



**HAL**  
open science

## Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières

Vincent V. Badeau, Jean-Luc Dupouey, Catherine Cluzeau, Jacques Drapier,  
Christine Le Bas

► **To cite this version:**

Vincent V. Badeau, Jean-Luc Dupouey, Catherine Cluzeau, Jacques Drapier, Christine Le Bas. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières. 2004. hal-02834220

**HAL Id: hal-02834220**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02834220>**

Submitted on 7 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Projet CARBOFOR**  
*Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France*

**Tâche D1**  
*Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle  
des grandes essences forestières françaises*

**ECOFOR n° 2002.17**  
**INRA n° 4154 B**

**Résumé du Rapport Final – juin 2004**

**Vincent BADEAU<sup>-1-</sup>, Jean-Luc DUPOUEY<sup>-1-</sup>,**

**Catherine CLUZEAU<sup>-2-</sup>, Jacques DRAPIER<sup>-2-</sup>, Christine LE BAS<sup>-3-</sup>**

- 1 -

INRA - Centre de NANCY  
UMR Ecologie et Ecophysiole  
Forestières  
Equipe Phytoécologie  
54280 Champenoux – France

Tél. : +33 (0)3 83 39 40 72  
Fax : +33 (0)3 83 39 40 22

badeau@nancy.inra.fr  
dupouey@nancy.inra.fr

- 2 -

Inventaire Forestier National  
14 rue Girardet – CS 4216  
54042 Nancy Cédex

Tél. : +33 (0)3 83 30 99 30  
Fax : +33 (0)3 83 30 99 37

ccluzeau@ifn.fr  
jdrapier@nancy.ifn.fr

- 3 -

Unite INFOSOL - INRA  
Centre de recherche d'Orléans  
Avenue de la Pomme de Pin  
BP 20619 - Ardon  
45166 Olivet Cédex

Tel: +33 (0)2 38 41 78 43  
Fax: +33 (0)2 38 41 78 69

christine.le-bas@orleans.inra.fr

## CONTENU DU PROJET

Dans ce volet du projet CARBOFOR, nous proposons d'étudier, à l'échelle du territoire national, les effets des contraintes climatiques sur l'extension de l'aire potentielle des principales essences forestières, et de modéliser le déplacement de ces aires sous l'effet des changements climatiques.

## RAPPEL SUR LES DONNEES DISPONIBLES

### *Données concernant la végétation*

Toutes les données concernant la végétation proviennent des bases de l'Inventaire Forestier National. Les données disponibles regroupent, d'une part, des relevés *dendrométriques* et d'autre part, des relevés *floristiques* et *écologiques*. Après harmonisation des bases de données, géoréférencement des points de relevés, utilisation de données anciennes pour compléter les données manquantes, un ensemble de 104 259 relevés, réalisés de 1985 à 2001, permet l'analyse de la présence /absence de 67 espèces ligneuses sur l'ensemble du territoire.

### *Données climatiques pour la période actuelle*

Les données climatiques de base utilisées dans le cadre du projet correspondent : i) aux interpolations du modèle AURELHY de Météo-France et ii) aux données du Service d'Archivage et de Traitement Météorologique des Observations Spatiales (SATMOS) – CNRS / Météo-France.

Les interpolations AURELHY au pas de 1 km correspondent à des normales trentenaires mensuelles et concernent les précipitations (période 1961 – 1990), les températures minimales et maximales (période 1961 – 1990) et le nombre de jours de gel (période 1971 – 2000). Ces données sont complétées par deux cartes annuelles correspondant aux nombres de jours avec température inférieure à -5°C et -10°C.

Un rayonnement global moyen mensuel est calculé à partir des synthèses décennales de rayonnement du SATMOS. Ces flux d'éclairement solaire sont issus des données canal visible de l'imageur Météosat traitées par l'algorithme *SOFIA-ASTEX*. Ils couvrent la période 1996 – 2002 et la résolution moyenne des images est de 3 km.

D'autres descripteurs sont calculés à partir de ces données de base, et pour chaque maille AURELHY : températures moyennes mensuelles, moyennes annuelles, extrêmes de températures, amplitudes thermiques, évapotranspirations potentielles mensuelles selon la formule de Turc (ETP), déficits pluviométriques mensuels (P – ETP). A ces données s'ajoutent des cumuls bimensuels, trimensuels et annuels.

### *Données climatiques futures*

Les paramètres de sortie du scénario ARPEGE - B2, fournis au pas de temps journalier, sont synthétisés sous forme de normales trentenaires mensuelles correspondant : i) aux périodes de référence des données climatiques actuelles ; ii) à un futur *proche* (période 2020-2049) et iii) un futur *éloigné* (période 2070-2099). Les anomalies sont calculées entre les périodes futures et la période actuelle, puis les climats futurs sont estimés en ajoutant aux données AURELHY les deux séries d'anomalies.

### *Caractéristiques édaphiques*

Les relevés écologiques ne sont systématiques à l'IFN que depuis 1992. En conséquence il existe des manques importants sur le territoire. Pour prendre en compte la nature du substrat dans le contrôle des aires de répartition, la carte des sols de France au 1/1 000 000<sup>ème</sup> (INRA-Orléans) a été dérivée à l'aide de fonctions de pédo-transfert en une carte thématique donnant trois classes d'acidité pour les substrats.

## PRINCIPAUX RESULTATS

### *Analyse des cartes de répartition des essences*

Les cartes individuelles de répartition des essences ont été éditées et classées afin d'identifier les espèces présentant des aires de répartition semblables et regrouper celles-ci en un nombre limité de groupes chorologiques. Les 67 espèces ligneuses choisies dans le cadre du projet ont été rassemblées en 13 groupes après une analyse visuelle de leur aire de répartition (*figure 1*).

### ***Analyse en composante principale des variables climatiques actuelles***

Une première analyse en composantes principales des variables climatiques associées aux points IFN montre la pertinence des 344 paramètres retenus pour discriminer les grandes zones climatiques françaises. Le premier axe factoriel de cette analyse (55% de la variance totale) est très fortement déterminé par les températures moyennes et les ETP auxquelles s'opposent les nombres de jours de gel et les déficits pluviométriques. Le second axe factoriel (16% de la variance) est lié aux rayonnements. Le troisième axe (11% de la variance) est déterminé par les hauteurs de précipitations. Enfin, le quatrième axe (4% de la variance) est lié aux amplitudes thermiques et dans une moindre mesure aux températures maximales de printemps (*figure 2*).

### ***Caractéristiques climatiques moyennes et présence des espèces***

Pour vérifier l'hypothèse de concordance entre, d'une part, le classement des points de relevés par l'ACP sur une base uniquement climatique et, d'autre part, la présence des différentes espèces, le barycentre de la présence de chaque espèce a été calculé en utilisant les coordonnées des relevés sur les principaux axes factoriels (quand l'espèce considérée est présente). La position relative des différents barycentres est ensuite confrontée, d'une part, aux données autécologiques des essences et, d'autre part, aux groupes chorologiques présentés ci-dessus.

Deux ensemble d'espèces s'opposent sur le premier axe factoriel (*figure 3*). On trouve, d'une part, le pin cembro et le pin à crochets, l'aulne vert, le mélèze, etc. L'olivier, le chêne liège et le chêne vert, le pin d'Alep, le figuier, etc. constituent le second groupe. Ces espèces montagnardes et méditerranéennes s'opposent, conformément à la définition du premier axe factoriel, selon un gradient de températures.

Sur le deuxième axe factoriel l'ensemble des espèces citées précédemment (méditerranéennes et montagnardes-subalpines) s'opposent au charme, aux bouleaux verruqueux et pubescent, aux chênes sessile et pédonculé et au tilleul à petites feuilles. Ces essences sont totalement absentes de la région méditerranéenne et des Alpes du Sud ; les aires de répartition de ces deux ensembles ne se recouvrent donc pas. Le deuxième axe factoriel oppose les espèces des régions soumises à de fort rayonnements (région méditerranéenne et Alpes du Sud) aux espèces dont la présence couvre les zones les plus septentrionales de l'échantillon étudié.

La *figure 3* confirme la pertinence des groupes d'espèces constitués *a priori*. Le **groupe 1** correspond à des essences de l'étage subalpin. Il est essentiellement représenté par des espèces des Alpes internes auxquelles s'ajoutent des espèces que l'on trouve jusque dans le Massif-central et les Pyrénées orientales. Le **groupe 2** rassemble des espèces essentiellement présentes à l'étage montagnard dans les Alpes (à des altitudes inférieures aux espèces du groupe 1), les Pyrénées orientales, la bordure sud-ouest du Massif-central et le Jura. Le **groupe 3** correspond à des espèces communes à l'ensemble des régions de montagne et pouvant s'étendre à l'étage collinéen dans le quart Nord-Est de la France ou ayant été introduites dans le Nord-Ouest (sapin et épicéa en particulier). Le **groupe 4** est une extension du groupe 3 ; il correspond à des espèces communes en montagne (jusqu'à l'étage montagnard) et très présentes en plaine dans la moitié Nord de la France. Les espèces du **groupe 5** sont principalement collinéennes mais peuvent s'étendre jusqu'à l'étage montagnard (sauf Alpes du Sud). Elles sont toutes très communes sur une grande partie du territoire, sauf dans la région méditerranéenne. Le **groupe 6** est un groupe intermédiaire entre les groupes 5 et 7. Il regroupe des espèces de l'étage collinéen, fréquentes dans le Sud et l'Ouest et plus rares dans le Nord et le Nord-Est. Le **groupe 7** rassemble les espèces dont la plus forte présence est observée dans l'Ouest de la France. Le **sous-groupe 7a** correspond à l'ensemble des espèces de la moitié Ouest (principalement les Landes de Gascogne, le Massif armoricain, la Sologne) et pouvant s'étendre jusque dans le midi. Le **sous-groupe 7b** est proche du groupe 7a mais s'en distingue par une diminution de la fréquence des espèces dans l'Ouest et une augmentation en région méditerranéenne. Le **groupe 8** rassemble l'ensemble des espèces méditerranéennes. Enfin, les espèces supraméditerranéennes essentiellement présentes dans les Alpes du Sud constituent un **groupe 9**, intermédiaire entre les groupes des espèces méditerranéennes et montagnardes. Cette figure démontre que la solution factorielle, malgré le nombre limité d'axes employés, est conforme aux hypothèses chorologiques de départ et que les groupes d'espèces constitués à partir des cartes de répartition s'ordonnent de façon cohérente.

### ***Analyse discriminante des groupes chorologiques***

Les variables climatiques séparant au mieux ces groupes chorologiques sont recherchées en réalisant une analyse discriminante des populations présentant la meilleure séparation spatiale (groupes chorologiques 1, 2, 3, 4, 6, 7a et 8) en fonction des paramètres climatiques actuels. Le meilleur modèle obtenu pour séparer les groupes fait intervenir l'ETP du mois de janvier, la température moyenne de février, le cumul des rayonnements des mois de mai, juin et juillet, l'ETP cumulée des mois de juin et juillet et enfin, l'ETP du mois de novembre. Ce modèle permet la

reconnaissance correcte de 74% des points du groupe 8, 56% des points du groupe 7a, 55% des points du groupe 1, 52% des points du groupe 2, 44% des points du groupe 6, 32% des points du groupe 3 et 25% des points du groupe 4.

La **figure 4a** présente le résultat de la fonction discriminante appliquée au 551 716 points de la grille AURELHY. On distingue nettement une zone méditerranéenne (groupe 8a), trois zones de montagne (groupes 1, 2 et 3), un ensemble aquitain (groupe 7a), un ensemble atlantique (groupe 6) et une zone nord-est plus continentale (groupe 4). Malgré l'approche très réductrice employée, la carte résultante concorde, dans les grandes lignes, aux grands domaines phytogéographiques français.

#### **Modélisation des aires de répartition des essences**

Une première analyse des corrélations entre la présence / absence des espèces et les paramètres climatiques a été conduite. Bien qu'imparfait, ce test permet de classer les essences en grandes familles de réactions vis-à-vis des contraintes climatiques. Dans le cas du hêtre par exemple, on observe de fortes corrélations négatives avec les températures, le rayonnement et l'ETP. A l'inverse, les pluies, les déficits pluviométriques et le nombre de jours de gel sont positivement corrélés à la présence de cette essence. La présence du chêne vert est au contraire très positivement corrélée aux températures, au rayonnement et plus encore à l'ETP. Le nombre de jours de gel est corrélé négativement à sa présence. Les pluies et les déficits pluviométriques semblent peu corrélés à la présence du chêne vert.

La présence / absence de diverses essences a ensuite été analysée par régression logistique. La sélection des modèles est l'étape la plus sensible de la procédure et ne sera pas décrite *in extenso* ici. Du fait de la taille de l'échantillon, la plupart des variables climatiques présentes ont une contribution significative aux modèles et les critères classiques (objectifs) de sélection des modèles sont inefficaces. La sélection est donc réalisée de manière subjective : i) en limitant le plus possible le nombre de régresseurs ; ii) en évitant la colinéarité entre les régresseurs ; iii) en étudiant la pertinence du modèle pour classer les occurrences de présence ; iv) en vérifiant visuellement l'adéquation entre les cartes de présence / absence observées et les cartes de probabilités de présence modélisées. Les **figures 5ab** et **6ab** présentent deux exemples calculés pour le chêne vert et le hêtre.

Le modèle retenu pour le chêne vert fait intervenir l'ETP du mois de juillet (effet positif du paramètre sur la présence du chêne), l'amplitude thermique (effet négatif) et le nombre de jours avec des températures inférieures à -10°C (effet négatif).

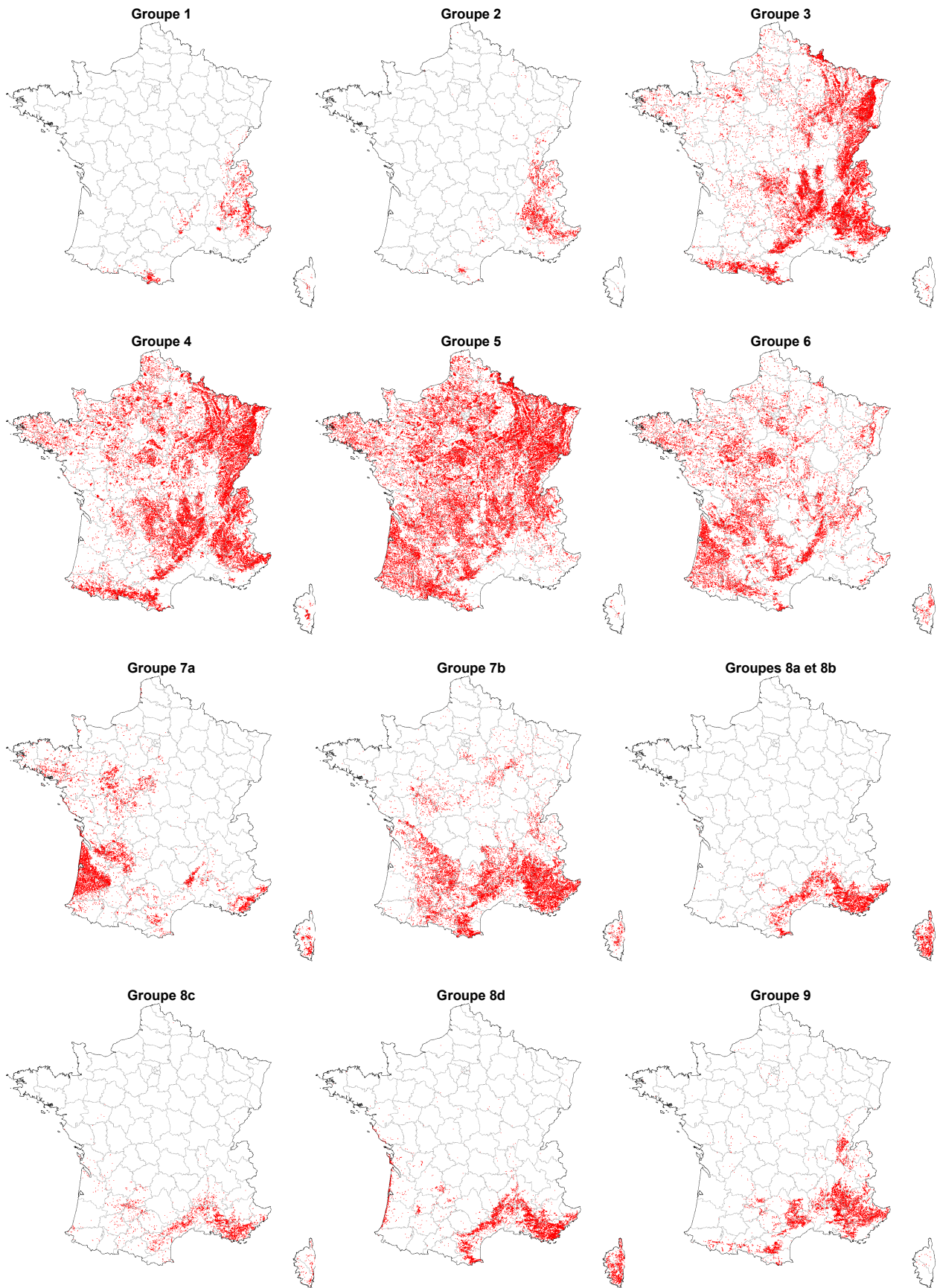
Le modèle retenu pour le hêtre fait intervenir les déficits pluviométriques des mois de juin et juillet (effet positif de la variable sur la présence du hêtre) et la température maximal du mois d'octobre.

#### **Application des modèles aux données climatiques futures**

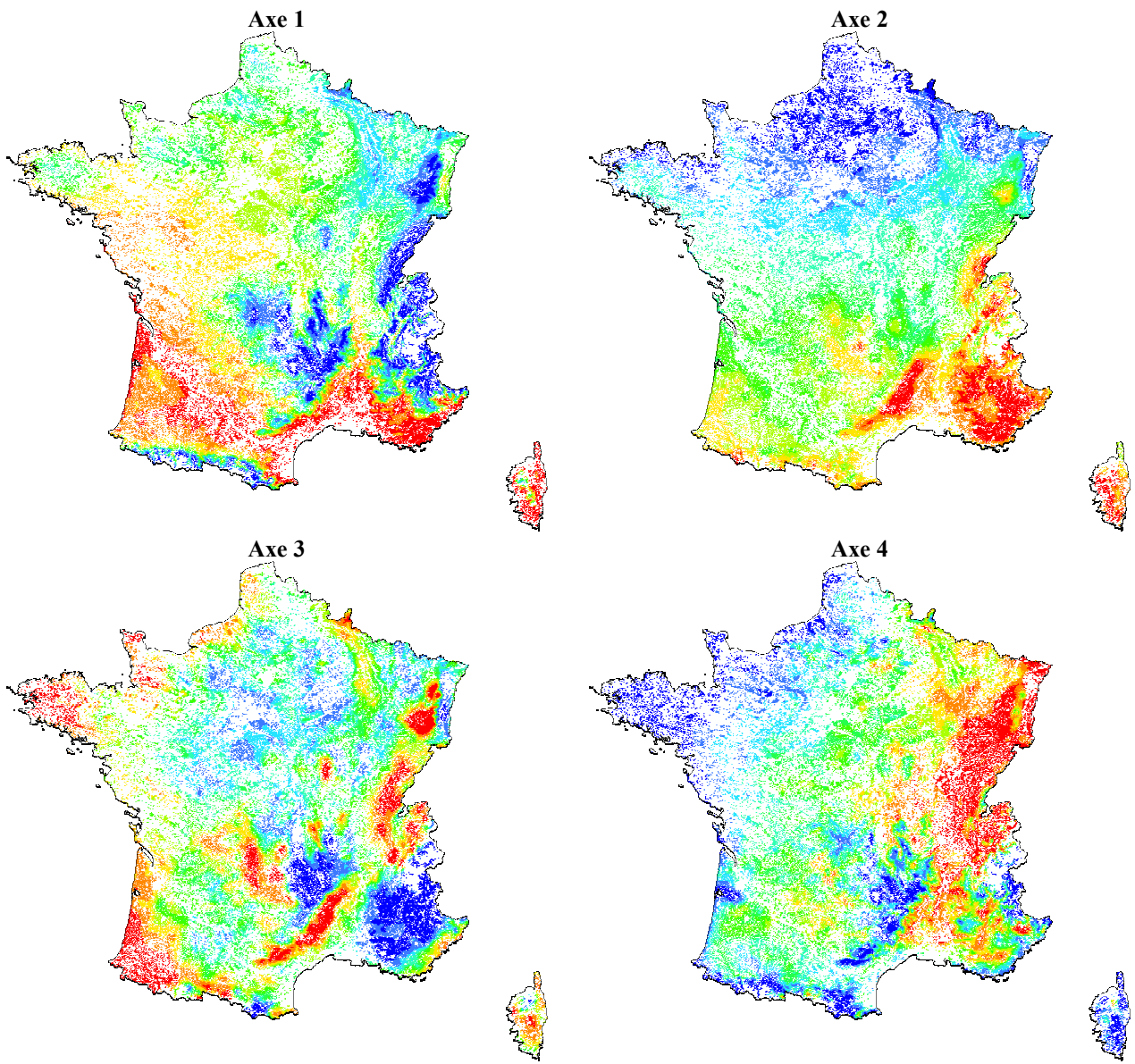
Les **figure 4b** et **4c** présentent les résultats de la fonction discriminante des groupes chorologiques appliquée aux points de la grille AURELHY modifiée par les anomalies ARPEGE pour les périodes 2020-2049 et 2070-2099. Selon le scénario B2, les plus fortes évolutions sont observées pour le groupe 7a (17% du territoire actuellement contre 46% en 2100), et le groupe 8 (9% du territoire actuellement contre 28% en 2100). Tous les autres groupes auraient tendance à diminuer, notamment les groupes montagnards (groupes 1, 2 et 3) dont les surfaces de territoire passeraient de 16% à 6%.

Les **figures 5bc** et **6bc** présentent les projections des modèles logistiques ajustés à la présence du chêne vert et du hêtre. Pour le chêne vert, les probabilités de présence augmentent très fortement dans toute la moitié Sud de la France conformément à l'extension observée précédemment pour l'ensemble du groupe des espèces méditerranéennes. A l'opposé, l'aire potentielle de distribution du hêtre (classée dans le groupe chorologique 4) tend à régresser fortement.

Des modèles identiques à ceux présentés ici ont également été calculés pour les essences de montagne (groupes 1 et 2), les essences méditerranéennes (groupes 8a), le pin d'alep, les chênes pubescent et tauzin, l'épicéa et le sapin.



**Figure 1 :** Assemblage des cartes de répartition des 67 essences étudiées en groupes chorologiques.

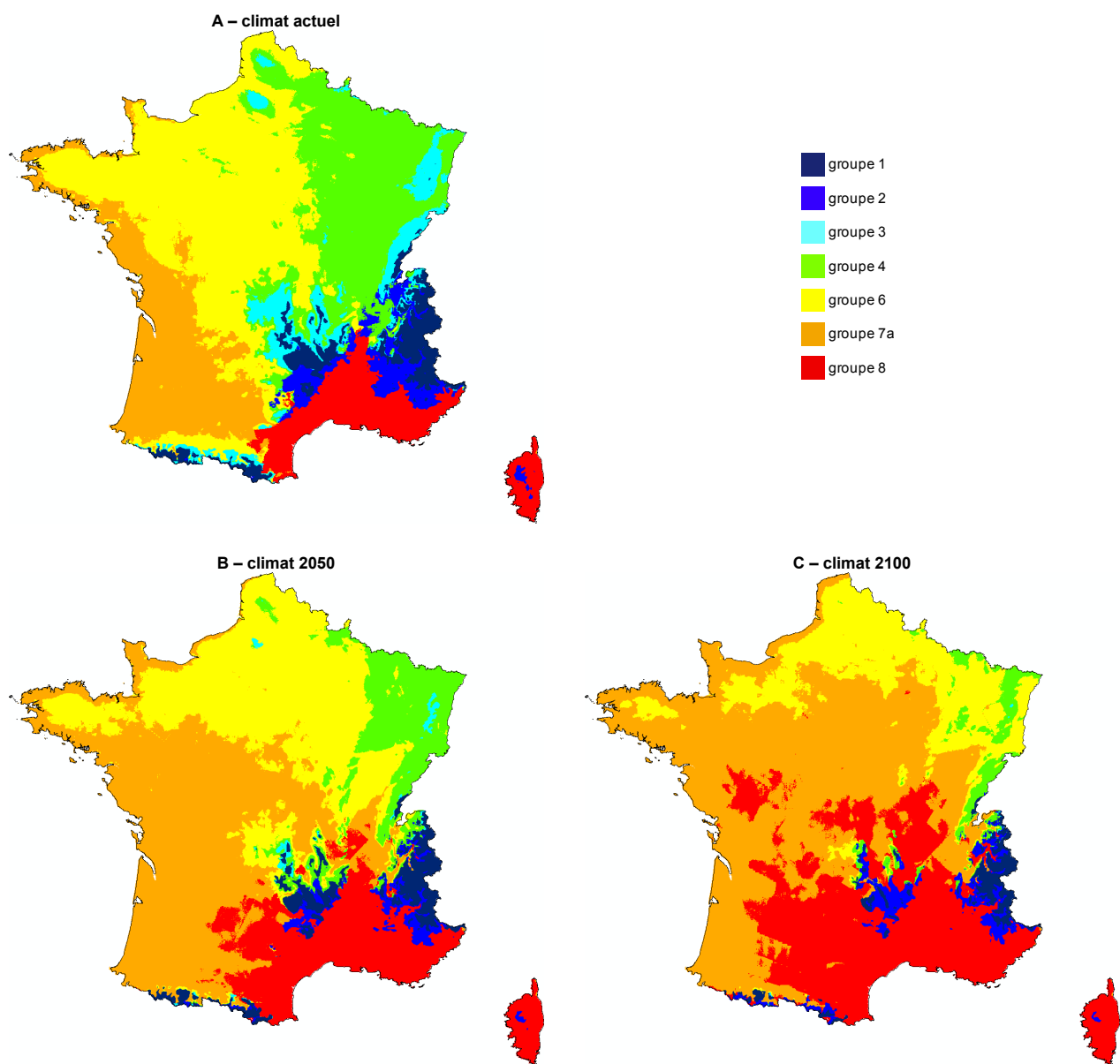


**Figure 2 :** Projection des 104 259 relevés IFN en fonction de leurs coordonnées sur les quatre premiers axes factoriels de l'analyse en composantes principales des variables climatiques.

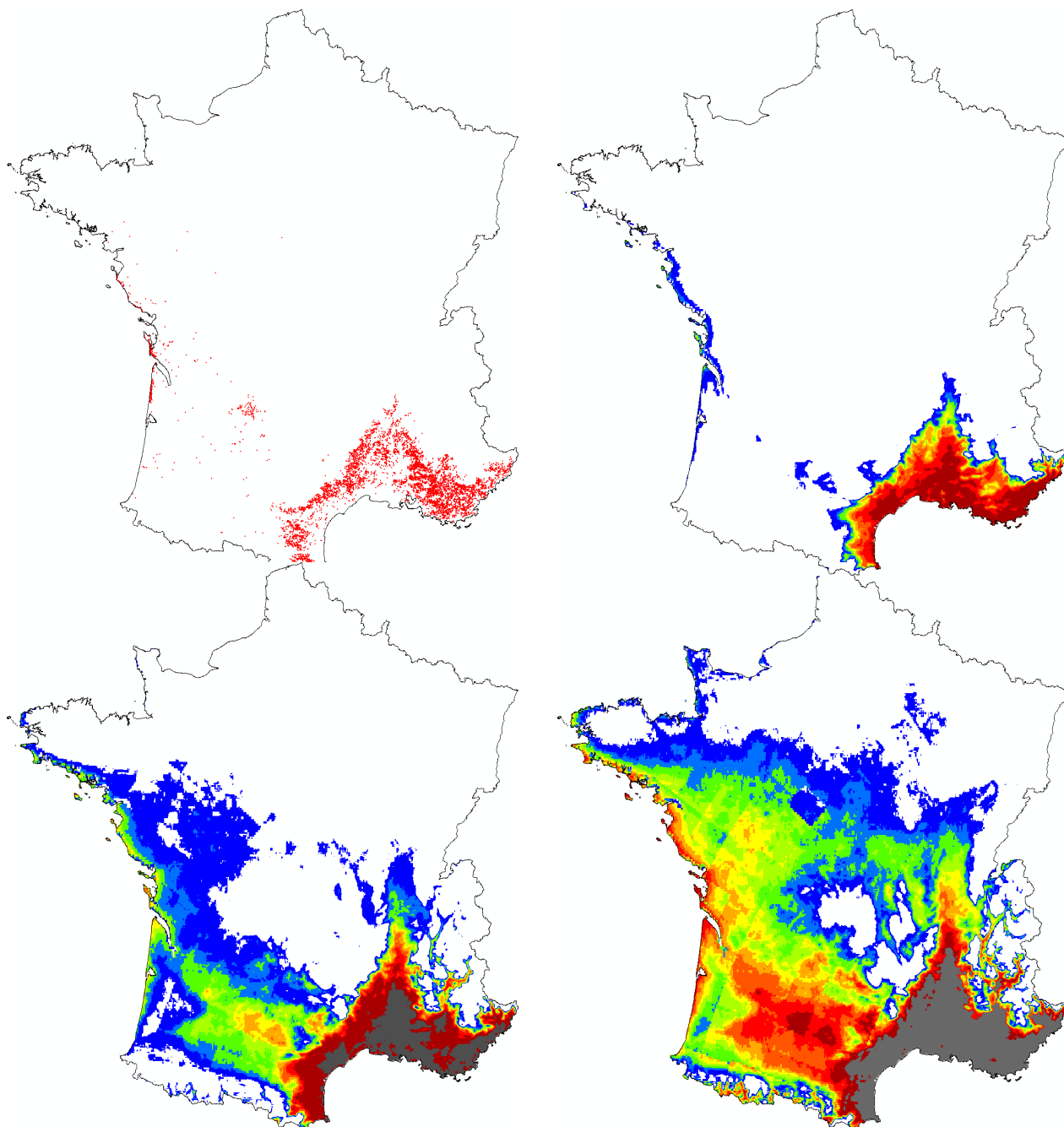


**Figure 3 :** Projection du barycentre des 67 essences étudiées sur le premier plan factoriel déterminé par l'analyse en composantes principales des caractéristiques climatiques et groupes chorologiques (*cf.* figures 1).

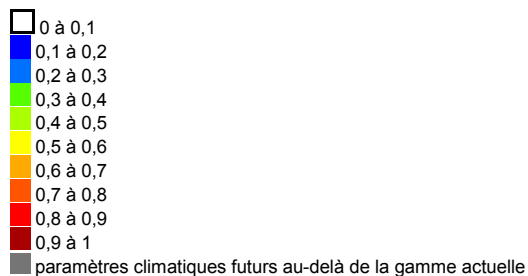




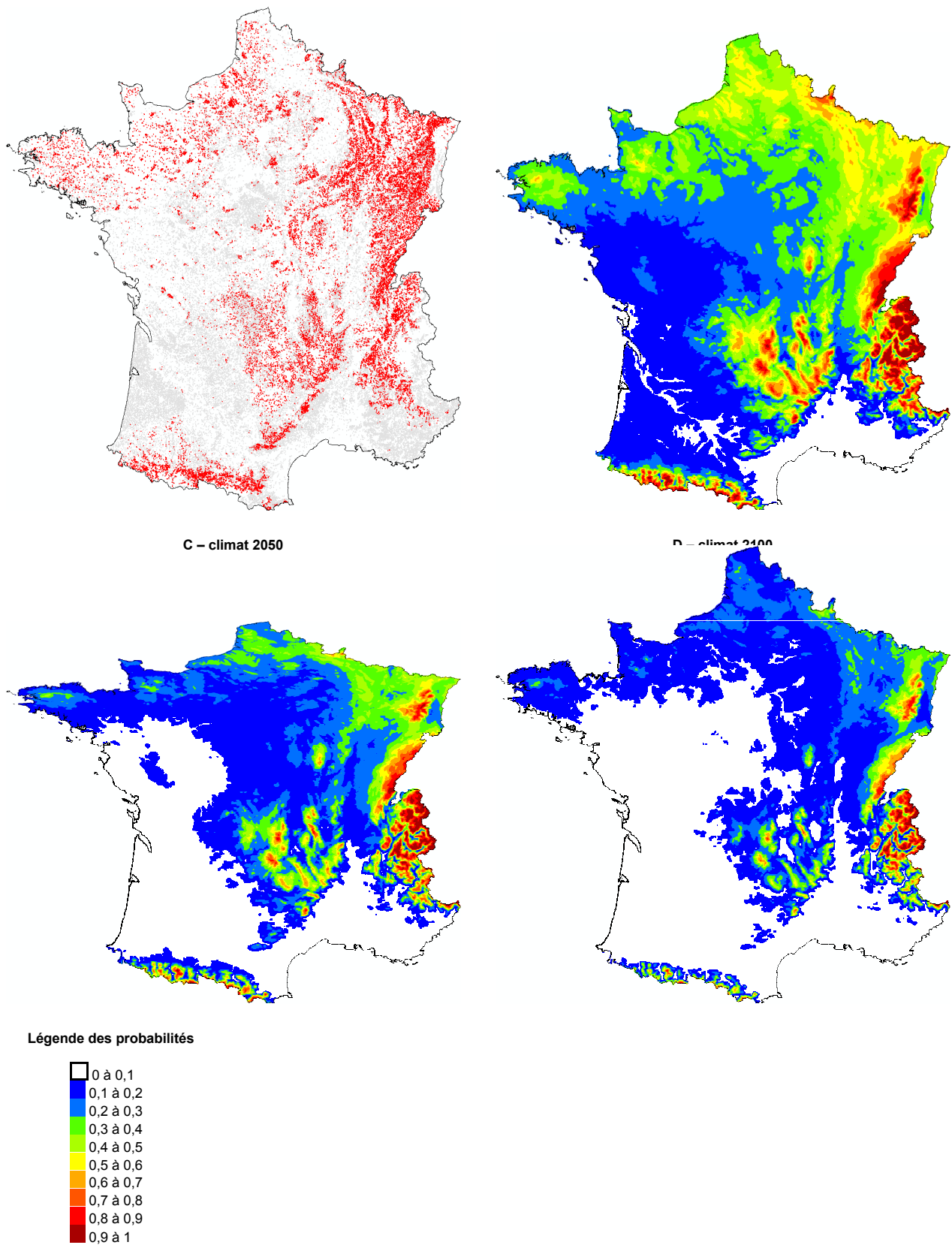
**Figure 4 :** Répartition géographique de 7 groupes chorologiques (*cf.* figures 1 et 3) estimée par analyse discriminante en fonction des climats actuel (A) et futurs (B et C).



**Légende des probabilités**



**Figure 5 :** Analyse logistique de la présence du chêne vert. A – répartition actuelle observée par l’IFN ; B – modélisation de l’aire de répartition actuelle ; C et D – extrapolation du modèle logistique en utilisant les données climatiques futures



**Figure 6 :** Analyse logistique de la présence du hêtre. A – répartition actuelle observée par l’IFN ; B – modélisation de l’aire de répartition actuelle ; C et D – extrapolation du modèle logistique en utilisant les données climatiques futures