



**GICC**

Le programme  
Gestion et Impacts  
du Changement Climatique



## Projet FAST :

Analyse et spatialisation de scénario intégré  
de changement global sur la forêt française



partenaires : INRA et LSCE  
coordination André Granier



Nancy-Université  
Université  
Henri Poincaré

# Objectifs

## **Objectif général du projet FAST :**

Analyser les évolutions régionalisées de la forêt métropolitaine face aux aléas climatiques et biotiques, avec des scénarios de gestion forestière d'atténuation et d'adaptation.

## **Questions posées dans le projet :**

1 : quels scénarios cohérents peut on définir en intégrant l'évolution future du climat, de l'atmosphère, de la demande économique du secteur et de la gestion, avec une résolution suffisante pour le support d'aide à la décision ?

2 : quelle sera l'effet direct de ces scénarios sur la forêt?

3 : quel sera l'effet indirect du changement climatique via une modification du régime des incendies, des attaques de pathogènes et de ravageurs ?

# Architecture du projet

## 1. Etat initial des systèmes

## 2. Définition des scénarios climatiques, sylvicoles et économiques

- 2.1. Scénarios climatiques et atmosphériques
- 2.2. Scénarios sylvicoles et économiques

## 3. Modélisation : évaluation, analyse et développement des modèles

- 3.1. Analyse et modélisation des effets abiotiques
- 3.2. Analyse et modélisation des ravageurs cibles ; interactions biotiques / abiotiques

## 4. Impacts régionalisés à l'échelle nationale

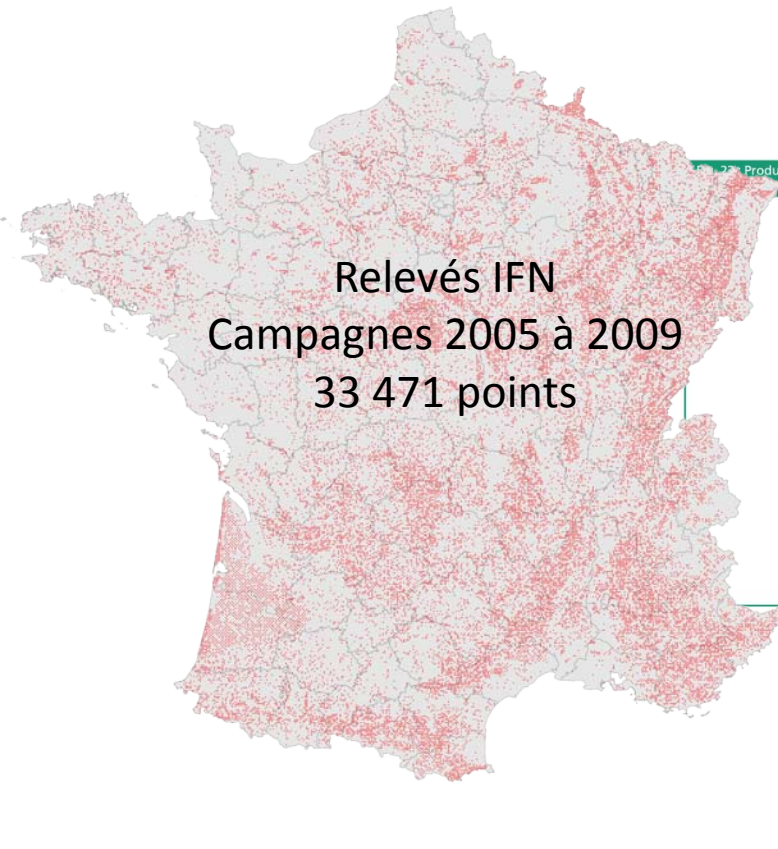
- 4.1. Changement de fonctionnement et de productivité des écosystèmes forestiers
- 4.2. Risques en interaction avec les aléas climatiques

# Lot 1

## **Etat initial des systèmes**

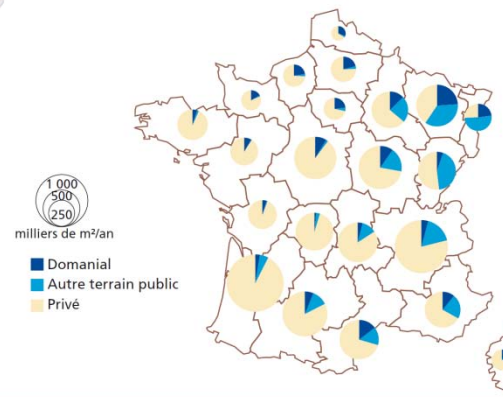
**Responsable Vincent Badeau, INRA-Nancy**

# Travail initial d'agrégation des données élémentaires (IFN) : exemples à l'échelle de la Région



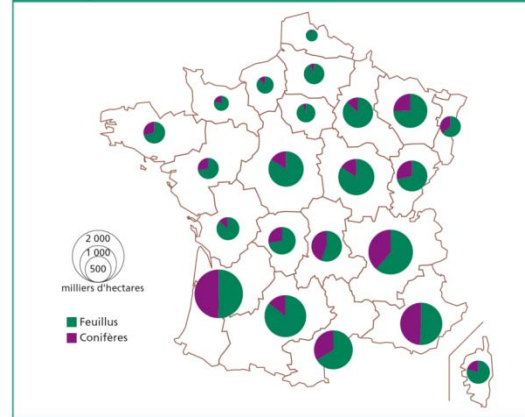
Accroissement en G

Fig. 39 : Production annuelle de surface terrière en forêt de production inventoriée effectivement boisée et par catégorie de propriété.



répartition espèces

Fig. 40 : Répartition de la surface de forêt de production inventoriée effectivement boisée selon le groupe d'essences de plus fort couvert relatif.

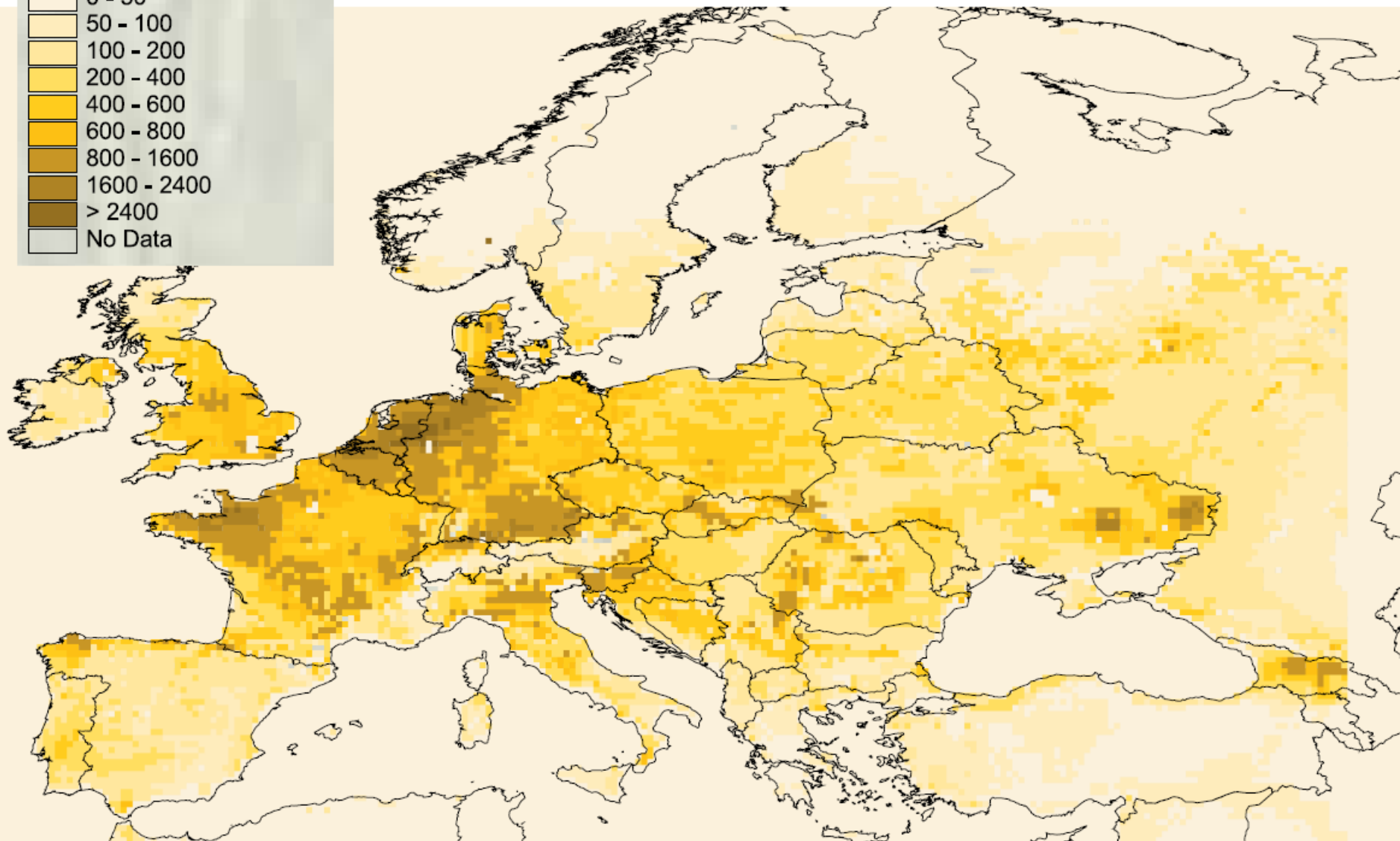
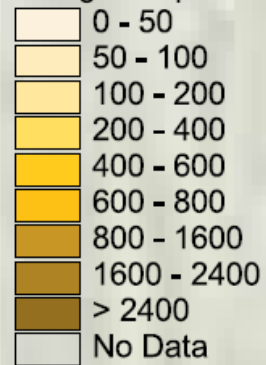


Exemples tirés de :

[http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IFN\\_PubliNat2009\\_TO\\_ME-France2-2.pdf](http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IFN_PubliNat2009_TO_ME-France2-2.pdf)

→ dans FAST, une discussion entre tous les partenaires pour  
déterminer les variables d'intérêt à agréger à la maille 8 x 8 km

Nitrogen deposition (eq/ha/y)

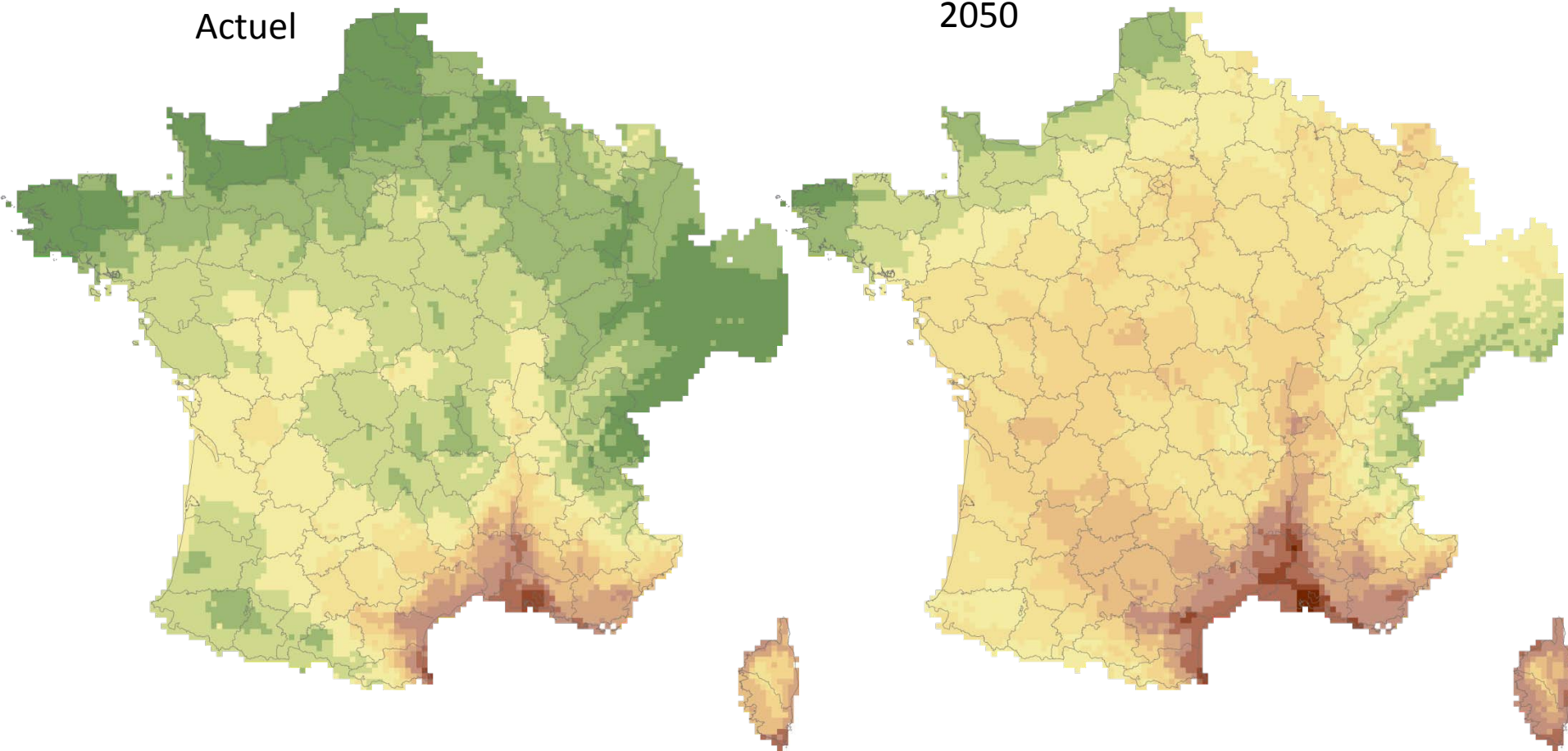


Autres variables en cours de récupération :  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_y$  &  $\text{NH}_x$ , azote total et acidité  
Travail en cours sur le carbone du sol

# Climat : exemple de l'ETP Penman de juillet

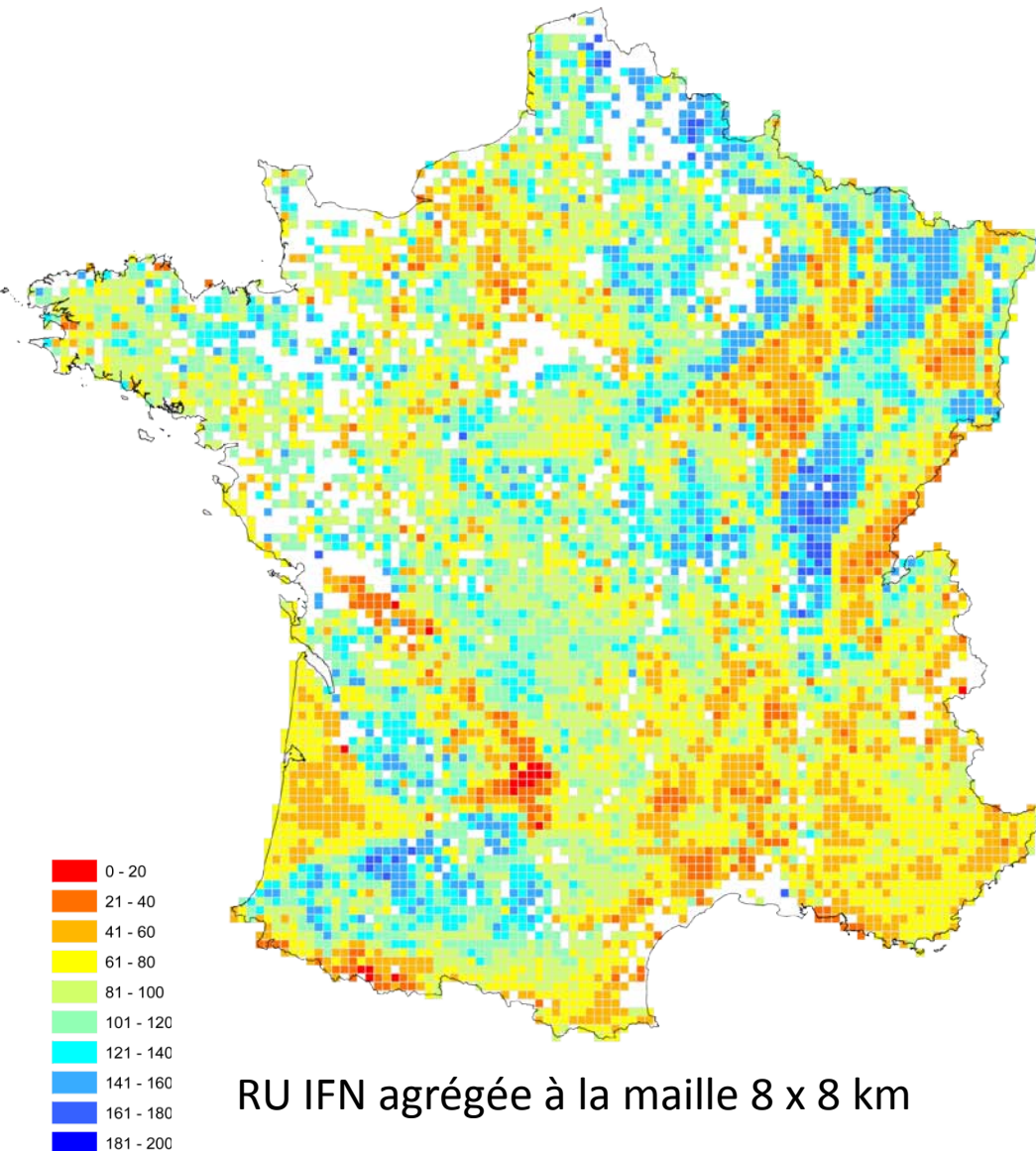
Actuel

2050



Modèle ARPEGE, scénario A1B, régionalisation  
par la méthode des types de temps

# Réserve utile des sols forestiers (RU), ici estimations basées sur les données des relevés IFN



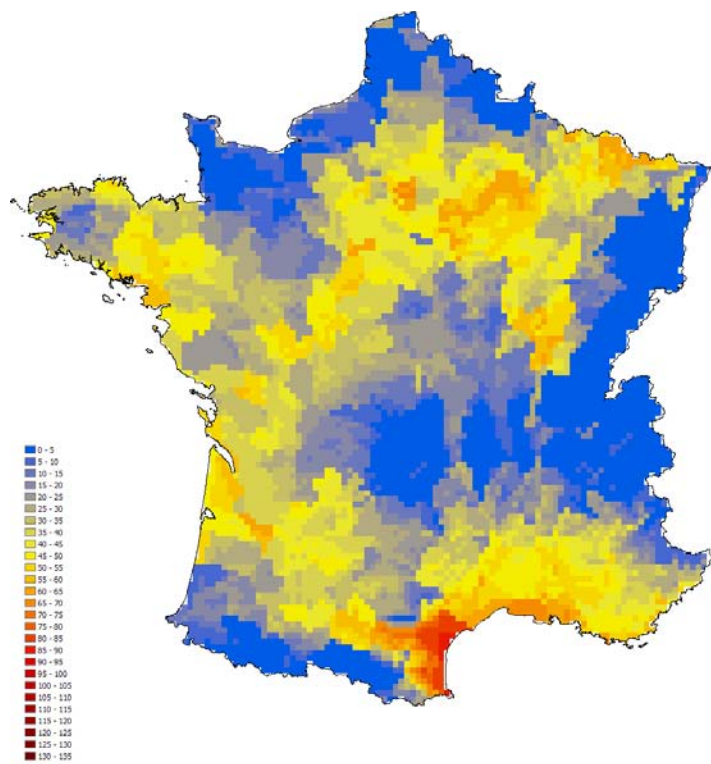
Une travail important en cours :  
quantifier la spécificité des  
sols forestiers

→ collaborations  
INFOSOL, EEF et IFN

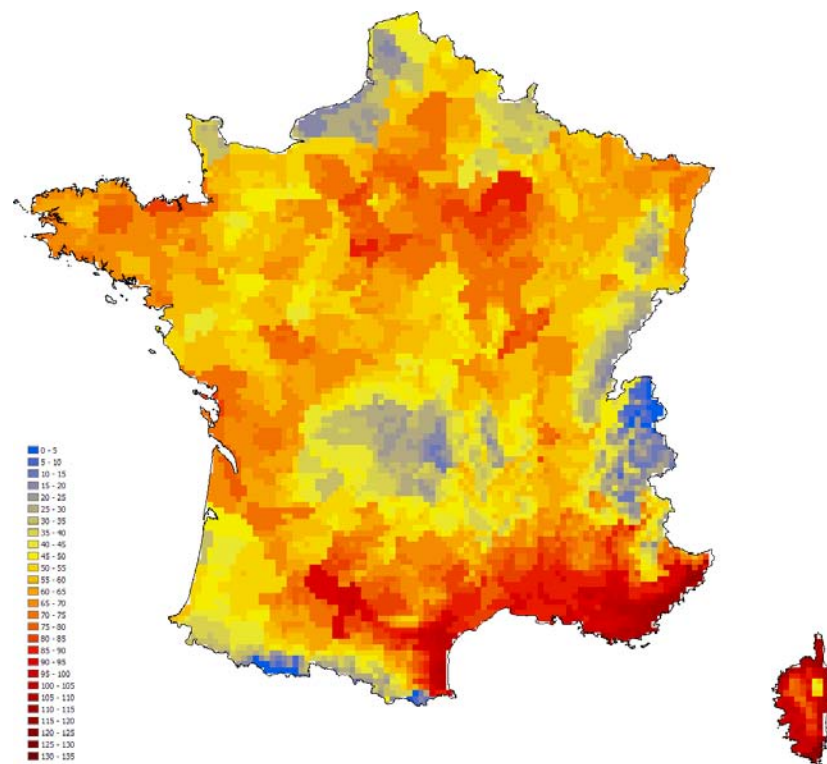


# Forçage majeur de la sécheresse

climat + sol + végétation → simulation des contraintes hydriques  
(modèle **BILJOU**©)



2002



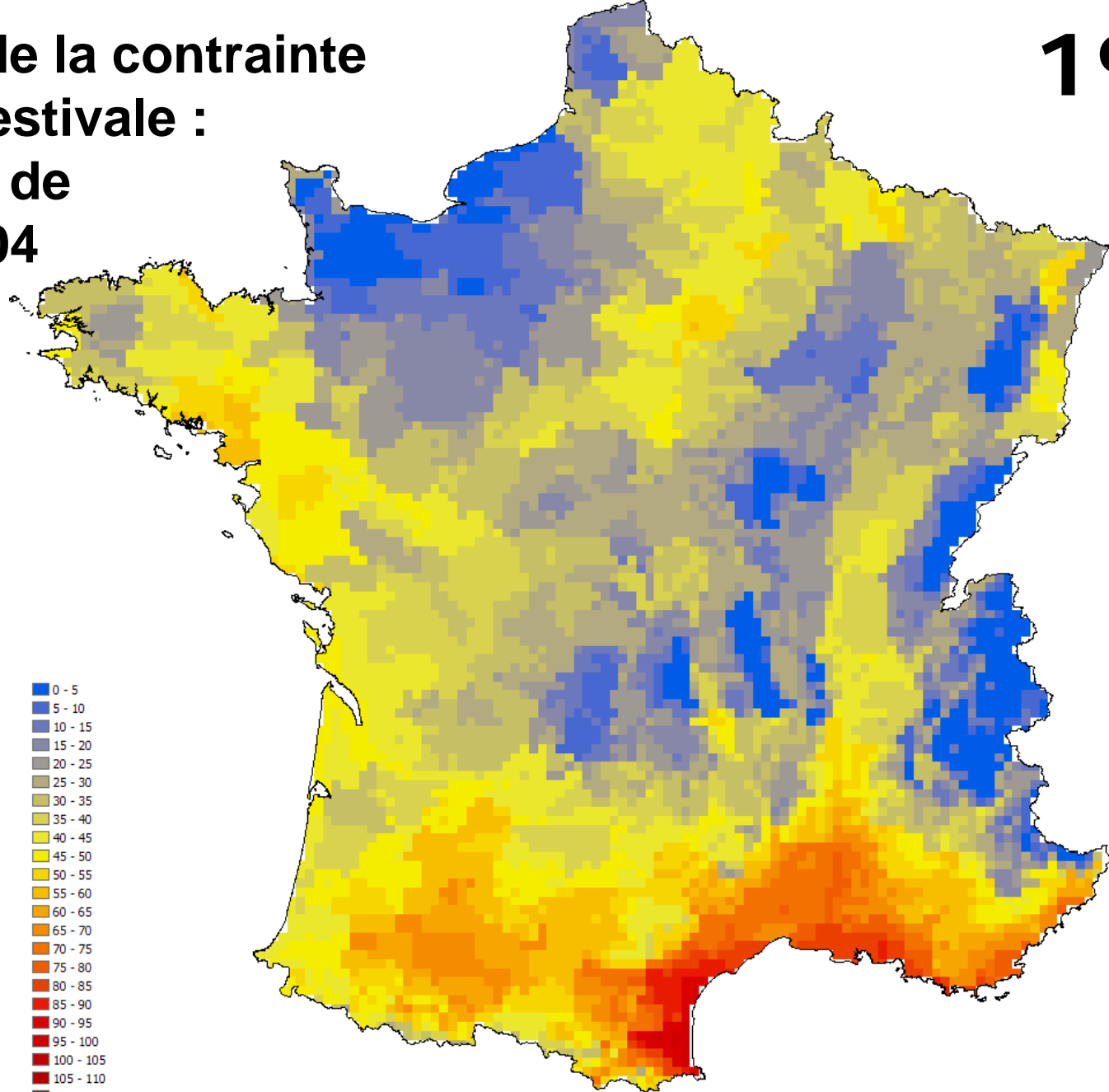
2003

BILJOU spatialisé à 8 x 8 km  
avec RU constante (100 mm)

**étape suivante → simulations avec des RU probables sur 1950 à 2100**

**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**1994**

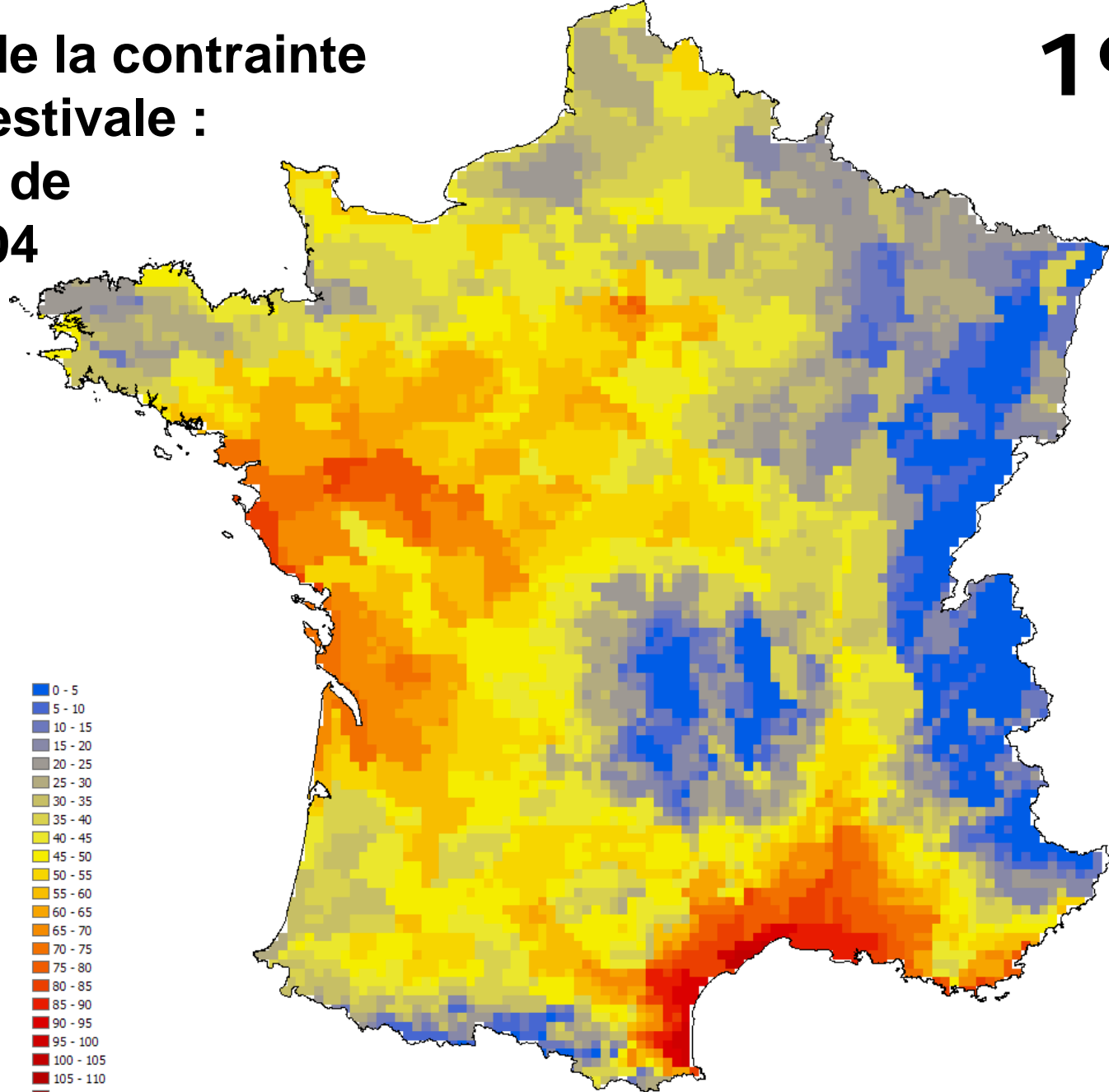


- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- 40 - 45
- 45 - 50
- 50 - 55
- 55 - 60
- 60 - 65
- 65 - 70
- 70 - 75
- 75 - 80
- 80 - 85
- 85 - 90
- 90 - 95
- 95 - 100
- 100 - 105
- 105 - 110
- 110 - 115
- 115 - 120
- 120 - 125
- 125 - 130
- 130 - 135



**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**1995**

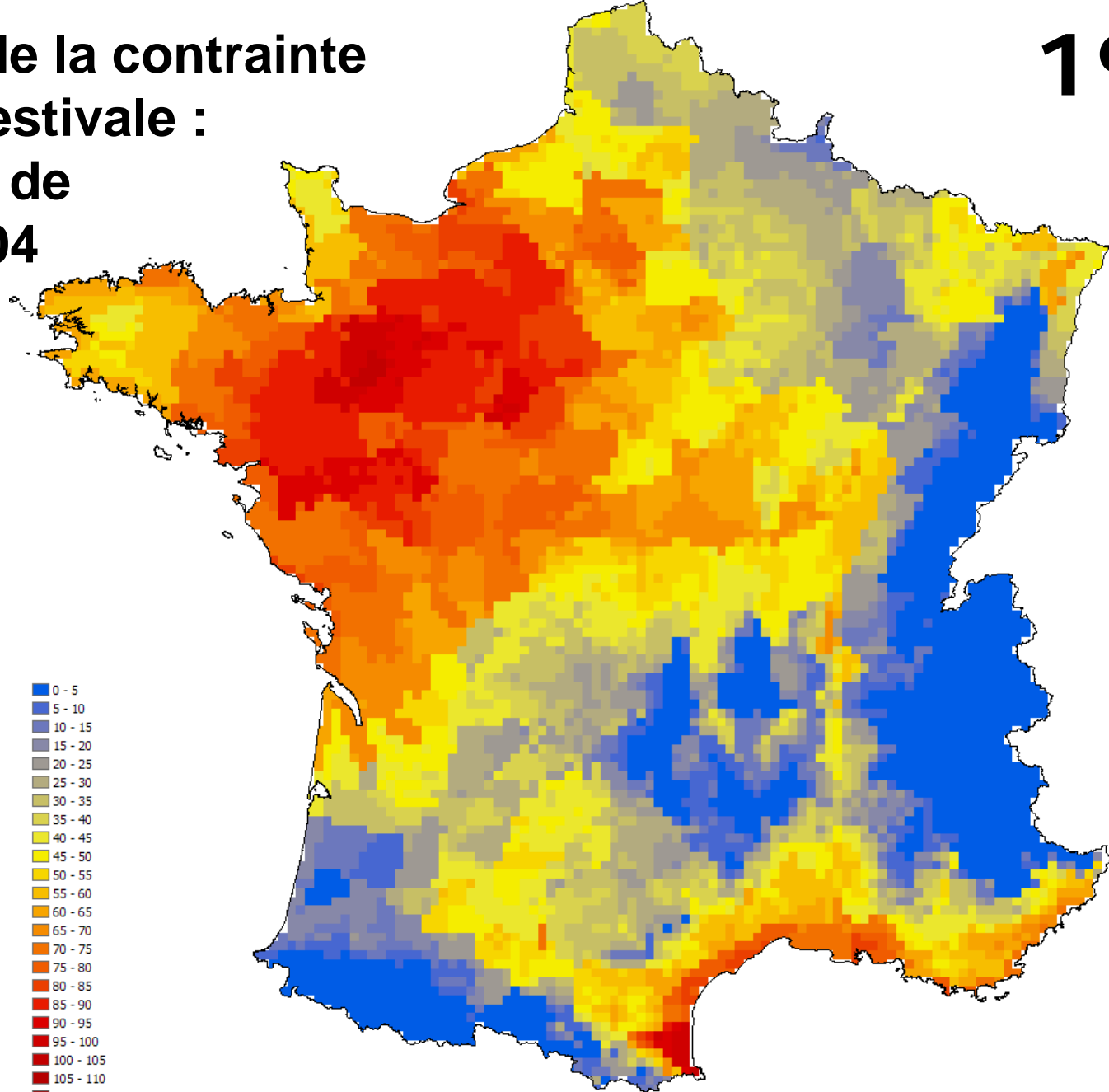


- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- 40 - 45
- 45 - 50
- 50 - 55
- 55 - 60
- 60 - 65
- 65 - 70
- 70 - 75
- 75 - 80
- 80 - 85
- 85 - 90
- 90 - 95
- 95 - 100
- 100 - 105
- 105 - 110
- 110 - 115
- 115 - 120
- 120 - 125
- 125 - 130
- 130 - 135

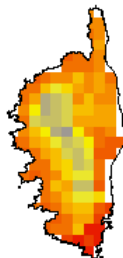


**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**1996**

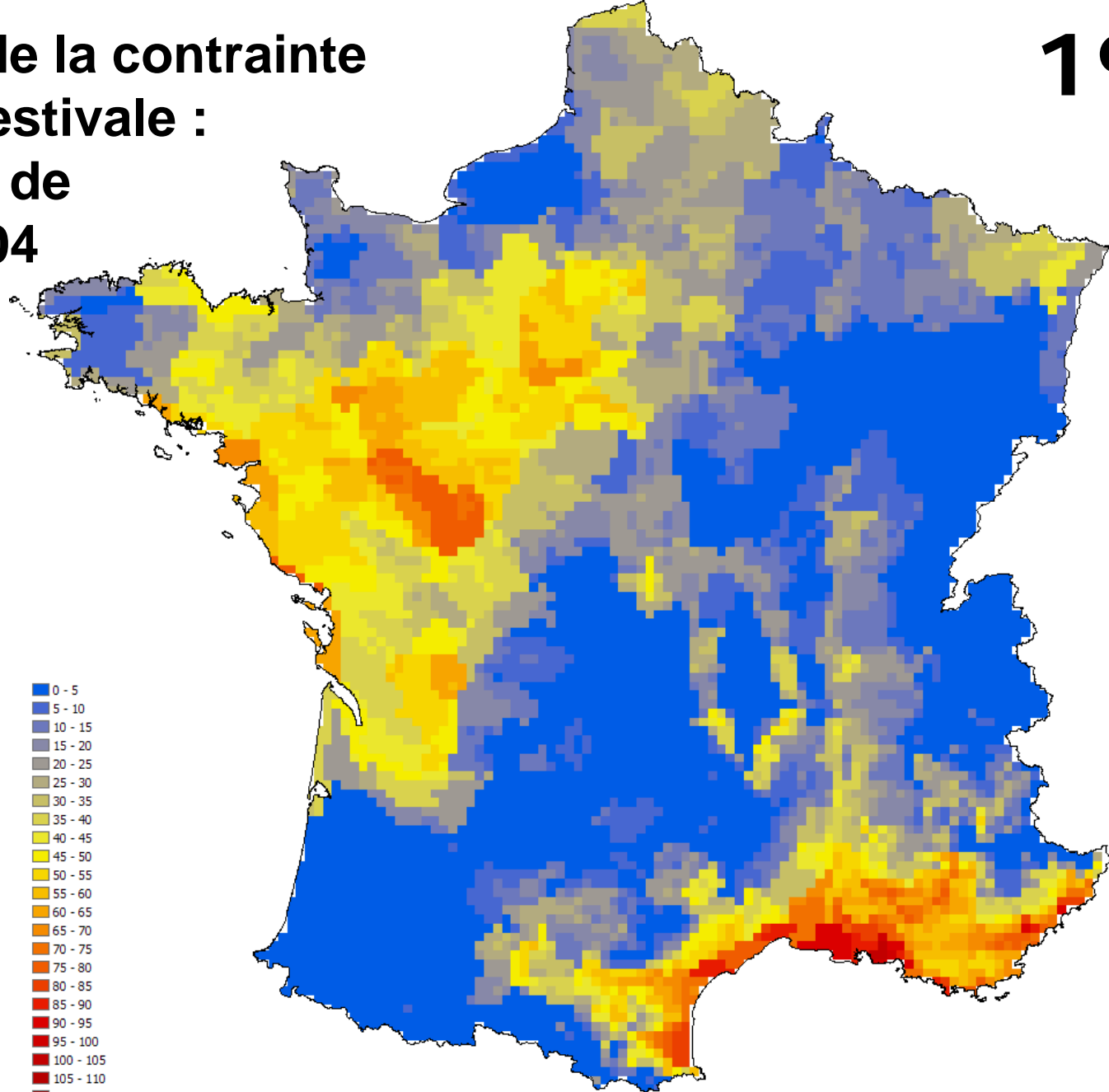


- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- 40 - 45
- 45 - 50
- 50 - 55
- 55 - 60
- 60 - 65
- 65 - 70
- 70 - 75
- 75 - 80
- 80 - 85
- 85 - 90
- 90 - 95
- 95 - 100
- 100 - 105
- 105 - 110
- 110 - 115
- 115 - 120
- 120 - 125
- 125 - 130
- 130 - 135

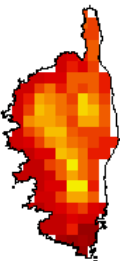


**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**1997**

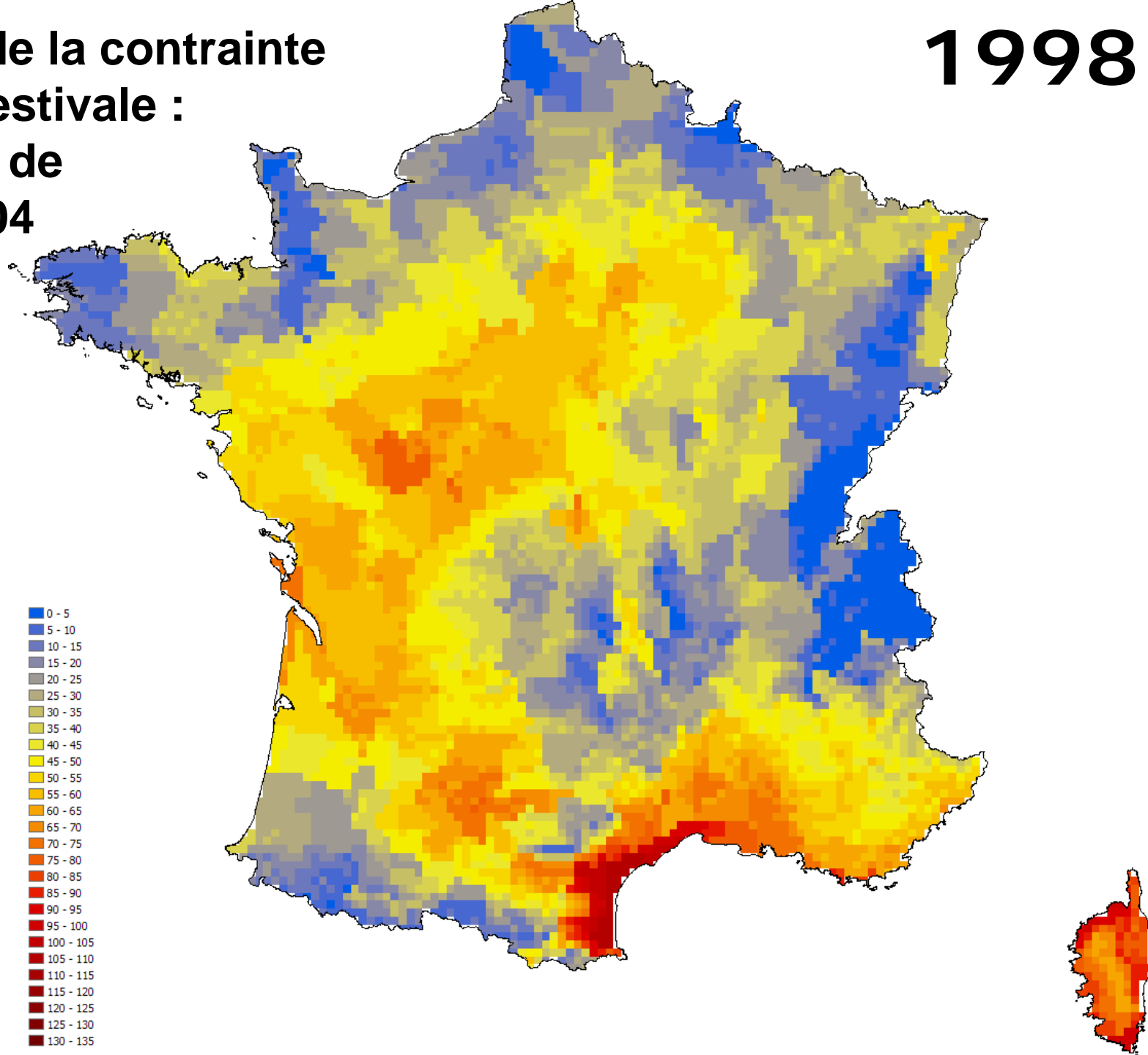


- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- 40 - 45
- 45 - 50
- 50 - 55
- 55 - 60
- 60 - 65
- 65 - 70
- 70 - 75
- 75 - 80
- 80 - 85
- 85 - 90
- 90 - 95
- 95 - 100
- 100 - 105
- 105 - 110
- 110 - 115
- 115 - 120
- 120 - 125
- 125 - 130
- 130 - 135



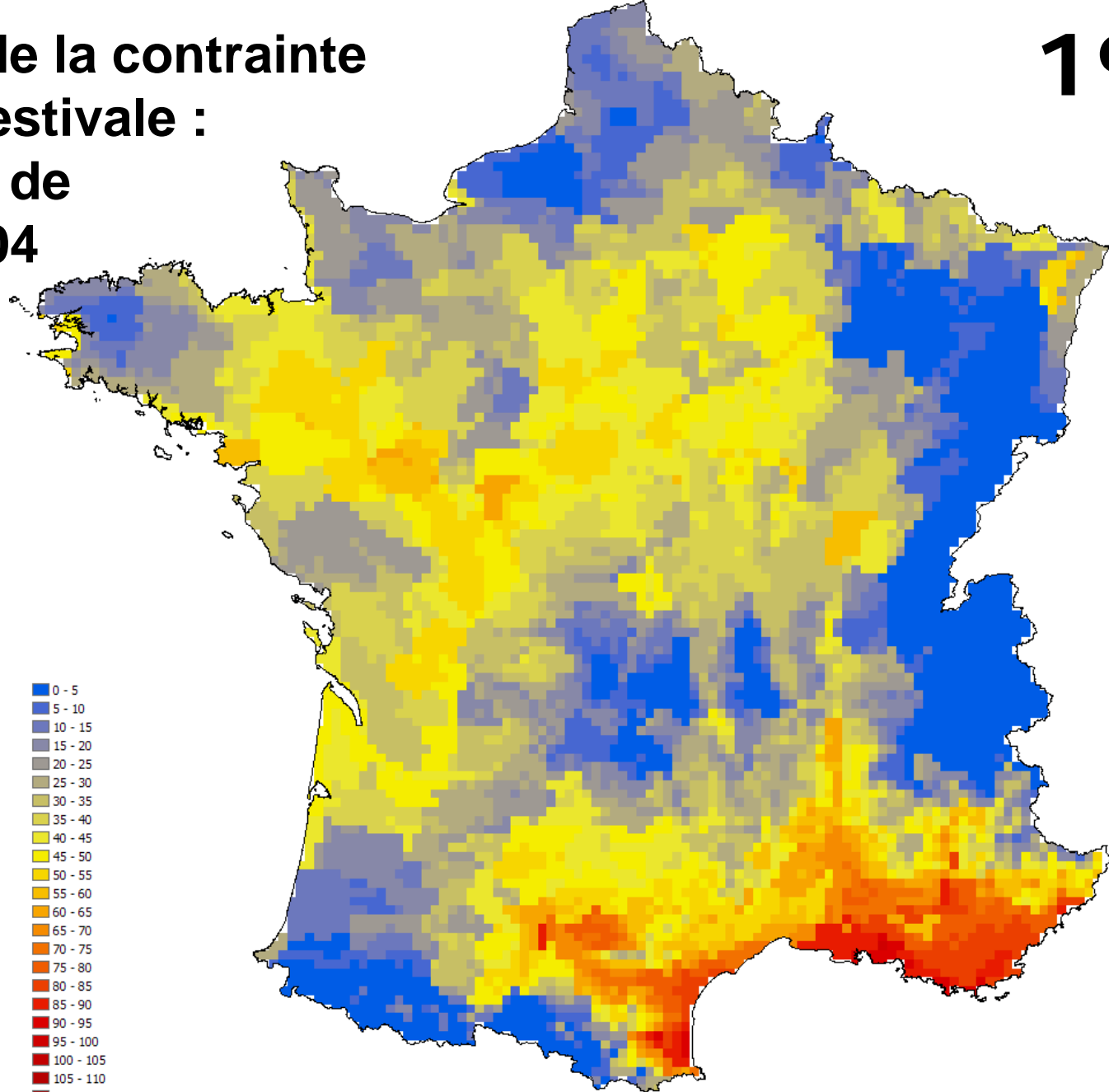
**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**1998**

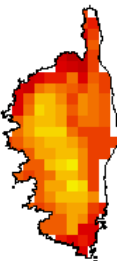


# Intensité de la contrainte hydrique estivale : variations de 1994 à 2004

# 1999

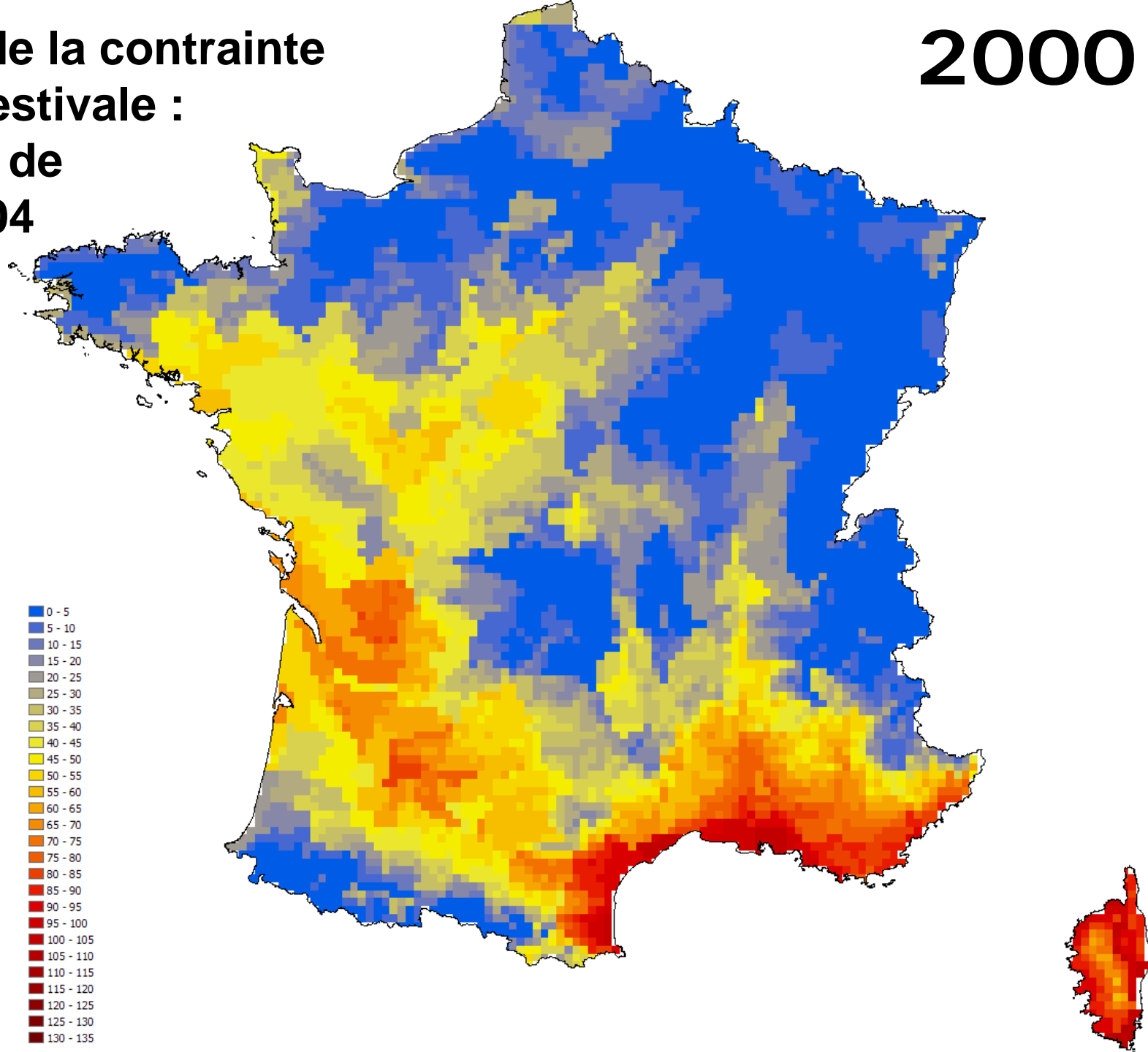


- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- 30 - 35
- 35 - 40
- 40 - 45
- 45 - 50
- 50 - 55
- 55 - 60
- 60 - 65
- 65 - 70
- 70 - 75
- 75 - 80
- 80 - 85
- 85 - 90
- 90 - 95
- 95 - 100
- 100 - 105
- 105 - 110
- 110 - 115
- 115 - 120
- 120 - 125
- 125 - 130
- 130 - 135



# Intensité de la contrainte hydrique estivale : variations de 1994 à 2004

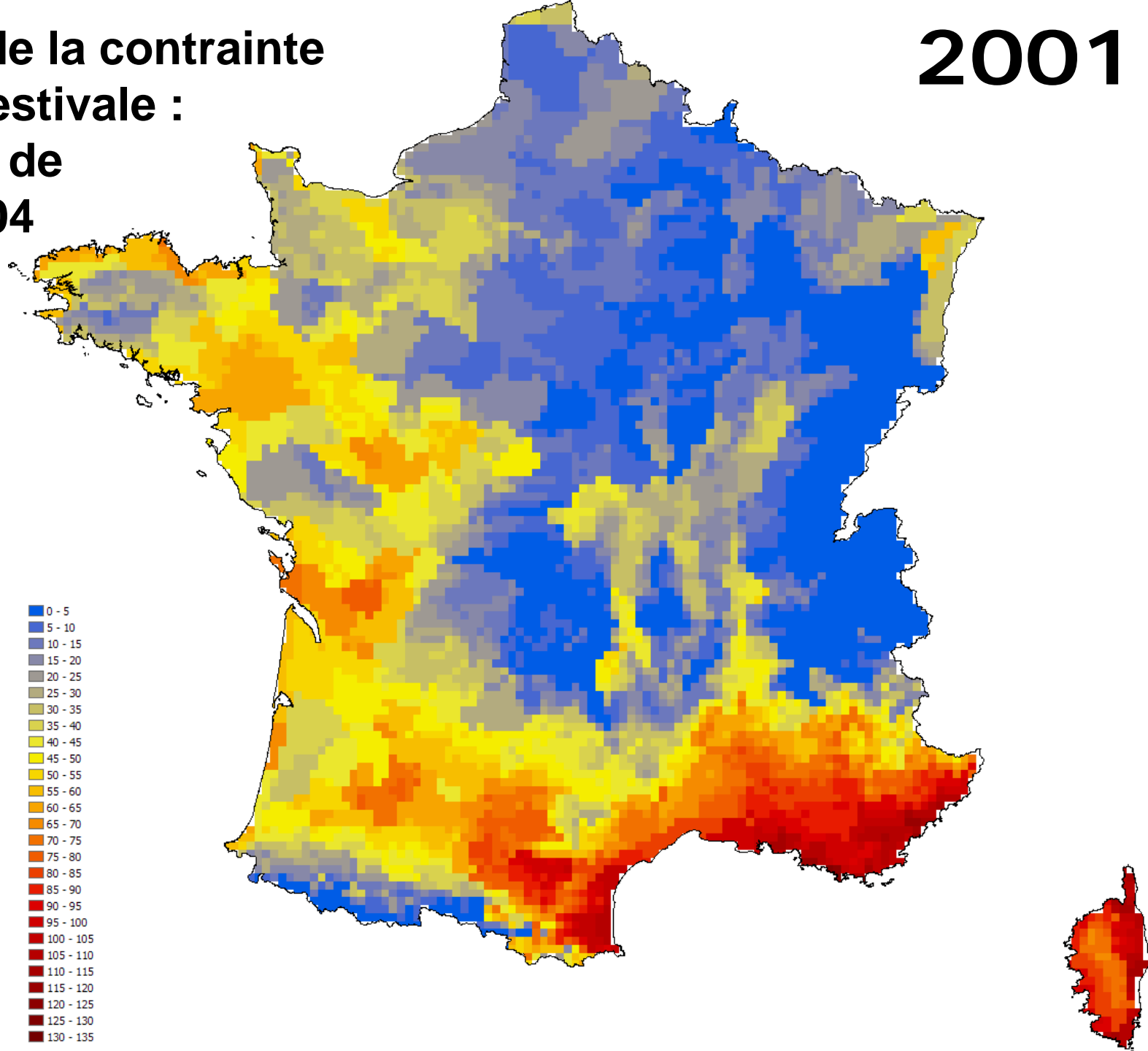
# 2000





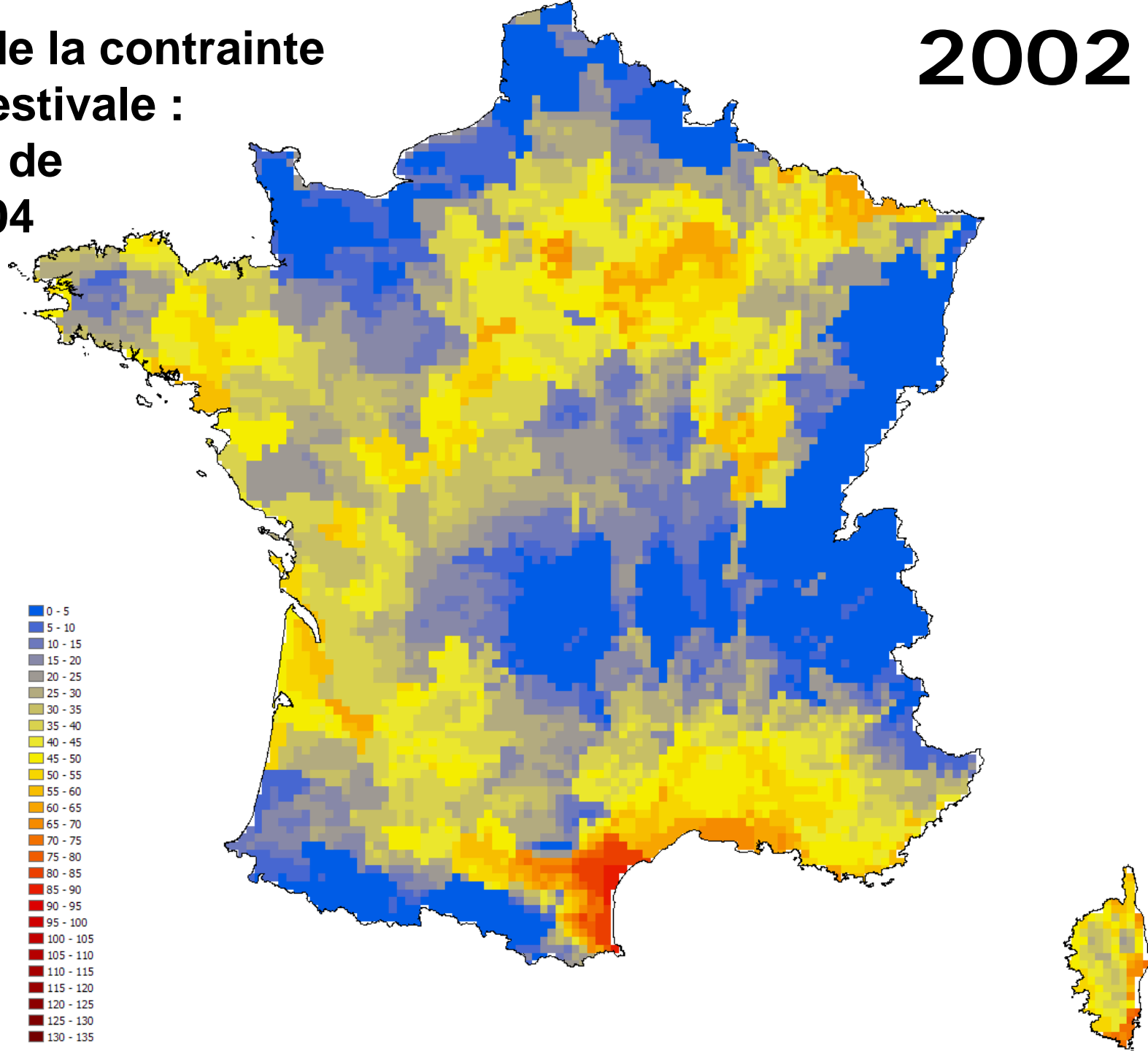
**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**2001**



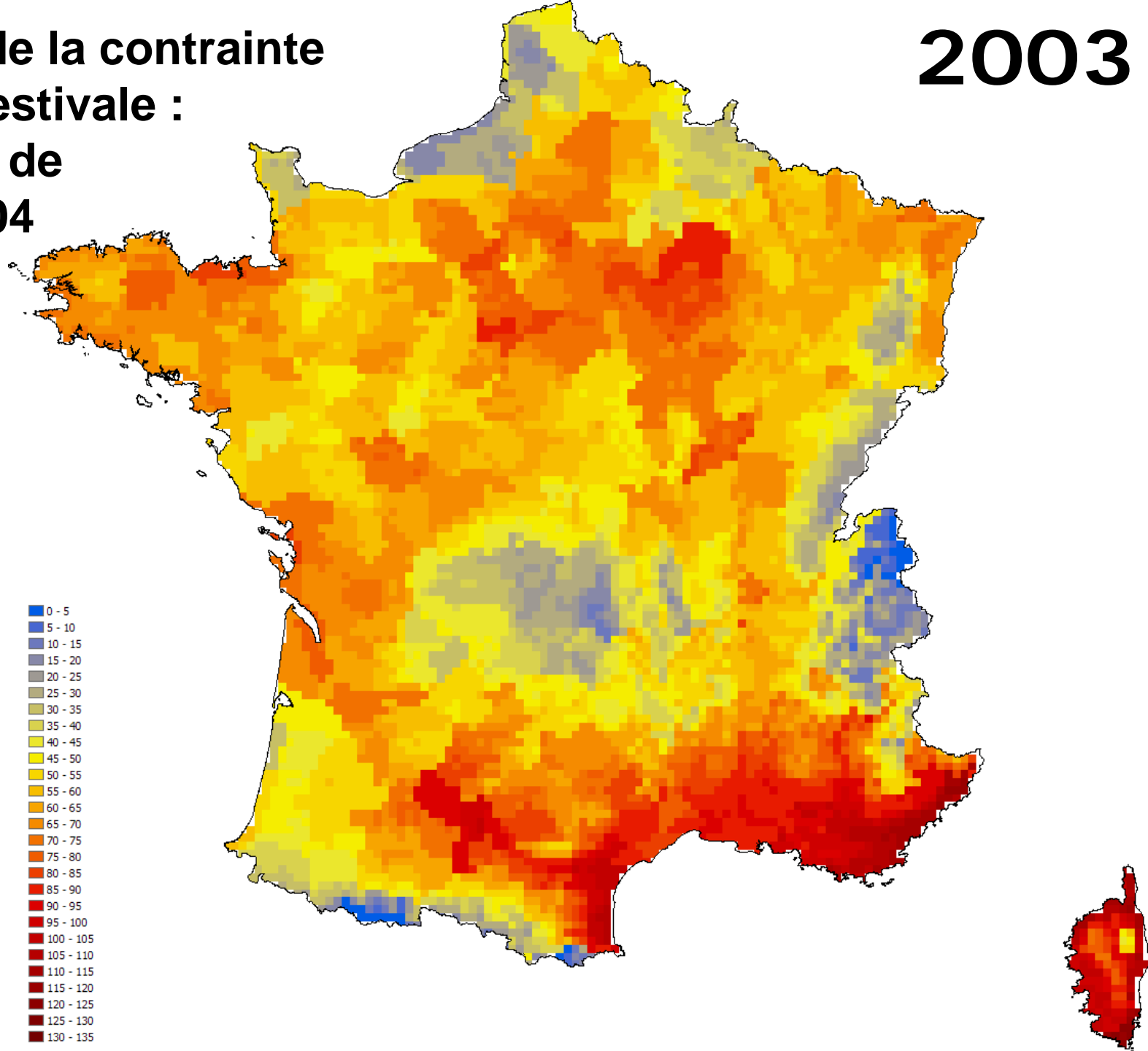
**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**2002**



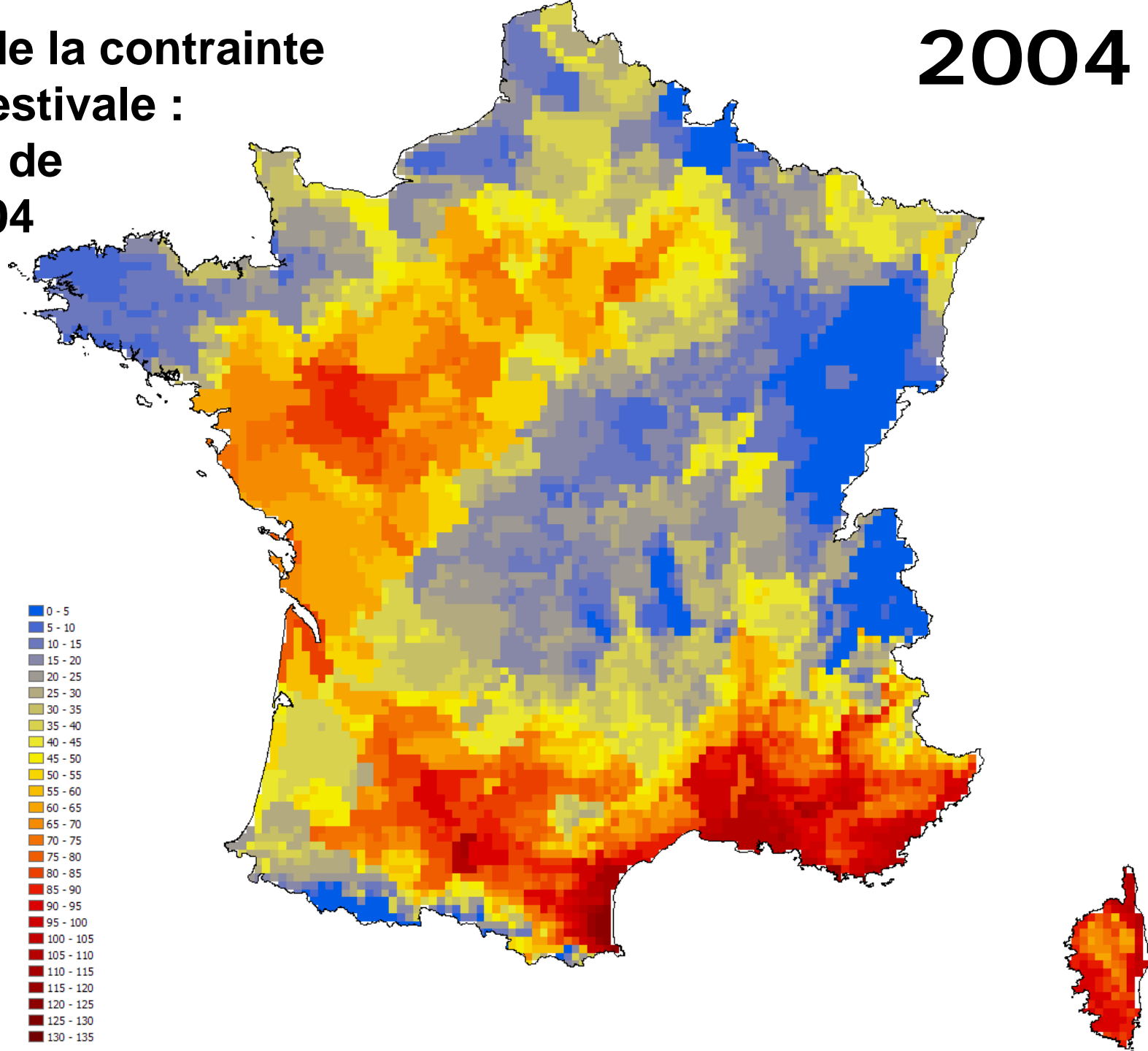
**Intensité de la contrainte  
hydrique estivale :  
variations de  
1994 à 2004**

**2003**



# Intensité de la contrainte hydrique estivale : variations de 1994 à 2004

# 2004



# Lot 2

## **Définition des scénarios climatiques, sylvicoles et économiques**

**responsables :**

**Vincent Badeau, INRA-Nancy**

**Christian Pagé, CERFACS**

**Jean-Michel Carnus, INRA-Bordeaux**

# Définition des scénarios

- climatiques : en cours et en lien étroit avec les travaux réalisés dans le projet CLIMATOR (collaborations avec CNRM et Agroclim-Avignon) ; méthode de désagrégation (collaboration EEF/CERFACS)
- de gestion (J-M Carnus, avril 2011)

# Lot 3

## **Modélisation : évaluation, analyse et développement des modèles**

**Responsable Denis Loustau, INRA-Bordeaux**

# Développement du modèle « complet » G-GRAECO

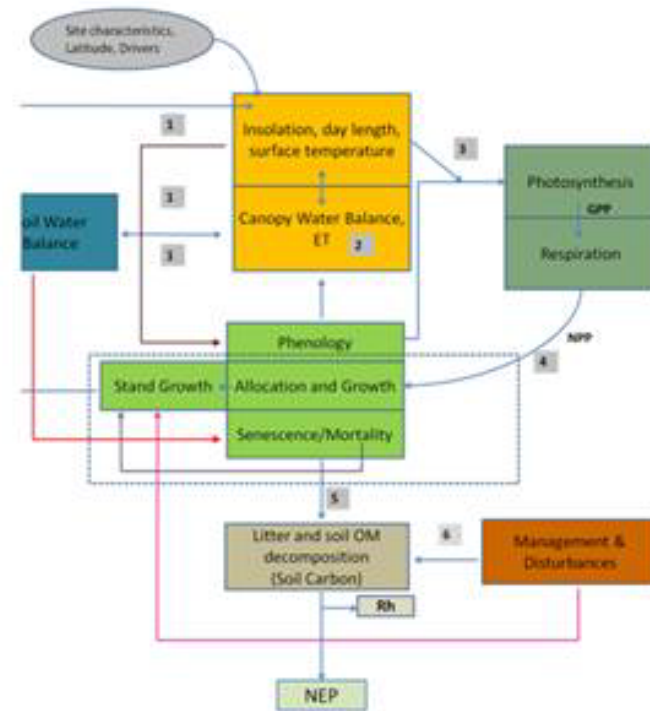
(A Bosc, A Govind, J Kumari, D Loustau, T Rabemanantsoa)

- Utilisation des données climats, sol, végétation (lots 1 et 2)
- Prise en compte de scénarios croisés climat / gestion
- **Prise en compte du développement spatio-temporel des pathogènes et des insectes**



# Le modèle « complet » G-GRAECO

1. Main
2. Variable Declaration Module (shared data)
3. Energy Balance
  - o Radiation Balance
  - o Canopy Water Balance
4. Phenology, Growth and Mortality Module
5. Soil Water Balance
  - o Liquid Water Module
  - o Snow module
6. Canopy Carbon
7. Soil carbon
8. Management
9. Disturbances
  - o Fire
  - o Storm
  - o Insects
  - o Pathogens



## Étapes techniques :

1. externalisation de tous les jeux de paramètres (novembre 2010)
2. réécriture en modules de processus (généricité) (janvier 2011)
3. passage au langage Python (février 2011)

# Structuration du modèle en modules de « processus »

BIOPHYSICAL PROCESSES	BIOGEOCHEMICAL PROCESSES	GROWTH AND DEVELOPMENT	MANAGEMENT	DISTURBANCES
<b>Radiative balance</b> Short wave Long wave Energy balance	<b>Carbon flow 1. Trees and vegetation</b> photosynthesis respiration carbon allocation	<b>Tree growth and phenology</b> Timing of organ growth and development Canopy structure (foliage, roots) Stem size distribution Commercial timber production	<b>Stand management</b> thinning harvest vegetation control pruning	<b>Fires</b> Biomass pools
<b>Latent and sensible heat flux</b> Sensible heat flux Rainfall interception Evapotranspiration Stomatal conductance	<b>Carbon flow 2. Soil</b> Mortality and turnover Mineralisation Humification	<b>Insect species</b> Population dynamics Phenology timing of feeding Damage to trees	<b>Soil management</b> site preparation fertilisation others	<b>Windstorms</b> Tree anchorage and biomechanics Soil mechanical stability
<b>Water flow</b> Soil water Drainage Sap flow and hydraulic pathway Canopy water content	<b>Nitrogen Flow</b> Atmospheric input	<b>Fungi species</b> Population dynamics Phenology Impact on processes		

- Lois simplifiées de transfert d'énergie, rayonnement, chaleur...
- Analogies *big leaf* x ombre/soleil
- Modèles de Farquhar, Penman-Monteith
- Phénologie plantes, insectes, pathogènes
- Allocation du carbone par lois d'allométrie
- Carbone du sol par Roth-C

## Lot 3.2. Analyse et modélisation des ravageurs : interactions biotiques- abiotiques

→ 2 modèles d'insectes ravageurs et 2 pathogènes à forts impacts sylvicoles, répondant au réchauffement climatique et/ou à la sécheresse édaphique

→ mise en œuvre d'approches expérimentales, de mesures *in situ* et de modélisation

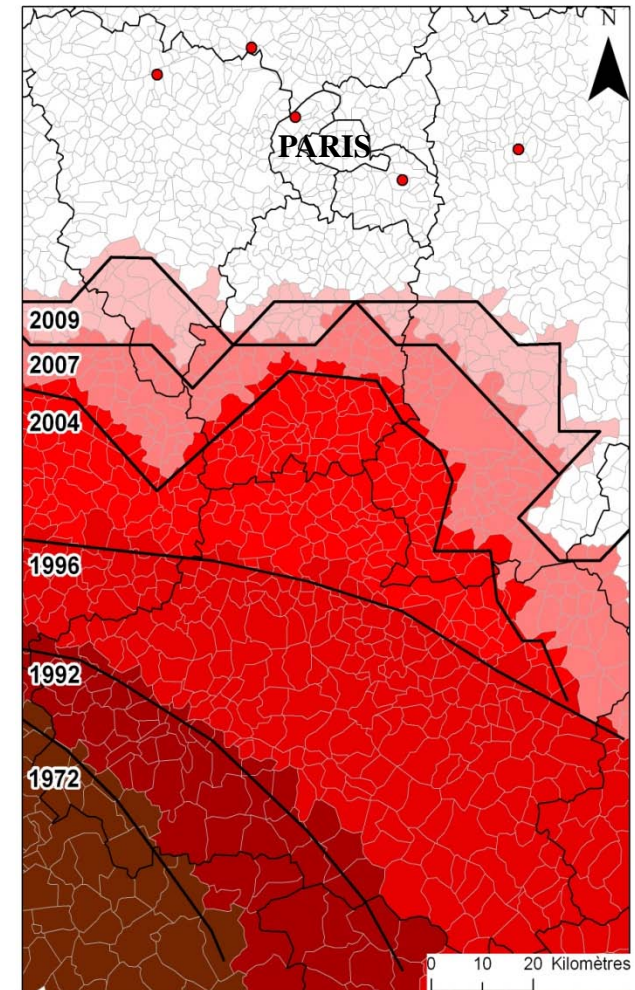
- processionnaire du pin
- tordeuse du mélèze
- Oïdium du chêne
- *Diplodia pinea* / pin

# Processionnaire du pin



## Objectifs 2010

- Etude des mécanismes de dispersion à longue distance et d'apparition de foyers en lien avec le réchauffement
- Etude de l'effet des événements extrêmes (vagues de froid ; canicules) sur la survie des insectes
- Relations changement climatique - vulnérabilité des peuplements (en cours, non présenté ici)



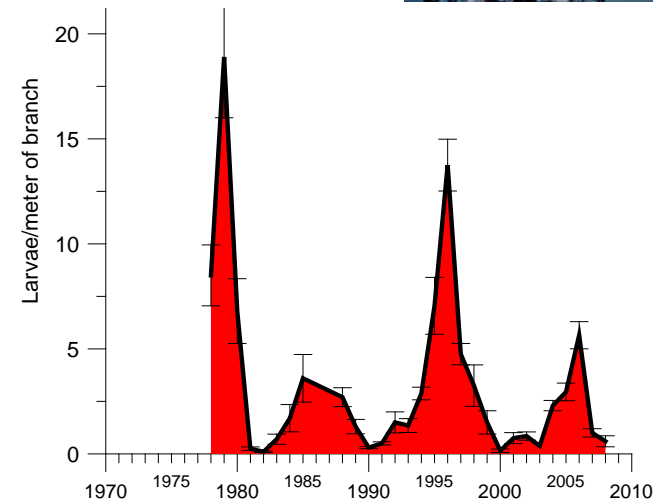
# Tordeuse du mélèze



- Dégâts cycliques (8-10 ans) avec fort impact sur le bois
- Nécessité d'une coïncidence phénologie / stade
- Perturbations récentes du cycle, montée vers zones > 2000 m

## Approches :

- Phénologie comparée débourrement du mélèze-éclosion des larves de tordeuses
- Analyse rétrospective des attaques
- Analyses dendrochronologiques



## en 2011 :

- modélisation du développement comparé arbres-insectes en fonction de l'altitude



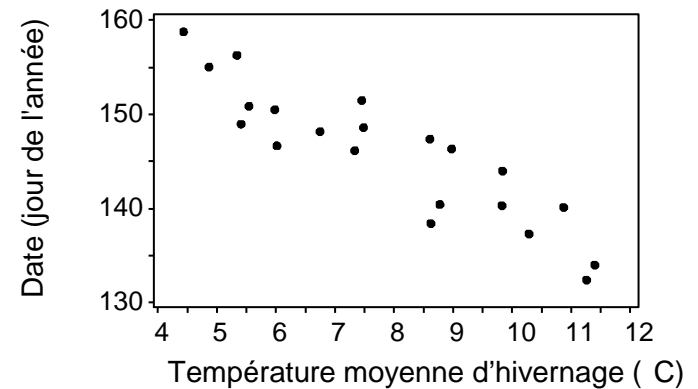
# Synchronisation phénologique chêne-oïdium

Question :

Modification de cette synchronisation  
avec l'évolution du climat  
(températures hivernales) ?

→ Modèle en cours de construction  
(suite au projet ANR Dryade)

date optimum de production  
d'ascospores

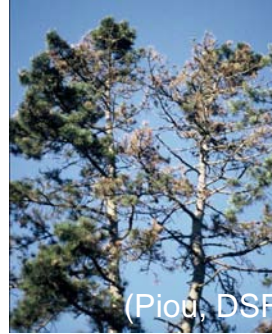


**en 2011 :**

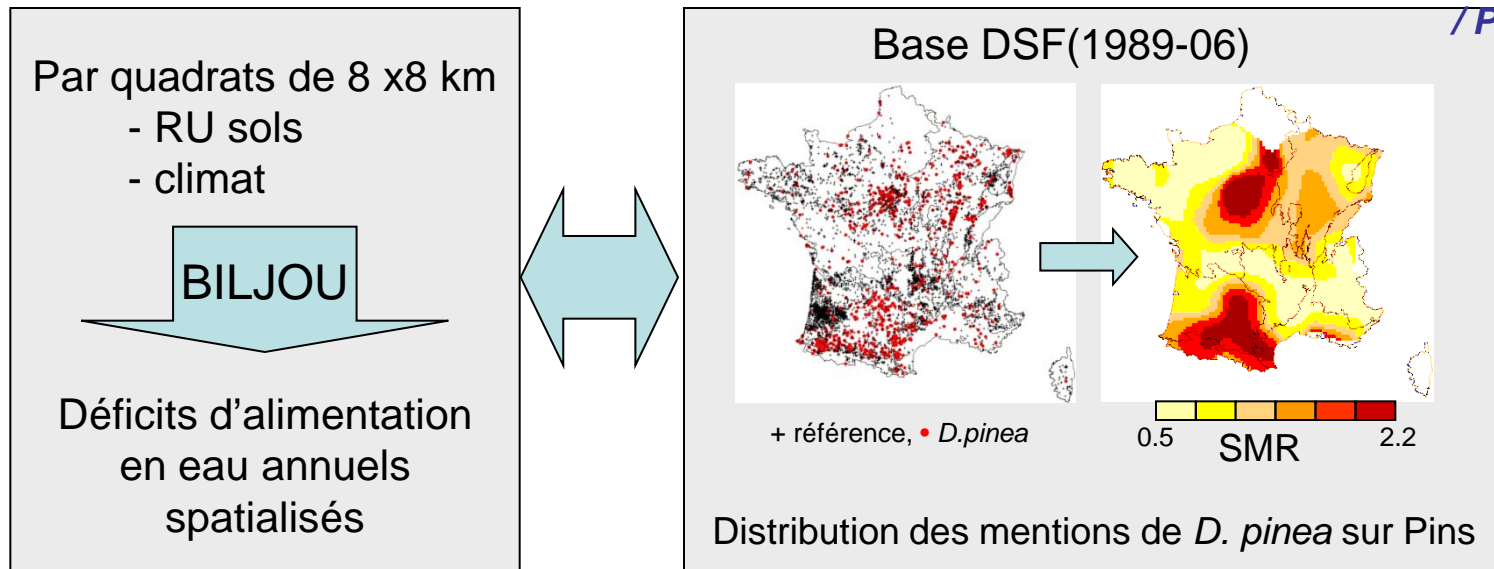
- Confronter sorties de modèle et notations d'oïdium sur chênes (base DSF)
- Prédire impact de l'évolution du climat sur la synchronisation chêne / oïdium

# Dépérissement à *Diplodia pinea* et sécheresse édaphique

pathogène favorisé par le stress hydrique de l'hôte



*Diplodia pinea*  
/ *P. nigra*



en 2011 :

- Simulation spatialisée des déficits hydriques
- Ajuster une relation déficit hydrique / mentions de *D. pinea* (base DSF)
- Prédire l'impact de l'évolution du climat sur l'occurrence de dépérissements de pins

# **Evolutions du modèle ORCHIDEE : le modèle ORCHIDEE-FM (année 1)**

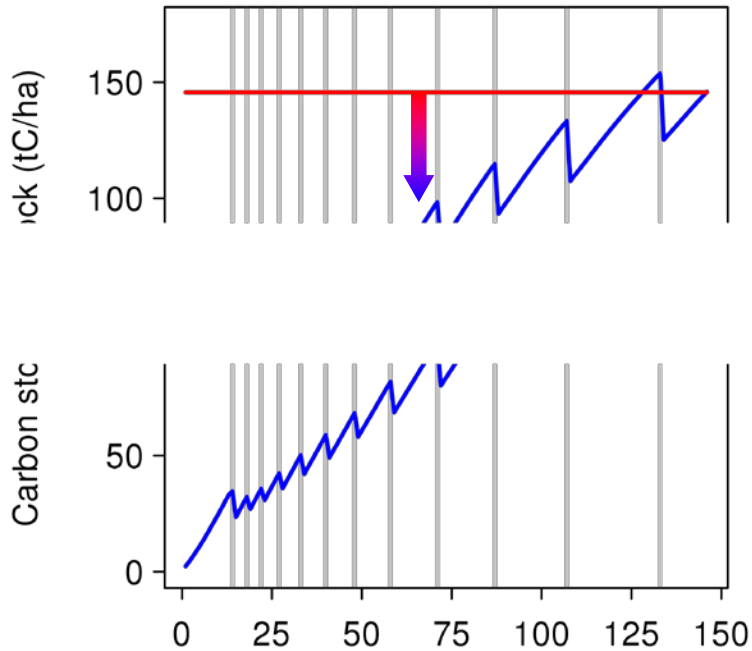
- approche “peuplement moyen”, non plus “arbre moyen”
- prise en compte de la gestion forestière et validation du modèle
- intégration cycle de l’azote (en cours)
- préparation des scénarios de forcages climatiques futurs pour ORCHIDEE (8 km résolution ; CERFACS)
- augmentation du nombre de PFT du modèle



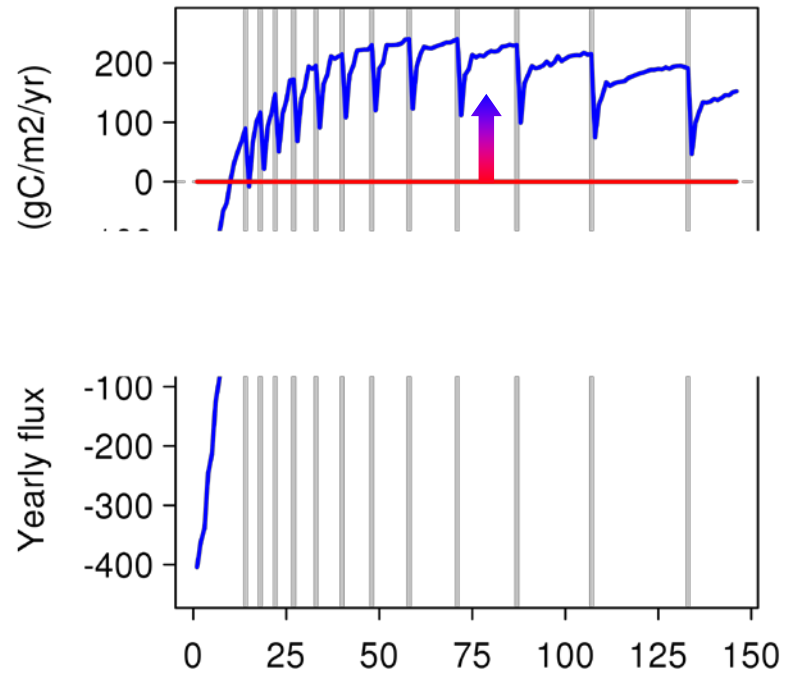
# Changements dans la simulation des stocks et des flux de carbone

— ORCHIDEE  
— ORCHIDEE-FM  
— Thinning

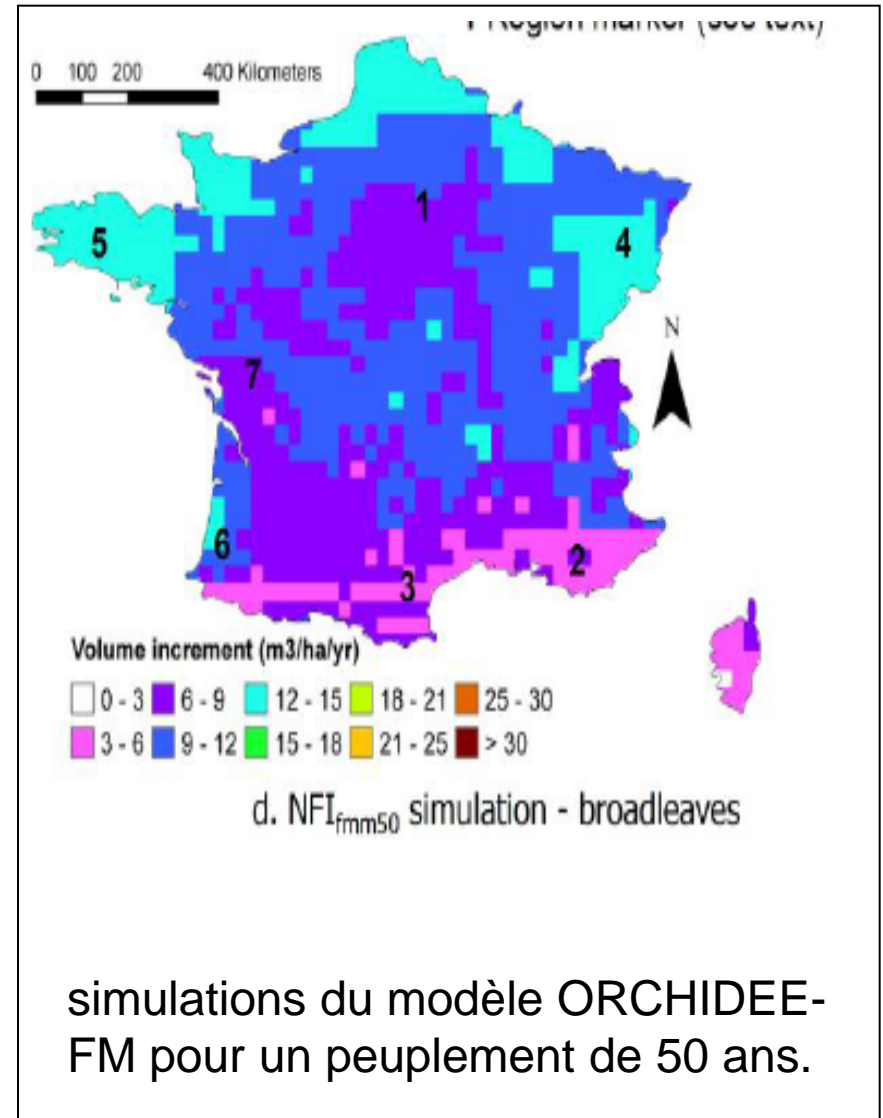
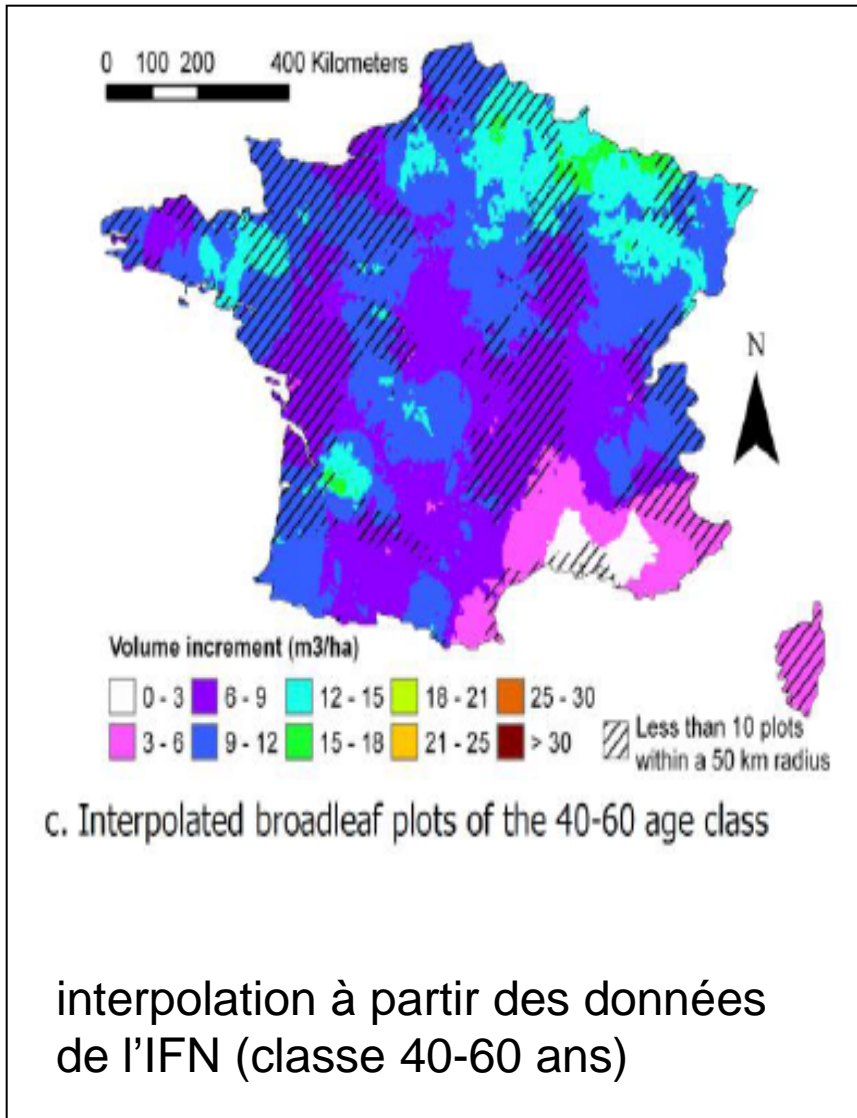
Aboveground biomass



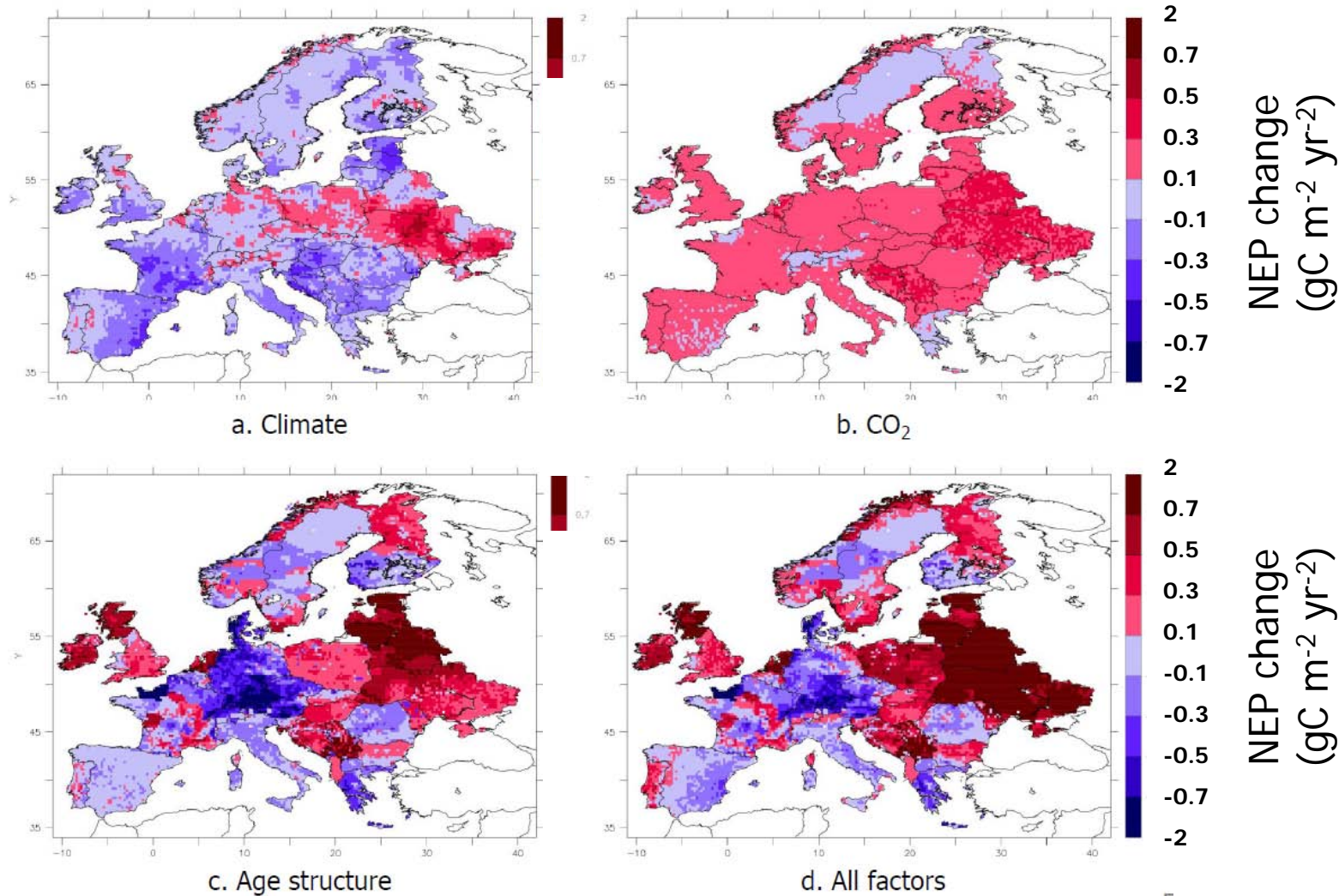
NEP



# Premières validations : les accroissements en volume



# Attribution à l'échelle locale : climat et gestion ont plus d'impact que le CO<sub>2</sub>



# Lot 4

## **Impacts régionalisés à l'échelle nationale**

**Responsable : Philippe Peylin, LSCE**

## Reste à faire en 2<sup>ème</sup> année

- finaliser la mise en forme des informations sur l'état initial du système (presque achevé)
- rapidement, choix de scénarios de gestion (cf intensifs/extensifs, demande en bois-énergie etc.)
- formaliser les modèles de développement des pathogènes et insectes (organisation prochaine d'un atelier spécifique) puis les inclure dans G-GRAECO
- simulation des impacts régionalisés à l'échelle nationale → impacts des différents scénarios croisés climat-gestion

# organisation générale : disciplines impliquées et méthodes mises en œuvre

