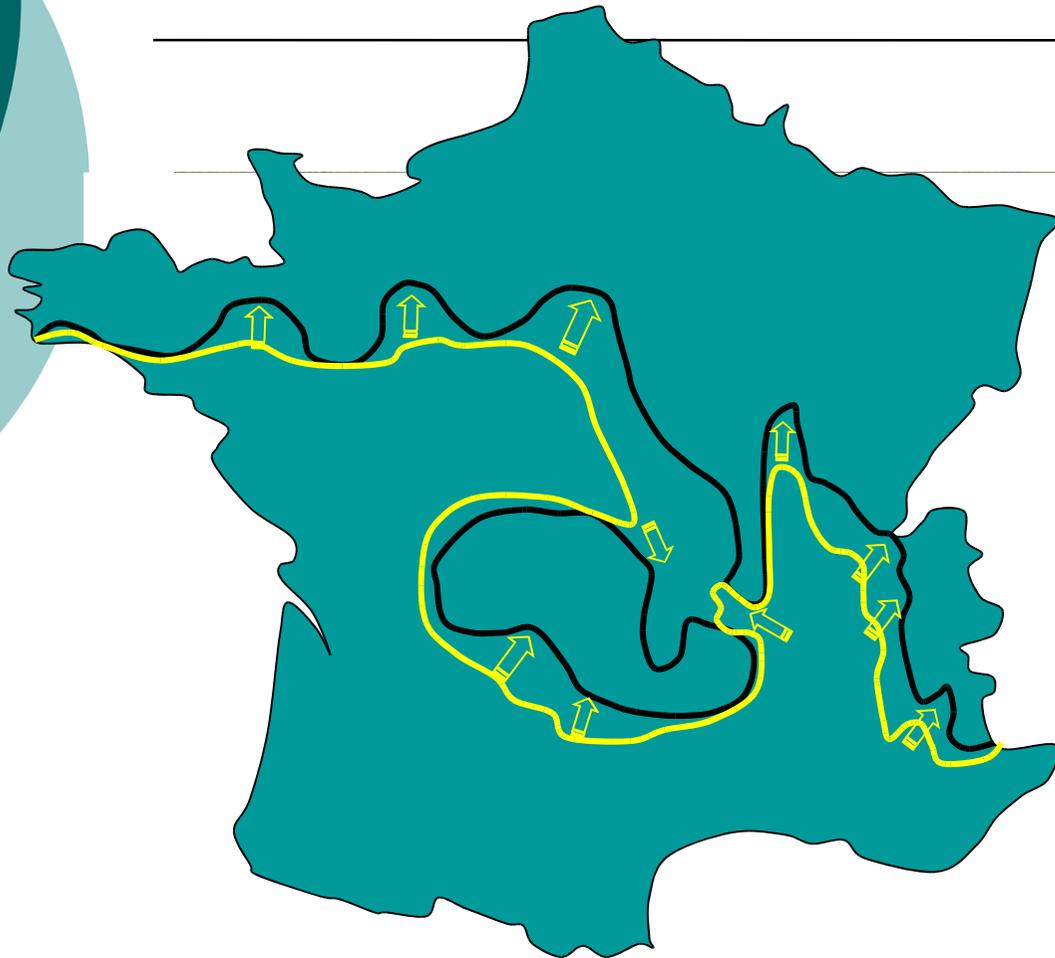


# Des outils et des méthodes pour observer et pour comprendre

Apports de la modélisation:  
Le cas de la processionnaire du pin



**Alain ROQUES**

Zoologie Forestière  
INRA Orléans



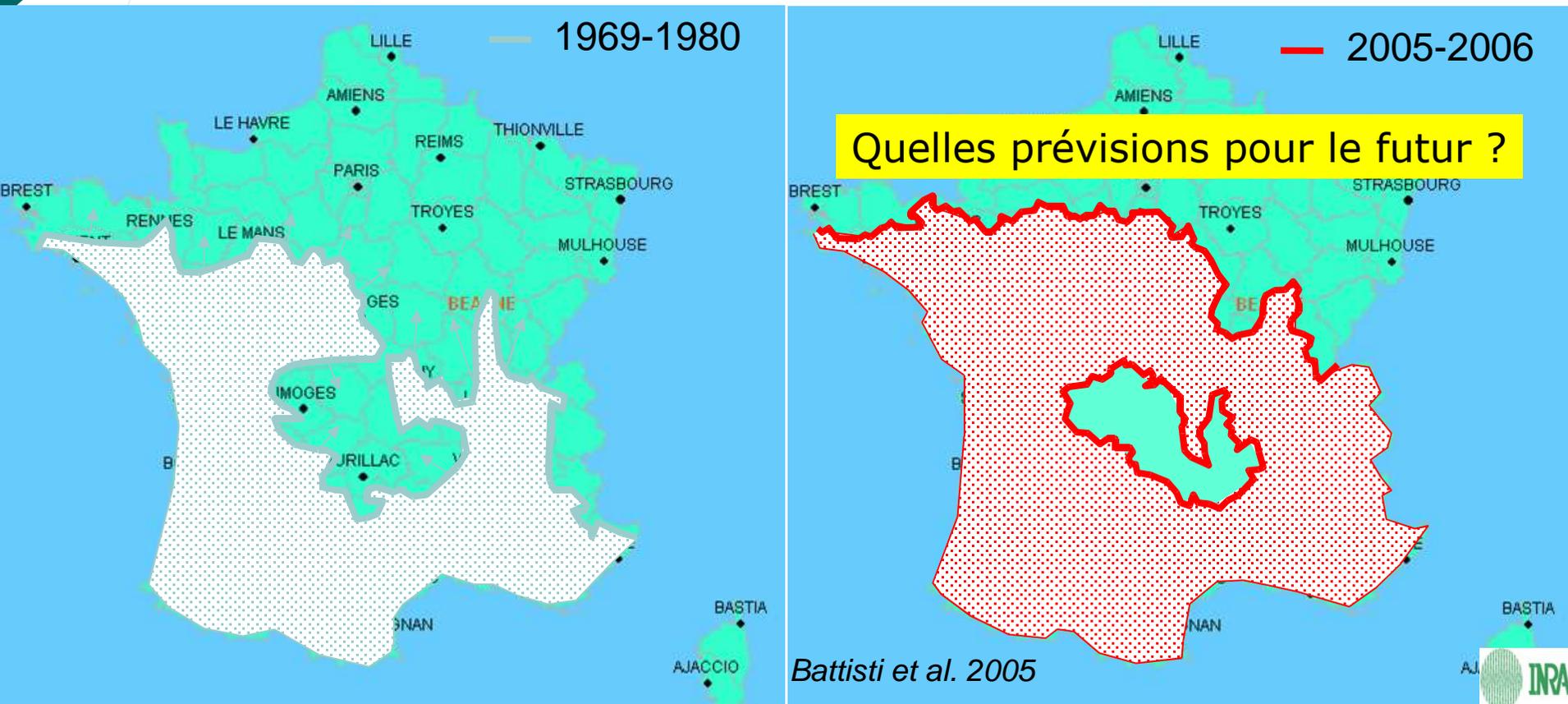
# La processionnaire du Pin

## Un ravageur forestier et ...

### un modèle exemplaire pour le changement climatique

Expansion conséquente en latitude et altitude à partir des années 1990

- 2.7 km/an entre 1972 to 2004
- 5.6 km/an entre 1992 to 2004



# Le changement global a un impact complexe sur les populations d'insectes et leur distribution

Δ température  
Δ précipitations  
Δ insolation  
Δ événements extrêmes  
Δ CO2 atmosphérique, O3, NO,...

Survie, Fécondité,  
Vitesse de  
développement,  
Dispersion

Phénologie, Aire,  
Physiologie

Survie, Fécondité,  
Vitesse de  
développement,  
Dispersion

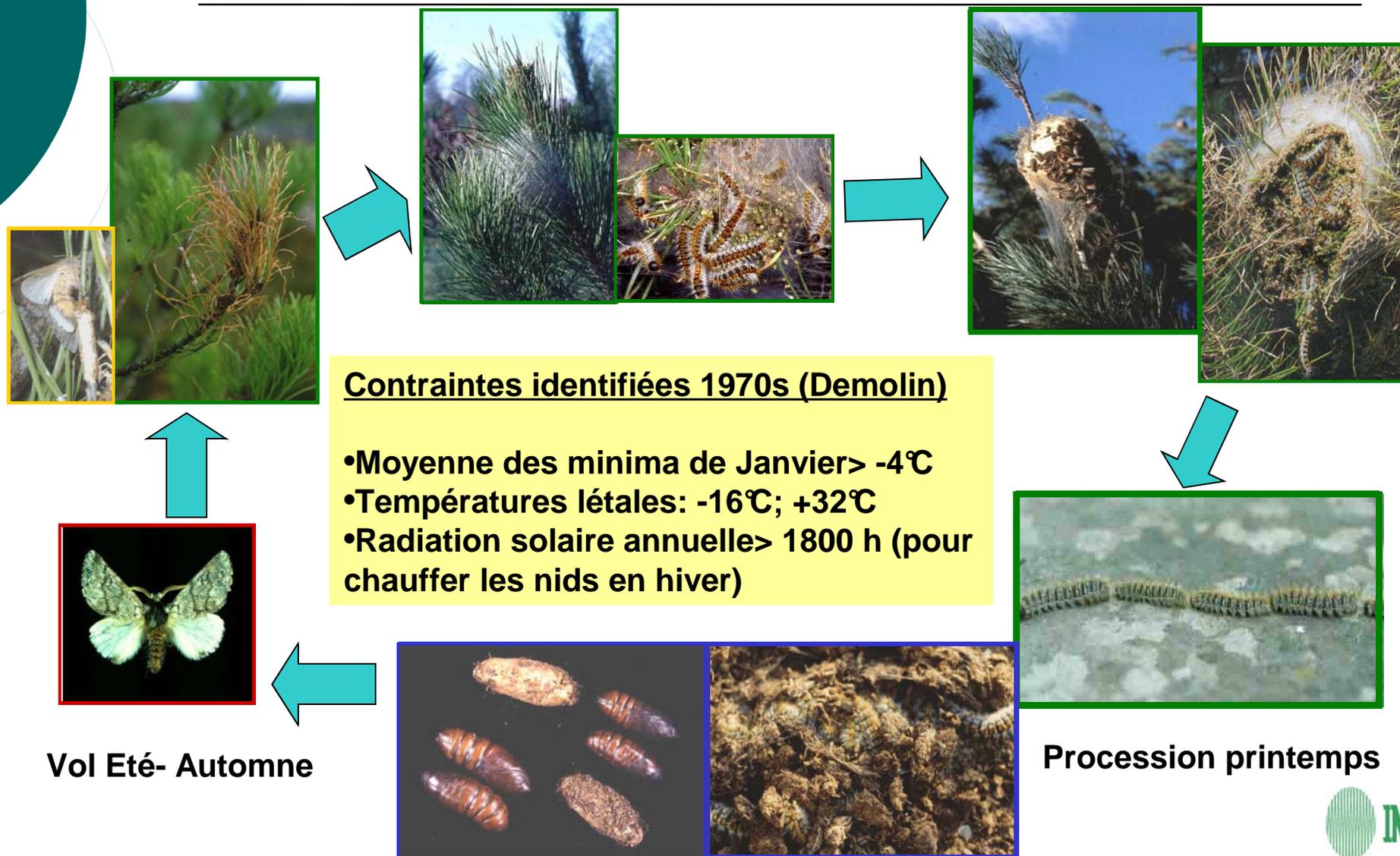
Ennemis  
naturels  
Compétiteurs  
Mutualistes

Arbres-  
hôtes

Population de  
ravageur



# Cycle de la processionnaire connu de longue date sous contrôle des températures hivernales



# Modélisation facile de l'expansion ?

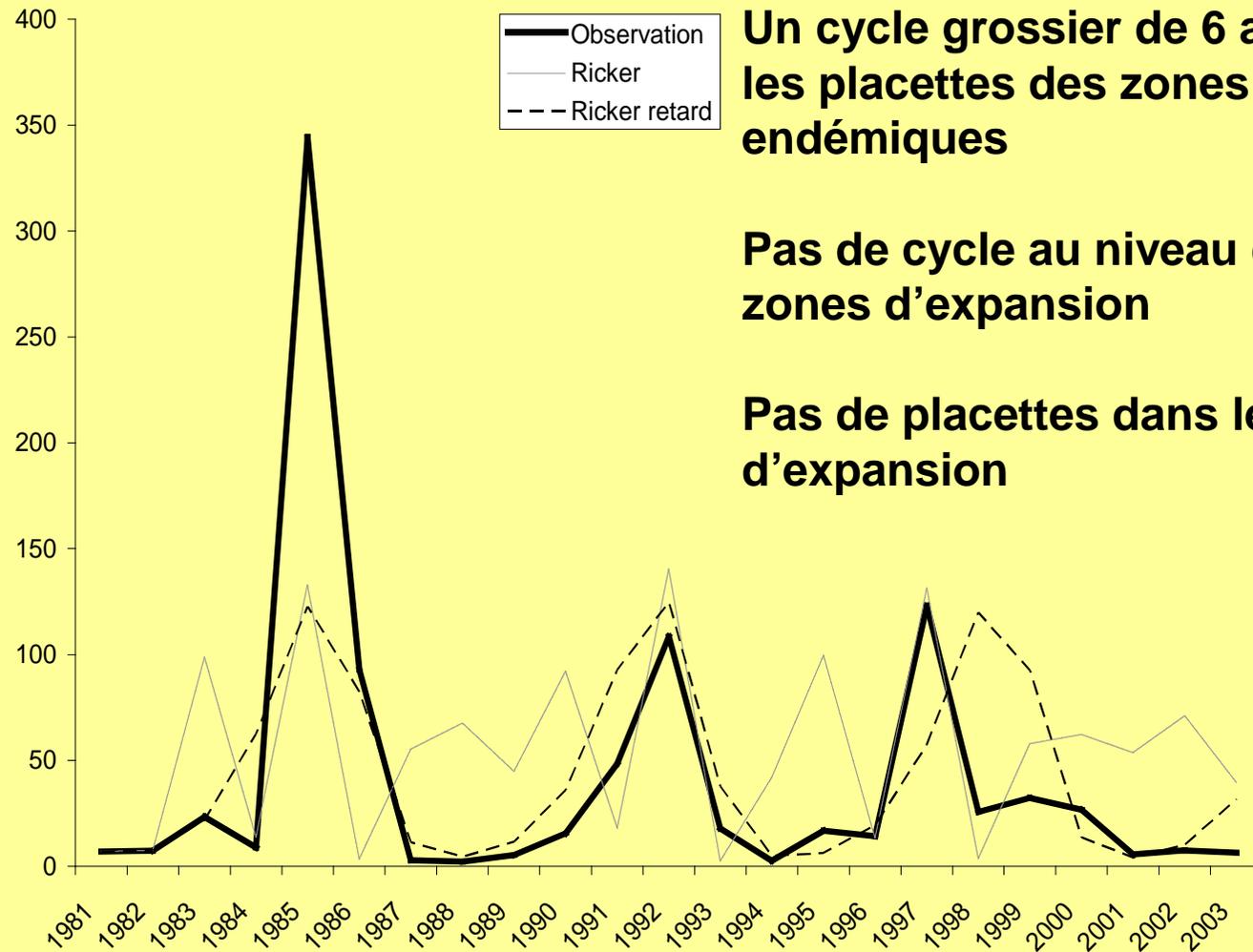
## Les contraintes

---

- Obtention de séries temporelles fiables des populations
- Connaissance fine des contraintes climatiques pour la survie et le développement
- Obtention de données climatiques spatialisées
- Obtention de données spatialisées sur les arbres- hôtes (données IFN suffisantes ?)
- Connaissance des capacités intrinsèques de dispersion
- Prise en compte de la cyclicité des pullulations
- Prise en compte de phénomènes adaptatifs (apports de la génétique)
- Fiabilité des prédictions climatiques pour le futur

# Apports du DSF

Un réseau de centaines de placettes  
suivies depuis 50 ans



**Un cycle grossier de 6 ans dans  
les placettes des zones  
endémiques**

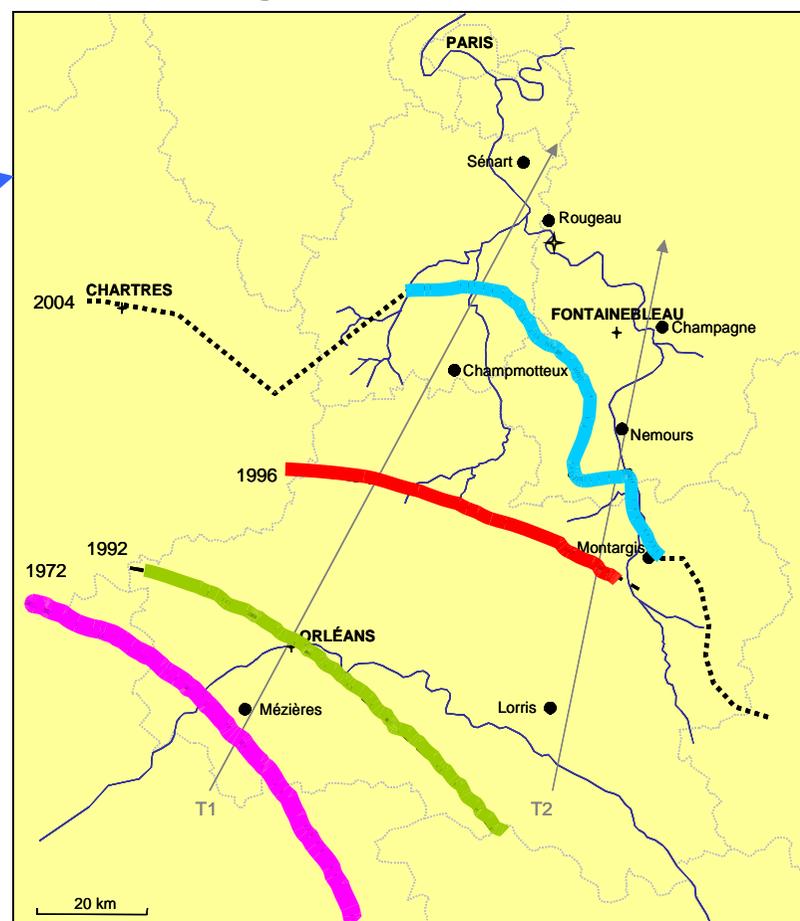
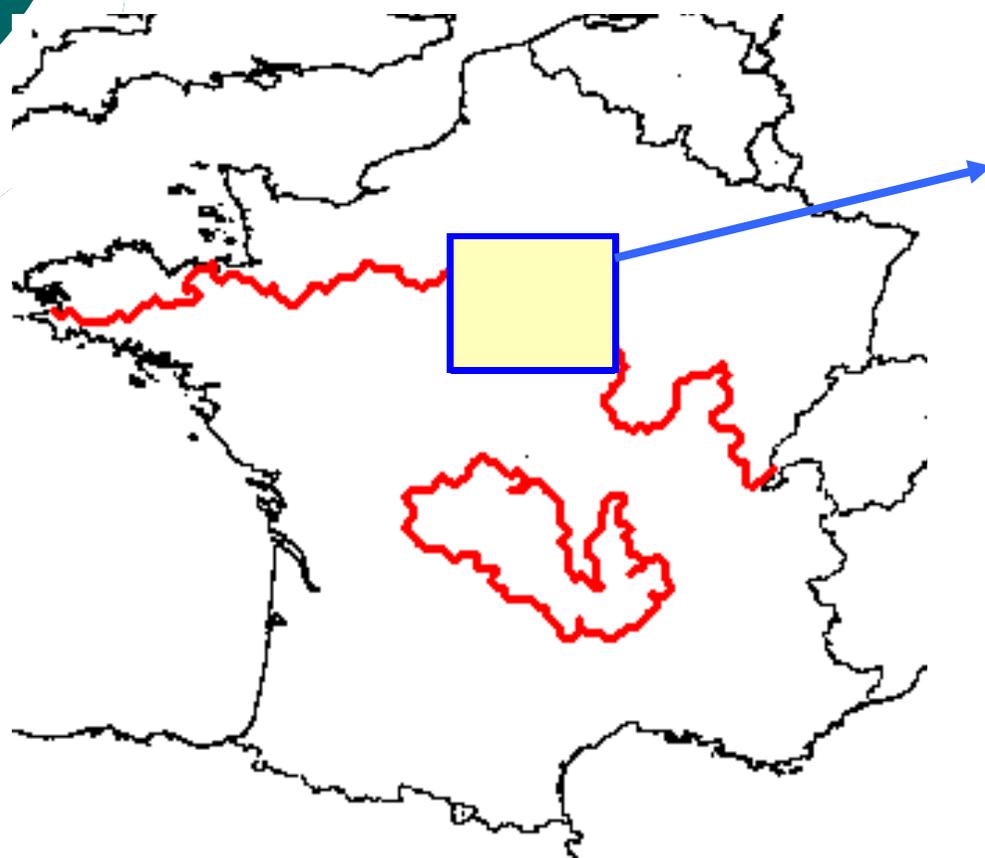
**Pas de cycle au niveau des  
zones d'expansion**

**Pas de placettes dans les zones  
d'expansion**

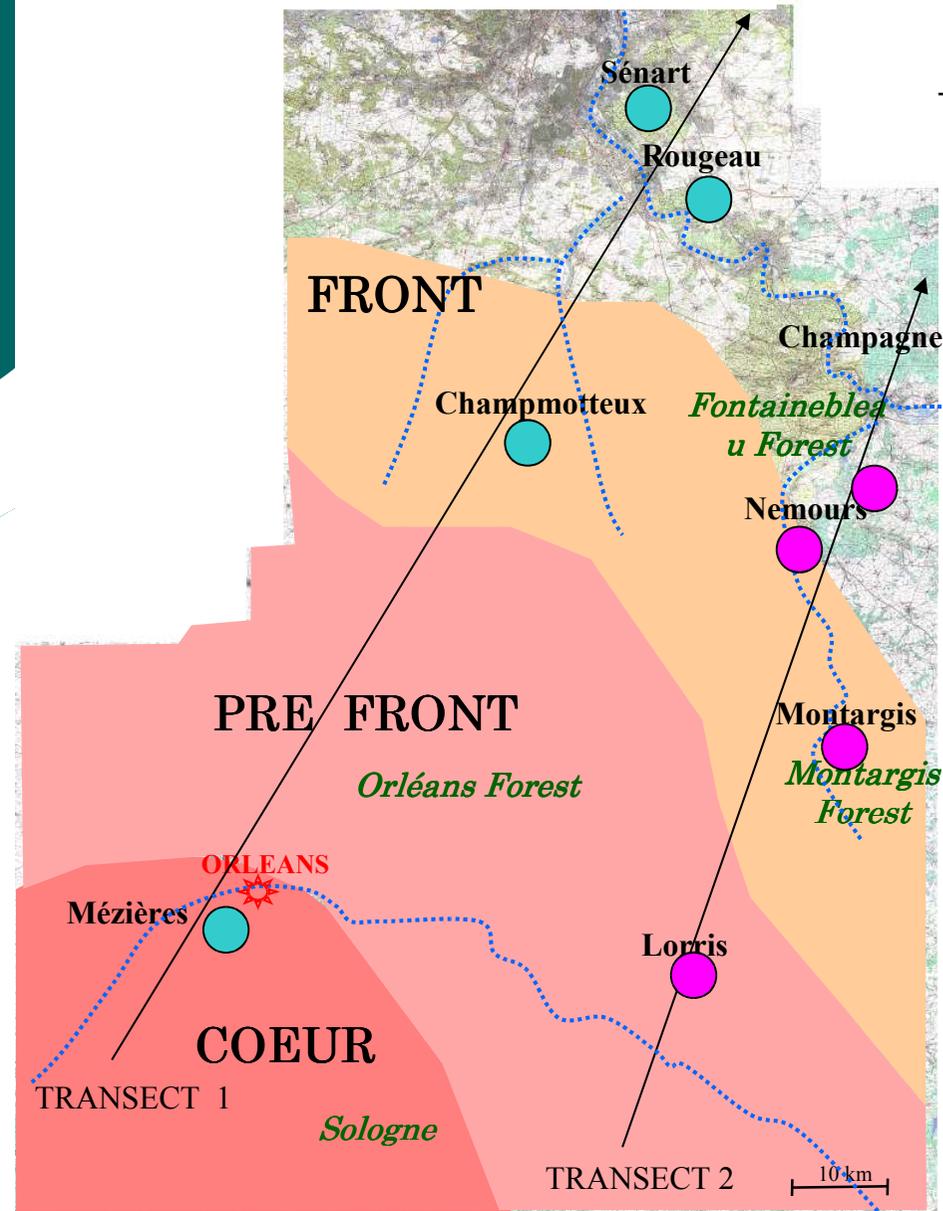
# 1<sup>ère</sup> Etape pour la modélisation: Suivi fin des fronts annuels d'expansion

Front géo-référencé de référence établi en 2005-06 (maille 8\*8 km)

Indispensable pour les études à long terme (2050)



## 2<sup>ème</sup> étape: Utilisation de gradients naturels pour simuler les conditions climatiques futures



➤ L'expérience de translocation de nids permet d'évaluer les capacités d'établissement le long de l'axe de colonisation, qui est aussi un gradient climatique, et d'étudier l'effet du changement climatique. A partir de cette étude dans l'espace, on obtient des données temporelles.

➤ Cette expérience permet de mesurer les capacités de survie des larves là où elles ne sont pas encore présentes (à cause, par exemple, d'une limitation due à la capacité de dispersion).

➤ Elle permet d'établir une fonction de survie

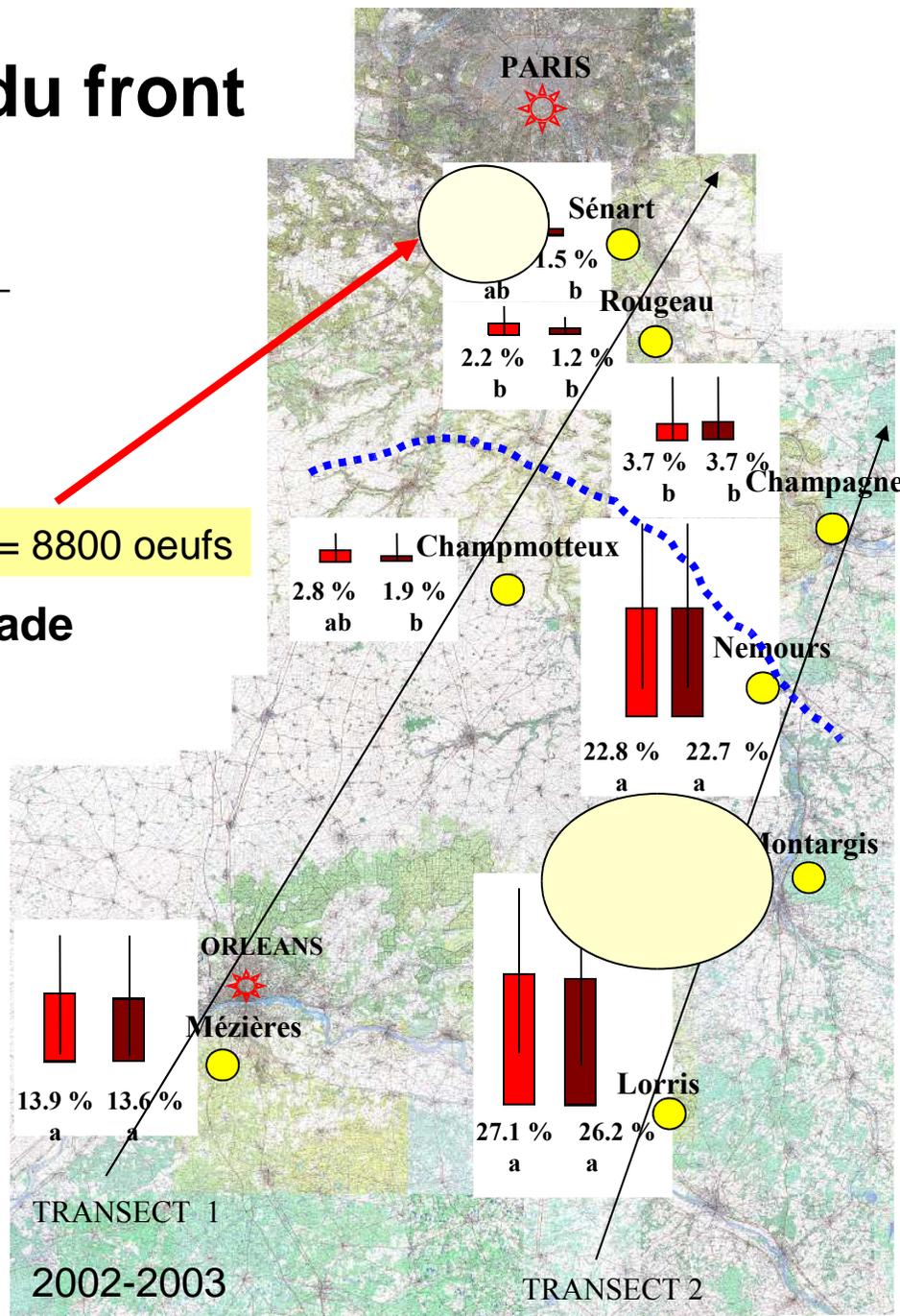
# Survie possible au-delà du front

 % Survie

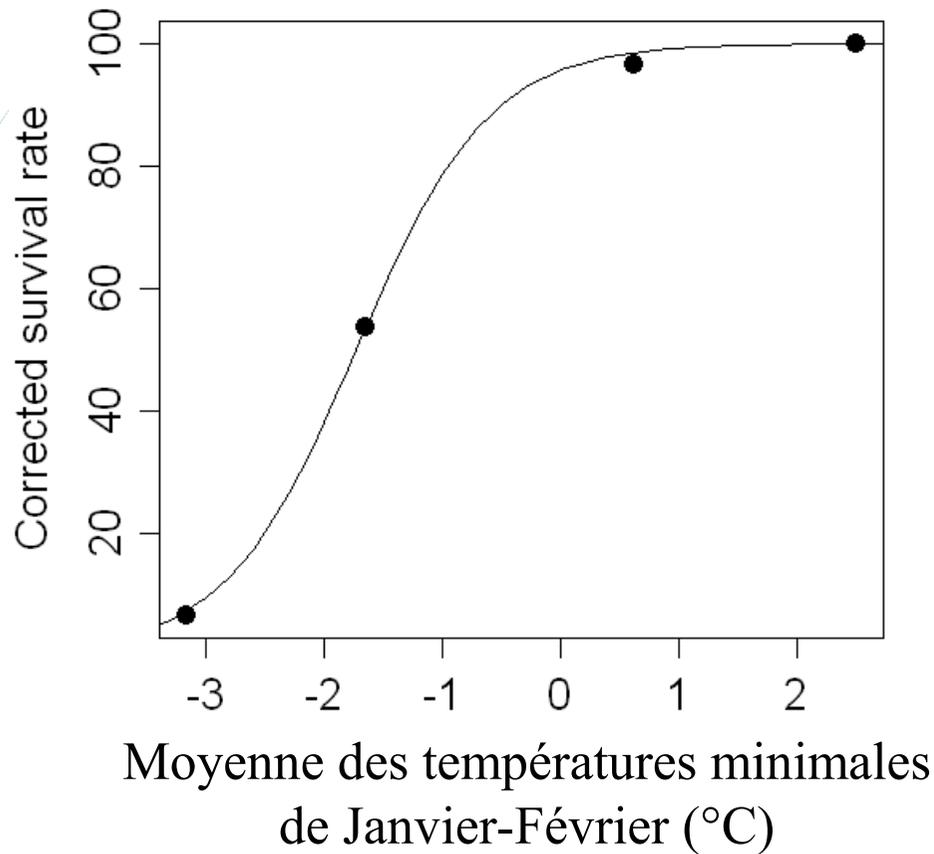
$4.4\% * 2000 = 88 \text{ adultes} = 44 \text{ ♀} = 44 * 200 = 8800 \text{ oeufs}$

 % Larves 5ème stade

La température létale n'a été obtenue qu'à Montargis en Janvier 2003: - 16.7°C



### 3<sup>ème</sup> étape: Etablissement d'une fonction de survie



On définit une fonction de survie pour pouvoir prévoir le taux de survie pour toute température.

Fonction de survie

$$S(TN) = \frac{100}{1 + \exp(s(T_c - TN))}$$

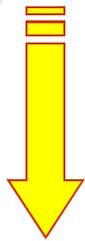
$$s = 1.79 \pm 0.14 \text{ (estimate } \pm \text{ SE)}$$

$$T_c = -1.73 \pm 0.03$$

# 4<sup>ème</sup> étape: Redéfinition expérimentale des contraintes thermiques au développement larvaire

La survie des larves est liée à l'alimentation durant la période froide (= période durant laquelle la moyenne hebdomadaire des minima journaliers de  $T^{\circ} < 0^{\circ}\text{C}$ )

TEMPERATURE



ALIMENTATION

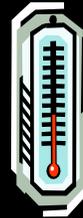


SURVIE

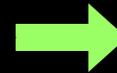


$T_{\text{nid}} > 9^{\circ}\text{C}$   
(jour)  
 $T^{\circ}$  Activation

+

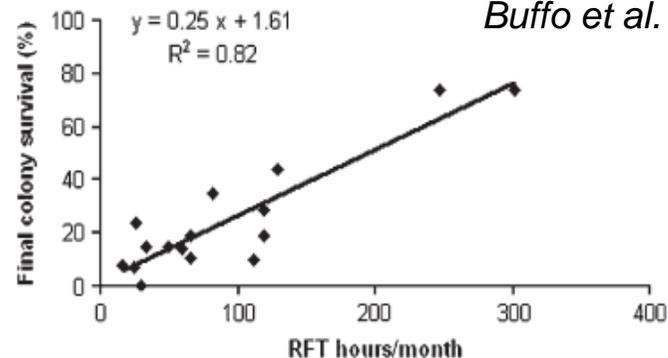


$T_{\text{air}} > 0^{\circ}\text{C}$   
(nuit suivante)  
 $T^{\circ}$  Alimentation  
Potentielle



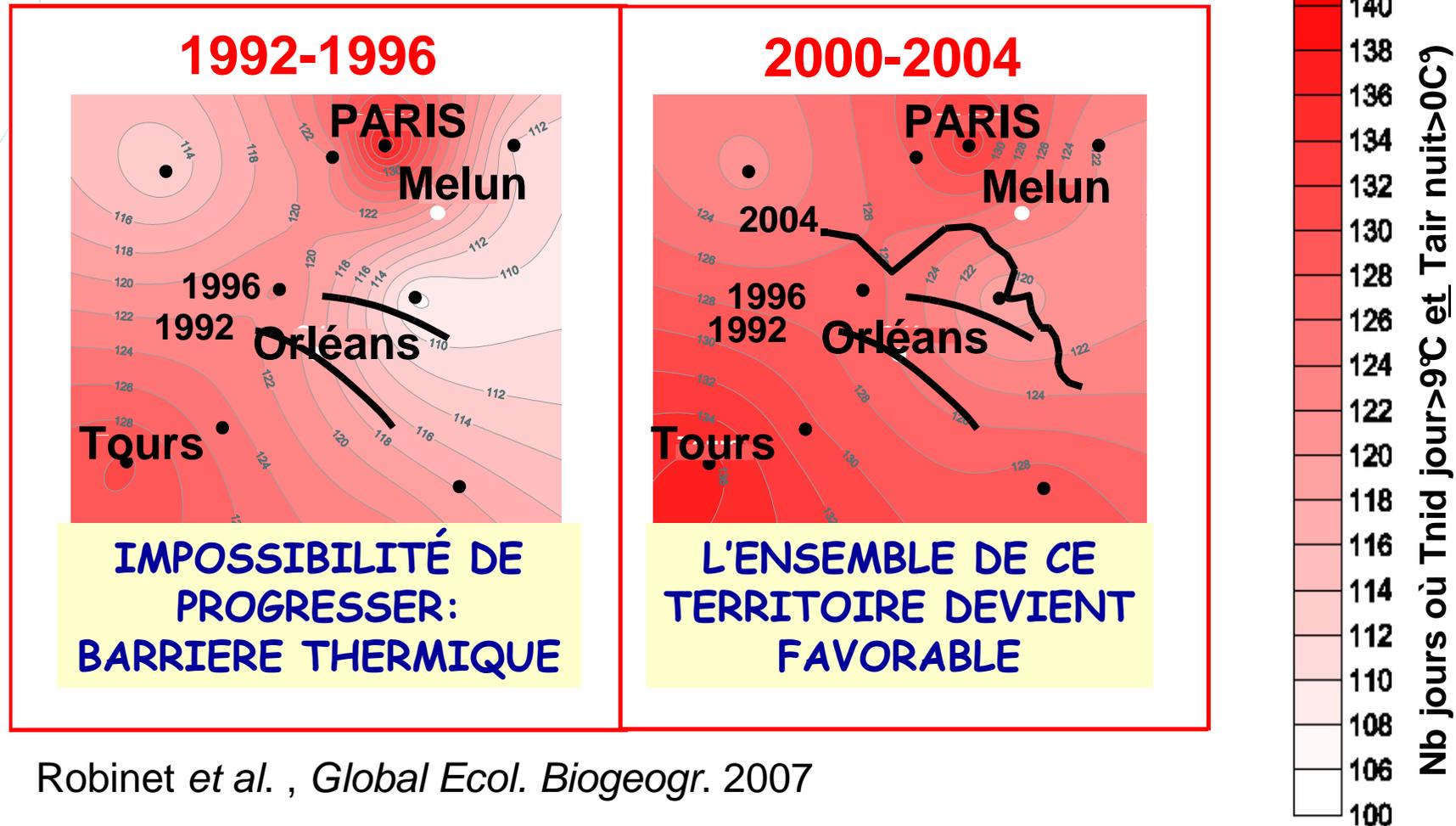
Seuil  
d'Alimentation

*Battisti et al. 2005*



# 5ème étape: Etablissement d'un modèle climatique

Toutes les zones du Bassin Parisien sont devenues favorables en moins de 10 ans



Robinet *et al.* , *Global Ecol. Biogeogr.* 2007

# 6<sup>ème</sup> étape: Etablissement des capacités de dispersion

---

## Manège de vol



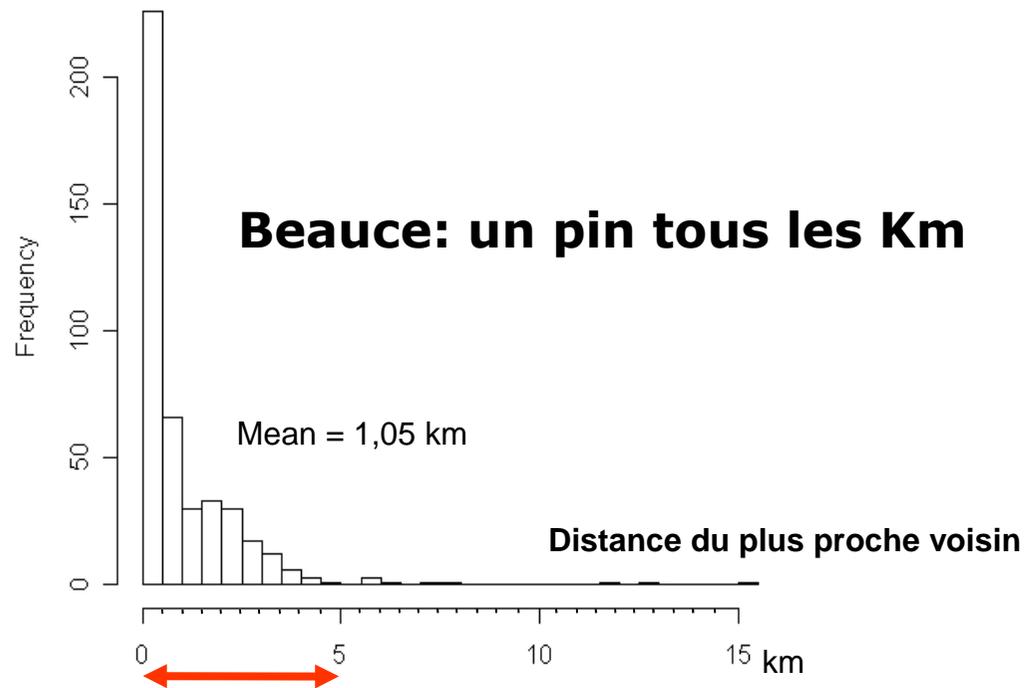
Mâles ~ 30-50 km

Femelles ~ 3-5 km

# 7<sup>ème</sup> étape: Cartographier les hôtes

## Est-ce que les données IFN suffisent ?

Le pin noir, hôte préféré, a été massivement planté le long des autoroutes, dans les parcs et jardins publics et privés, les écoles. Ces arbres agissent comme relais pour l'expansion qui est plus rapide dans ces milieux qu'en forêt



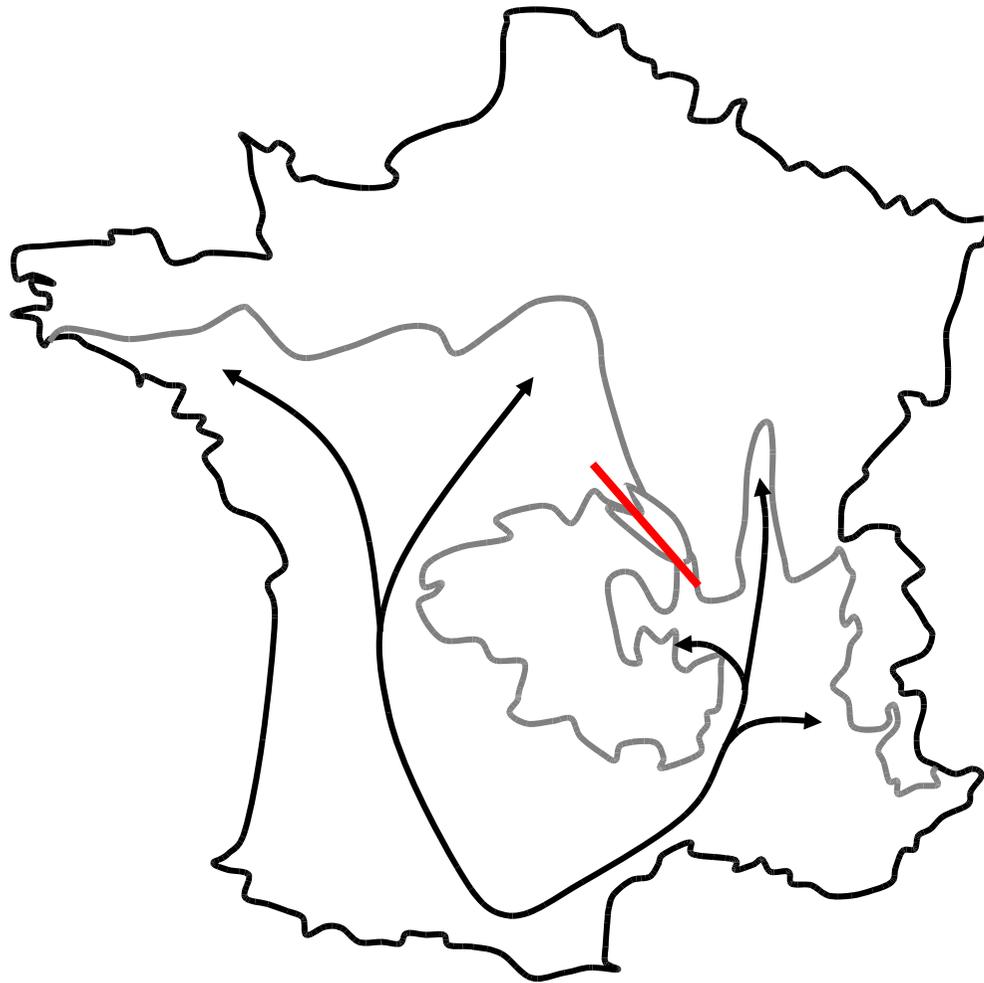
Si ♀ ~ 3-5 km<sup>ecart</sup>

⇒ 98% des pins accessibles

## 8<sup>ème</sup> étape: Quel type de modèle ?

### Apport de la génétique des populations

---



Les données génétiques permettent de retracer l'expansion passée. Elles suggèrent un modèle de type **diffusion** car:

- isolement des populations par la distance avec 2 corridors de flux de gènes depuis la zone Méditerranéenne
- baisse progressive de la diversité génétique de la zone cœur vers la zone d'expansion

# Définition d'un modèle d'expansion naturelle dans le Bassin Parisien

Scénario climatique  
(Météo-France)

Répartition spatiale des pins  
(IFN + cartographie propre)

Impact des conditions climatiques  
sur la survie des larves- fonction  
de survie-  $T_{\text{seuil}} = 2.78^{\circ}\text{C}$  pour la  
moyenne des températures journalières  
entre Octobre et Mars

Capacités de  
dispersion femelles  
3-5 km

**Modèle de réaction- diffusion**

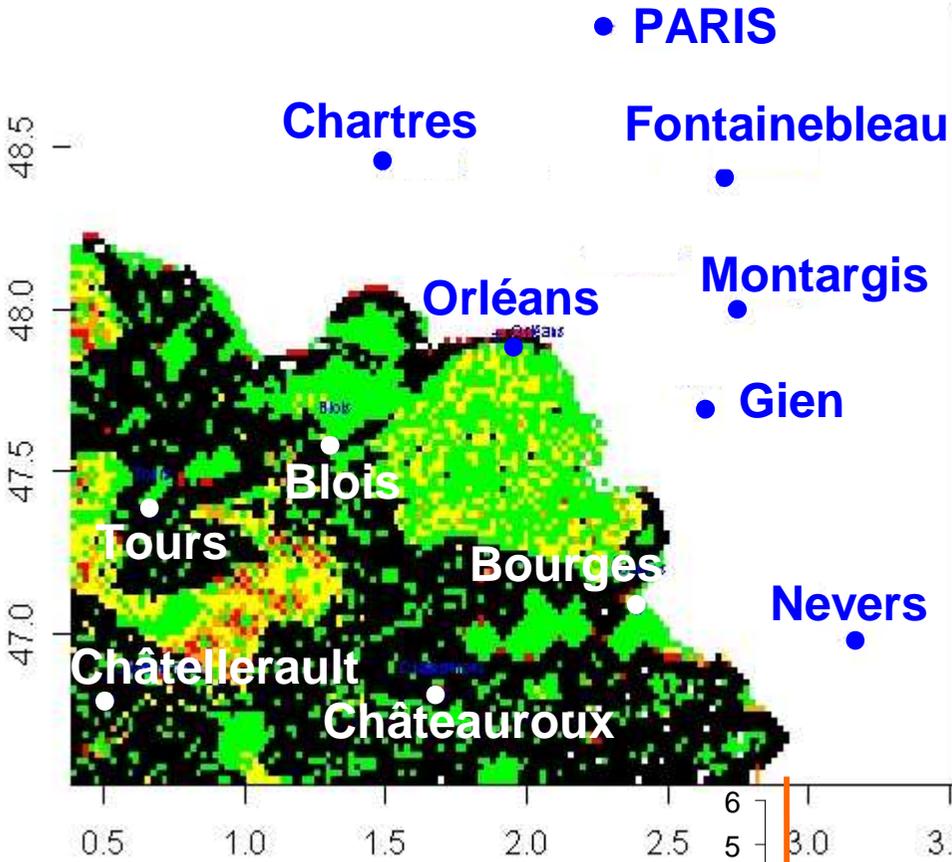
$$\frac{\partial E}{\partial \tau}(X, \tau) = D \cdot \Delta E(X, \tau), \tau = 0..1$$

paramètre de sensibilité  $s=3.5$ .

Scénario d'expansion

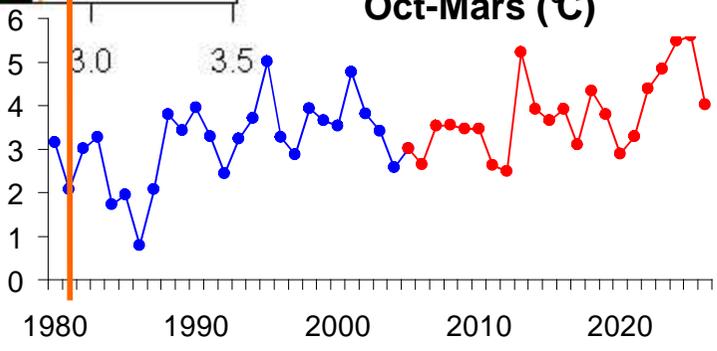


# Reconstruction par le modèle Année 1981

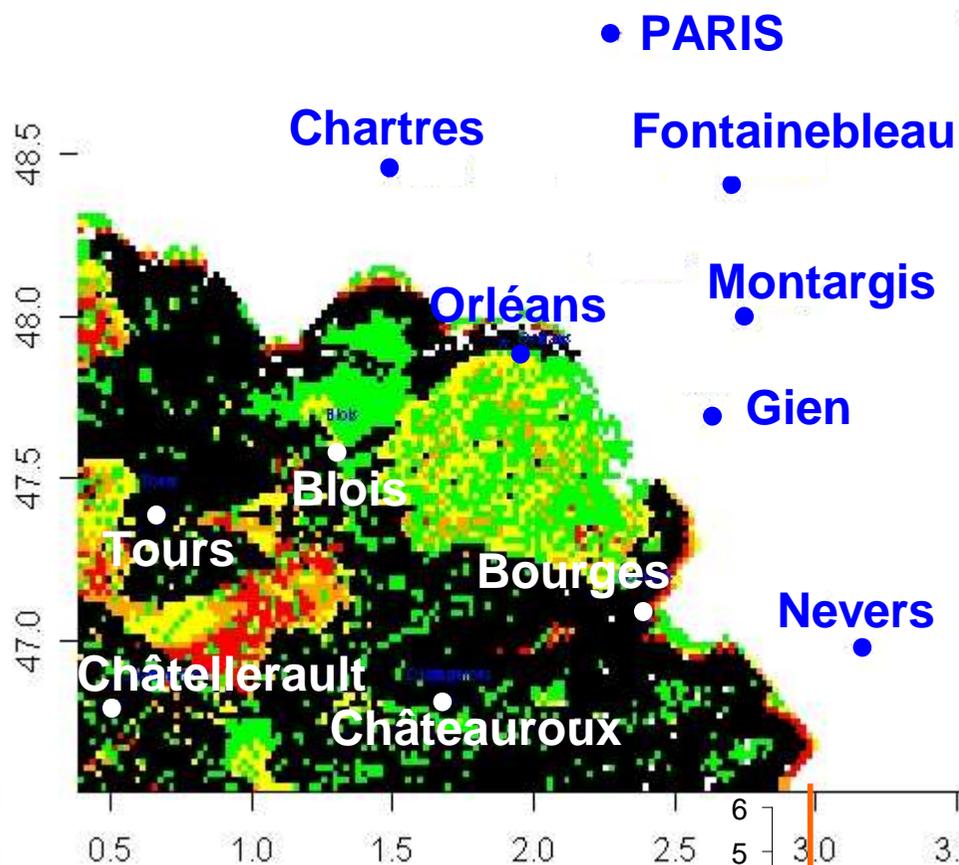


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

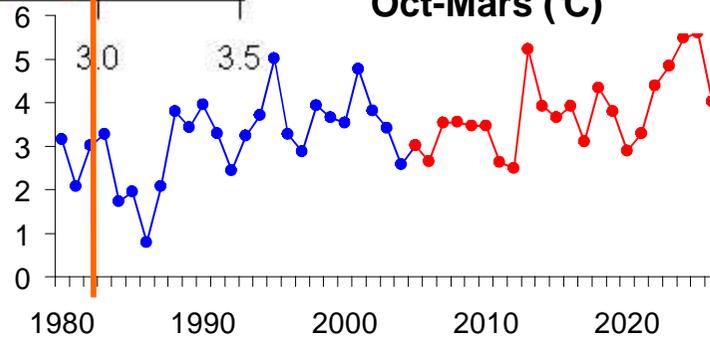
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



# Reconstruction par le modèle Année 1982

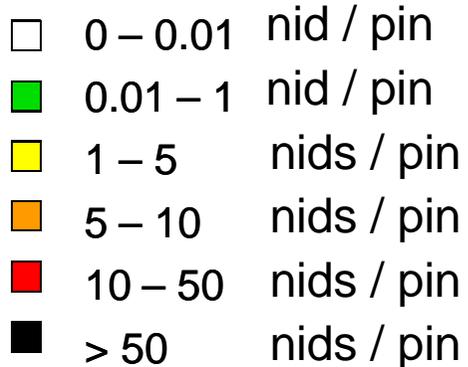
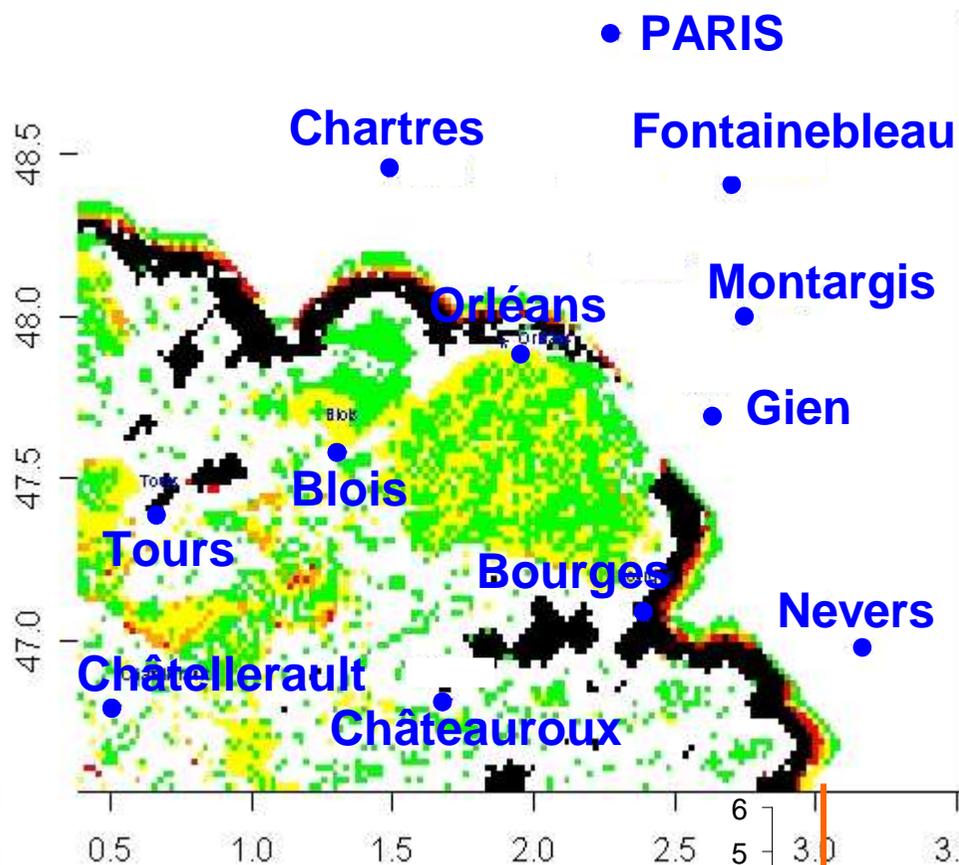


Température minimale  
Oct-Mars (°C)

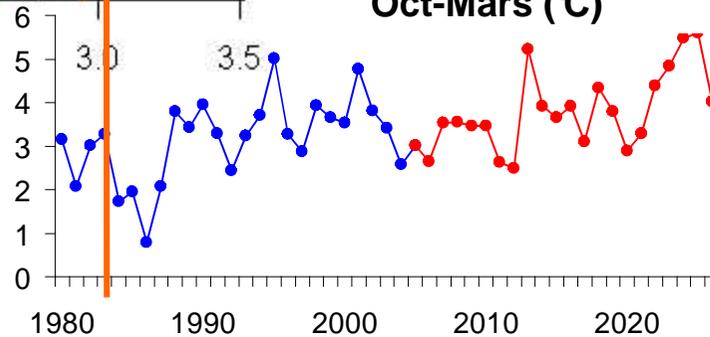


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

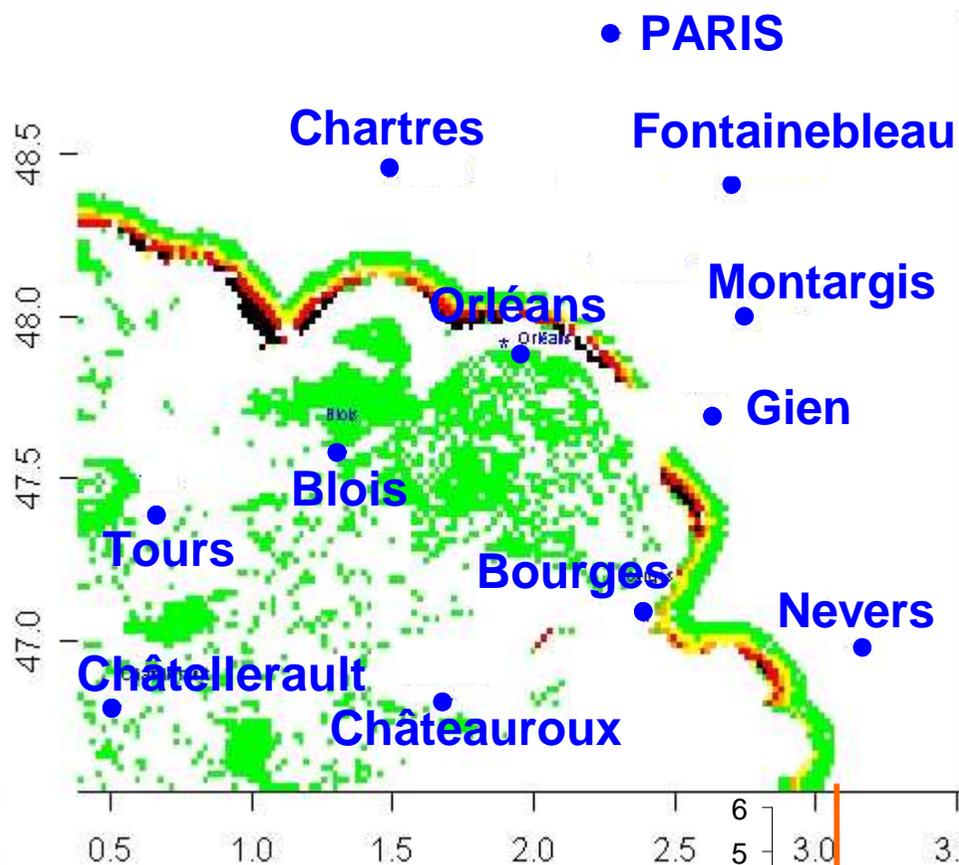
# Reconstruction par le modèle Année 1983



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

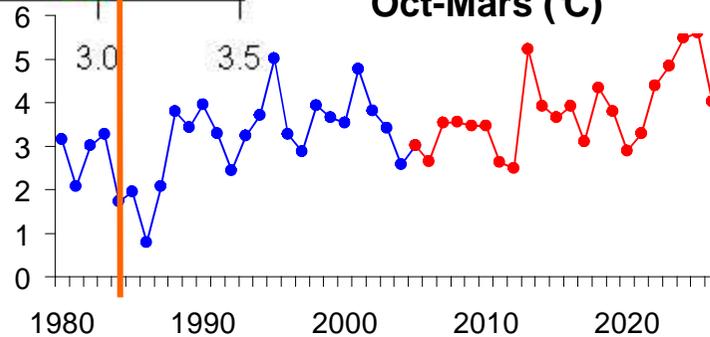


# Reconstruction par le modèle Année 1984

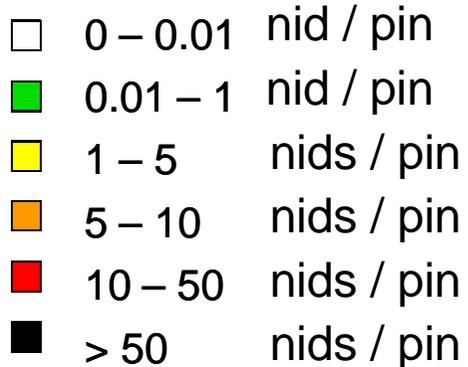
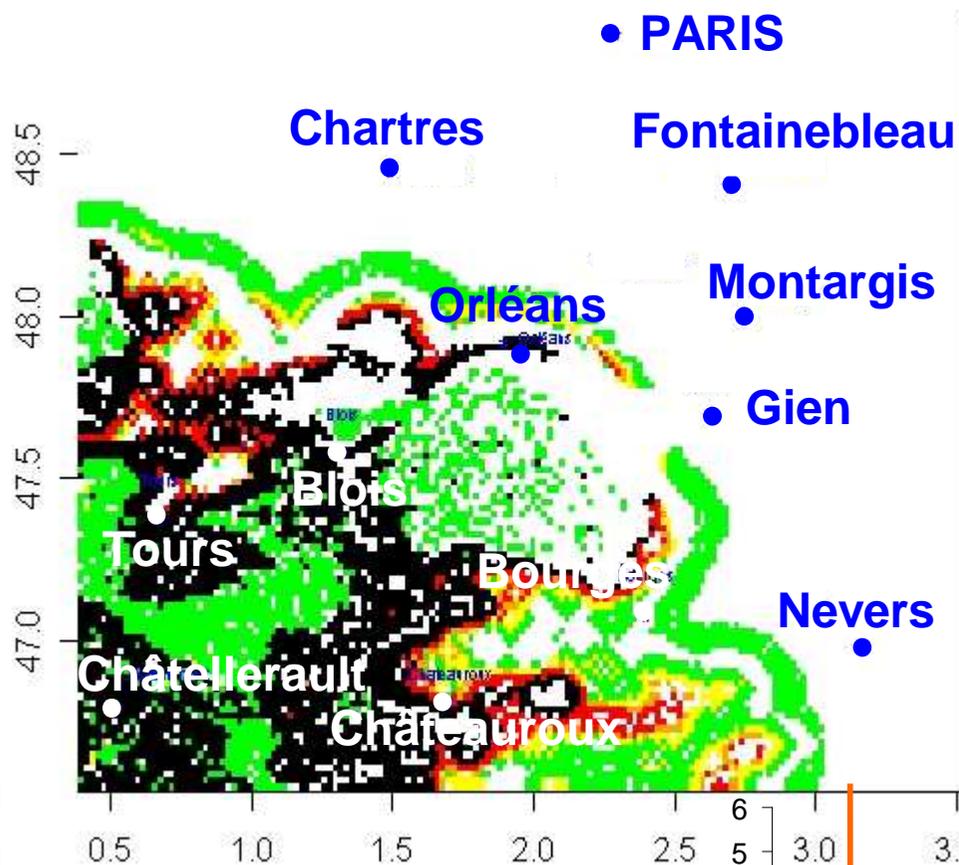


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

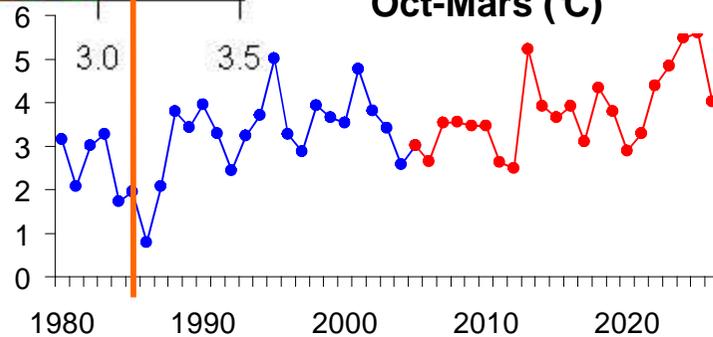
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



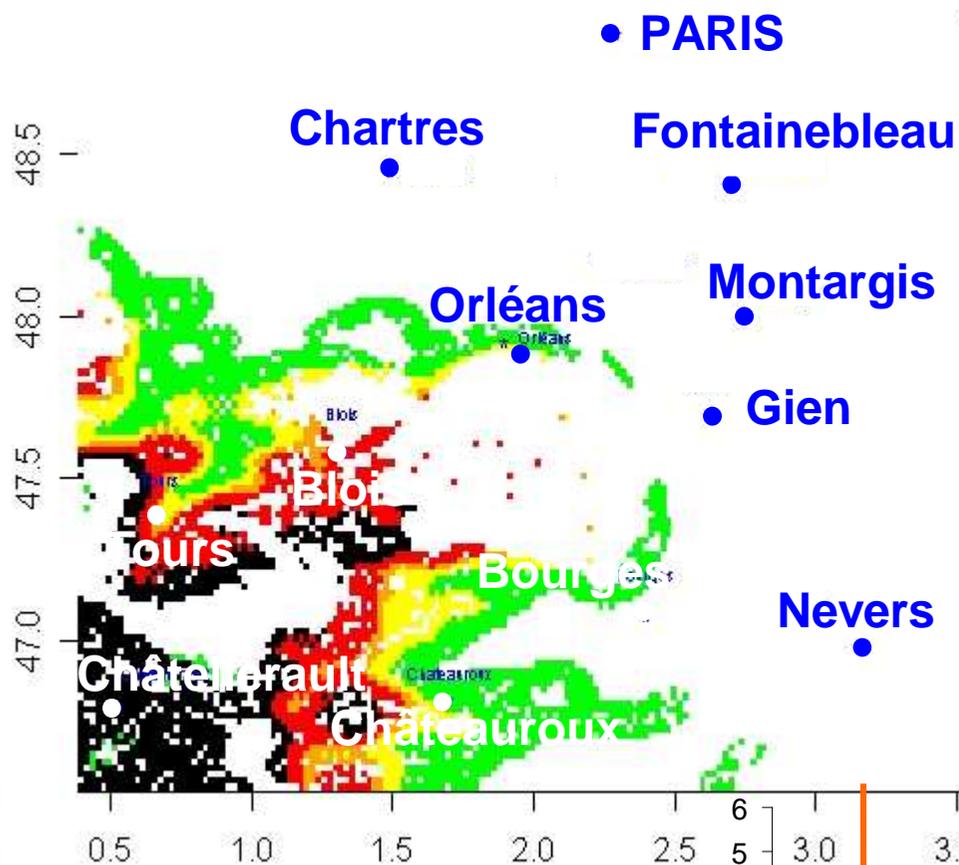
# Reconstruction par le modèle Année 1985



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

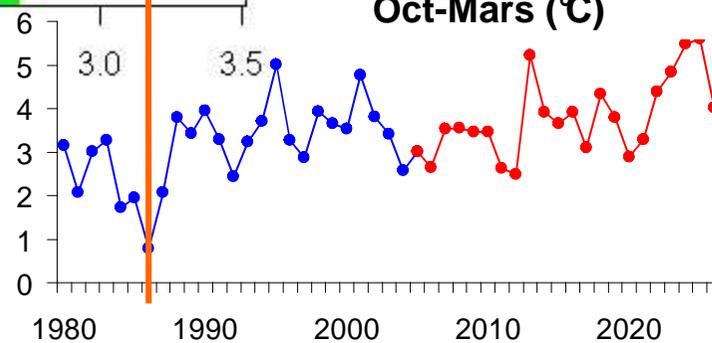


# Reconstruction par le modèle Année 1986



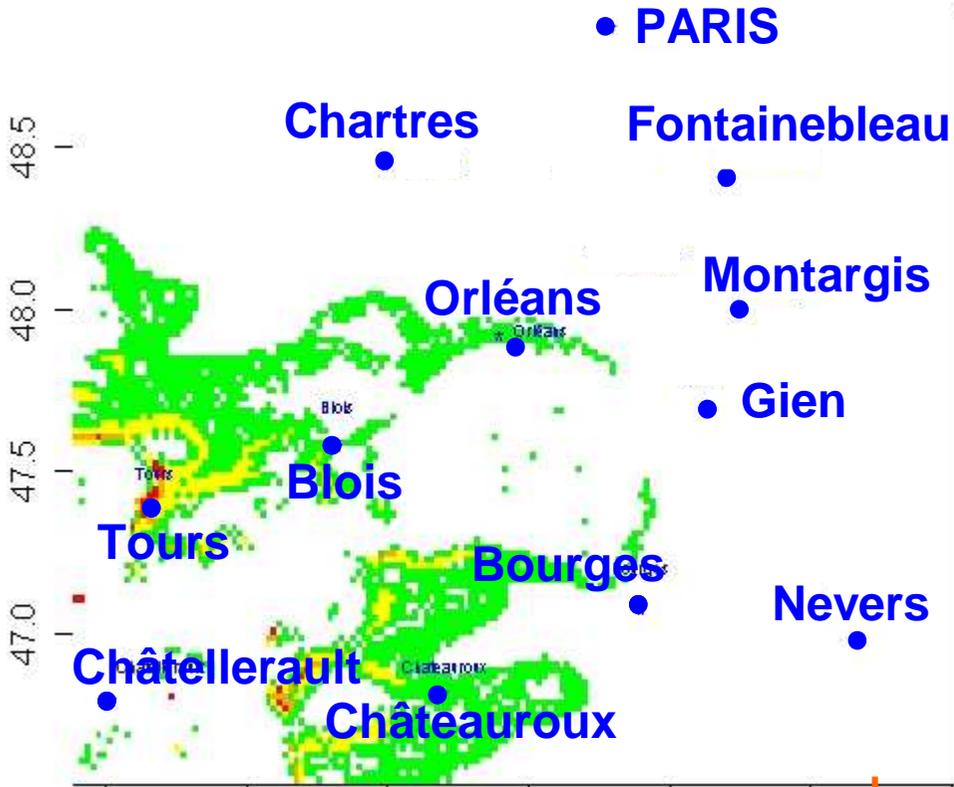
- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

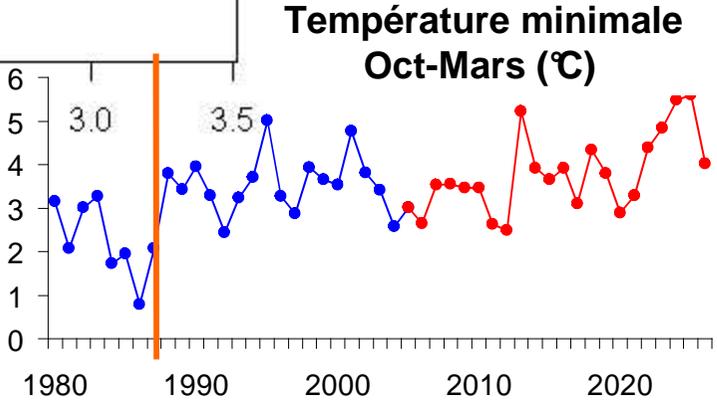


# Reconstruction par le modèle

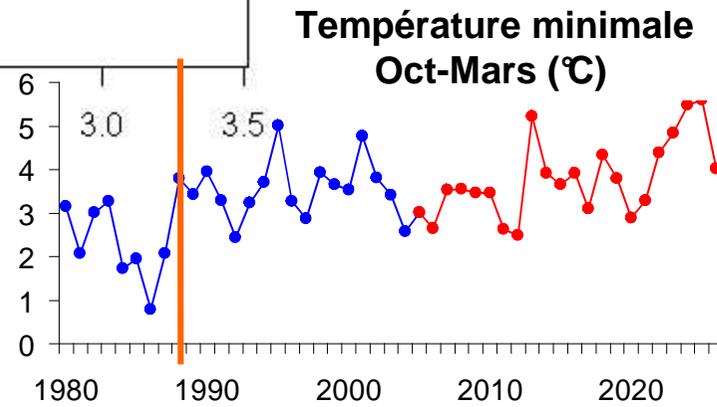
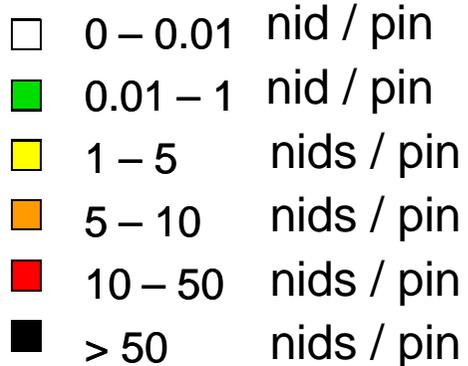
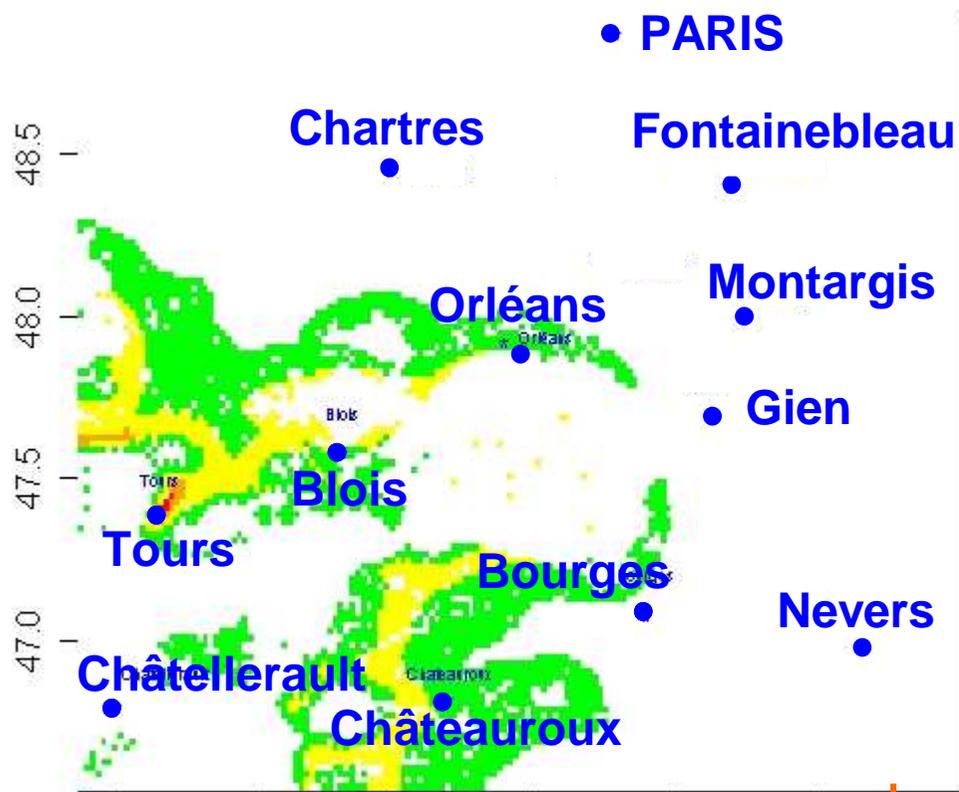
## Année 1987



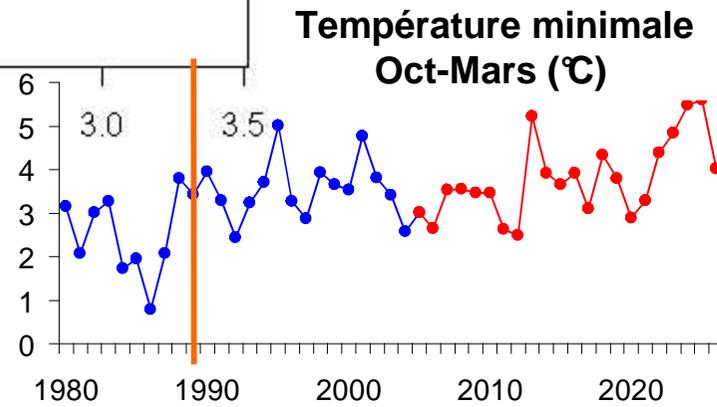
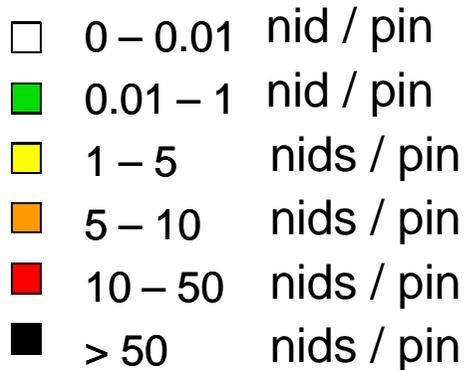
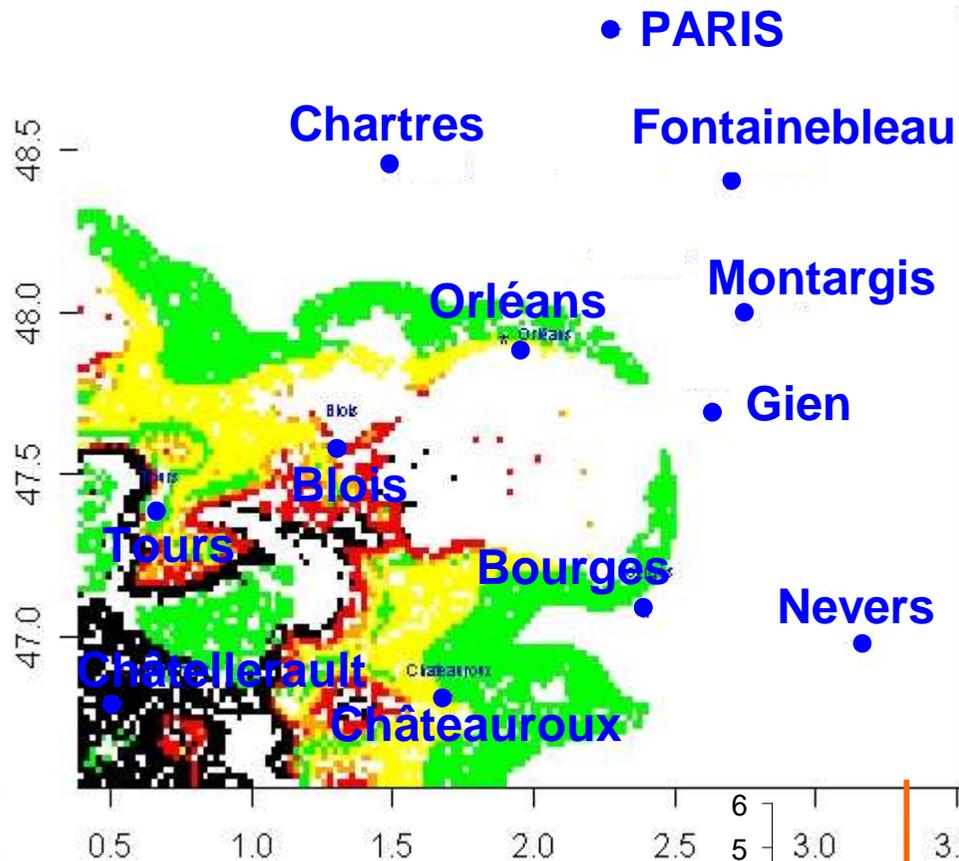
- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin



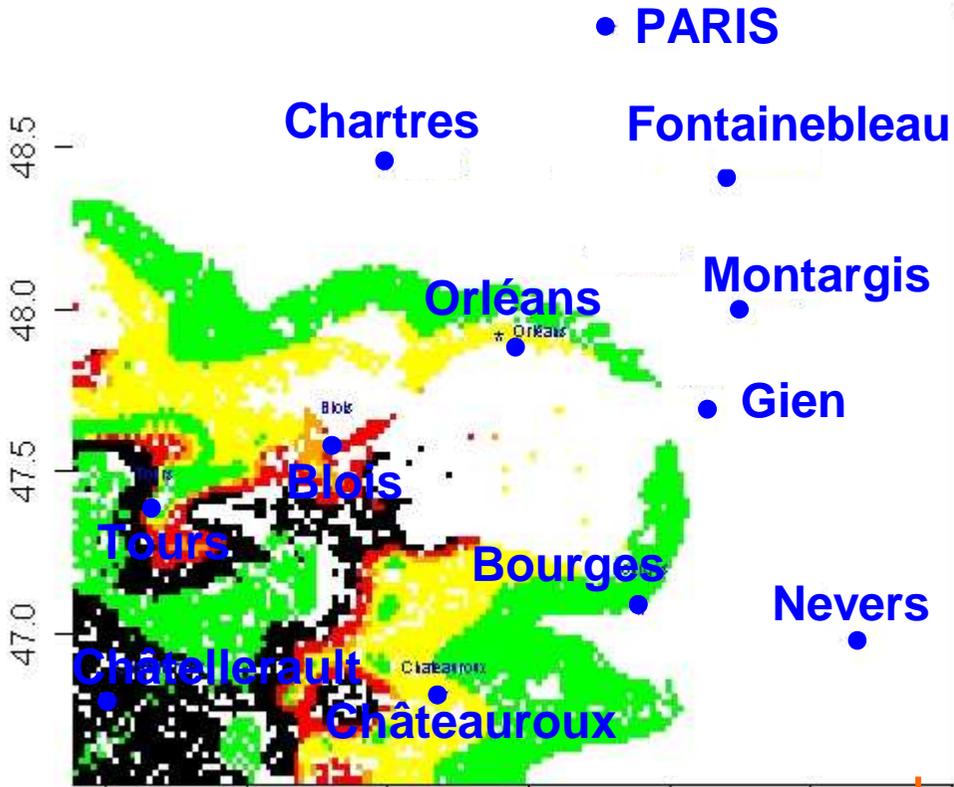
# Reconstruction par le modèle Année 1988



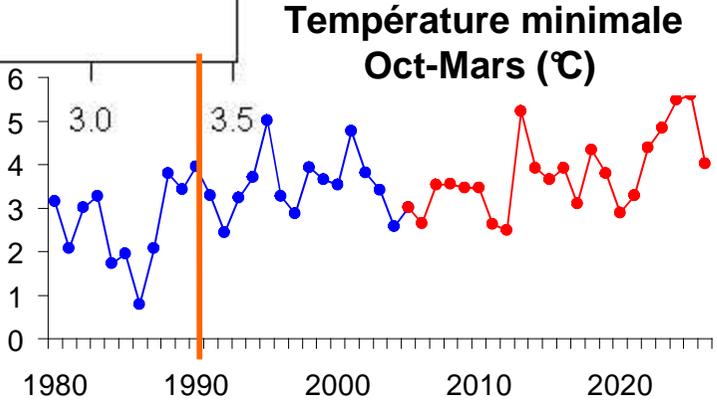
# Reconstruction par le modèle Année 1989



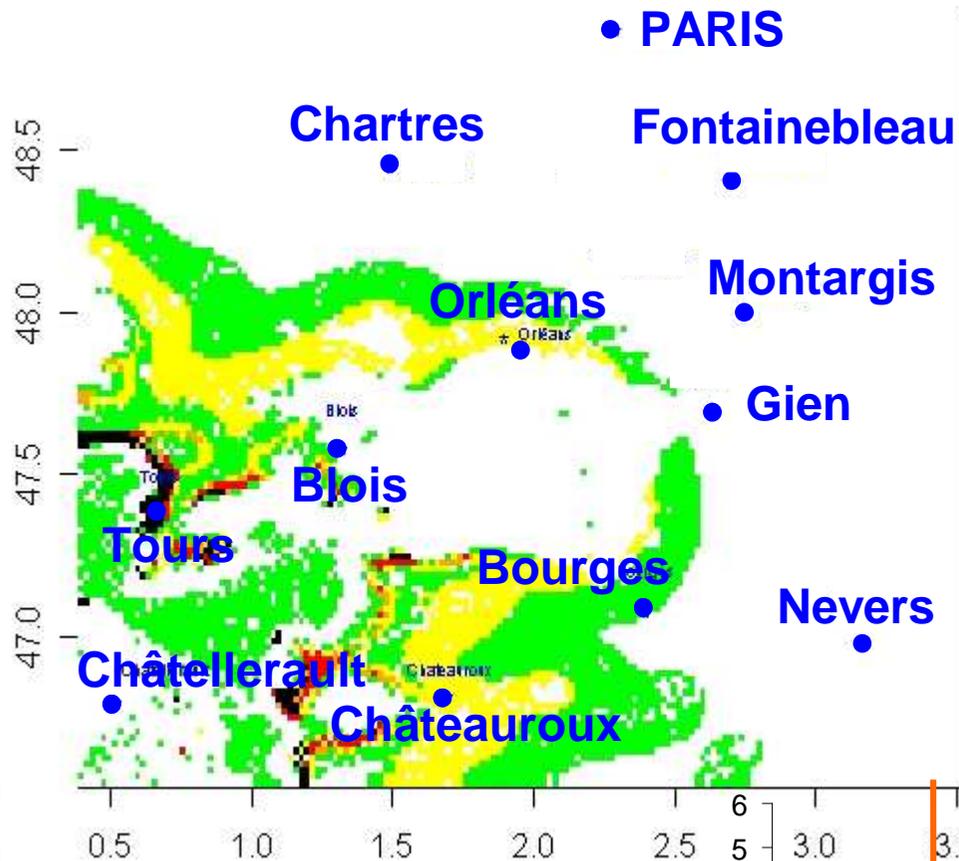
# Reconstruction par le modèle Année 1990



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

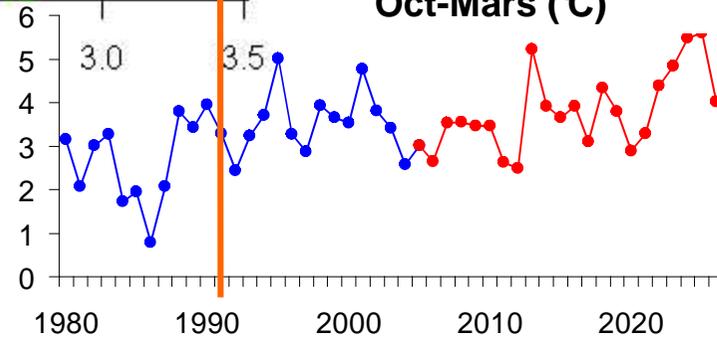


# Reconstruction par le modèle Année 1991

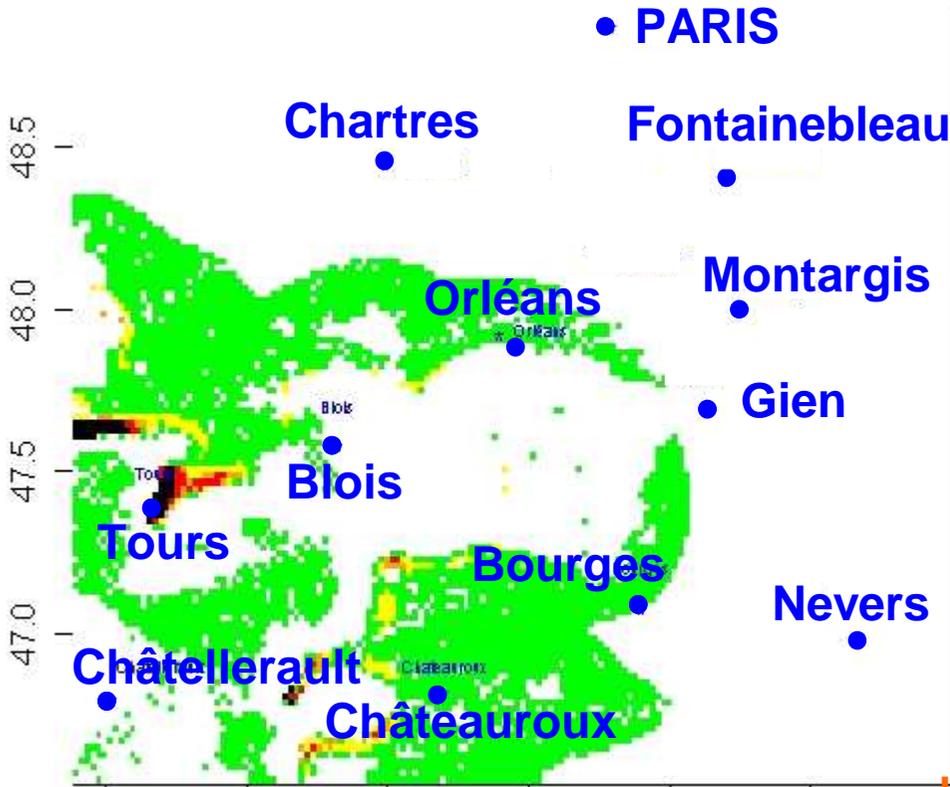


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

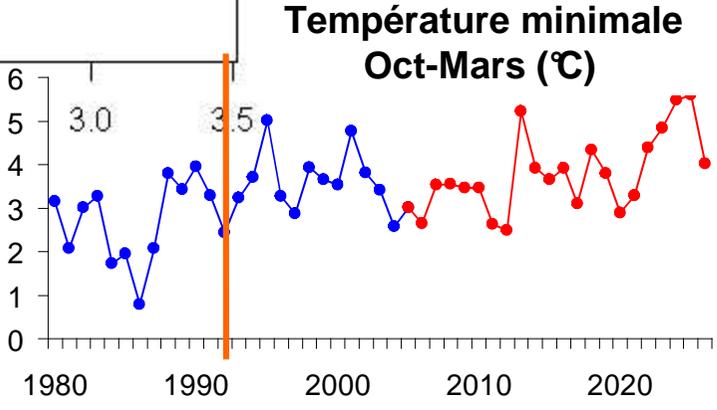
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



# Reconstruction par le modèle Année 1992

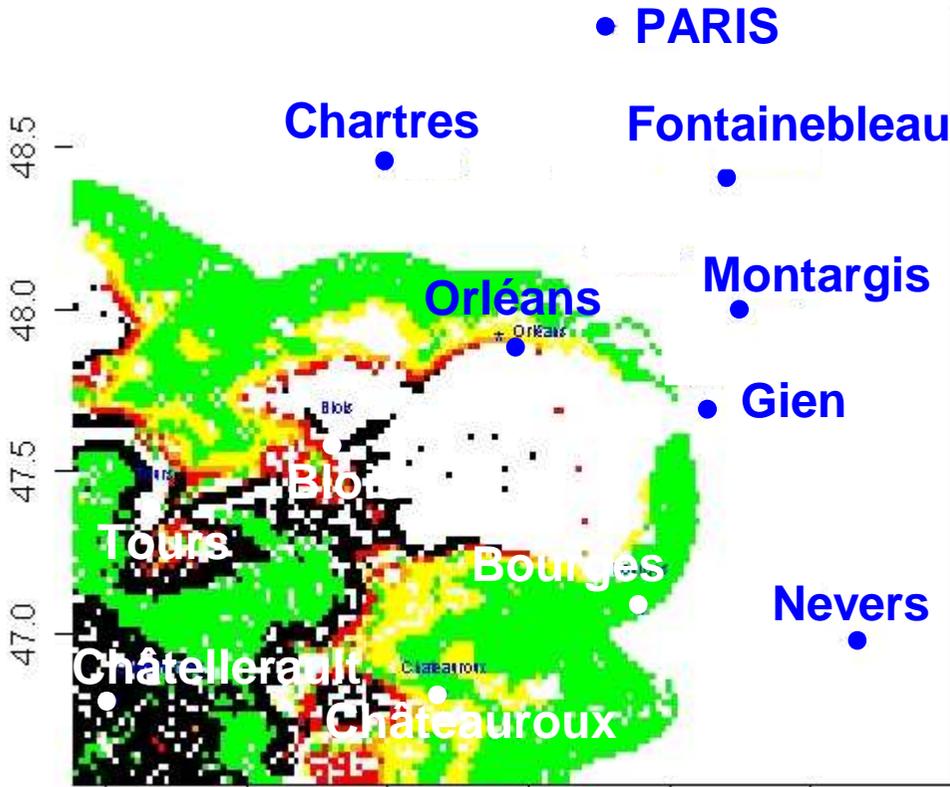


- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

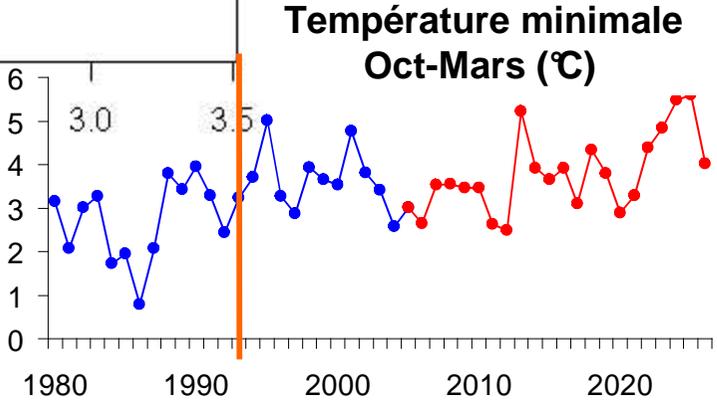


# Reconstruction par le modèle

## Année 1993

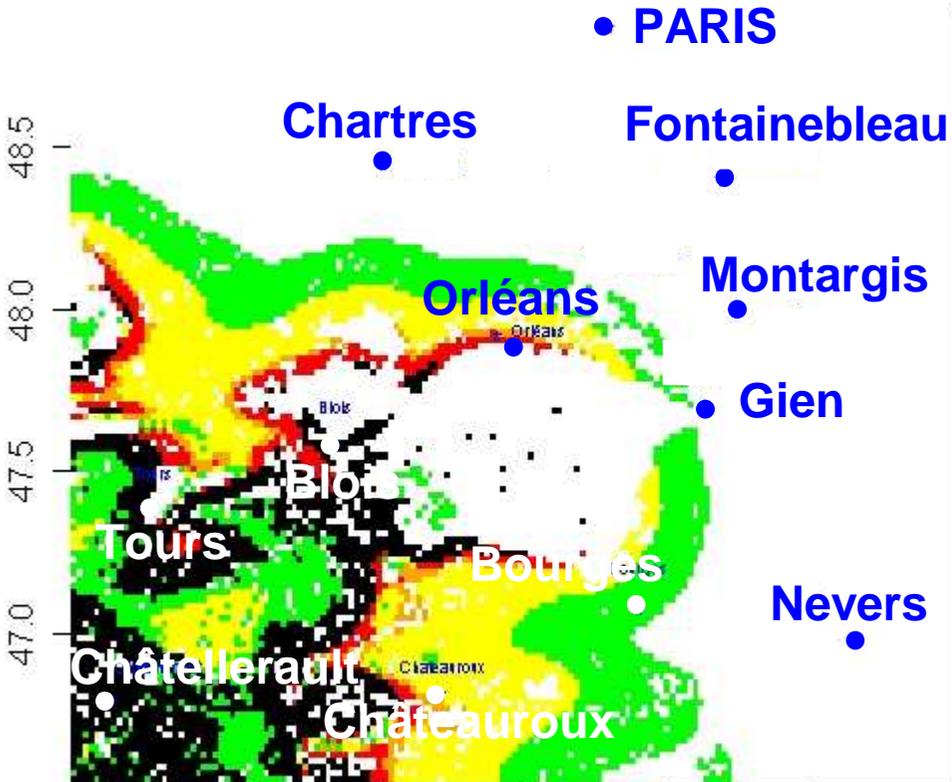


- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

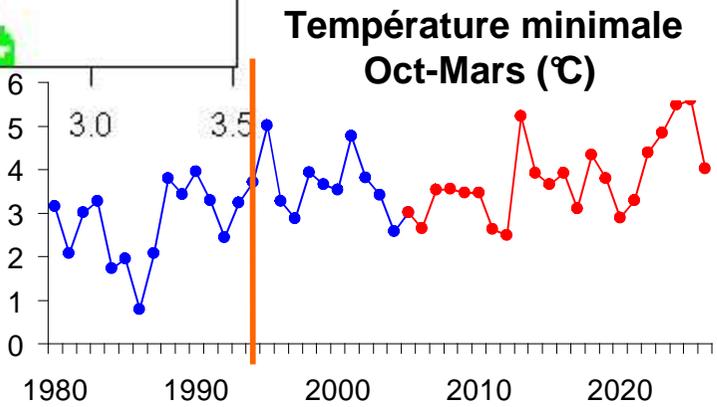


# Reconstruction par le modèle

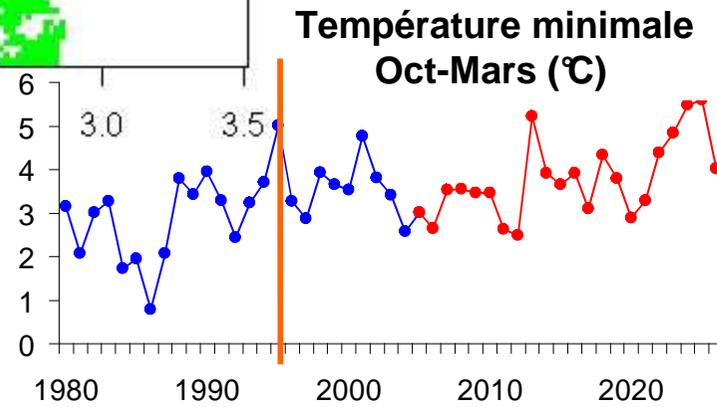
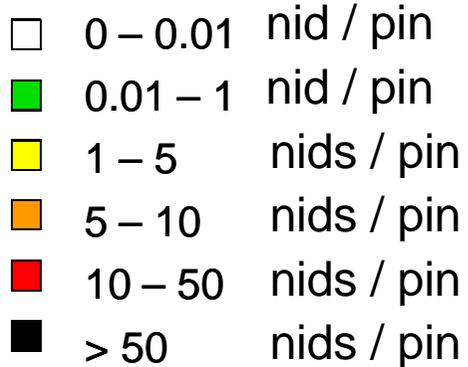
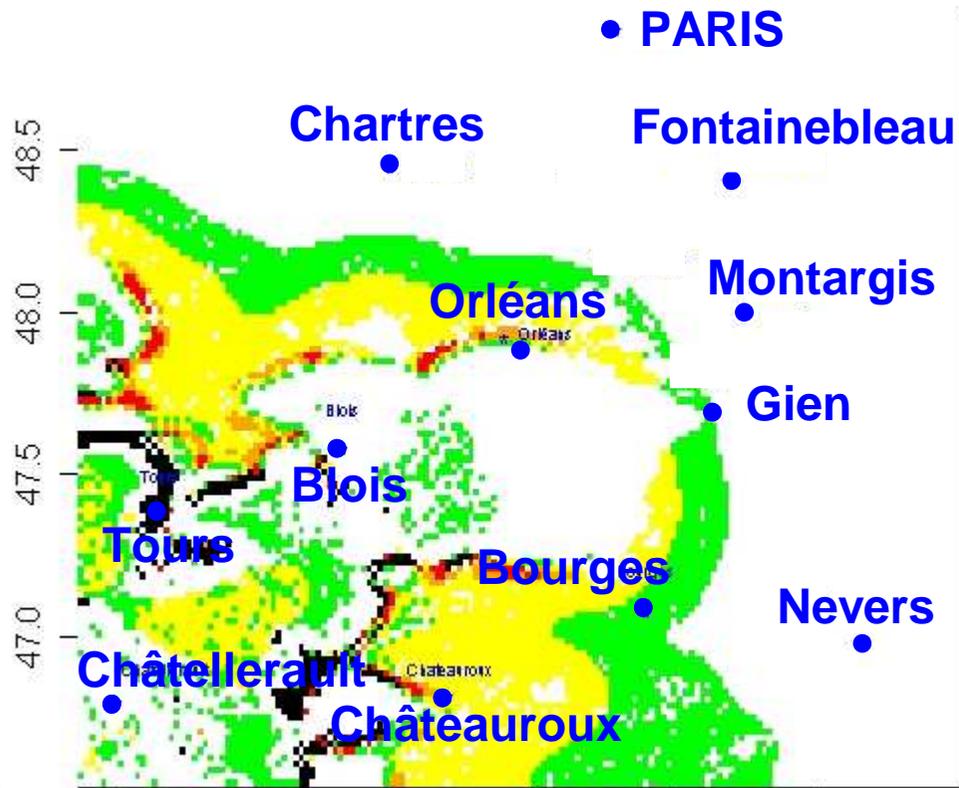
## Année 1994



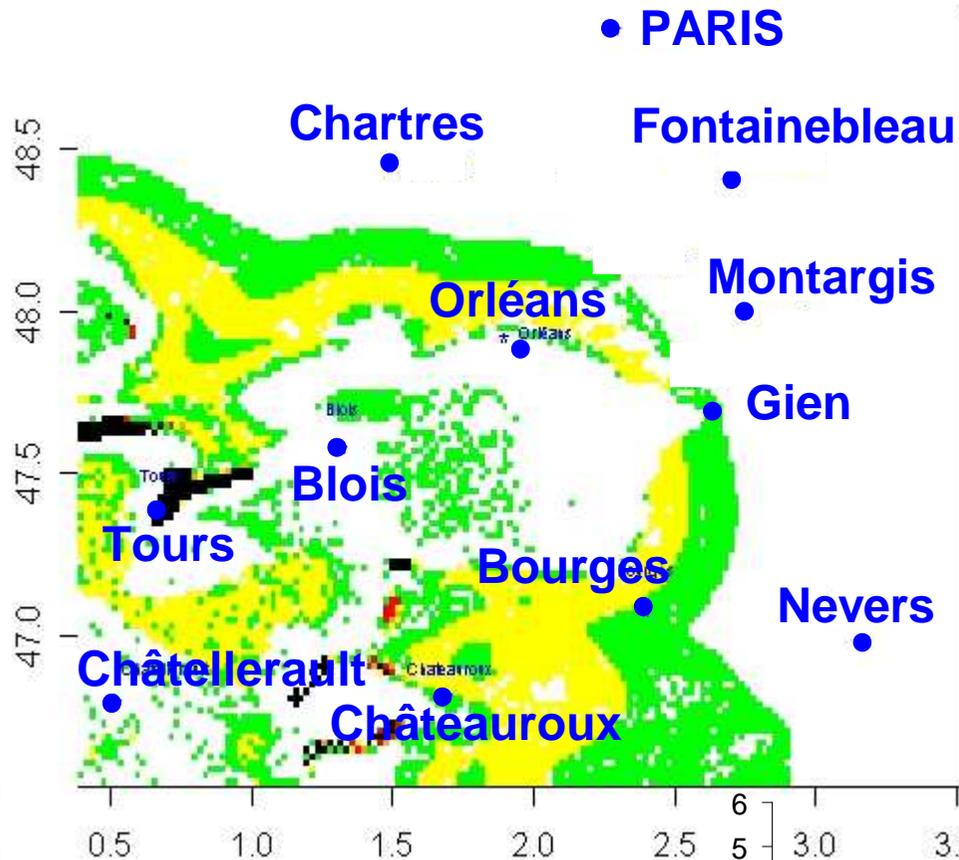
- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin



# Reconstruction par le modèle Année 1995

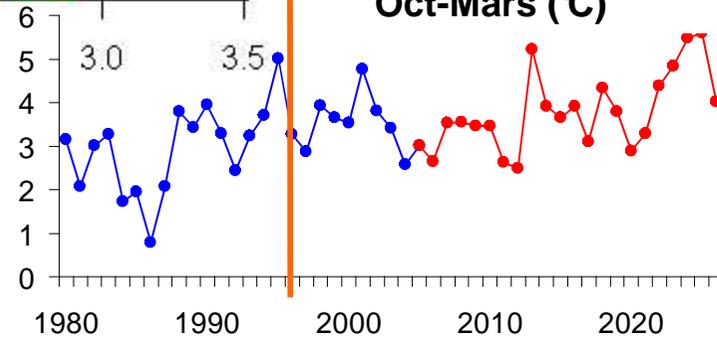


# Reconstruction par le modèle Année 1996

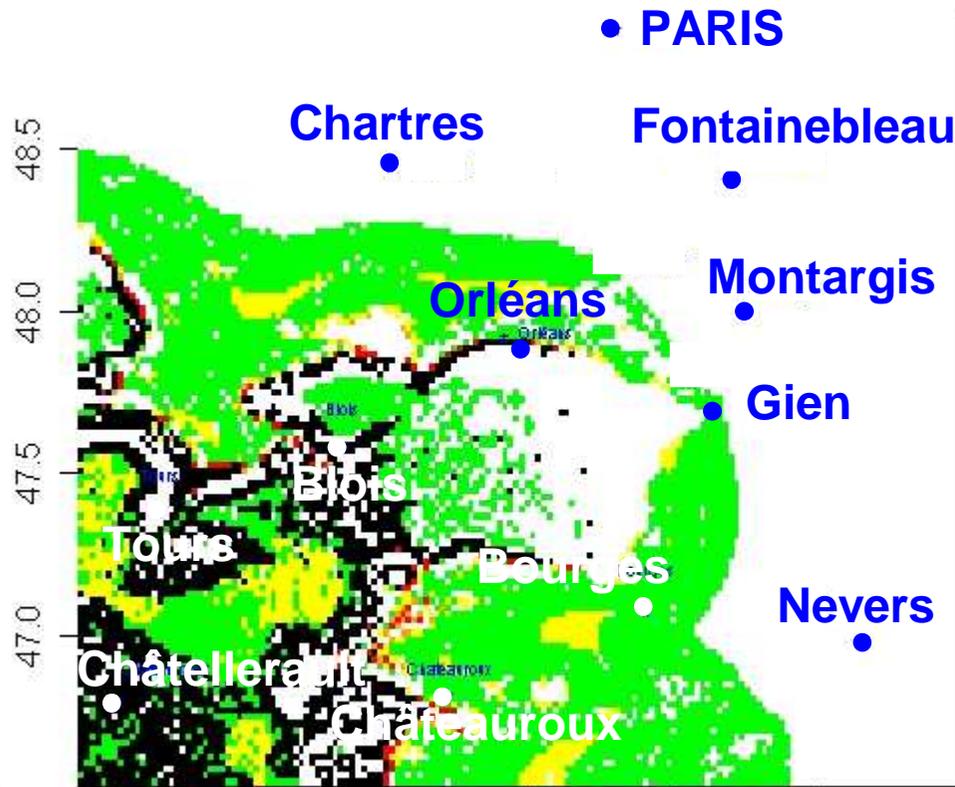


- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

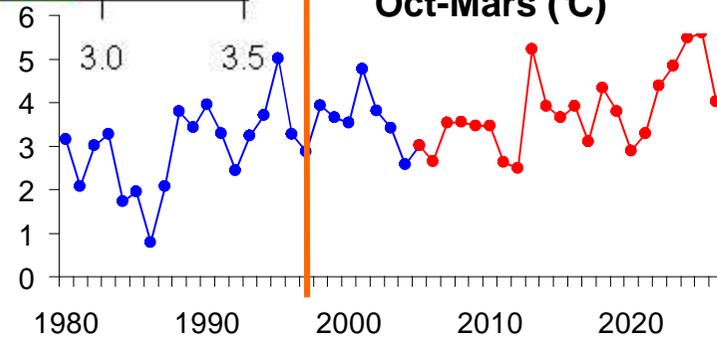


# Reconstruction par le modèle Année 1997

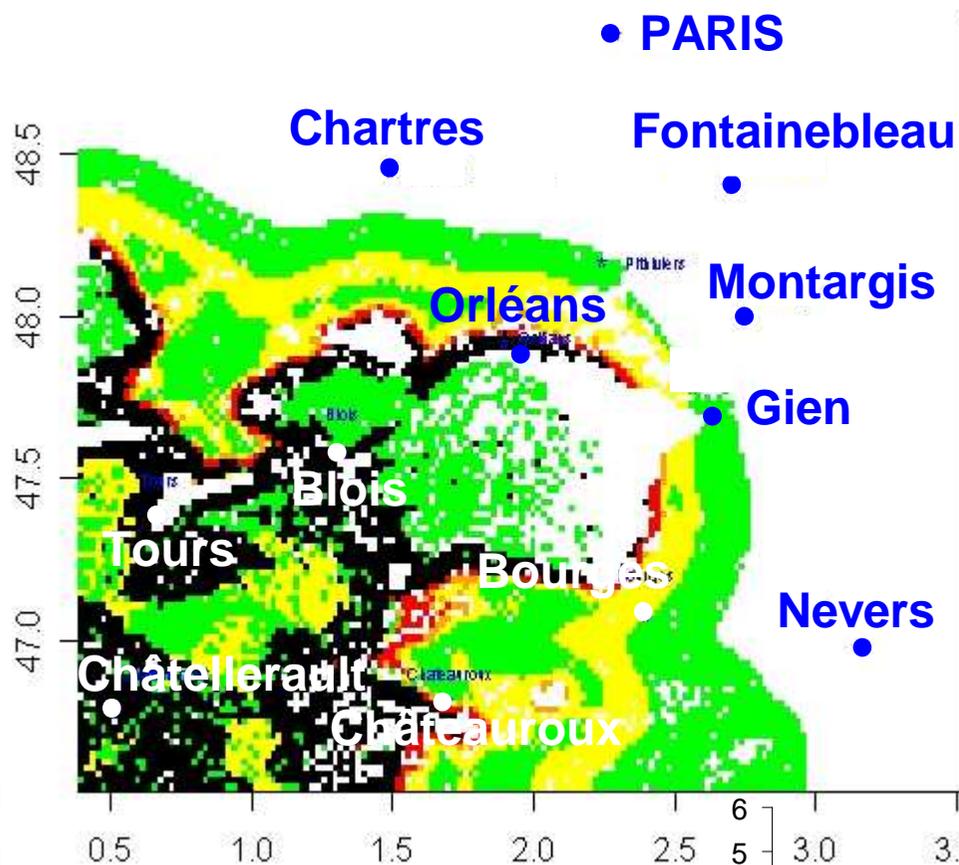


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

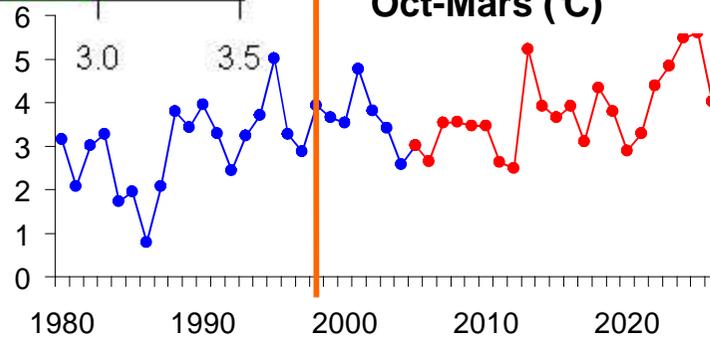


# Reconstruction par le modèle Année 1998

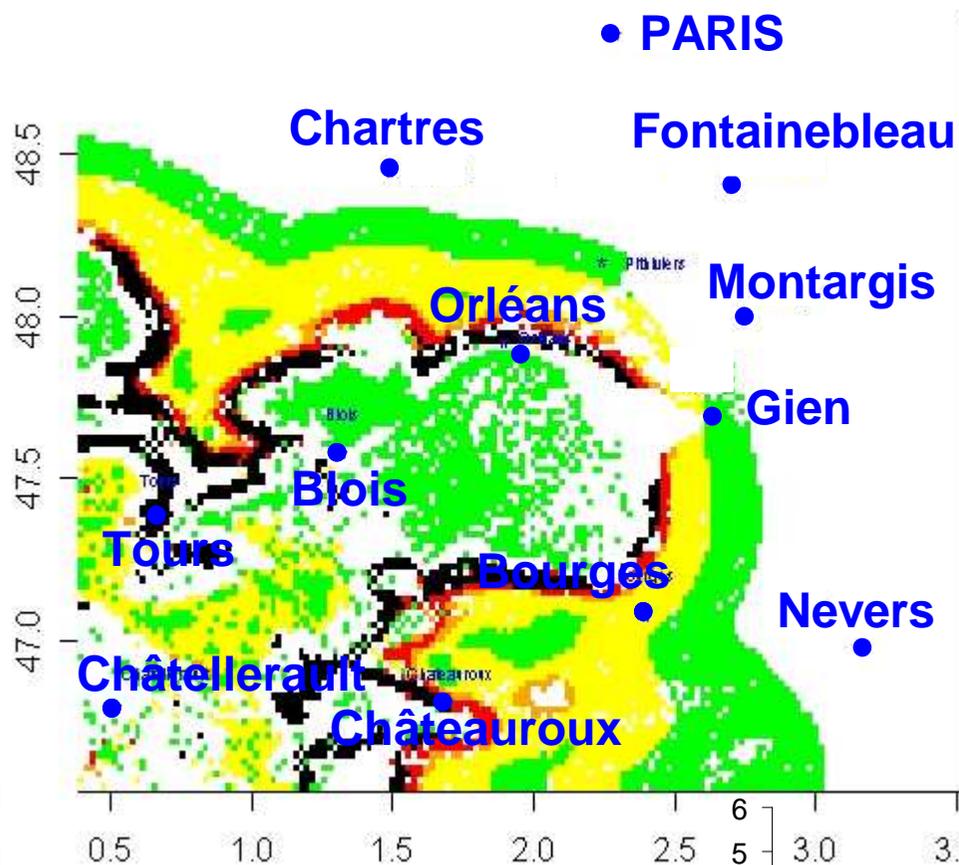


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

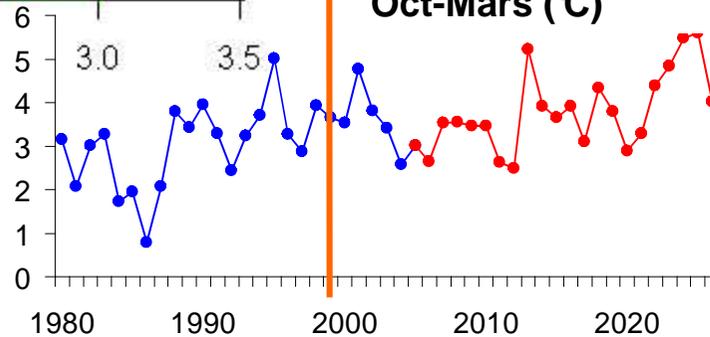


# Reconstruction par le modèle Année 1999

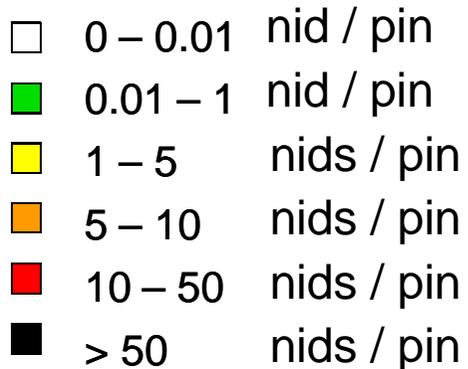
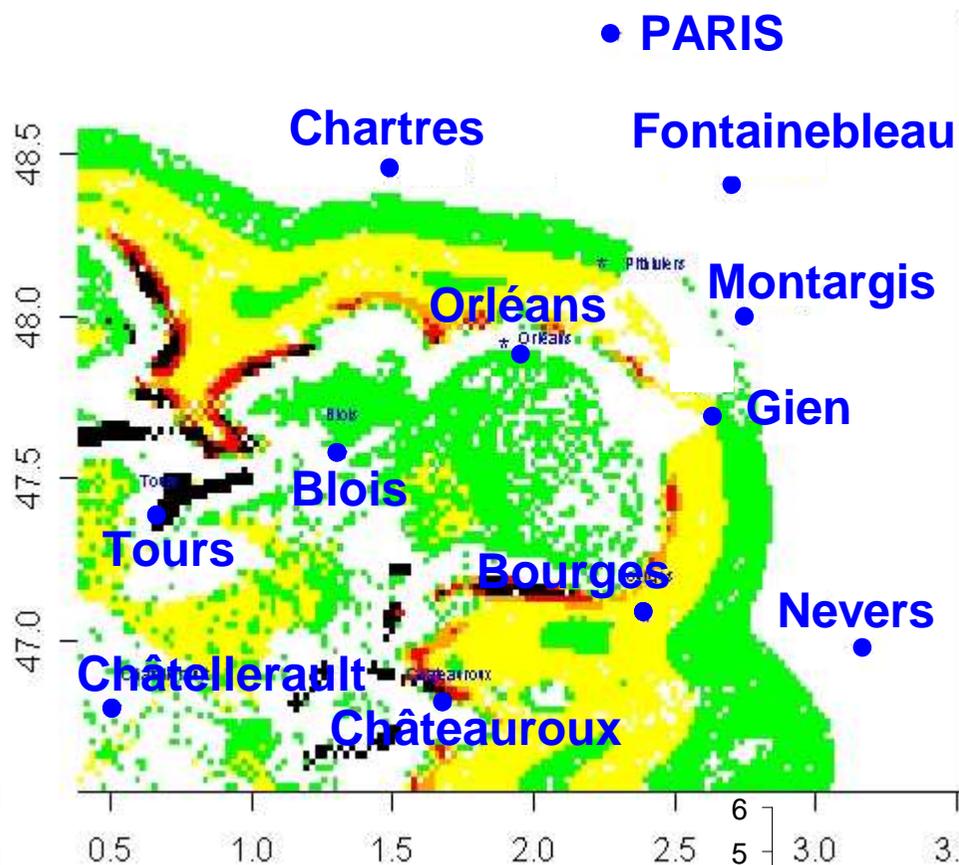


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

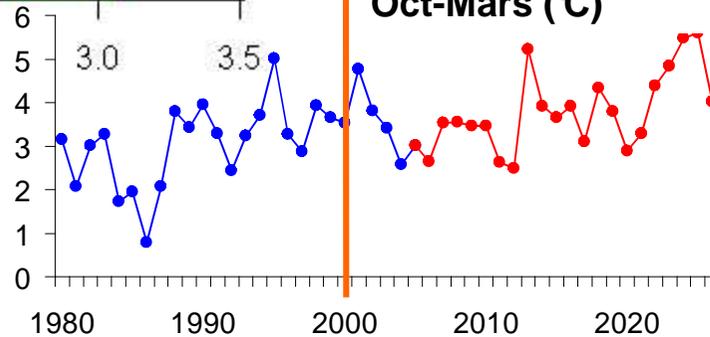
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



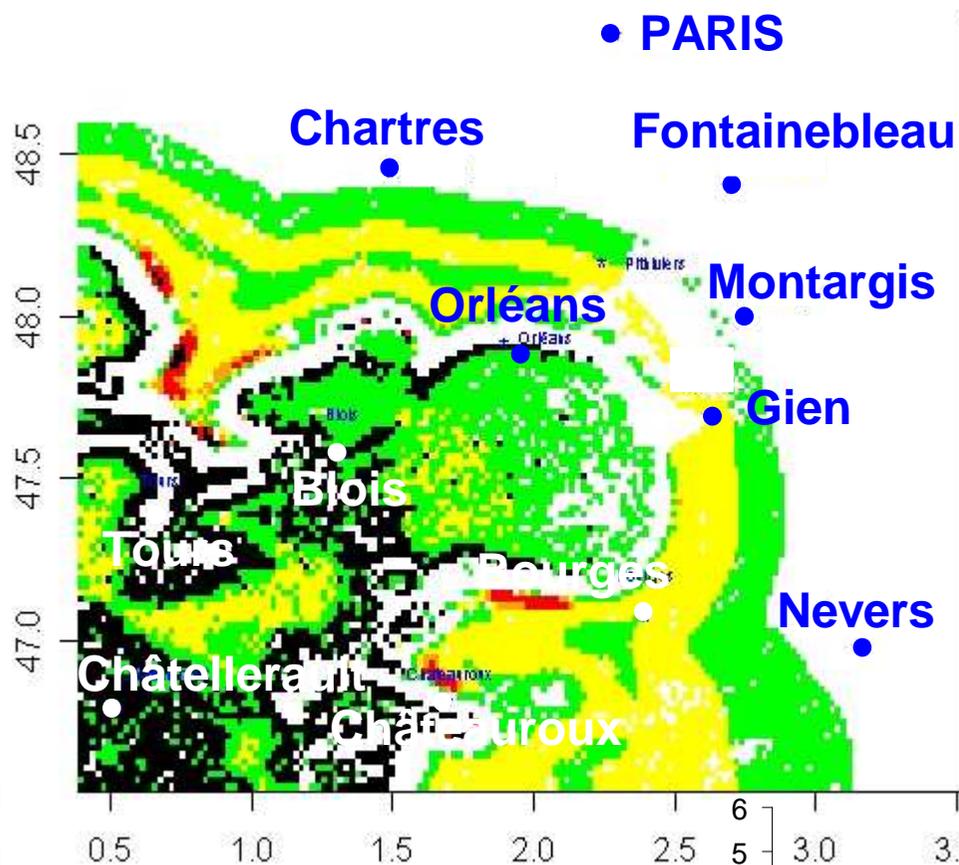
# Reconstruction par le modèle Année 2000



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

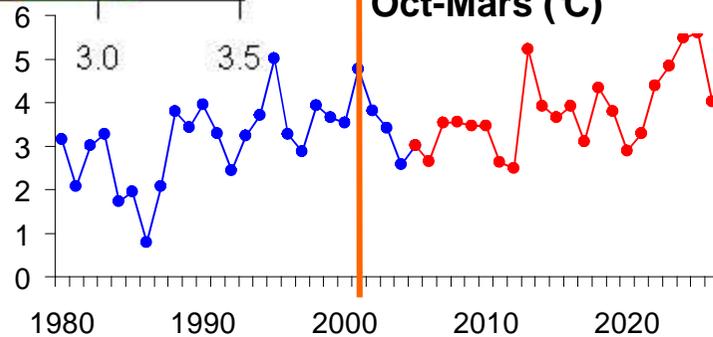


# Reconstruction par le modèle Année 2001

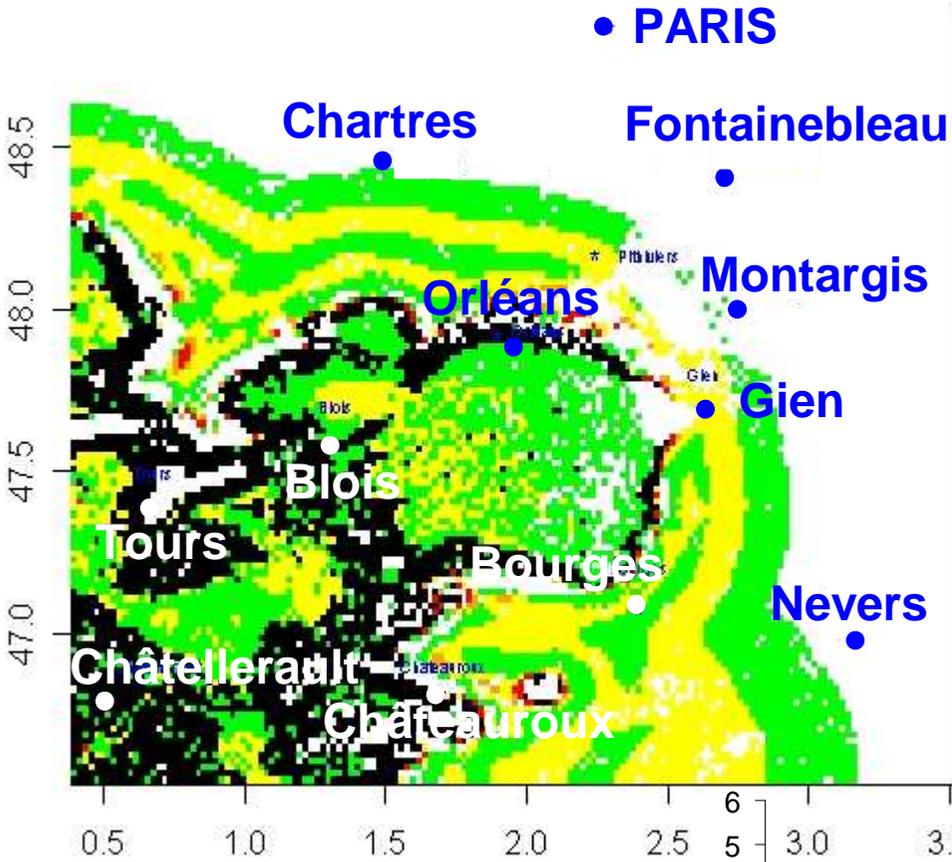


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

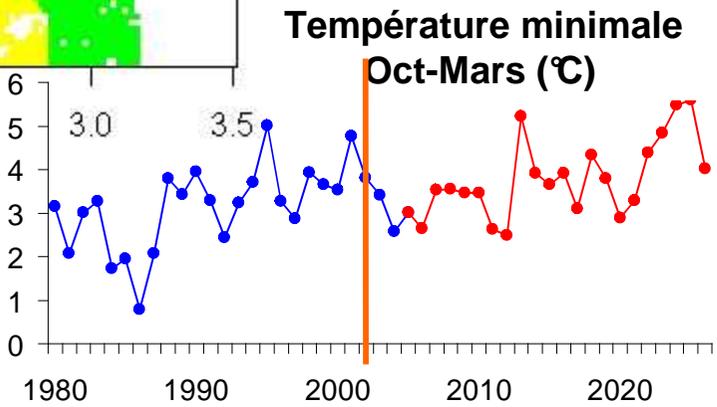
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



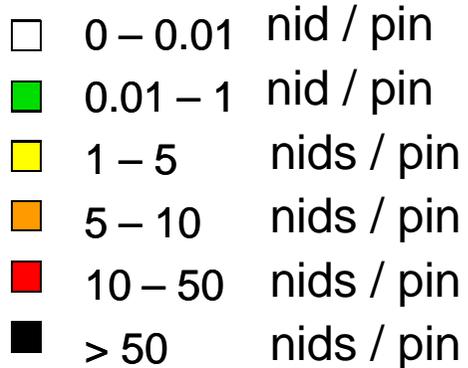
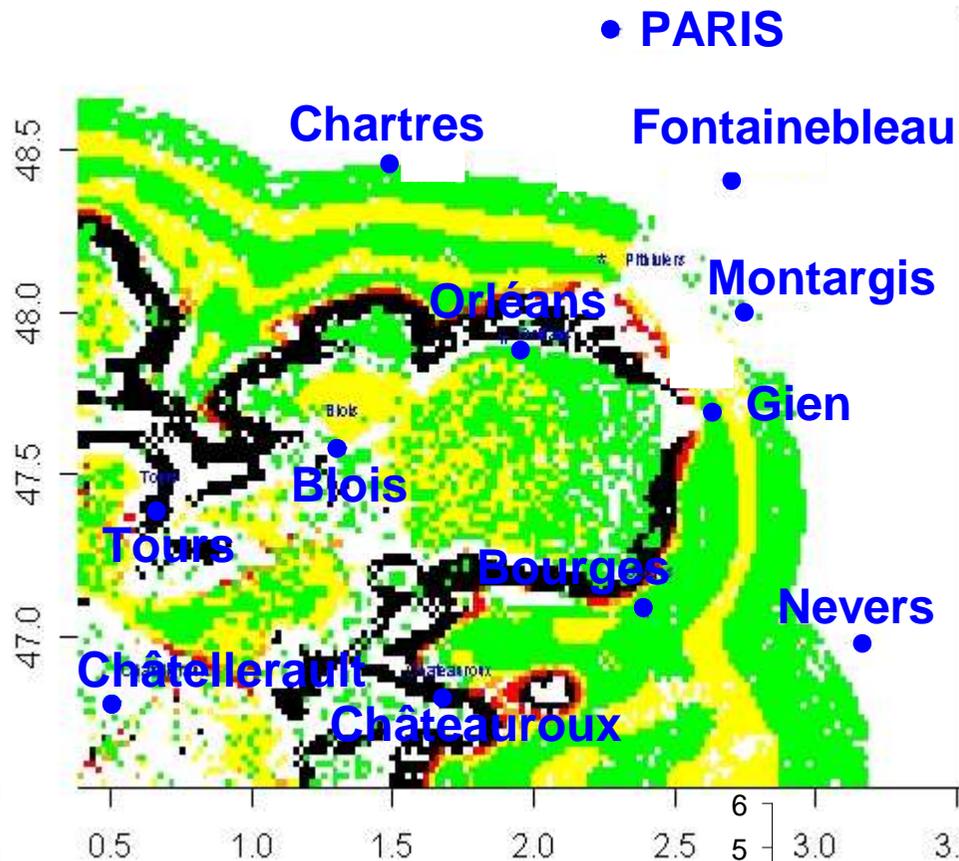
# Reconstruction par le modèle Année 2002



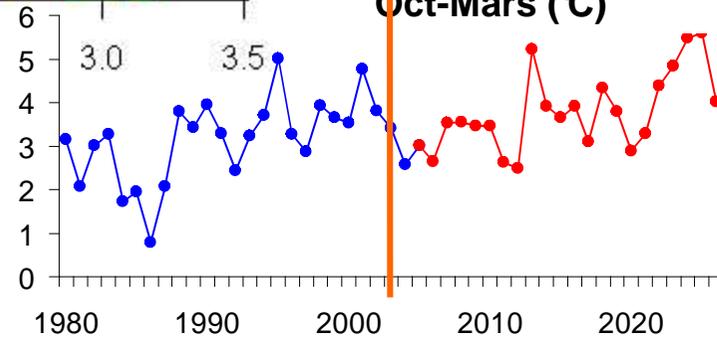
- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin



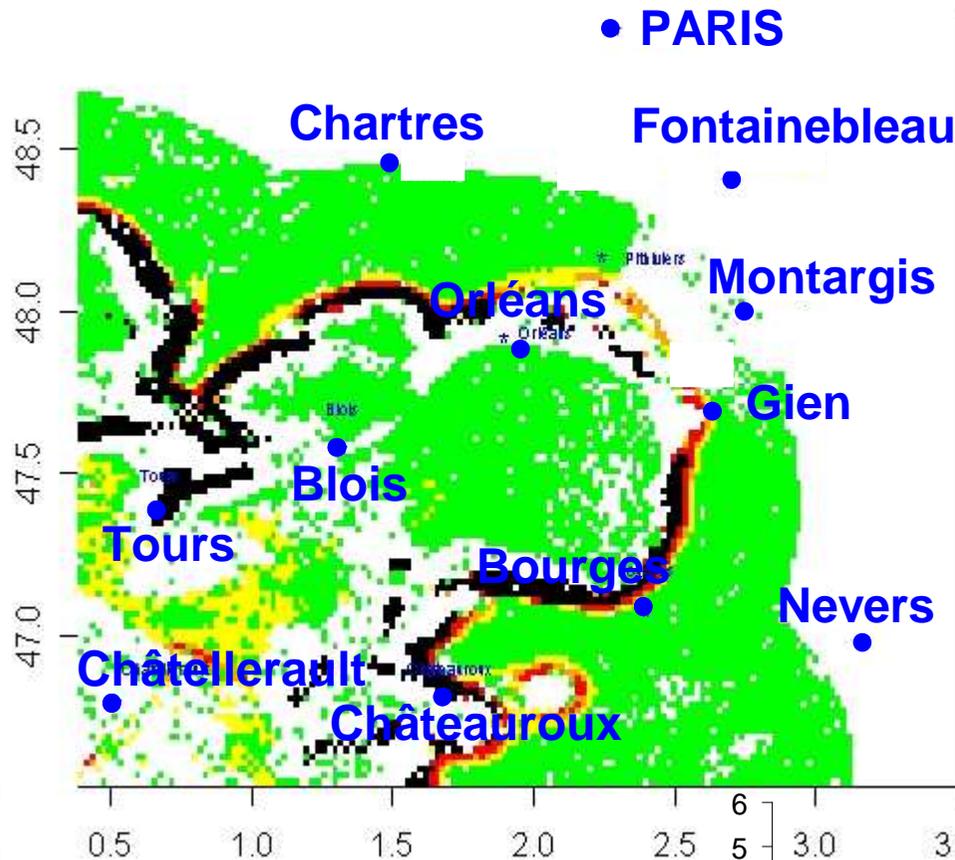
# Reconstruction par le modèle Année 2003



Température minimale  
Oct-Mars (°C)

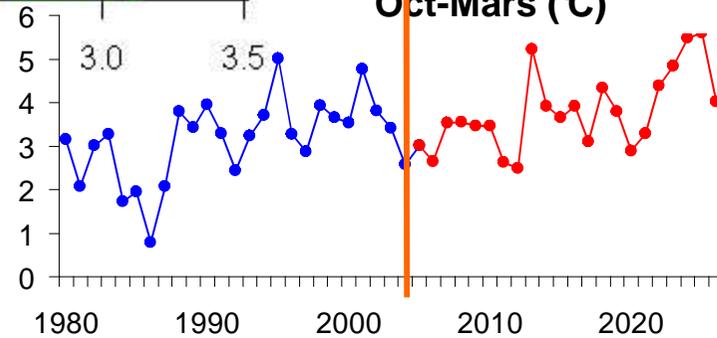


# Reconstruction par le modèle Année 2004

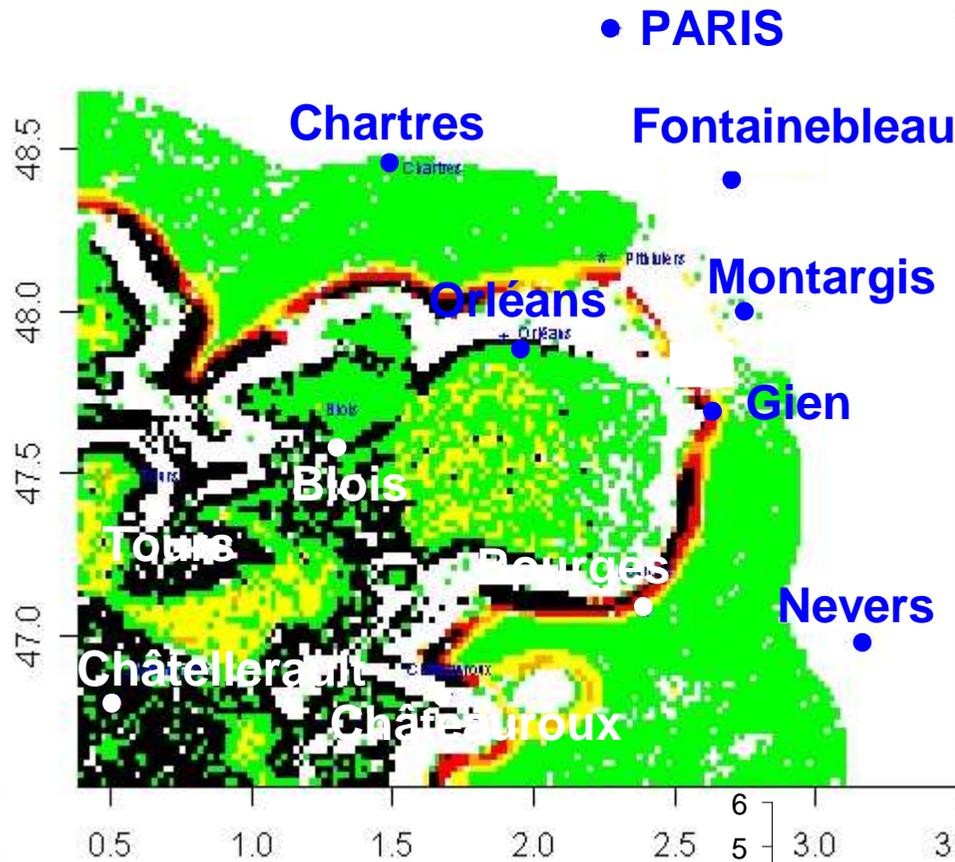


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

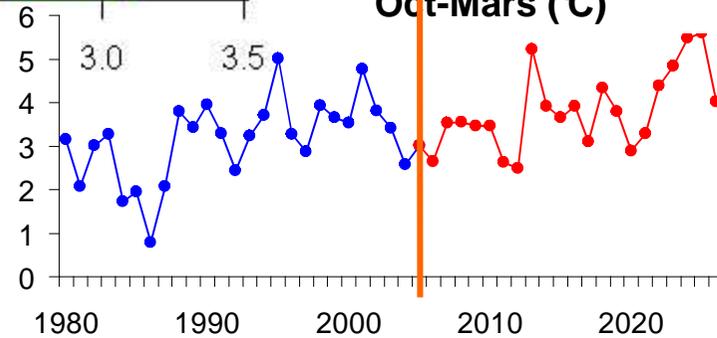


# Reconstruction par le modèle Année 2005

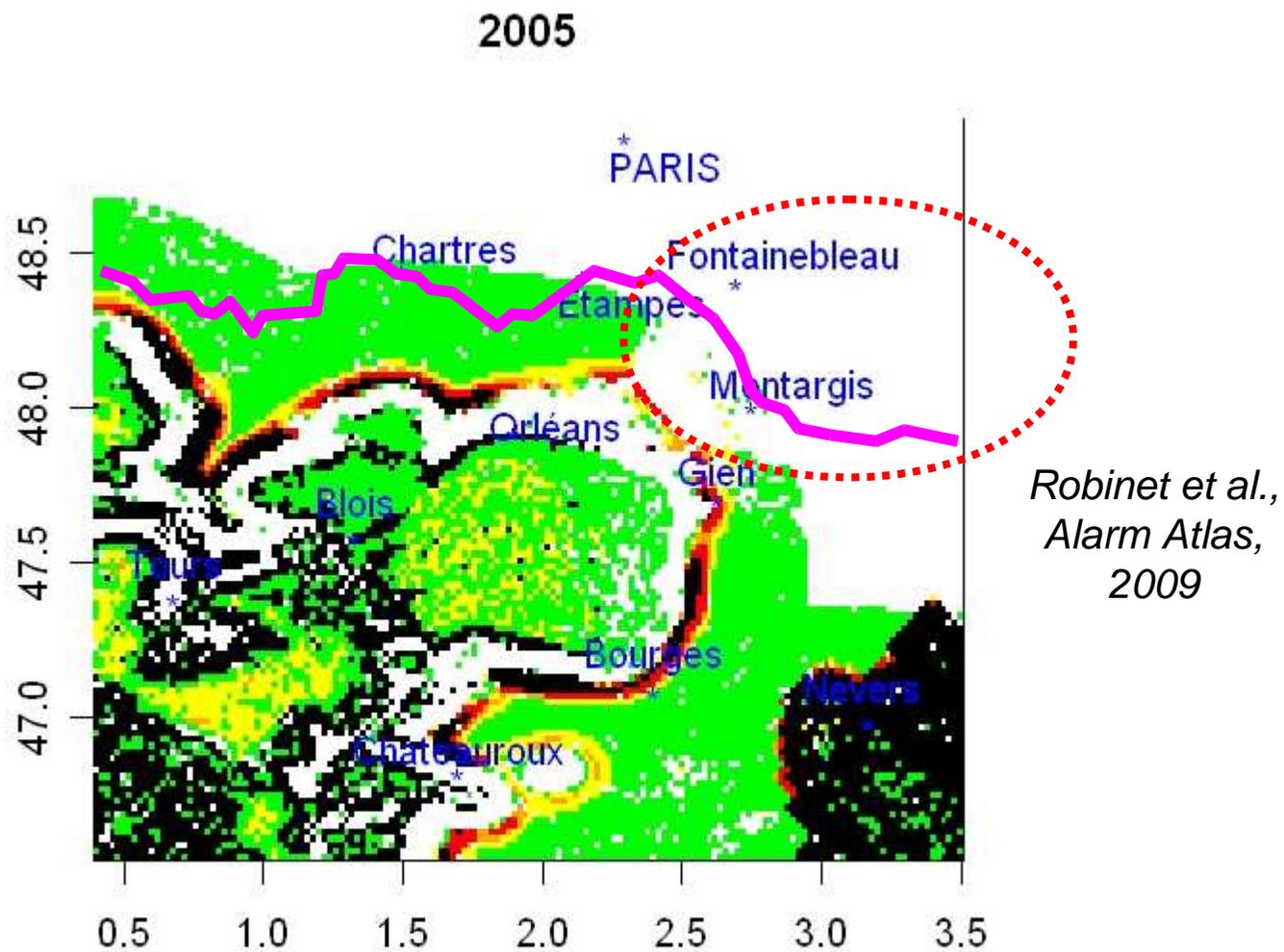


- 0 – 0.01 nids / pin
- 0.01 – 1 nids / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

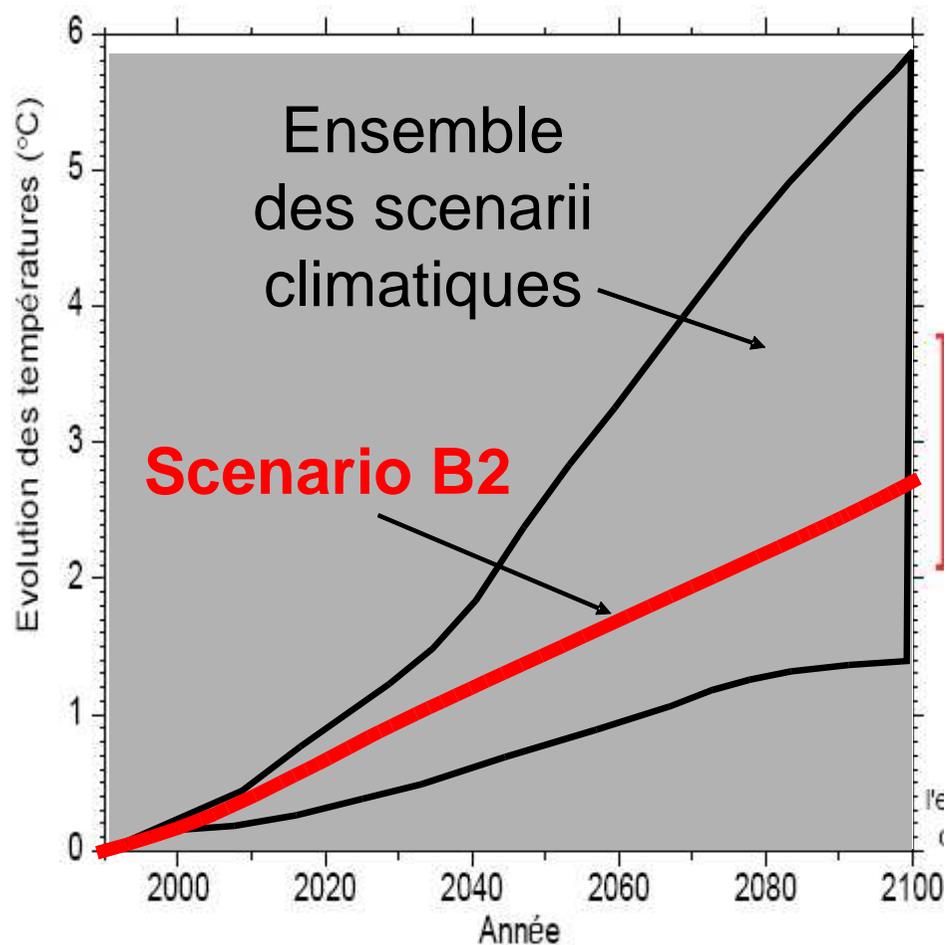
Température minimale  
Oct-Mars (°C)



# Comparaison fronts 2005 prédit vs. observé



# Simulation pour le futur à partir du scénario B2 du GIEC

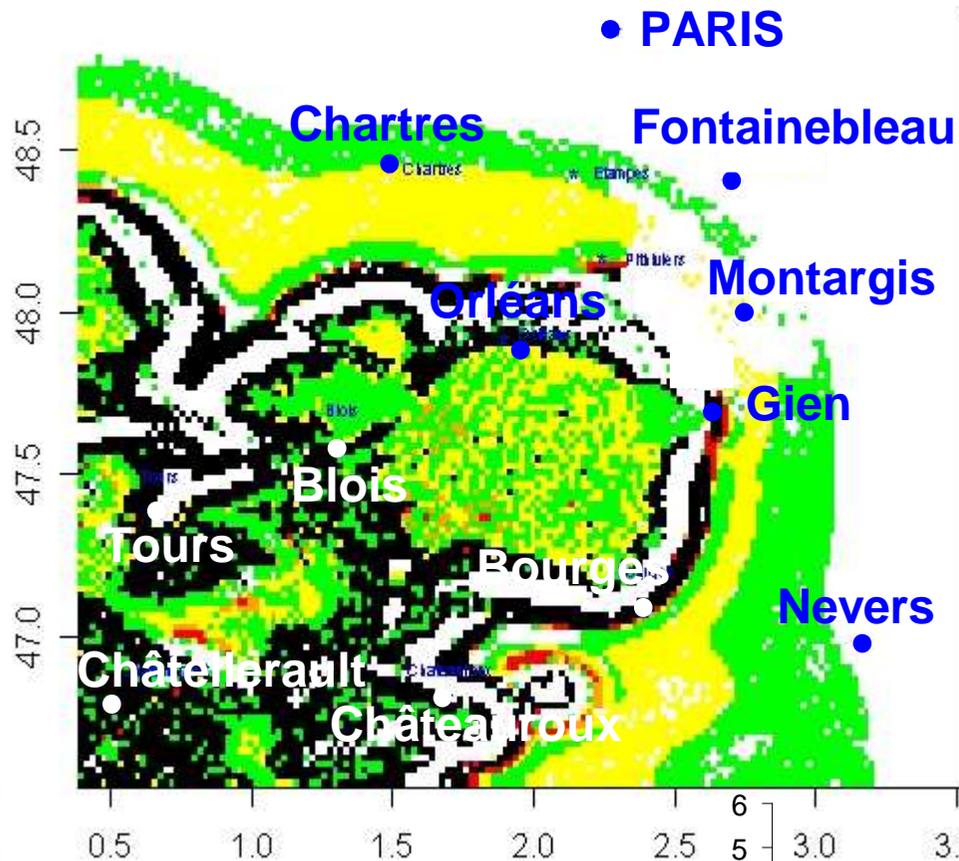


Hausse prévue des températures à la fin du siècle:  
**+1.1-6.4°C**  
ou autrement dit:  
**+0.01-0.06°C/an**

## B2

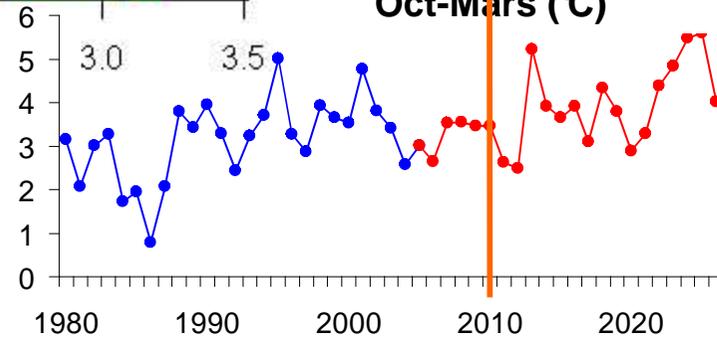
- Doublement du CO<sub>2</sub> entre 1975 et 2100
- Augmentation moyenne T° annuelle: 2.3°C

# Prévision du modèle Année 2010

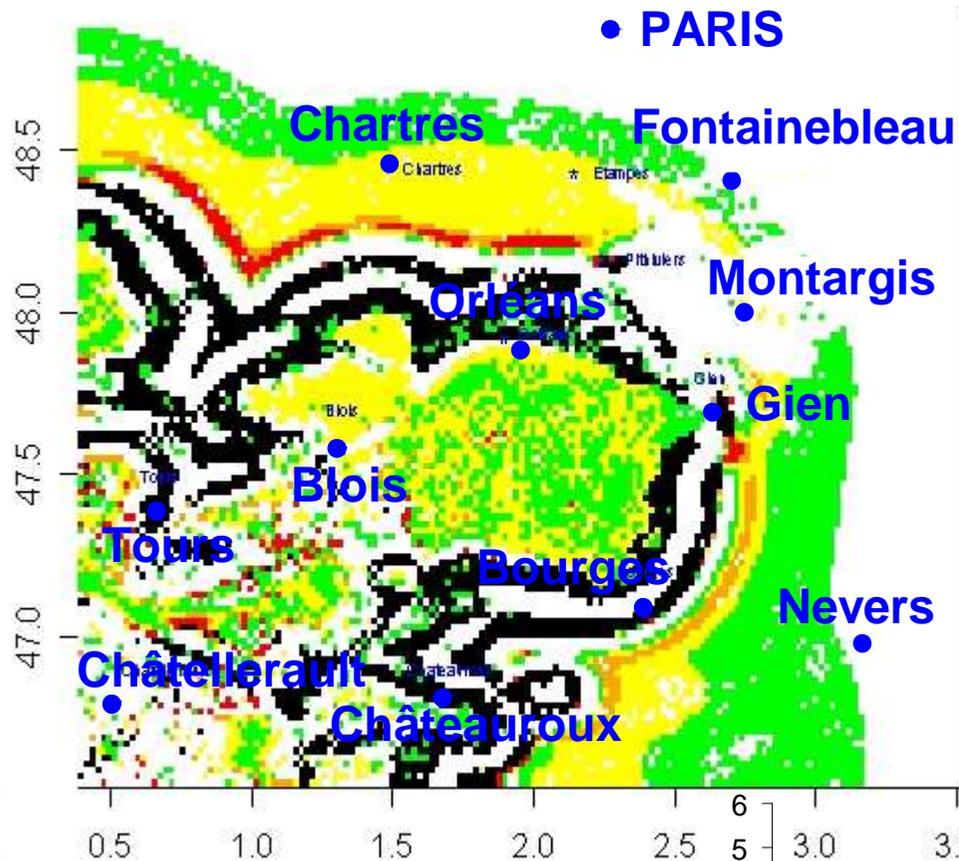


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

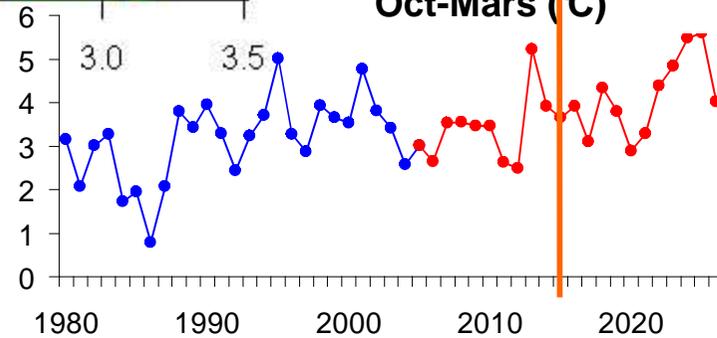


# Prévision du modèle Année 2015

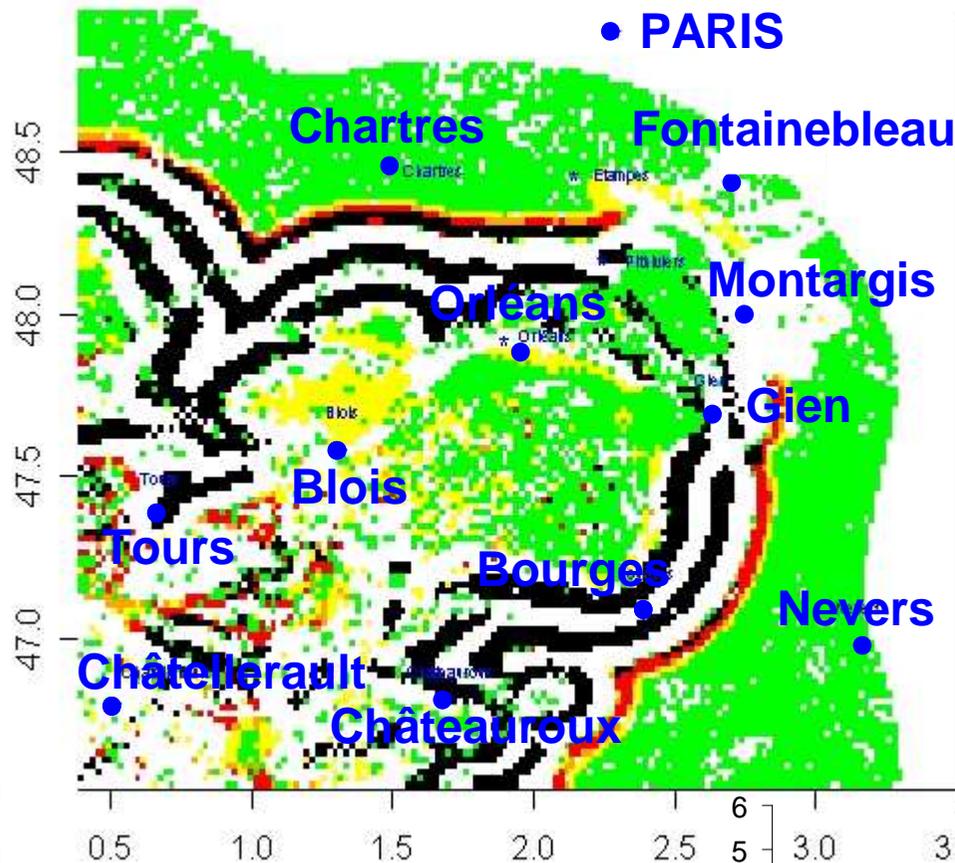


- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)

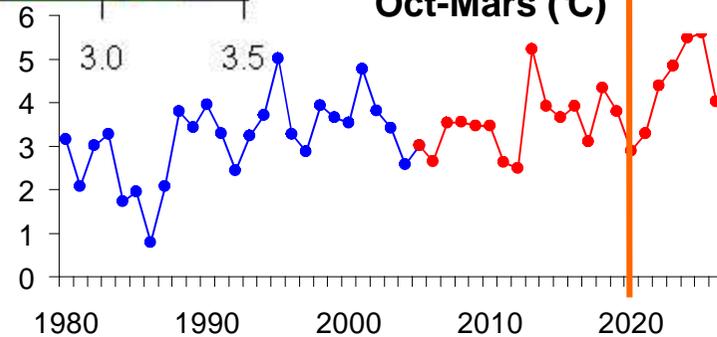


# Prévision du modèle Année 2020



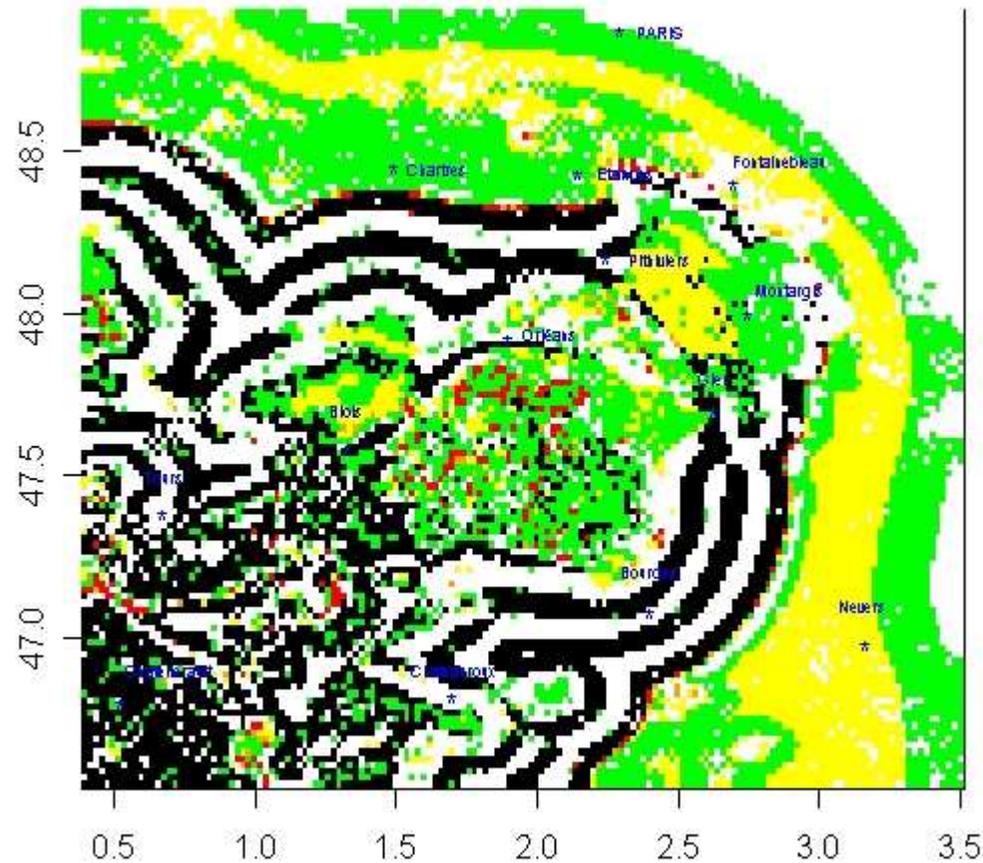
- 0 – 0.01 nid / pin
- 0.01 – 1 nid / pin
- 1 – 5 nids / pin
- 5 – 10 nids / pin
- 10 – 50 nids / pin
- > 50 nids / pin

Température minimale  
Oct-Mars (°C)



# Paris intra-muros colonisé en 2025 ?

nests/pine  
2025

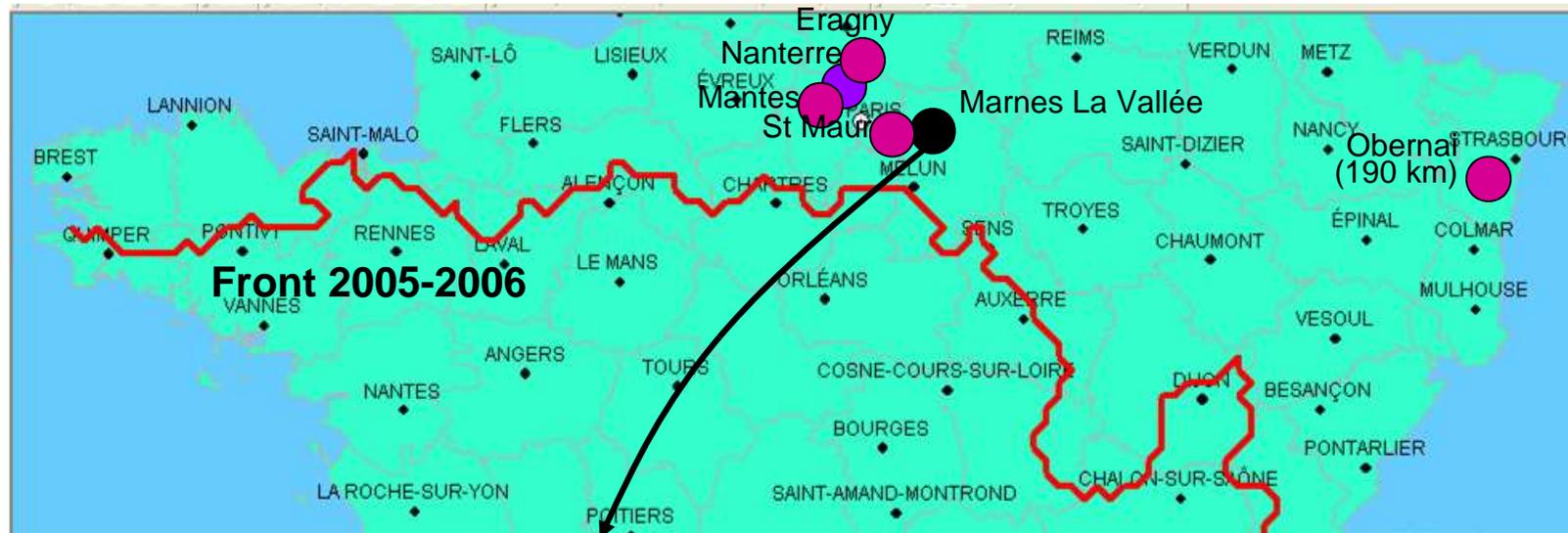


□	0 – 0.01	nests / pine
■	0.01 – 1	nests / pine
■	1 – 5	nests / pine
■	5 – 10	nests / pine
■	10 – 50	nests / pine
■	> 50	nests / pine



# Un problème: introductions accidentelles par l'Homme plus fréquentes que prévues

6 colonies récemment découvertes très en amont du front



Génétiquement proches des populations du sud-ouest

⇒ ne viennent pas du front, plantation de grands pins avec leurs mottes ?

De tels transports existaient probablement avant

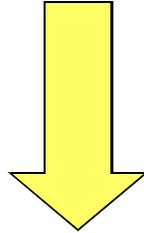
mais les conditions larvaires étaient défavorables à leur survie

*Les modèles doivent intégrer ces transports possibles par l'Homme*



# Améliorer les prévisions d'expansion et établir les risques d'urtication

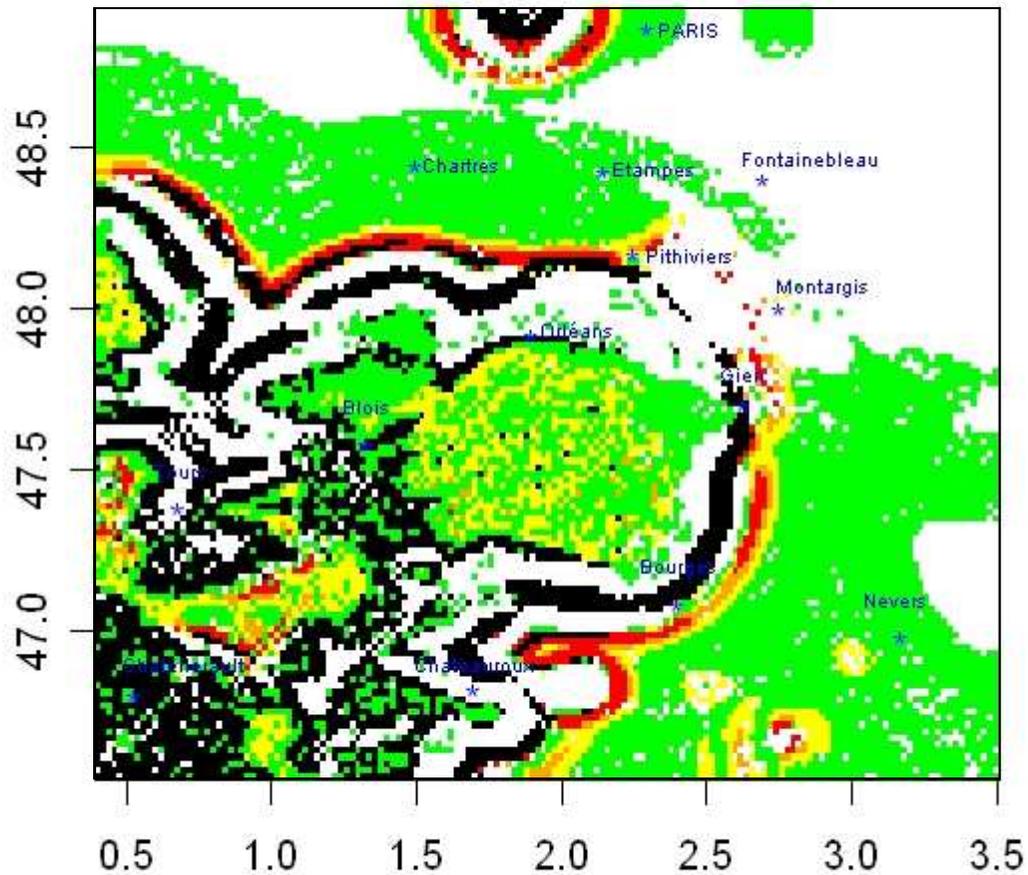
---



**Projet ANR « URTICLIM » 2008-2011**

- Nouveaux modèles d'expansion de la processionnaire
- Modèle de dispersion des poils urticants
- Modèle spatial de risques allergiques

# Prise en compte de facteurs stochastiques dans le processus de dispersion

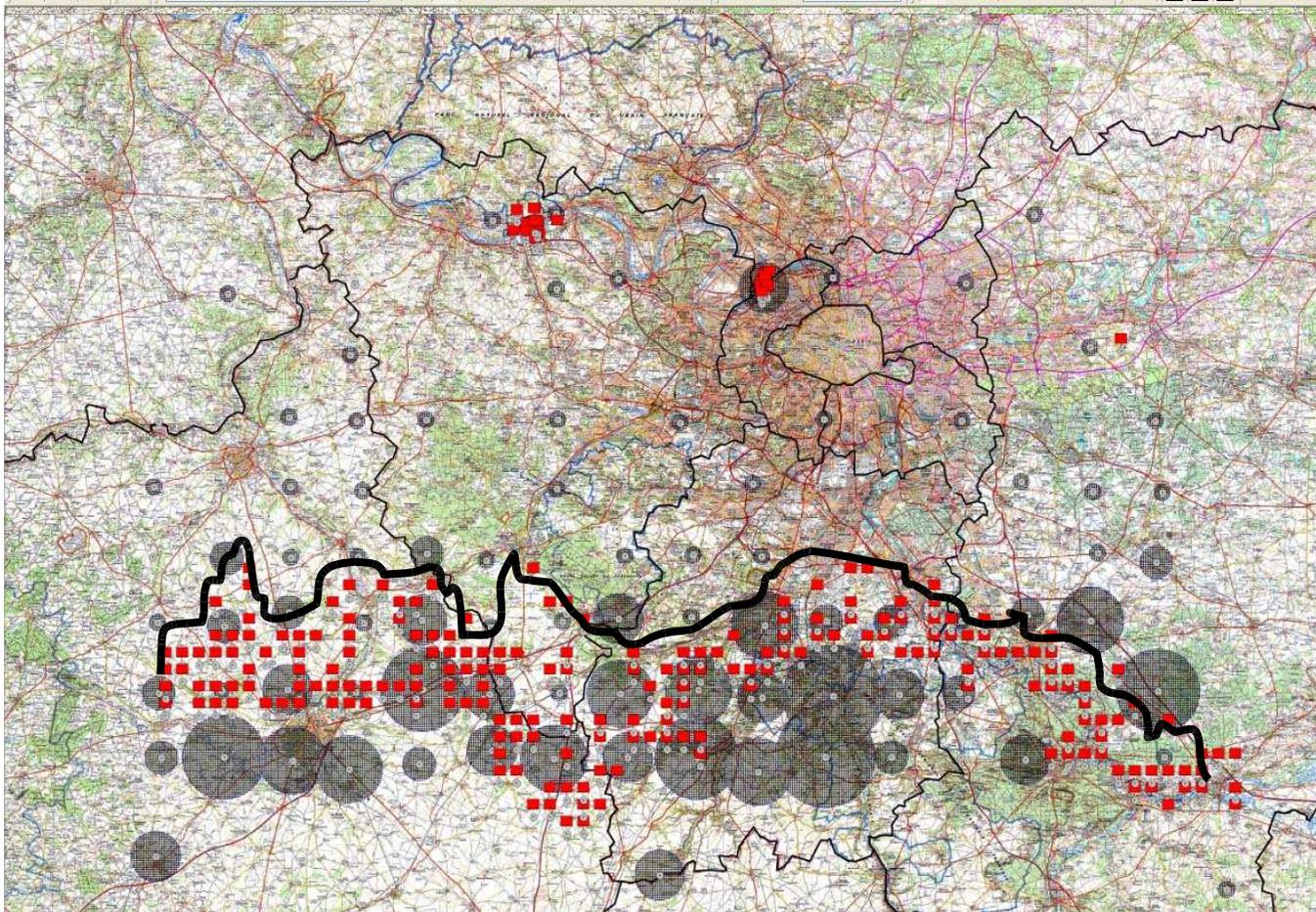


**Paris colonisé en 2013 si un foyer post-front pris en compte dans le modèle**

# Combiner génétique et modélisation pour la prise en compte des trajectoires de vol

---

Grille de piégeages 2008 au-delà du front comparée à une grille de collecte de chenilles en- dessous du front



**Merci de votre attention !**

