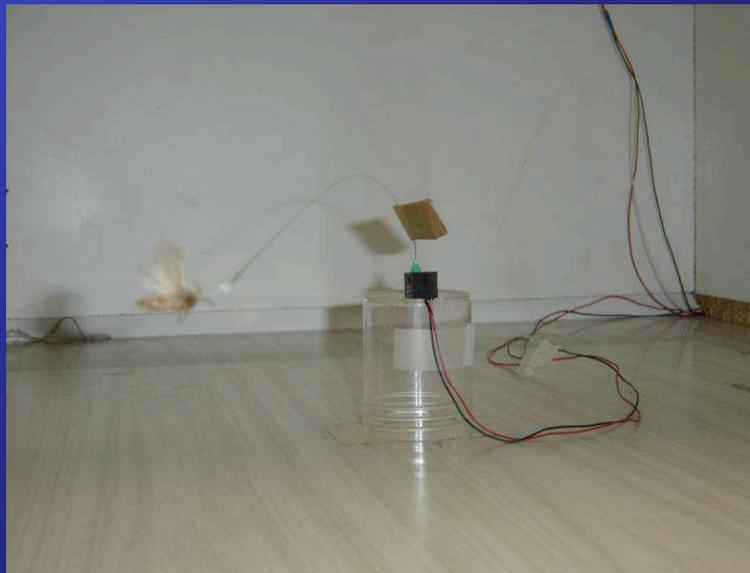
## Dispersion à longue distance:

Queue fine ou épaisse?  
Décroit +/- vite que:  $\text{Exp}(-x)$  ?



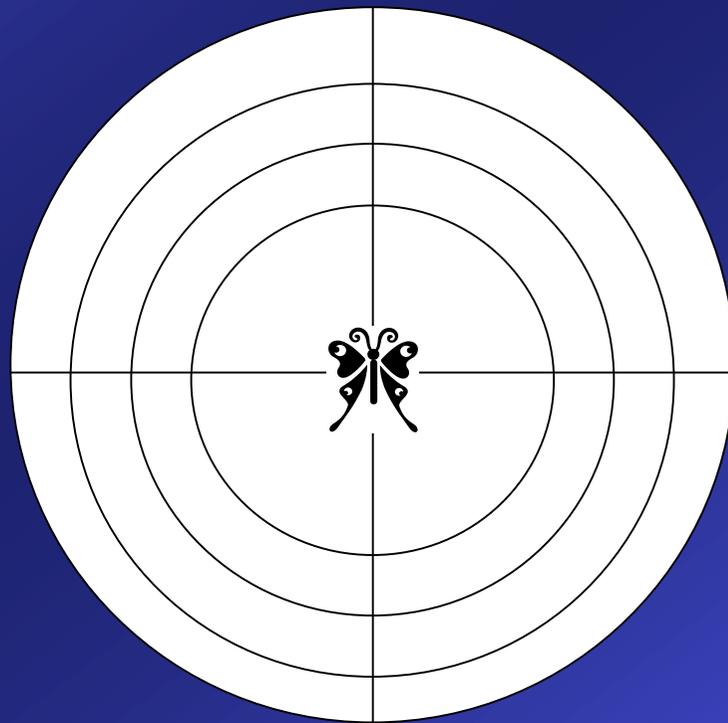
# 1- Caractérisation plus fine du noyau de dispersion

- Études expérimentales: manège de vol



# 1- Caractérisation plus fine du noyau de dispersion

- Études expérimentales: manège de vol
- Études expérimentales: lâcher-recapture





# 1- Caractérisation plus fine du noyau de dispersion

- Études expérimentales: manège de vol
  - Études expérimentales: lâcher-recapture
    - Études expérimentales: effet des températures
      - Études génétiques

**Dispersion à longue distance**

Klein et al. (2006)



**Queue de distribution épaisse**



**Apparition de colonies satellites indépendantes  
avec un effet fondateur important**



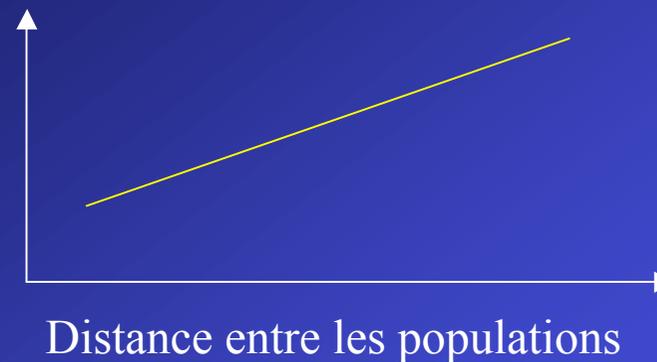
**Forte structuration génétique mais pas d'isolement par la distance**

# 1- Caractérisation plus fine du noyau de dispersion

- Études expérimentales: manège de vol
  - Études expérimentales: lâcher-recapture
    - Études expérimentales: effet des températures
      - Études génétiques (Rousselet et al., en prép.)

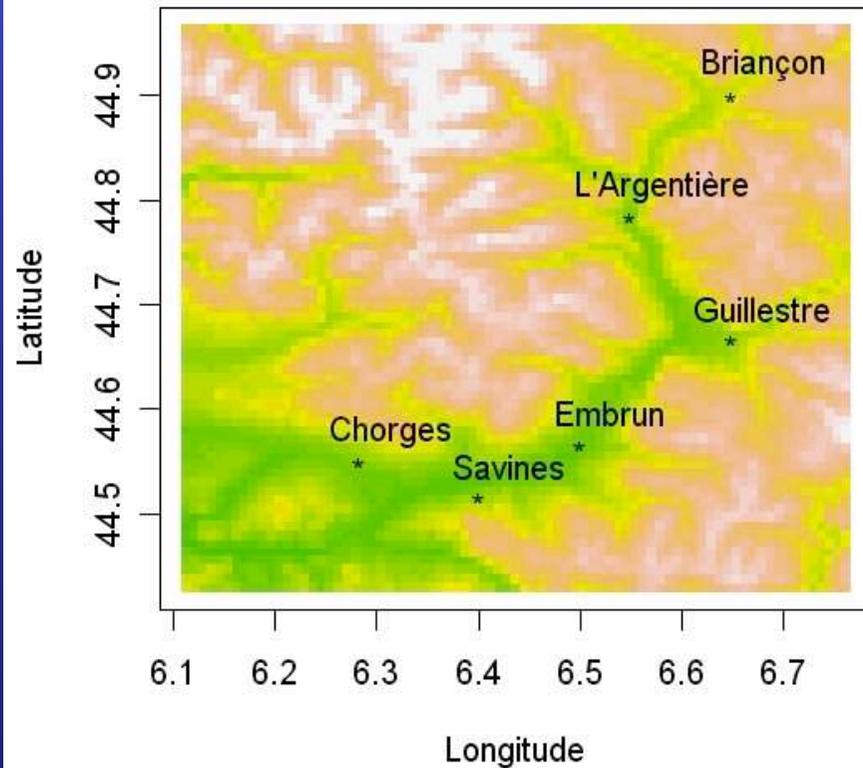
**Isolement par la distance chez la processionnaire du pin, caractérisé par la tendance:**

Indice de structuration  
génétique des populations



## 2- Extension du modèle à l'expansion en altitude

### Altitude dans la vallée de la Durance (Alpes Françaises)



1) Prise en compte de l'altitude pour interpoler la température et estimer la survie des larves

Rôle de l'exposition, de l'insolation? De la pente?

2) Intégrer la contrainte bioclimatique dans un modèle dynamique d'expansion (tenant compte des capacités de dispersion et de la distribution des pins)

**MERCI DE VOTRE ATTENTION !**