UMR INRA – ENGREF 1092
Laboratoire d'Étude des Ressources
FOrêt-Bois (LERFOB)
Equipe Ecologie Forestière
14 rue Girardet, CS 14216
54042 Nancy Cedex

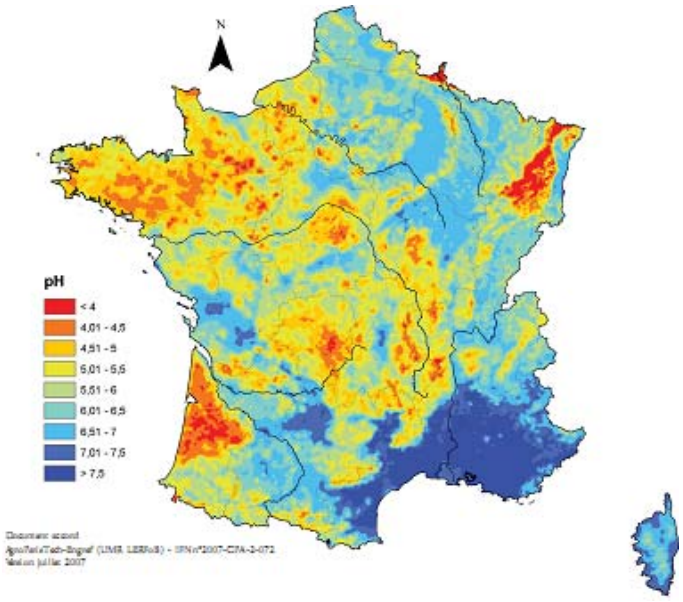
LERFOB

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL

Carte du pH de surface des sols forestiers français

Guide technique

Version 1, mars 2008



Mots clés : pH – France métropolitaine – Carte – 1/1.000.000 – raster – bioindication – relevés floristiques IFN – EcoPlant

Citation : AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB), IFN (2008) - Guide d'utilisation de la carte des pH de surface des sols forestiers français, version 1, mars 2008, selon le document © accord AgroParisTech (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072 dans sa version d'avril 2007.

Etude financée en partie par l'ADEME.

Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

Résumé

La carte des pH des sols forestiers français a été élaborée à partir du caractère bioindicateur des plantes forestières et de la base de données de l'Inventaire forestier national (IFN). Le caractère bioindicateur des espèces végétales forestières a d'abord été calculé par rapport au pH à partir de 3835 placettes possédant toutes un inventaire floristique et une mesure de pH eau de l'horizon organo-minéral A du sol effectuée en laboratoire. Ce travail, réalisé à partir de la base de données EcoPlant (AgroParisTech-ENGREF), a permis de calculer, pour chaque espèce, la valeur indicatrice qui représente la valeur de pH pour laquelle sa fréquence dans la nature est maximale. Le pH de surface de 104 375 placettes de l'IFN inventoriées entre 1989 et 2004 a ensuite été estimé par la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes sur chaque site. Une méthode d'interpolation par krigeage a été utilisée pour estimer le pH entre les placettes et créer une carte des pH de surface des sols forestiers français avec une résolution de 1 km².

La qualité de la carte a été évaluée à partir de 261 placettes systématiquement échantillonnées en France et n'ayant pas servi à calculer les valeurs indicatrices ou élaborer la carte des pH. L'écart moyen entre le pH de la carte et le pH mesuré sur ces placettes est égal à 0.81 unités de pH et le carré du coefficient de corrélation (R^2) entre valeurs de pH prédites et mesurées atteint 0.58. Ces valeurs constituent une bonne estimation de l'erreur réalisée par une prédiction du pH effectuée à partir de cette carte des pH en un point quelconque des forêts françaises. Du fait des relevés floristiques employés, situés uniquement en forêt, et des modifications de sol liées aux pratiques agricoles, la carte des pH n'est pas valable hors milieu forestier.

Cette carte est issue d'une collaboration entre l'IFN[1] et AgroParisTech-ENGREF (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois)[2] dans le cadre d'une convention financée par l'ADEME[3].

La carte est disponible en version mise en page (gratuite, téléchargement et impression par l'utilisateur) et en version numérique (payante, raster au format GeoTIFF au tarif de 950 €). Il est ainsi possible d'utiliser l'information au 1/1 000 000, à deux niveaux de lecture :

- comme illustration ou carte murale. La gamme de couleur met en évidence les grandes structures et ensembles régionaux ;
- ou comme couche d'information dans un système d'information géographique.

[1] www.ifn.fr
[2] http://efdp.nancy-engref.inra.fr/
[3] www.ademe.fr

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

Sommaire

1. Méthode de calcul 4
1.1. Utilisation de la base de données EcoPlant pour établir le caractère indicateur de la flore 5
1.2. Bioindication du pH à partir des relevés de l'IFN 7
1.3. Spatialisation des valeurs de pH bioindiqué 8
1.4. Utilisation d'un jeu de données pour la validation 8
2. robustesse de la méthode 10
2.1. Utilisation des relevés incomplets pour réaliser les prédictions 10
2.2. Pertinence de l'utilisation de valeurs indicatrices nationales plutôt que régionales 12
3. Validité de la carte des ph 14
3.1. Distribution des valeurs de pH sur la France 14
3.2. Validation de la carte sur un jeu indépendant de données 16
3.3. Pertinence des pH bioindiqués pour expliquer le comportement de la flore forestière Française 18
3.4. Limites de la carte 18
4. Caractéristiques techniques 20
4.1. Contenu du CD-ROM 20
4.2. Symbologie 20
5. mise à jour 22
5.1. Généralités 22
5.2. Périodicité de mise à jour 22
5.3. Historique 22
5.4. Responsable technique de la mise à jour 22
6. Diffusion et conditions d'accès 23
6.1. Visualisation simple des fichiers 23
6.2. Support d'exemple proposé 23
6.3. Condition matérielles d'accès 23
7. Conditions d'achat et conditions juridiques 24
7.1. Forme juridique 24
7.2. Unités de commandes 24
7.3. Tarif 24
7.4. Contact pour la commande 24
8. Bibliographie 25

1. METHODE DE CALCUL

Le pH d'un sol permet de caractériser sa richesse chimique en éléments minéraux, c'est un facteur déterminant de la végétation des écosystèmes terrestres. Pour en réaliser la carte, nous avons utilisé la base de données EcoPlant, crée par le LERFOB, qui contient plusieurs milliers de placettes comprenant simultanément un inventaire floristique exhaustif et des analyses de sol réalisés en laboratoire, dont le pH de l'horizon A. Cette base de données a rendu possible l'analyse quantitative de plus de 500 espèces de la flore forestière Française vis-à-vis du pH. Ce caractère indicateur de la flore peut ensuite être utilisé pour prédire le pH d'un site à partir de son relevé floristique. Cette technique a été utilisée pour prédire les valeurs de pH sur plus de 100 000 relevés floristiques issus de la base de données écologiques de l'IFN. Les valeurs ont ensuite été interpolées pour fournir une carte donnant une valeur de pH en tout point du territoire français. La validation de cette carte à l'aide de mesures de pH réalisées en laboratoire sur un jeu indépendant de relevés permet de déterminer la qualité de la prédiction (Figure 1).

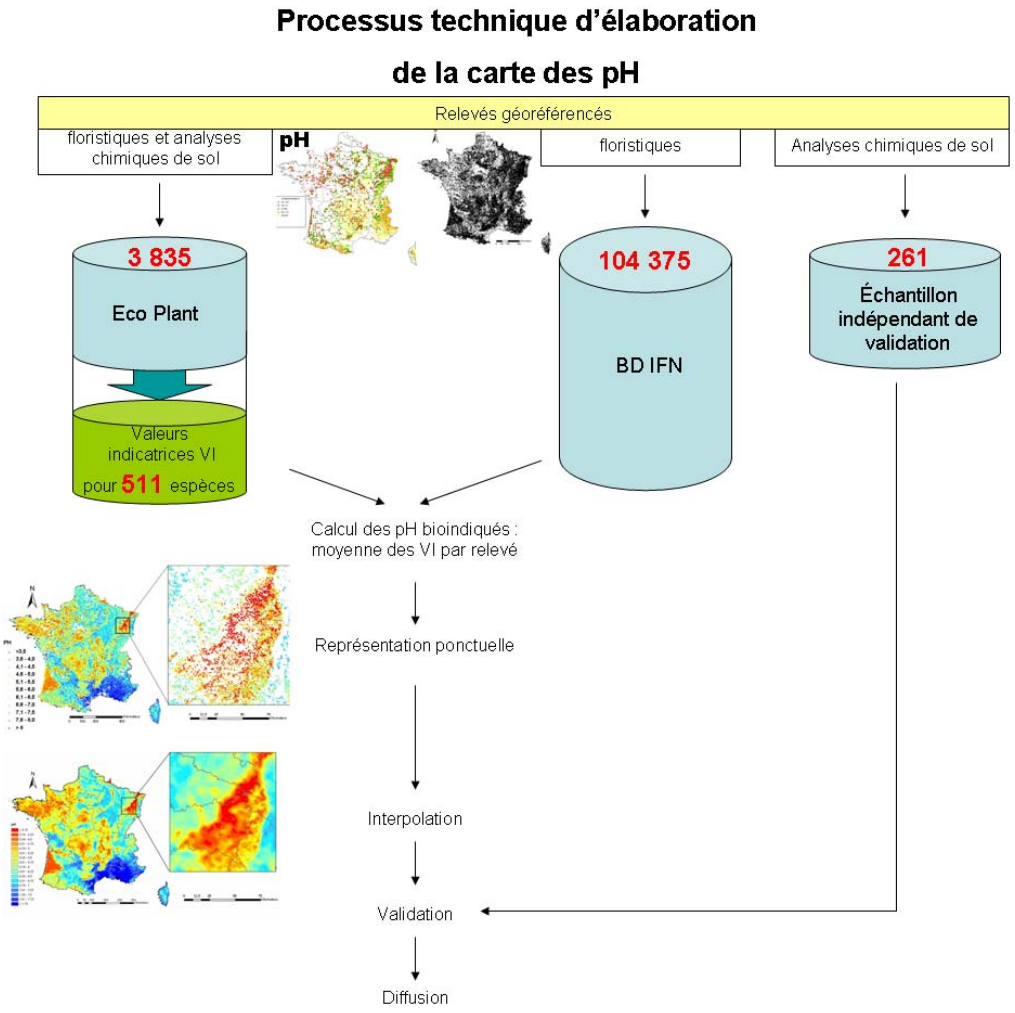


Figure 1: Elaboration de la carte du pH des sols forestiers de France : schéma. (en rouge le nombre de relevés)

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

1.1. Utilisation de la base de données EcoPlant pour établir le caractère indicateur de la flore

La base de données phytoécologiques EcoPlant (Gegout, *et al.*, 2005) créée par l'équipe Écologie Forestière (LERFoB) de l'ENGREF à Nancy a été réalisée dans le cadre de contrats avec le ministère de l'agriculture (DERF) et l'ADEME. Elle a permis de structurer, de gérer et d'utiliser des informations contenues dans les relevés phytoécologiques réalisés dans le cadre des typologies de stations forestières, de thèses ou issues de réseaux de placettes forestières (réseau européen, Rénécofor). Elle regroupe près de 7000 relevés phytoécologiques complets (réalisés entre 1960 et 2000), géoréférencés, et pour la plupart d'entre eux des analyses de sol réalisées au même endroit que le relevé floristique. EcoPlant permet d'étudier le comportement de la flore forestière vis-à-vis des variables du sol (pH, nutrition minérale (Ca, Mg, K, Na échangeables), azotée (C/N, NH_4, NO_3) ou phosphorée (P_2O_5) ; toxicité (Al et H échangeables) ; réserve utile et hydromorphie du sol, etc.), et de cartographier celles qui sont les plus importantes pour expliquer la distribution ou la productivité des végétaux. De cette base, 3835 relevés floristiques ont été extraits, répartis sur toute la France (Figure 2), possédant à la fois un relevé floristique complet et une analyse du pH eau de l'horizon A des sols réalisée en laboratoire. Il est à noter qu'une densité plus importante de placettes se situe dans la moitié nord de la France, et plus particulièrement dans le nord-est. De nouvelles analyses sont en cours de réalisation suivant un plan d'échantillonnage stratifié. Cela permettra de compléter la base dans les zones biogéographiques actuellement moins échantillonnées, comme la zone méditerranéenne ou le Massif Central.

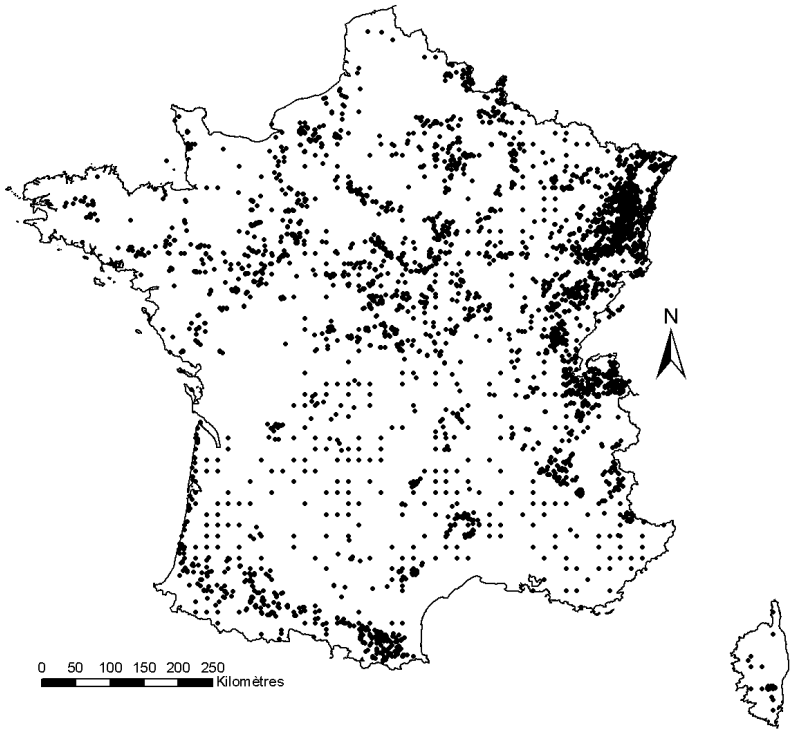


Figure 2: Répartition des 3835 relevés de la base EcoPlant contenant des mesures de pH.

Les relevés floristiques de la base Ecoplant permettent de connaître la présence ou l'absence des espèces forestières pour chacun des 3835 relevés. A partir de ces données, on modélise la distribution de chaque espèce vis-à-vis de la variable étudiée en établissant une courbe de probabilité de présence (ou courbe de réponse) de l'espèce pour les différentes valeurs prises

par la variable dans les conditions naturelles (Figure 3, à gauche). Ces courbes de réponse permettent de définir le comportement de l'espèce vis-à-vis du facteur étudié.

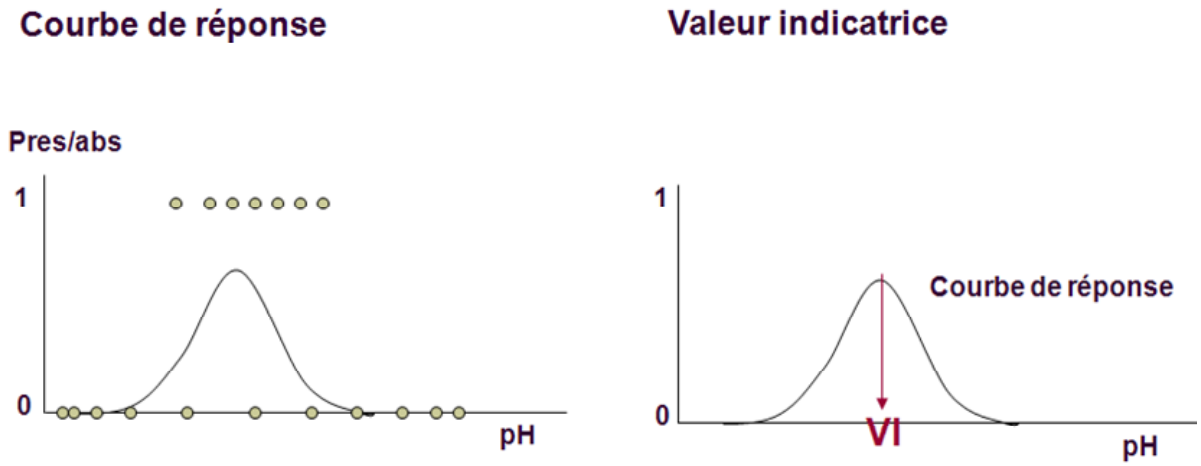


Figure 3: Courbe de réponse établie à partir de présence-absence de l'espèce étudiée sur des sites dont le pH est connu. La valeur indicatrice (VI) est égale à la valeur de pH qui correspond au maximum de probabilité de présence de l'espèce.

Cette courbe de réponse est utilisée pour prédire la variable uniquement à partir des inventaires floristiques établis sur les placettes. Pour cela, un indice numérique est défini, appelé « valeur indicatrice », qui est la valeur du facteur pour laquelle la probabilité de présence de l'espèce est maximale (Figure 3, à droite). Il est ensuite possible de réaliser une estimation du facteur sur la placette par bioindication à partir de l'inventaire floristique des sites : la valeur estimée correspond à la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes sur chaque site (Figure 4). Les espèces bimodales, à très large amplitude, ou dont la réponse vis-à-vis du facteur écologique n'est pas significative n'ont pas été prises en compte (Coudun et Gégout, 2006 ; Gegout, *et al.*, 2003).

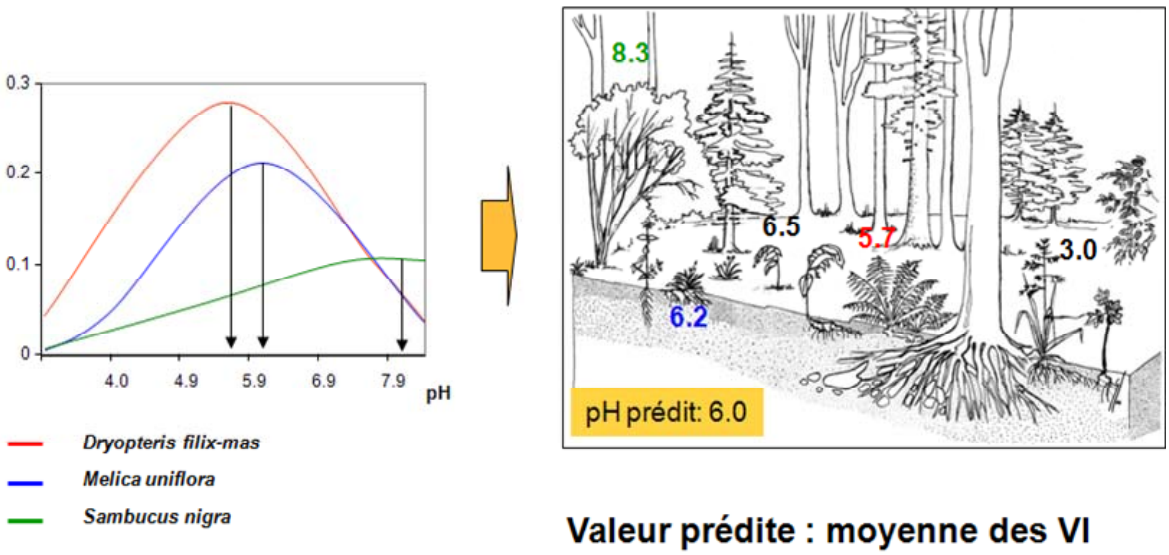


Figure 4 : D'un relevé floristique à une mesure de pH bioindiqué.

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

1.2. Bioindication du pH à partir des relevés de l'IFN

Depuis 1992, et dès le début des années 1980 pour certains départements du nord-est et du sud-est de la France, les relevés dendrométriques de l'Inventaire forestier national sont systématiquement complétés par des relevés phytoécologiques, afin de décrire les conditions de croissance des peuplements. Ces relevés comprennent des observations topographiques, pédologiques et floristiques.

Jusqu'en 2004, l'IFN réalisait des inventaires départementaux avec une périodicité moyenne de 12 ans. Le taux d'échantillonnage était de l'ordre de 1 point pour 130 ha de forêt, soit en moyenne 1 000 points par département. Il fallait une quinzaine d'années pour couvrir l'ensemble de la France à raison de 6 à 7 départements inventoriés par an.

En septembre 2004, l'IFN a modifié sa méthode d'échantillonnage pour passer à un inventaire national systématique et annuel. L'ensemble du territoire métropolitain est couvert chaque année avec un taux de sondage de 1 point pour 2 000 ha de forêt, ce qui représente environ 7 000 points par an.

La végétation est inventoriée sur un cercle de 15 m de rayon (soit 700 m² environ) centré sur le point d'inventaire. Les agents de terrain font la liste des espèces ligneuses et herbacées (bryophytes terricoles et ptéridophytes comprises) présentes sur la placette et affectent à chaque taxon une note d'abondance-dominance dérivée du coefficient de Braun-Blanquet selon les modalités suivantes :

1 : présence mais recouvrement < 5% de la surface
2 : 5 - 25 % de la surface
3 : 25 - 50 % de la surface
4 : 50 - 75 % de la surface
5 : > 75 % de la surface

Les observations et mesures de terrain sont effectuées en toute saison, y compris les relevés floristiques. Les placettes de l'IFN sont des placettes temporaires.

La base de données floristiques de l'IFN contient actuellement près de 120 000 relevés réalisés entre 1985 et aujourd'hui. C'est une source de données unique sur la flore forestière française puisqu'elle couvre l'ensemble du territoire métropolitain avec une forte densité de relevés. De plus, ces données ont été recueillies selon un protocole identique et sont géoréférencées, c'est-à-dire repérées précisément dans l'espace. Le caractère cyclique des inventaires permet également de suivre l'évolution de la végétation forestière dans le temps.

Les données phytoécologiques, et plus particulièrement floristiques, de l'IFN permettent notamment d'étudier la distribution géographique des espèces et de modéliser leurs aires de répartition en fonction de paramètres environnementaux. Ces études contribuent à améliorer les connaissances autoécologiques des espèces forestières et à simuler leur distribution future sous l'effet des changements globaux à moyen et long terme. À travers la valeur bioindicatrice des espèces végétales, les données floristiques de l'IFN peuvent aussi être utilisées pour dresser des cartes de distribution géographique des principaux facteurs écologiques et étudier leur évolution dans le temps.

La carte des pH présentée ici a été élaborée à partir de 104 375 relevés de l'IFN réalisés entre 1989 et 2004. Ils sont donc issus des derniers inventaires départementaux et toute la France (Figure 5). Les valeurs indicatrices calculées à partir de la base EcoPlant du Lerfob ont été utilisées pour estimer un pH bioindiqué sur chacun de ces relevés.

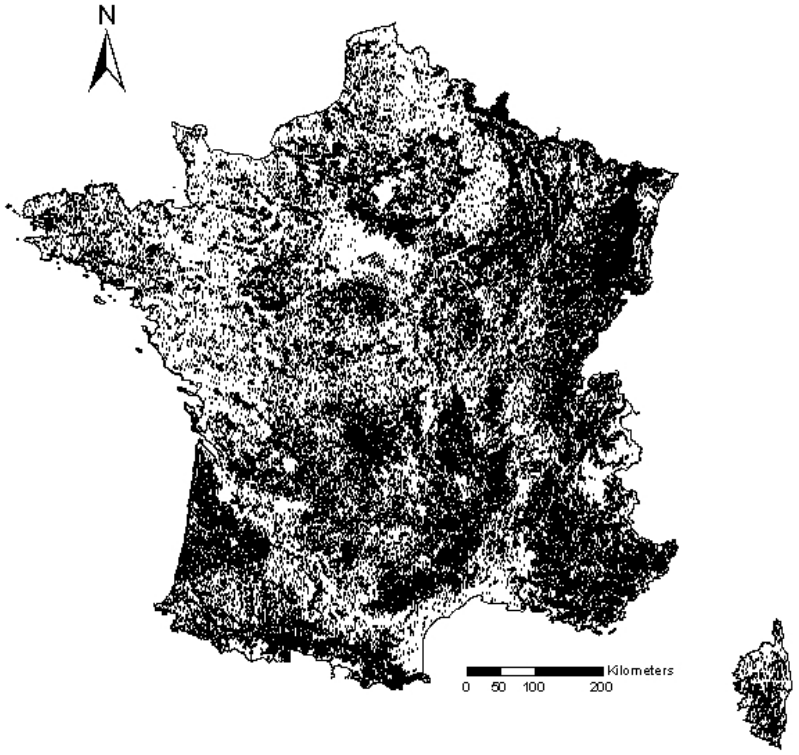


Figure 5: Localisation des 104 375 relevés floristiques IFN utilisés pour réaliser la carte des pH.

1.3. Spatialisation des valeurs de pH bioindiqué

La spatialisation est un moyen de générer de l'information en tout point de l'espace à partir d'informations ponctuelles, en l'occurrence les pH bioindiqués sur les 104 375 placettes de l'IFN. Nous avons retenu une des méthodes d'interpolation les plus classiques, considérée comme une des plus justes d'un point de vue statistique, le krigeage ordinaire.

La qualité de l'interpolation est dépendante du nombre de points pris en compte et de leur répartition dans l'espace. La base de l'IFN permet d'utiliser un très grand nombre de valeurs (104 375 relevés), qui sont dispersées de façon homogène sur la France (Figure 5). La densité d'échantillonnage est d'environ un point tous les km en moyenne sur le territoire forestier. De ce fait, nous avons choisi de spatialiser les pH à une résolution kilométrique, c'est-à-dire que chaque pixel de 1 km de coté contient une valeur de pH prédite. Cette résolution est de plus compatible avec de nombreuses banques de données géographiques (modèle AURELHY de Météo France, European soil database, …).

1.4. Utilisation d'un jeu de données pour la validation

Un jeu de 261 relevés du réseau européen (Badeau, 1998), répartis en quinconce sur une grille de 16 km de côté placée sur la France entière, a été utilisé pour estimer la qualité des prédictions réalisées à l'aide des valeurs indicatrices. Il contient à la fois des analyses de pH

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

réalisées en laboratoire et des relevés floristiques permettant d'estimer des pH bioindiqués. En croisant les coordonnées des placettes avec la couche SIG, il est également possible d'avoir la valeur de pH estimée sur la carte à l'emplacement de chaque placette. Ce jeu de validation n'a pas été utilisé pour définir les valeurs indicatrices ou pour réaliser la carte. Cela permet d'éviter une corrélation spatiale et temporelle avec les données de calibration, qui aurait pu être à l'origine d'une surestimation de la qualité de la bioindication. La répartition systématique des placettes de validation sur l'ensemble des forêts du territoire français constitue un autre avantage de ces données (Figure 6). L'erreur de prédiction des variables du milieu par la végétation de ces 261 placettes est une estimation non biaisée de l'erreur de prédiction attendue pour toute placette sélectionnée de façon aléatoire dans les forêts françaises. Elle correspond donc à l'erreur moyenne attendue en n'importe quel point forestier du territoire français.

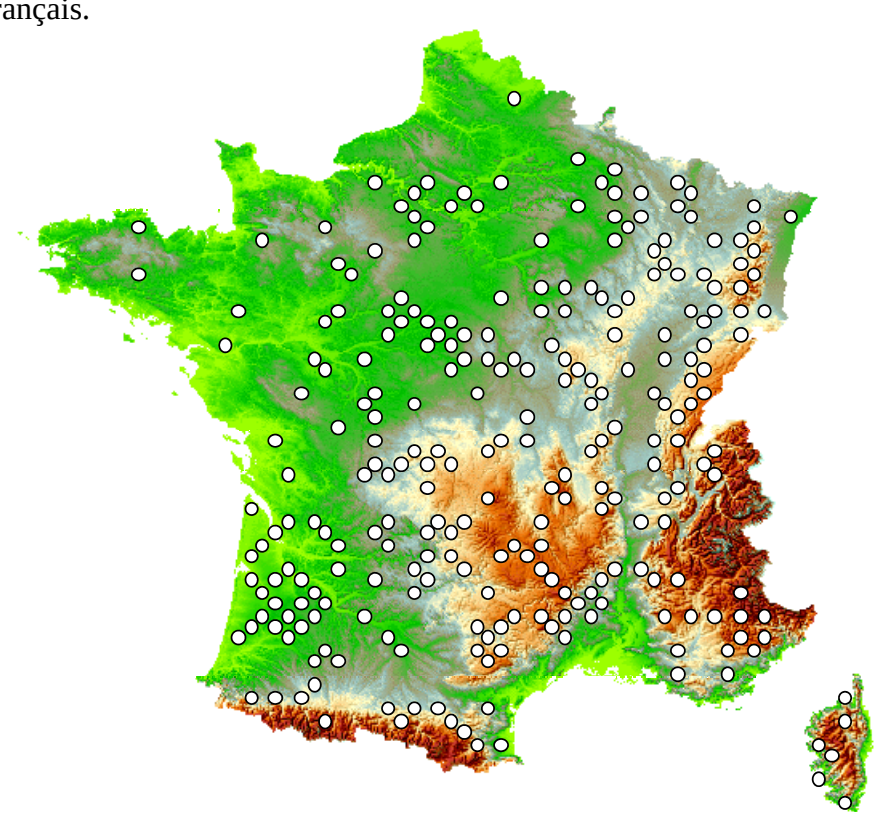


Figure 6: Distribution sur le territoire français des 261 placettes utilisées pour étudier l'effet de relevés incomplets sur la qualité de prédiction.

Deux mesures ont été utilisées pour évaluer la qualité d'estimation des différentes approches de bioindication. La première est la racine de l'erreur quadratique moyenne des prédictions :

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} \left(x_j - \hat{x}_j \right)^2}$$

Cette erreur prend en compte le biais des prédictions par rapport aux valeurs mesurées et l'imprécision des prédictions autour de ce biais.

La seconde mesure de qualité utilisée est le carré de la corrélation linéaire R^2 entre les valeurs mesurées et prédites de la variable. Le R^2 est indépendant de tout biais des prédictions qui peut être corrigé par une régression linéaire. Il présente également l'avantage de permettre les comparaisons entre les qualités de prédiction de différentes variables. Les résultats seront présentés dans le chapitre 3.

2. ROBUSTESSE DE LA MÉTHODE

La carte des pH utilise des relevés floristiques parfois incomplets, et prend en compte un secteur géographique vaste, la France entière. La validité de la méthode mise au point a été étudiée dans le cadre du contrat n°0562C0029 financé par l'ADEME et liant l'ADEME, l'IFN et l'ENGREF.

2.1. Utilisation des relevés incomplets pour réaliser les prédictions

L'Inventaire Forestier National (IFN) réalise des milliers de relevés floristiques annuellement sur toute la France. Ces relevés sont réalisés en un temps limité tout au long de l'année, hiver compris, et peuvent de ce fait être incomplets. L'incidence de l'utilisation de tels relevés sur la qualité des prédictions du pH a été évaluée.

Sur les 261 relevés du réseau Européen possédant chacun une mesure faite en laboratoire, nous avons sélectionné aléatoirement une proportion variable des espèces présentes dans chaque relevé pour prédire le pH (Figure 7 et Figure 8).

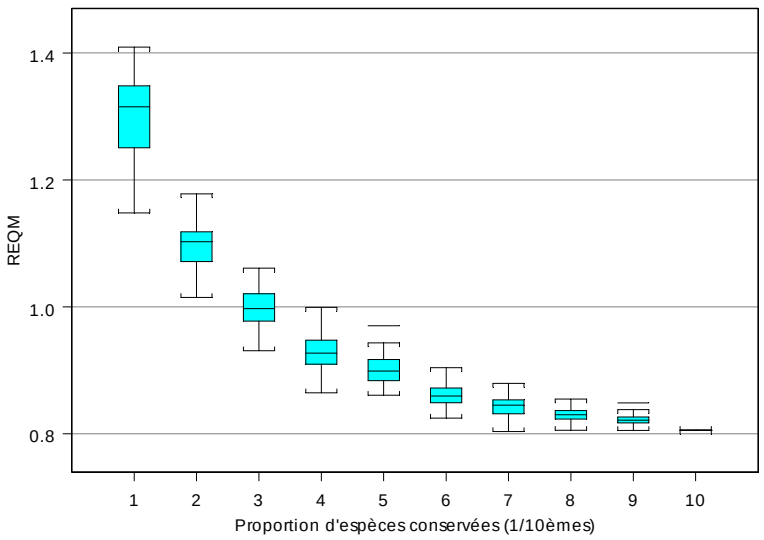


Figure 7 : Variation de l'écart (REQM) entre pH mesuré et pH bioindiqué par la flore pour des proportions croissantes d'espèces des relevés prises en compte pour réaliser les prédictions.

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

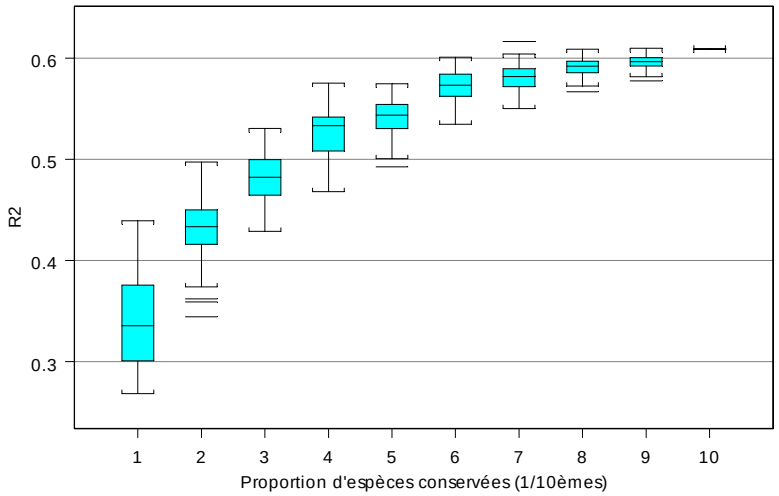


Figure 8 : Variation de la corrélation (R^2) entre pH mesurés et pH bioindiqués par la flore pour des proportions croissantes.

Trois gammes de proportions peuvent être identifiées :

- Lorsque la proportion d'espèces conservées est inférieure au 1/3 des espèces contenues dans les relevés, la qualité de prédiction est dégradée. Le R^2 est inférieur à 0.5 et l'écart entre pH mesurés et estimés par la flore est supérieur à 1 ;
- Lorsque la proportion d'espèces conservées est comprise entre 1/3 et 2/3 du total des espèces des relevés, la qualité de prédiction est acceptable ;
- Au delà de 2/3 des espèces des relevés conservées, la qualité de prédiction est élevée et varie peu.

Afin d'aller plus loin, un certain nombre de simulations ont été réalisées, en utilisant une partie des espèces des relevés de façon à simuler des relevés effectués par l'IFN en période de végétation et hors période de végétation, avec deux niveaux de qualité :

- La première série de prédictions, appelée « Relevés complets » correspond à des relevés exhaustifs effectués pendant la saison de végétation. Elle utilise l'ensemble des espèces des relevés ;
- La deuxième série de prédictions utilise l'ensemble des végétaux vasculaires des relevés, c'est à dire toutes les espèces des relevés sauf les mousses. Cette série est dénommée « Relevés sans mousses » ;
- La troisième série de prédictions simule des relevés réalisés en période hivernale et utilise l'ensemble des espèces visibles à cette période. Les catégories d'espèces utilisées sont définies à partir du caractère ligneux et de la permanence des feuilles en hiver des végétaux. Cette simulation est dénommée « relevés hivernaux complets » ;
- La quatrième et dernière série de prédictions réalisées simule également des relevés hivernaux. Par rapport à la précédente, elle utilise seulement les espèces reconnaissables relativement facilement : les mousses et les herbacées persistantes mais non vertes sont éliminées en plus des espèces non visibles l'hiver. Cette simulation est dénommée « Relevés hivernaux aisés ».

Tableau 1 : Caractéristiques principales des prédictions de pH du sol (horizon A) réalisées avec des relevés floristiques complets et partiels simulant l'absence de bryophytes, des relevés exhaustifs réalisés en période hivernale et des relevés rapides réalisés en période hivernale.

Type de relevé simulé	Relevés complets	R. sans mousses	R. hivernaux complets	R. hivernaux aisés
Nombre d'espèces avec V.I.	868	813	452	268
Proportion des espèces (%)	100	94	52	31
Nombre moyen d'espèces par relevé	20.7	18.8	15.3	11.1
Proportion d'espèces conservées par relevé (%)	100	90	74	53
R^2 avec pH estimés par les relevés complets	1	0.97	0.98	0.92
R^2 avec pH mesurés	0.61	0.60	0.59	0.56
REQM	0.81	0.84	0.81	0.88

Les valeurs prédites avec une partie seulement des espèces sont très semblables aux prédictions réalisées à partir des relevés complets. Le R^2 entre les valeurs prédites avec des relevés complets et avec des relevés utilisant seulement 31 % d'espèces fréquentes est ainsi supérieur à 0.9 (tableau 1).

La qualité des prédictions se dégrade légèrement lorsque les mousses ne sont pas relevées. Les prédictions sont également très faiblement dégradées pour les simulations de relevés hivernaux complets. Elles se dégradent de façon un peu plus importante pour les simulations de relevés hivernaux faits assez rapidement qui n'utiliseraient que les ligneux et les espèces toujours vertes (donc avec des feuilles vertes en hiver).

Nous pouvons conclure de cette étude que la prise en compte de relevés hivernaux réalisés par l'IFN n'entraîne pas une dégradation conséquente de la valeur bioindiquée de pH.

2.2. Pertinence de l'utilisation de valeurs indicatrices nationales plutôt que régionales

L'incidence de la zone géographique prise en compte pour calibrer les valeurs indicatrices a ensuite été étudiée. L'objectif est de déterminer si des valeurs indicatrices calibrées régionalement permettaient une meilleure estimation des facteurs par bioindication que des valeurs indicatrices calibrées à l'échelle de la France. Plusieurs auteurs ont en effet montré des changements de comportement des espèces d'un territoire à l'autre (Diekmann & Lawesson, 1999; Le Tacon & Timbal, 1972). Cependant, les études réalisées sont entachées de problèmes méthodologiques liés au faible nombre de relevés pris en compte ou à l'absence de variables mesurées. La base de données EcoPlant, qui contient des données nombreuses et bien réparties dans le nord de la France permet la résolution de ces problèmes méthodologiques.

Des valeurs indicatrices (VI) ont été calculées pour la France entière à partir des 3835 placettes réparties sur l'ensemble du pays, puis pour le nord-est et le nord-ouest de la France. Ces deux zones ont été délimitées selon la distance aux côtes de la France,

1051 placettes situées dans la moitié nord à plus de 300 km des côtes ayant été affectées au nord-est, et 1353 placettes situées à moins de 300 km des côtes au nord-ouest (Figure 9). Les VI ont été calculées comme l'optimum écologique des courbes de réponse des espèces pour les trois régions (France entière, Nord-ouest, Nord-est de la France). La relation entre les valeurs indicatrices du NE et du NO est étroite puisque le R^2 entre valeurs indicatrices des deux régions atteint 0.78 et la plupart des espèces ont des VI différant de moins de 0.5 unités de pH entre ces régions (Coudun et Gégout, 2005).

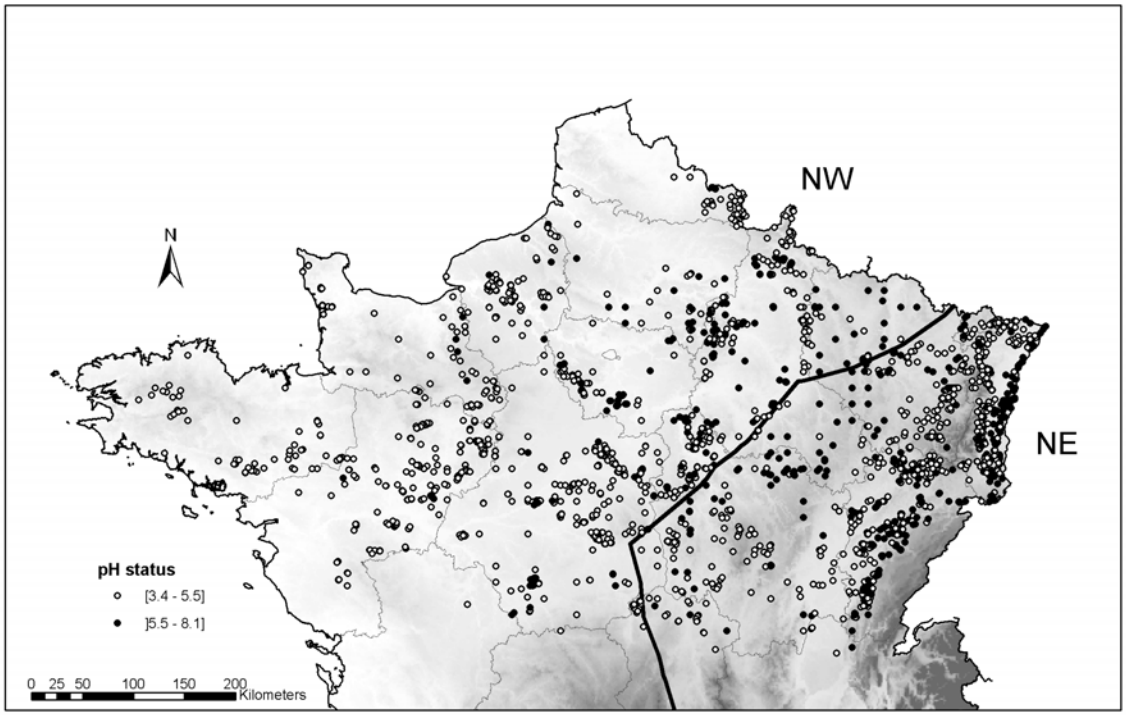


Figure 9 : Carte de répartition des placettes utilisées pour calculer les valeurs indicatrices dans le nord-est et le nord-ouest de la France et pour comparer les pH mesurés et les pH estimés par bioindication.

Les trois séries de VI (France, NE, NO) ont ensuite été utilisées pour prédire le pH dans les 1051 placettes du nord-est et les 1353 placettes du nord-ouest de la France. Le R^2 entre valeurs de pH prédites par la flore est très élevé : il dépasse 0.97 entre les pH prédits avec les VI calibrées régionalement et les pH prédits avec les VI calibrées au niveau national. Cette très forte corrélation signifie une grande stabilité des valeurs prédites à partir du caractère indicateur de la flore indépendamment du fait que celui-ci ait été calibré au niveau régional ou au niveau national. Il n'y a donc pas de perte de qualité des prédictions de pH lorsque l'on passe de valeurs indicatrices régionales à des valeurs indicatrices nationales dans la comparaison qui a été réalisée. Il est probable que ces conclusions, établies pour le nord de la France, puissent être généralisées à la France entière. Les valeurs indicatrices ont donc été calibrées nationalement pour réaliser la carte des pH.

3. VALIDITE DE LA CARTE DES PH

3.1. Distribution des valeurs de pH sur la France

Les pH prédits par la carte (Figure 10) sont cohérents avec les valeurs mesurées sur le terrain, qui s'échelonnent à peu près entre 3 et 8,5. Les zones connues comme acides apparaissent clairement sur la carte, tels les massifs anciens : Ardennes, Vosges, Massif Armoricain et Massif Central ou encore les plaines des Landes et de la Sologne. Les pH les plus élevés se trouvent dans le Bassin Méditerranéen. Cette répartition est cohérente avec les valeurs de pH mesurées en laboratoire (Figure 11).

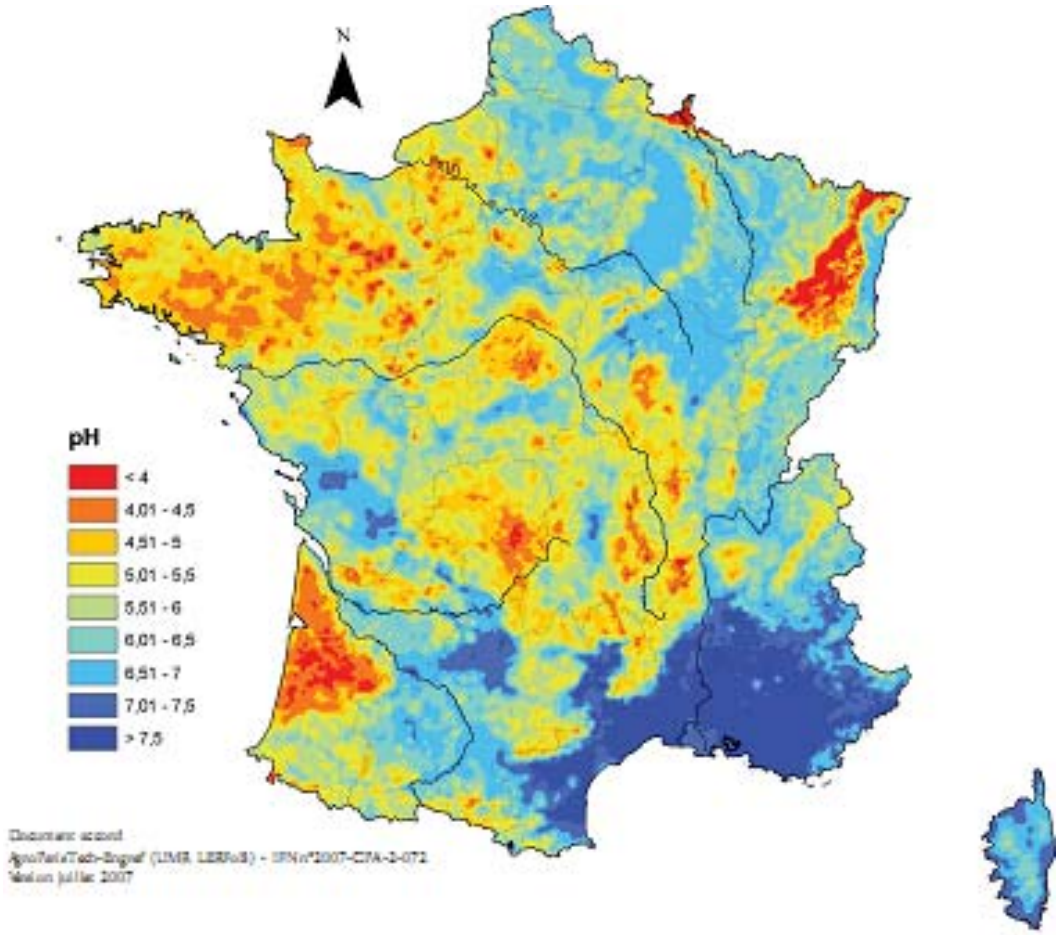


Figure 10 : Carte du pH de surface des sols forestiers français.

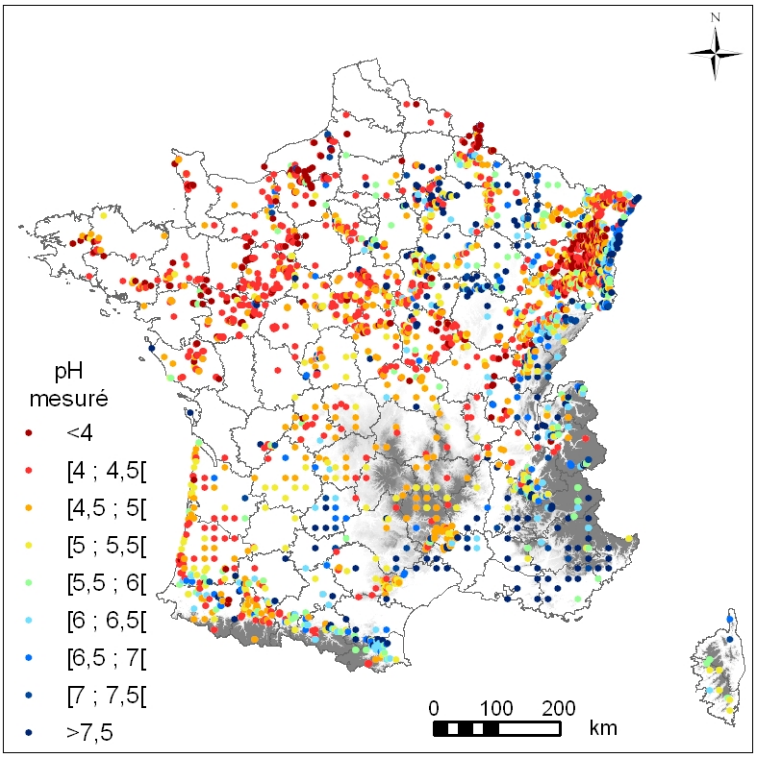


Figure 11: carte des pH de l'horizon A du sol de 3601 placettes forestières d'EcoPlant mesurés en laboratoire.

La carte permet également de mettre en évidence des changements de substrats plus localisés comme les pH acides les alluvions de la Moselle et de la Meurthe (Figure 12, en haut à gauche), les sols acides de l'Argonne (Figure 12, en haut à droite) et les sols riches des Causses (Figure 12, en bas à droite).

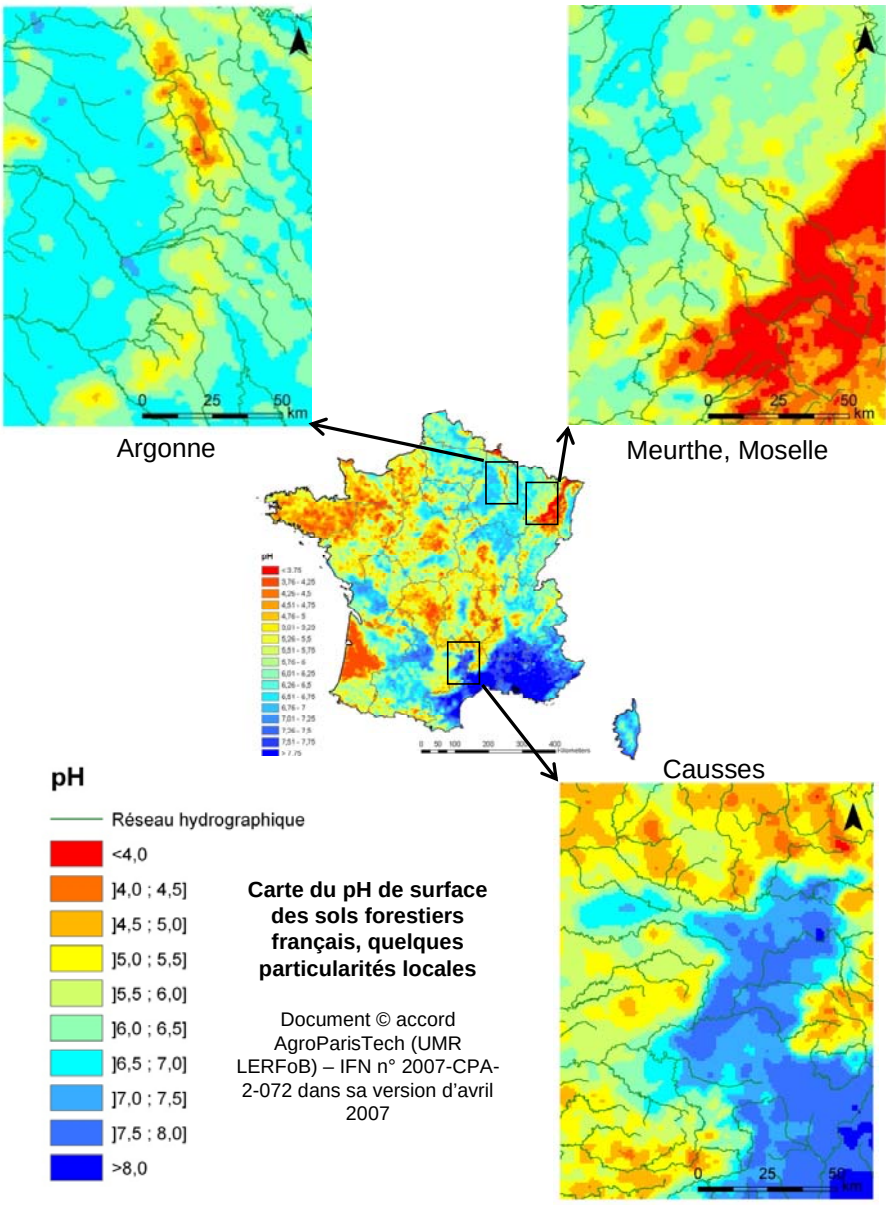


Figure 12: Carte du pH de surface des sols forestiers français, quelques particularités locales.

3.2. Validation de la carte sur un jeu indépendant de données

Le jeu indépendant de 261 placettes du réseau Européen de suivi des dommages forestiers, soit environ la moitié des placettes françaises de ce réseau, a été utilisé pour valider les pH calculés. La validation a été réalisée à 2 niveaux. Les mesures de pH en laboratoire ont été comparées : i) au pH bioindiqué à l'aide des valeurs indicatrices sur les mêmes points, ii) aux valeurs extraites de la carte. A chaque fois, le R^2 et la REQM ont été calculés. On obtient un R^2 de 0.61 et une REQM de 0.81 entre les valeurs bioindiquées et mesurées, et un R^2 de 0.58 et une REQM de 0.81 entre les valeurs de la carte et les mesures. On constate que les résultats obtenus avec les valeurs bioindiquées sont proches de celles obtenues avec la carte, la REQM étant stable et le R^2 ne diminuant que légèrement. Cela est probablement du au fait que

l'imprécision engendrée par l'interpolation est en grande partie compensée par un lissage des valeurs qui conduit à réduire le poids de points localement mal estimés. La carte des pH fournit donc une valeur estimée précise localement à plus ou moins 0,8 unité de pH. L'examen de la répartition spatiale des écarts entre les mesures et les prédictions de la carte ne met pas en évidence de zones pour lesquelles les prédictions seraient systématiquement biaisées, dans un sens ou dans l'autre (Figure 14), et les valeurs extrêmes ne semblent pas être plus mal prédites que les valeurs médianes (Figure 13). Il semble donc que la qualité de la précision soit relativement uniforme pour toute la France et quelque soit le pH du sol.

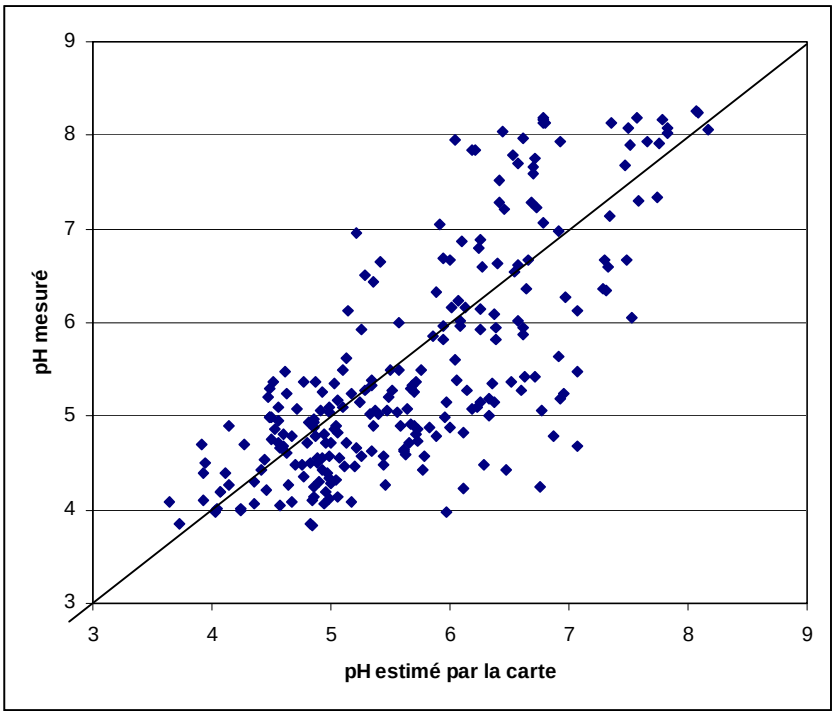


Figure 13 : relation entre les pH prédits par la carte et les pH analysés en laboratoire, à partir d'un jeu de 261 relevés indépendants.

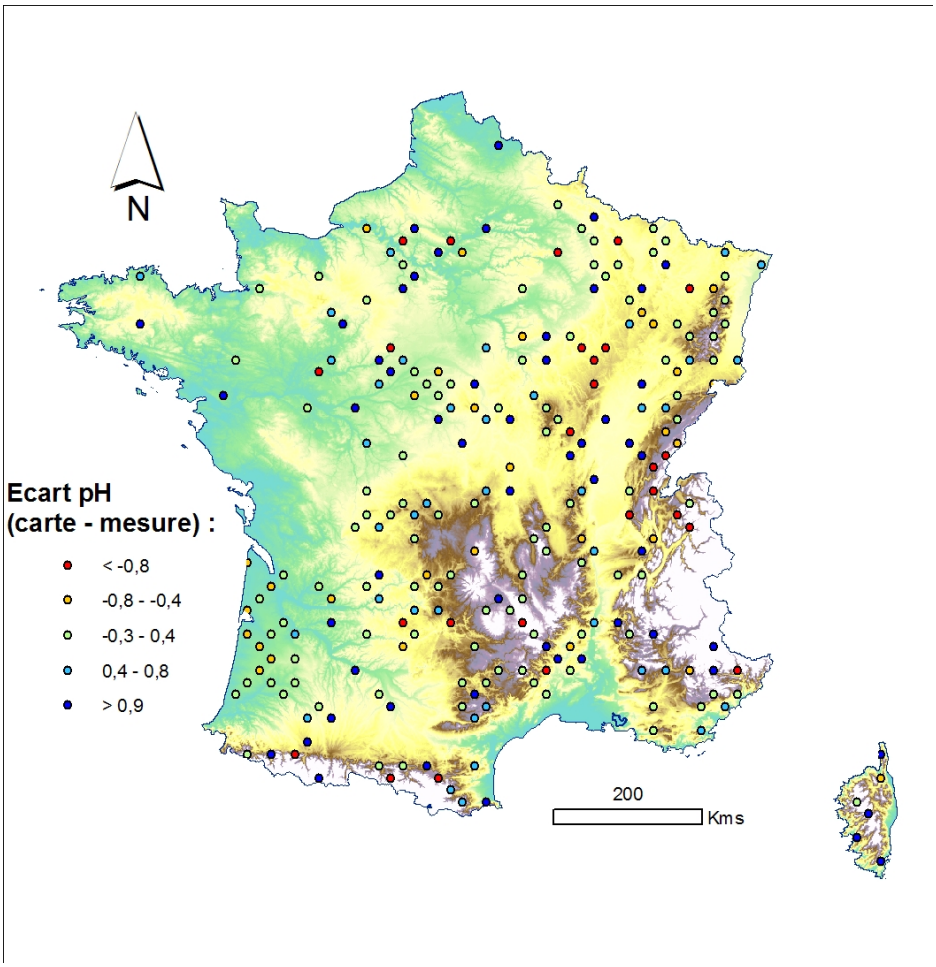


Figure 14 : carte des écarts entre les pH prédits par la carte et les pH analysés en laboratoire, à partir d'un jeu de 261 relevés indépendants.

3.3. Pertinence des pH bioindiqués pour expliquer le comportement de la flore forestière Française

Les valeurs indicatrices élaborées à partir de la base EcoPlant ont déjà été utilisées dans de nombreuses études scientifiques, portant principalement sur l'étude de la distribution (Coudun, Gégout, 2005 ; Coudun, *et al.*, 2006 ; Piedallu, Gégout, 2007 ; Pinto, Gegout, 2005) ou de la fertilité (Seynave *et al.*, 2004a, b) des espèces et des communautés à l'échelle de la France. Toutes ces études ont montré un effet important du pH bioindiqué à l'aide de relevés floristiques, que ce soit sur la distribution ou sur la productivité, vis-à-vis de nombreuses espèces forestières, confirmant ainsi l'efficacité et l'utilité de la méthode d'estimation à l'échelle des forêts de France.

3.4. Limites de la carte

Les limites liées à la carte des pH sont de plusieurs ordres :

- Qualité de la prédiction : le pH prédit par la carte est fiable à plus ou moins 0.8 unités de pH ;

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

- Cohérence spatiale de la carte : il n'a pas été mis en évidence de zone pour laquelle la qualité de prédiction pourrait être dégradée à l'échelle de la France. Cependant, du fait de la prise en compte de relevés uniquement réalisés en forêt, cette carte n'est valide qu'en milieu forestier. En milieu agricole, les pratiques culturales ont conduit à des modifications importantes du milieu naturel pouvant conduire à des changements conséquents de pH. L'utilisation des données de pH prédites en dehors des zones forestières se fait sous la responsabilité de l'utilisateur.
- Validité locale de la carte : les prédictions n'ont pas vocation à être utilisées localement. L'échelle recommandée d'utilisation est le 1/1000 000ème, correspondant à un usage à l'échelle nationale ou de la région administrative. Toute utilisation à une échelle inférieure se fait sous la responsabilité de l'utilisateur.

4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

La carte du pH de surface (horizon A) des sols forestiers de la France est :

- une information numérique de type raster (résolution, c'est-à-dire la taille de la cellule : 1000 m),
- où chaque cellule de la grille contient une valeur estimée du pH bioindiqué arrondie au dixième et comprise entre 3,0 et 8,5,
- utilisant le système de projection géographique Lambert II étendu, où les coordonnées sont exprimées en mètres,
- couvrant de façon exhaustive la France métropolitaine,
- utilisable à l'échelle du 1/1 000 000, toute utilisation à des échelles plus locales étant réalisées sous la responsabilité de l'utilisateur,
- valable en milieux forestiers uniquement,
- déclinée en deux produits :
    - version gratuite illustrative déjà mise en page,
    - couche d'information SIG.

4.1. Contenu du CD-ROM

- Carte numérique : fichier de type raster au format GéoTIFF (taille de 4,67 Mo) accompagné de :
    - son fichier de géo-référencement .tfw,
    - son fichier de métadonnées (compatible norme ISO 1939) au format xml,
    - un fichier de légende numérique au format .lyr
- Guide technique (26 pages A4) : fichier pdf de1,6 Mo.
- Carte mise en page (A3, 1/1 000 000) : fichier pdf de 5,7 Mo.
- Notice courte (1 page A4) : fichier pdf de 26 ko.
- Jacquette au format pdf

4.2. Symbologie

La symbologie a été étudiée afin d'être rapidement intelligible et visuellement représentative des processus biologiques influant le pH. Une typologie en 10 classes a ainsi été définie. Elle a été appliquée pour la version illustrative de la carte et est proposée pour la couche SIG sous forme de légende numérique au format Arcgis (.lyr) .

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

Tableau 2: Symbologie retenue.

Classe de pH	Code hexadecimal	Couleur	Code RGB R + G * 256 + B * 256 ^ 2	Code composante R	Code composante G	Code composante B
< 4,0	#FE0000	Rouge	254	254	0	0
] 4,0 ; 4,5]	#FF6F00	Orange fonçé	28671	255	111	0
] 4,5 ; 5,0]	#FEB800	Orange clair	47358	254	184	0
] 5,0 ; 5,5]	#FFFF00	Jaune	65535	255	255	0
] 5,5 ; 6,0]	#D2FE69	Vert pâle	6946514	210	254	105
] 6,0 ; 6,5]	#9AFFB4	Vert d'eau	11861914	154	255	180
] 6,5 ; 7,0]	#00FFFF	Cyan	16776960	0	255	255
] 7,0 ; 7,5]	#38ACCD	Bleu clair	13478968	56	172	205
] 7,5 ; 8,0]	#3871FF	Bleu roi	16740664	56	113	255
> 8,0	#0000FE	Bleu foncé	16646144	0	0	254

5. MISE À JOUR

5.1. Généralités

Les conditions de mises à jour sont précisées dans les conditions générales de cession du droit d'usage disponibles sur le site Web de l'IFN : http://www.ifn.fr/spip/article.php3?id_article=45

La carte en étant à sa première version, les coûts de mises à jour n'ont pas encore été prévus au barème de l'IFN.

5.2. Périodicité de mise à jour

La carte du pH des sols forestiers de la France sera mise à jour:

- pour toute amélioration significative du calcul des valeurs bioindiquées ;
- pour toute augmentation significative du nombre de relevés IFN ;
- si une méthode de spatialisation plus performante est utilisée.

A chaque mise à jour, les personnes ayant signé un contrat de cession des droits d'usage de la carte du pH des sols forestiers seront informées qu'une nouvelle version est disponible. Libre à elle d'acquérir cette nouvelle version ou non.

5.3. Historique

Tableau 3 : Caractéristiques résumées des versions de la carte du pH.

Version de la carte du pH	Nbre relevés EcoPlant utilisés	Nbre de VI utilisées	Nbre de relevés floristiques IFN utilisés	Nbre de relevés de validation utilisés	Ecarts min, moyen, max	R^2
V 1 ; Mars 2008	**3 835**	**551**	**104 375**	**261**	**0,81**	**0,58**

Version - Explication

V1 – 2008 : Première version diffusée.

5.4. Responsable technique de la mise à jour

L'IFN est le responsable technique de la mise à jour, par le biais de :

Madame Marianne DUPREZ
Ingénieur chargé de l'information géographique
Château des Barres
F - 45290 Nogent-sur-Vernisson
Tél. : (+ 33) 02 38 28 18 13
Fax : (+ 33) 02 38 28 18 28
Mél : marianne.duprez@ifn.fr

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

6. DIFFUSION ET CONDITIONS D'ACCÈS

6.1. Visualisation simple des fichiers

La version mise en page de la carte des pH est disponible gratuitement sur le site de l'IFN, à l'adresse suivante : http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/carte_PH_version1-formatA3.pdf

Mention obligatoire : « Carte du pH de surface des sols forestiers français (v 1, mars 2008.) selon le document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072 dans sa version d'avril 2007. »

6.2. Support d'exemple proposé

Il n'y a pas d'extrait disponible pour la carte numérique. Se référer au paragraphe ci-dessus pour un aperçu.

6.3. Condition matérielles d'accès

Les formats utilisés (pdf et geoTIFF) sont des formats utilisant des standards du domaine public. Ils sont donc lisibles sous tout système d'exploitation (PC, Mac et Unix) et par la plupart des logiciels.

7. CONDITIONS D'ACHAT ET CONDITIONS JURIDIQUES

7.1. Forme juridique

Signature par le cédant et le cessionnaire d'un contrat de cession du droit d'usage des fichiers cartographiques engageant à respecter les conditions générales de cession du droit d'usage des données (http://www.ifn.fr/spip/article.php3?id_article=45).

7.2. Unités de commandes

Seuil minimum : France métropolitaine entière.

7.3. Tarif

Il est précisé sur le site Web : http://www.ifn.fr et a été approuvé par le conseil d'administration de l'IFN du 28 avril 2008 avec une entrée en vigueur au 15 mai 2008.

Les tarifs sont dégressifs en fonction de la commande :

- Réduction sur le nombre d'exemplaires : à partir de 2 exemplaires

A titre indicatif, le tarif d'une licence monoposte du produit est de 950 €.

Pour toute commande, un devis sera préalablement envoyé.

7.4. Contact pour la commande

Stéphanie LUCAS
Responsable de l'unité communication et relation avec les utilisateurs
Direction de la valorisation
Château des Barres
F - 45290 Nogent-sur-Vernisson
Tél : (+ 33) 02 38 28 18 18
Fax : (+ 33) 02 38 28 18 28
Mél : stephanie.lucas@ifn.fr

 Document © accord AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB) – IFN n° 2007-CPA-2-072

8. BIBLIOGRAPHIE

BECKER (M.), LE GOFF (N.), Diagnostic stationnel et potentiel de production, *Revue Forestière Française*, Vol. 40, n° 1988, p. 29-43.

CAJANDER (A.K.), The theory of forest types, *Acta For. Fenn.*, Vol. 29, n° 3, 1926, p. 1-108.

COUDUN (C.), GÉGOUT (J.-C.), The derivation of species response curves with Gaussian logistic regression is sensitive to sampling intensity and curve characteristics, *Ecological Modelling*, Vol. 199, n° 2, 2006, p. 164-175.

COUDUN (C.), GÉGOUT (J.-C.), *et al.*, Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with Acer campestre (L.) in France, *Journal of Biogeography*, Vol. 33, n° 10, 2006, p. 1750-1763

DUCHAUFOUR (P.), Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française, *Annales de l'école nationale des eaux et forêts*, Vol. 11, n° 1, 1948, p. 1-332.

GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), *et al.*, Prediction of forest soil nutrient status using vegetation, *Journal of vegetation science*, Vol. 14, n° 1, 2003, p. 55-62.

GÉGOUT (J.-C.), COUDUN (C.), *et al.*, EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables, *Journal of vegetation science*, Vol. 16, n° 2, 2005, p. 257-260.

PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.), Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling, *Annals of Forest Science*, Vol. 64, n° 2007, p. 899-909.

PINTO (P.-E.), GÉGOUT (J.-C.), Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains, *Annals of Forest Science*, Vol. 62, n° 7, 2005, p. 761-770.

SEYNAVE (I.), GEGOUT (J.-C.), *et al.*, Étude des potentialités forestières pour l'épicéa commun dans l'Est de la France à partir des données de l'IFN, Revue Forestière Française, Vol. LVI, n° 6, 2004, p. 537-550.

SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J.-C.), *et al.*, Picea abies site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases, Canadian journal of forest research, Vol. 35, n° 7, 2005, p. 1669-1678

La carte des pH des sols forestiers français a été élaborée à partir du caractère bioindicateur des plantes forestières et de la base de données de l'Inventaire forestier national (IFN). Le caractère bioindicateur des espèces végétales forestières a d'abord été calculé par rapport au pH à partir de 3835 placettes possédant toutes un inventaire floristique et une mesure de pH eau de l'horizon organo-minéral A du sol effectuée en laboratoire. Ce travail, réalisé à partir de la base de données EcoPlant (AgroParisTech-ENGREF), a permis de calculer, pour chaque espèce, la valeur indicatrice qui représente la valeur de pH pour laquelle sa fréquence dans la nature est maximale. Le pH de surface de 104 375 placettes de l'IFN inventoriées entre 1989 et 2004 a ensuite été estimé par la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes sur chaque site. Une méthode d'interpolation par krigeage a été utilisée pour estimer le pH entre les placettes et créer une carte des pH de surface des sols forestiers français avec une résolution de 1 km².

La qualité de la carte a été évaluée à partir de 261 placettes systématiquement échantillonnées en France et n'ayant pas servi à calculer les valeurs indicatrices ou élaborer la carte des pH. L'écart moyen entre le pH de la carte et le pH mesuré sur ces placettes est égal à 0.81 unités de pH et le carré du coefficient de corrélation (R^2) entre valeurs de pH prédites et mesurées atteint 0.58. Ces valeurs constituent une bonne estimation de l'erreur réalisée par une prédiction du pH effectuée à partir de cette carte des pH en un point quelconque des forêts françaises. Du fait des relevés floristiques employés, situés uniquement en forêt, et des modifications de sol liées aux pratiques agricoles, la carte des pH n'est pas valable hors milieu forestier.

Cette carte est issue d'une collaboration entre l'IFN et AgroParisTech-ENGREF (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois) dans le cadre d'une convention financée par l'ADEME.

La carte est disponible en version mise en page (gratuite, téléchargement et impression par l'utilisateur) et en version numérique (payante, raster au format GeoTIFF au tarif de 950 €). Il est ainsi possible d'utiliser l'information au 1/1 000 000, à deux niveaux de lecture :

- comme illustration ou carte murale. La gamme de couleur met en évidence les grandes structures et ensembles régionaux ;
- ou comme couche d'information dans un système d'information géographique.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL

DIFFUSION & RENSEIGNEMENTS
Inventaire forestier national
Château des barres
F – 45290 Nogent-Sur-Vernisson
Téléphone : (+33) 02 38 28 18 00
Télécopie : (+33) 02 38 28 18 28

© AgroParisTech-ENGREF (UMR LERFoB), IFN, 2008