



HAL
open science

La cartographie prédictive des stations forestières : un nouvel outil au service du gestionnaire

Jean-Claude Gégout, Christian Piedallu, Jean-François Cornu, Catherine Cluzeau

► To cite this version:

Jean-Claude Gégout, Christian Piedallu, Jean-François Cornu, Catherine Cluzeau. La cartographie prédictive des stations forestières : un nouvel outil au service du gestionnaire. *Revue forestière française*, 2008, 60 (1), pp.37-60. 10.4267/2042/17240 . hal-03449798

HAL Id: hal-03449798

<https://hal.science/hal-03449798>

Submitted on 25 Nov 2021

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.

LA CARTOGRAPHIE PRÉDICTIVE DES STATIONS FORESTIÈRES : UN NOUVEL OUTIL AU SERVICE DU GESTIONNAIRE

JEAN-CLAUDE GÉGOUT - CHRISTIAN PIEDALLU
JEAN-FRANÇOIS CORNU - CATHERINE CLUZEAU

L'identification puis la cartographie des stations forestières préoccupe depuis longtemps les forestiers. Initiées dans les années 1950, les études stationnelles se sont multipliées en France à partir des années 1970 (Duchaufour *et al.*, 1958 ; Brêthes, 1976 ; Becker *et al.*, 1980). Il existe aujourd'hui un nombre important de typologies de stations réalisées (environ 300 catalogues et guides répertoriés en mars 2007, source : site internet de l'IFN) qui identifient les différents types de stations forestières présents à l'échelle de la petite région naturelle et fournissent des clés d'identification de ces stations. Pour chacun des types de stations identifiés, on associe les potentialités forestières connues en termes de choix des essences ou plus rarement de productivité.

Malgré le nombre important d'études déjà réalisées, l'élaboration de catalogues de stations forestières demande des moyens importants, et la couverture du territoire national est loin d'être achevée. Par ailleurs, chaque catalogue réalisé à l'échelle d'une région naturelle utilise sa propre typologie, ce qui rend très difficile voire impossible une approche synthétique à l'échelle d'un vaste territoire ou de la France entière. Enfin, les catalogues ne proposent pas de cartographie et celle-ci demande un important travail de terrain réalisable seulement par un personnel nombreux et qualifié.

Avec le développement des systèmes d'informations géographiques (SIG), des bases de données phytoécologiques, et l'augmentation de la capacité des moyens de calcul, d'autres approches complémentaires aux travaux de terrain sont aujourd'hui envisageables. Il est possible par exemple de dériver des données d'un modèle numérique de terrain pour cartographier certains critères permettant d'identifier les stations, mais cette méthode n'est applicable que sur un territoire disposant déjà d'un catalogue et ne permet de caractériser que les paramètres topographiques, les autres facteurs devant généralement être relevés sur le terrain (Pavie, 2005). L'objectif de cette étude est d'aller plus loin et de montrer qu'il est possible de cartographier rapidement et de façon cohérente toutes les composantes caractérisant les stations forestières, sur une vaste emprise géographique. Nous avons choisi d'expérimenter cette méthode sur le massif vosgien, d'une superficie de 8 800 km², qui est en partie couvert par huit typologies réalisées de façon traditionnelle.

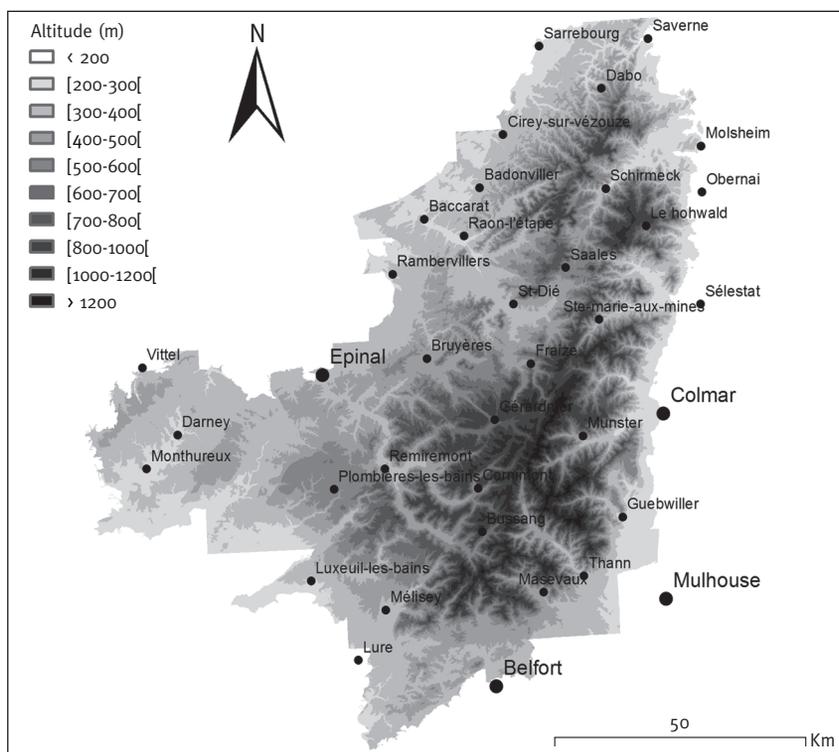
Nous avons d'abord inventorié, à partir des études existantes, les types de stations définis dans les Vosges et identifié les facteurs permettant leur discrimination. À l'aide d'une base de données de 2 404 relevés phytoécologiques, nous avons ensuite créé un indicateur quantitatif, le plus souvent construit à partir de la flore forestière, pour caractériser chacun de ces facteurs. Les indicateurs créés ont été modélisés à l'aide de variables numériques spatialisées puis combinés pour obtenir une carte prédictive des stations sur l'ensemble du massif vosgien. La validité des indi-

cateurs modélisés a été évaluée à l'aide d'un jeu de données indépendant de celui utilisé pour réaliser la typologie. Les stations forestières prédites par le modèle spatialisé ont été comparées aux stations relevées sur le terrain par l'Office national des Forêts pour environ 13 000 placettes effectuées dans les zones couvertes par les guides des stations forestières "Vosges cristallines lorraines" et "Vosges gréseuses lorraines". Nous développons enfin un exemple de relations "stations-choix des essences" à partir de ce nouvel outil, en montrant que la carte prédictive des stations permet de discriminer et de cartographier la distribution du Sapin pectiné (*Abies alba*) et de l'Érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*).

DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Cette étude concerne le massif vosgien délimité selon ses contours géologiques (8 800 km²), c'est-à-dire les grès coquilliers du Muschelkalk inférieur et tous les substrats plus anciens (substrats magmatiques ou gréseux). La zone ainsi délimitée s'étend du nord au sud de Saverne à Belfort et d'ouest en est d'Épinal à Colmar (figure 1, ci-dessous), couvrant une partie des régions Lorraine, Alsace et Franche-Comté. Son relief est marqué, s'échelonnant entre 200 mètres en plaine d'Alsace et 1 424 mètres d'altitude au Grand Ballon, ce qui induit de fortes variations de climat. Les précipitations annuelles moyennes varient de 1 000 mm environ au pied du versant lorrain pour atteindre 2 000 mm sur les sommets du sud du massif et tomber à 600 mm à la base orientale du massif (Cachan, 1974). Les températures moyennes annuelles varient de 10° C en plaine d'Alsace pour descendre jusque vers 4° C sur les sommets les plus élevés du massif.

FIGURE 1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE, LE MASSIF VOSGIEN



Sur le plan géologique, le massif vosgien peut être subdivisé en deux grands ensembles : les Vosges gréseuses et les Vosges hercyniennes cristallines. Les Vosges gréseuses correspondent à des couvertures sédimentaires déposées au Permien et au Trias inférieur, occupant de vastes surfaces à l'ouest et au nord du massif (grès permien, grès vosgien, conglomérat principal, grès intermédiaires et grès à Voltzia). Les Vosges hercyniennes sont composées de granites, de diorites et de formations volcaniques d'âge silurien ou carbonifère. Les sols les plus développés dans le massif appartiennent aux classes des sols brunifiés et des sols podzolisés (Bonneau *et al.*, 1978 ; Souchier, 1971). Les sols à tendance podzolique sont plutôt localisés dans les Hautes-Vosges où ils sont souvent humifères (Guillet, 1974). Ils sont également fréquents sur les substrats géologiques acides tels que le grès vosgien ou les positions topographiques de haut de pente. Les sols bruns sont localisés de préférence à faible altitude sur substrat peu acide (grès intermédiaires et grès à Voltzia) ou en position topographique de bas de pente.

La végétation est caractérisée par un étagement altitudinal classique, avec plusieurs grands types de climax climatiques forestiers successifs. Trois grands étages bioclimatiques sont distingués (Dion, 1985 ; Rameau *et al.*, 1993). L'étage collinéen occupe toute la partie basse du massif, jusqu'à 600 m d'altitude environ. C'est le domaine des hêtraies-chênaies. L'étage montagnard s'étend de 600 à 1 100 m. Il est occupé essentiellement par la sapinière-hêtraie. L'étage subalpin commence par la hêtraie à érables et se termine par des landes et des pelouses.

IDENTIFICATION DES FACTEURS ÉCOLOGIQUES STRUCTURANT LES STATIONS FORESTIÈRES

Une synthèse bibliographique des typologies des stations existant sur le massif permet l'identification des principaux facteurs écologiques. Huit documents ont été retenus, les catalogues de Gégout (Gégout, 1993) et d'Oberti (Oberti, 1990a, b, c), ainsi que les documents de vulgarisation de Madesclaire *et al.* (1995, 1999) et les mémoires de diplôme d'études approfondies de Drapier (1988) et de Piguet (1987). L'inventaire de l'ensemble des types de stations définis dans ces documents permet d'individualiser 193 types de stations dans le massif vosgien, qui peuvent être regroupés en 71 types de stations principaux si on réunit les types des différents catalogues ayant les mêmes caractéristiques.

L'analyse de la structuration des catalogues met en évidence trois facteurs écologiques qui conditionnent la différenciation des stations dans le massif. Il s'agit du climat souvent représenté par l'altitude, du niveau trophique du sol et de sa réserve en eau. En outre, certaines stations sont liées à la présence de conditions très particulières présentes sur de très faibles surfaces (éboulis, tourbières, bords de rivière). Ces stations marginales ne seront pas prises en compte dans cette étude. Dans les typologies, le niveau trophique est généralement donné par le caractère indicateur de la végétation forestière, l'étage bioclimatique est fourni par la végétation ou le plus souvent par des limites altitudinales et la réserve en eau des sols est diagnostiquée à partir de caractères édaphiques (épaisseur du sol, hydromorphie...) ou topographiques (position sur le versant, exposition).

DONNÉES DISPONIBLES

Les données utilisées pour ce projet sont des relevés de terrain permettant l'élaboration et la validation des modèles de niveau trophique, de réserve en eau et de bioclimat des stations d'une part et des couvertures numériques spatialisées manipulables sous SIG d'autre part.

Ces couches SIG sont utilisées comme variables explicatives dans les modèles et comme informations de base permettant la réalisation des cartes prédictives.

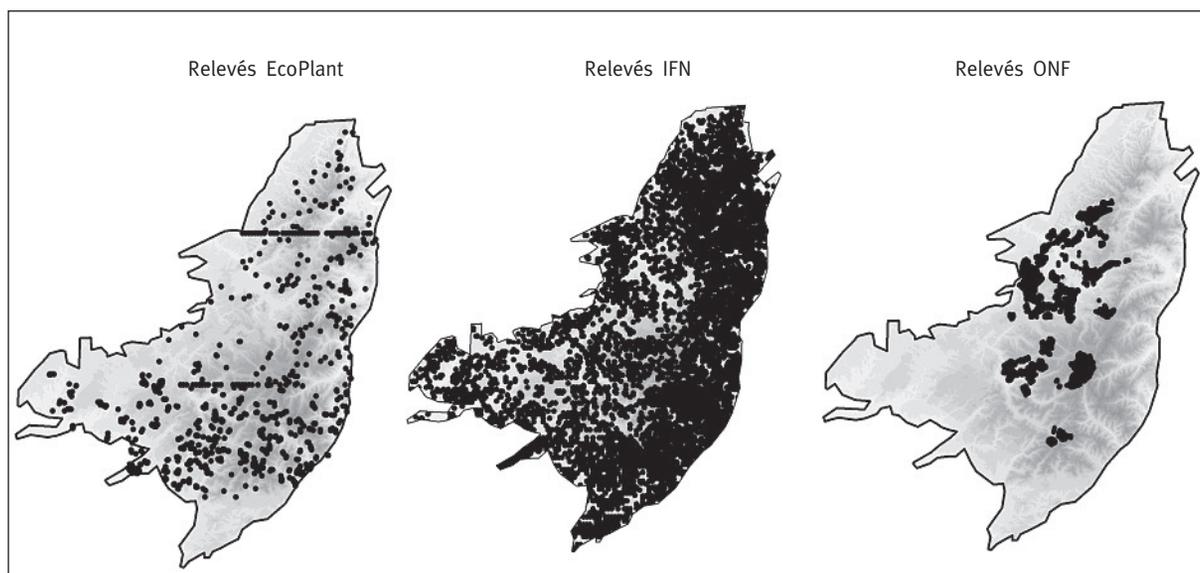
Les relevés de terrain

Les données relevées sur le terrain proviennent de trois sources. Le premier jeu comprend 2 404 relevés phytoécologiques (figure 2, ci-dessous) issus de la base de données EcoPlant (Gégout *et al.*, 2005), qui comprennent un inventaire floristique réalisé sur 400 m² et la mesure d'un grand nombre de variables écologiques (géologie, altitude, pente, exposition) et édaphiques (type de sol et d'humus, épaisseur et pierrosité des horizons). Des analyses de sol ont été réalisées en laboratoire pour 553 de ces placettes et elles comprennent la mesure de variables qui contrôlent la distribution ou la croissance des végétaux. Ces variables sont liées à la nutrition minérale des plantes (Ca, Mg, K échangeables, pH, C/N...), à la toxicité (Al, H échangeables) et à la réserve en eau des sols (texture).

Le second jeu de données contient 6 175 relevés phytoécologiques de la base écologique de l'Inventaire forestier national (Piedallu *et al.*, 2006) qui comprennent également un inventaire floristique et la mesure de variables écologiques et édaphiques (texture, pierrosité, profondeur du sol...) permettant notamment le calcul de la réserve utile du sol.

Enfin 13 572 relevés, codés selon le type de station, ont été fournis par l'agence de l'ONF d'Épinal. Ils sont répartis sur les catalogues de stations "Vosges gréseuses lorraines" (3 601 points) et "Vosges cristallines lorraines" (9 971 points) (figure 2, ci-dessous). Les relevés des Vosges cristallines sont directement issus d'une mesure de terrain, tandis que les relevés des Vosges gréseuses ont été calculés par l'ONF sur une maille de points de 200 mètres de côté à partir de la cartographie des stations existant sous forme de polygones.

FIGURE 2 LOCALISATION DES RELEVÉS DES BASES DE DONNÉES ECOPLANT (2 404 RELEVÉS), IFN (6 175 RELEVÉS) ET ONF (13 572 RELEVÉS) UTILISÉES DANS CETTE ÉTUDE



Les variables numériques spatialisées

Les variables spatialisées utilisées sont des variables issues du modèle AURELHY de Météo France (Benichou et Le Breton, 1987), le substrat géologique digitalisé et des indices climatiques ou topographiques calculés (tableau I, ci-dessous).

TABLEAU I Liste des variables spatialisées utilisées pour modéliser les facteurs de niveau trophique du sol de réserve en eau et de bioclimat qui ont été combinés pour réaliser la carte prédictive des stations du massif vosgien

Variabiles	Code	Unité	Pixel/ Ech.	Source
Climat				
Températures moyennes annuelles et mensuelles	T	°C	1 km	AURELHY
Précipitations moyennes annuelles et mensuelles	P	mm	1 km	AURELHY
Évapotranspiration moyenne annuelle et mensuelle (calculée selon Turc)	ETP	mm	50 m	AURELHY, ENGREF/Hélios
Bilan hydrique (P-ETPTurc) moyen annuel et mensuel	BH	mm	50 m	AURELHY, ENGREF/Hélios
Topographie				
Cosinus exposition (opposition nord-sud)	CosExpo	-	50 m	MNT, Arc Info
Pente	Pente	%	50 m	MNT, Arc Info
Indice de Convexité	Curve	-	50 m	MNT, Arc Info
Indice d'importance de la zone drainée	FD	-	50 m	MNT, Arc Info
Indice de Moore d'accumulation hydrique	Moore	-	50 m	MNT, Moore
Distance à la Crête	DC	m		MNT, ENGREF
Indice de Dénivelé dans un espace de taille définie	ID	m	50 m	MNT, ENGREF
Indice de position relative du pixel par rapport à un dénivelé défini dans un espace de taille spécifique	IDR	%	50 m	MNT, ENGREF
Indice de Position sur le Versant entre la crête et le talweg le plus proche	IPV	-	50 m	MNT, ENGREF
Indice de confinement	Conf	-	50 m	MNT, ENGREF
Géologie et sol				
Substrat à mauvaise richesse minérale	RM _a	0/1	1/50 000	Carte géol., BD géol., EcoPlant
Substrat à assez mauvaise richesse minérale	RM _b	0/1	1/50 000	Carte géol., BD géol., EcoPlant
Substrat à assez bonne richesse minérale	RM _c	0/1	1/50 000	Carte géol., BD géol., EcoPlant
Substrat à bonne richesse minérale	RM _d	0/1	1/50 000	Carte géol., BD géol., EcoPlant
Substrat calcaire	RM _e	0/1	1/50 000	Carte géol., BD géol., EcoPlant
Réserve utile	RU	mm	50 m	BD IFN
Bilans des apports latéraux en eau	BLE	mm	50 m	BD EcoPlant
Réserve en eau (RU + BLE)	RE	mm	50 m	EcoPlant + BD IFN

Les variables issues du modèle AURELHY sont des températures et des précipitations mensuelles et annuelles relevées sur les postes météo et interpolées sur l'ensemble du territoire au pas de 1 km² par Météo France (Benichou et Le Breton, 1987). Le programme Helios élaboré à l'ENGREF (Piedallu et Gégout, 2007) a été utilisé pour calculer le rayonnement solaire qui, combiné aux températures et aux précipitations, a permis de créer des couvertures d'ETP (calculées selon la formule de Turc), de bilans hydriques ou des déficits hydriques climatiques. Différents autres indices bioclimatiques ont également été calculés, comme l'angle de continentalité hydrique de Gams, ou l'indice d'aridité de De Martonne (Lebourgeois et Piedallu, 2005).

Les indices topographiques sont issus de traitements à partir du modèle numérique de terrain (tableau I, p. 41). Certains peuvent être calculés aisément grâce au logiciel SIG Arc Info comme la pente, le cosinus de l'exposition reflétant l'opposition nord/sud, la forme du relief (convexité, concavité). Il existe également des indices hydrologiques liés à l'importance de la zone drainée située en amont du pixel étudié (Jenson et Domingue, 1988) ou qui couplent cette importance du bassin drainé avec la pente du pixel (Moore *et al.*, 1991). D'autres indices ont été créés spécifiquement sous Arc Info pour caractériser la position sur le versant (IPV : position relative entre la crête et le talweg le plus proche), définir la distance à la crête (DC), déterminer l'altitude d'un pixel par rapport à son environnement (IDR, indice de dénivelé relatif indiquant si le pixel est en position haute ou en position confinée ; CONF, indice caractérisant uniquement le confinement) ou encore évaluer le caractère montagneux de la zone (ID, indice de dénivelé, caractérisant le dénivelé dans un rayon donné). Certains de ces indices sont calculés selon des emprises géographiques de différentes tailles. Par exemple, le confinement peut être calculé localement (encaissement du pixel par rapport à son environnement immédiat) ou sur un rayon plus large (encaissement du pixel par rapport à une zone géographique plus importante).

Afin d'avoir accès aux conditions de sols sur l'ensemble du massif vosgien, une couverture numérique de la géologie de la zone a été créée à partir de la digitalisation et de l'homogénéisation des 26 cartes géologiques au format papier au 1/50 000^e couvrant le massif. Les substrats géologiques ont été regroupés en 5 classes de richesse chimique (codées de "a" à "e", du plus acide au plus riche) à l'aide d'une base de données de plus de 900 analyses chimiques de granites et roches associées réalisée par le Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG) de Vandœuvre-les-Nancy (Stussi, 1995). Pour les substrats ne disposant pas d'un nombre d'analyses suffisant, le caractère bioindicateur des relevés floristiques de la base EcoPlant a été utilisé pour les ranger dans l'une des 5 classes de richesse chimique créées.

MÉTHODE

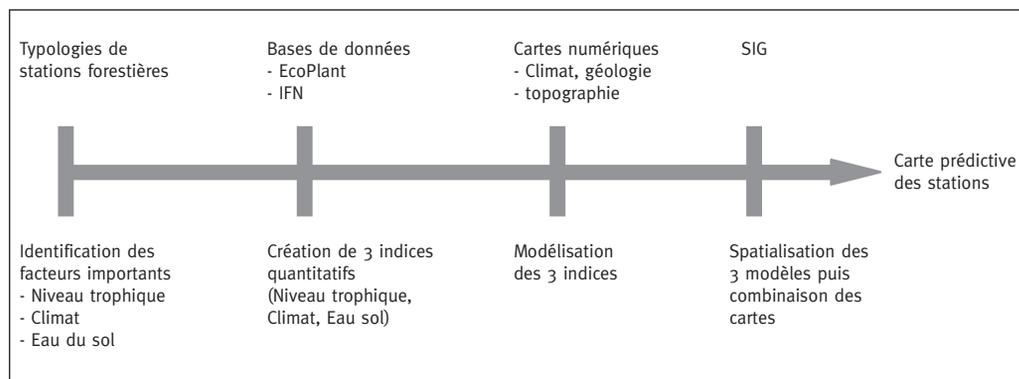
Typologie et spatialisation des stations du massif vosgien

La méthode utilisée pour créer la carte prédictive des stations forestières repose sur la détermination d'indices numériques de chacun des trois facteurs écologiques (richesse minérale, climat et réserve en eau) identifiés dans les typologies puis sur leur modélisation à l'aide de données numériques spatialisées afin de permettre leur combinaison en types de stations et leur cartographie (figure 3, p. 43).

Pour obtenir un indicateur numérique des facteurs écologiques, une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été réalisée sur le tableau floristique en présence-absence des 2 404 relevés de la base EcoPlant et des 395 espèces présentes dans plus de deux relevés. Les deux premiers axes de cette AFC représentent les gradients trophique et bioclimatique, en concordance avec les deux premiers facteurs écologiques identifiés dans les catalogues de stations forestières. Leur signification écologique a été précisée par régression multiple entre les coor-

données factorielles des relevés et les valeurs des variables écologiques relevées sur les placettes ou issues du SIG. Les modèles spatialisés de ces indices ont également été obtenus par régression multiple en mettant en relation les coordonnées factorielles avec uniquement les variables spatialisées gérées sous SIG. Le R^2 (carré du coefficient de corrélation) de la régression fournit un indice du caractère explicatif du modèle.

FIGURE 3 **SYNTHÈSE DE LA MÉTHODE UTILISÉE POUR RÉALISER LA CARTOGRAPHIE PRÉDICTIVE DES STATIONS FORESTIÈRES DU MASSIF VOSGIEN**



Comme aucun axe factoriel ne correspondait à la réserve en eau des sols, nous avons modélisé directement ses deux composantes, la réserve utile maximale du sol et les apports latéraux en eau, par des variables spatialisées. La réserve utile maximale (RUM) des sols a été estimée pour 3 674 relevés de l'IFN réalisés sur le massif vosgien à partir de la texture, de la pierrosité et de la profondeur des sols évaluées sur le terrain. Pour chaque texture, la quantité d'eau disponible pour les plantes par centimètre de sol est tirée de Baize et Jabiol (1995). Les RUM sont estimées par horizon en tenant compte de la pierrosité puis sont sommées pour l'épaisseur de sol prospectée. La position topographique des placettes d'EcoPlant, relevée sur le terrain, a été utilisée pour construire l'indice spatialisé de bilan latéral des apports en eau. Trois classes de bilan en eau ont été définies : départ (sommet, haut de versant), équilibre (plateau, milieu de versant), apport (bas de versant, vallon, vallée, dépression). Ces trois classes ont été modélisées à partir de 1 200 placettes par régression logistique polynomiale en prenant les variables topographiques spatialisées comme variables explicatives. La prise en compte simultanée de la réserve utile et des apports latéraux en eau dans un seul indice de réserve en eau des sols a été réalisée en deux étapes. La première a consisté à convertir les classes de bilan latéral en lame d'eau disponible pour les plantes en comparant les effets produits par les apports latéraux sur la croissance des essences à ceux produits par la réserve utile. Cette conversion étant faite, la lame d'eau fournie par les apports latéraux a été additionnée à celle fournie par la réserve utile pour définir la réserve en eau des sols.

Les modèles produits pour chacun des trois facteurs ont été utilisés pour réaliser sous SIG trois couches de données correspondant au niveau trophique des sols, à leur réserve en eau et au bioclimat. Les valeurs obtenues pour chacune de ces 3 variables ont été discrétisées sous SIG en 4 à 6 classes. La carte prédictive des stations est enfin obtenue par croisement des 3 couches spatialisées, chaque type de station étant défini comme une combinaison originale de modalités des trois facteurs. À l'issue de cette opération de spatialisation des stations, chaque pixel de 50 m de côté du massif vosgien est donc caractérisé simultanément par un type de station et par des indices quantitatifs et qualitatifs des facteurs trophique, hydrique et bioclimatique.

Validation de la carte prédictive des stations et correspondance avec les typologies traditionnelles

La validation de la carte prédictive des stations est réalisée pour chacun des trois facteurs écologiques à partir de données non utilisées pour créer les modèles spatialisés. Les modèles trophiques et bioclimatiques (axes 1 et 2 de l'AFC) ont été validés à partir des 6 175 relevés floristiques de l'IFN. Leurs coordonnées factorielles ont été calculées par positionnement des placettes en variables supplémentaires dans l'AFC initiale. Leur niveau trophique et hydrique modélisé a d'autre part été obtenu par croisement sous SIG avec les deux couches trophique et bioclimatique créées. La qualité des modèles a été évaluée par le R^2 de la régression entre les indices obtenus par croisement sous SIG et les coordonnées factorielles des relevés sur les axes trophiques et hydriques de l'AFC.

Le modèle de réserve utile maximale élaboré à partir des données de l'IFN a été validé sur un sous-échantillon de 2 470 placettes de l'IFN non utilisées pour la calibration du modèle. Les RUM mesurées sur ces placettes sont comparées aux RUM obtenues par croisement sous SIG avec la couche créée par modélisation. Les apports latéraux en eau sont validés à l'aide de la position topographique relevée sur 6 159 placettes de l'IFN comparée à celle fournie par la couche des apports latéraux modélisée grâce aux données d'EcoPlant.

La carte synthétique des stations a ensuite été comparée avec 13 571 relevés de terrain issus de deux bases de données réalisées par l'ONF, concernant deux guides simplifiés de stations : « *Les milieux forestiers dans les Vosges gréseuses lorraines* » et « *Le choix des essences forestières dans les Vosges cristallines lorraines* ». Pour 6 types de stations caractéristiques de milieux très différents, nous avons comparé les codes des stations relevés sur le terrain avec ceux obtenus par la carte prédictive, après croisement sous SIG, afin d'en tirer des enseignements sur la qualité des prédictions et l'adéquation entre les nomenclatures utilisées.

Lien entre stations et distribution des essences

La fréquence du Sapin et de l'Érable sycomore a été calculée pour chacun des types de stations afin de déterminer le caractère discriminant de la carte prédictive vis-à-vis du choix des essences. La fréquence a été calculée à partir de 1 198 relevés d'EcoPlant dans lesquels le Sapin et l'Érable sont présents respectivement dans 657 et 256 relevés. Le nombre de fois où l'essence a été rencontrée dans un type a été rapporté au nombre de placettes classées dans ce type de façon à obtenir une fréquence variant de 0 à 100 %.

RÉSULTATS

Caractérisation des gradients issus de l'AFC

La réalisation de l'AFC laisse apparaître deux axes importants dont les pourcentages d'inertie sont respectivement 2,91 et 2,04 %. Les coordonnées factorielles de l'axe 1 sont corrélées positivement avec l'augmentation de la quantité de calcium échangeable, avec un C/N plus favorable et avec la présence d'humus de type mull. Elles diminuent de façon significative avec l'augmentation d'acidité, un C/N plus défavorable et en présence d'humus de type moder ($R^2 = 0,80$). Les coordonnées des relevés sur l'axe 1 de l'AFC constituent donc un excellent bioindicateur des capacités de nutrition des sols qui correspond au principal facteur écologique qui régit la répartition de la végétation dans le massif vosgien.

L'axe 2 de l'AFC est corrélé de façon significative à la température moyenne annuelle, au cosinus de l'exposition (opposition nord-sud) et au bilan hydrique moyen du mois de juin ($R^2 = 0,49$). Le second gradient le plus important dans la région pour expliquer la distribution des espèces végétales est donc l'étage bioclimatique. Ici aussi, les coordonnées factorielles des relevés sur l'axe 2 constituent un bon indicateur des conditions climatiques des stations.

Modélisation des facteurs trophique, hydrique et bioclimatique à l'aide de variables spatialisées

La modélisation des gradients a permis de sélectionner les variables spatialisées ayant un lien très significatif (au seuil $p = 0,001$) avec les gradients trophiques, hydriques et bioclimatiques.

Le modèle de niveau trophique explique un peu plus d'un tiers de la variance du gradient trophique issu de l'AFC ($R^2 = 0,36$, $n = 955$). Il comprend 4 grands types de variables liées essentiellement au substrat et à la topographie (tableau II, p. 46) :

- le substrat géologique, plus il est siliceux (roches de richesse minérale de niveau "a" ou "b"), plus le niveau trophique est faible ;
- la topographie, plus la placette est située dans un point bas (IDR calculé sur un rayon de 250 m), loin de la crête (DC) avec un environnement proche montagneux (ID calculé sur un rayon de 250 m), plus le niveau trophique est élevé ;
- l'hydrologie, plus la zone drainée est importante (indice de Moore)(Moore *et al.*, 1991), plus le niveau trophique est élevé ;
- la région naturelle : la région des Mille Étangs et des Vosges gréseuses lorraines (dont la Vôge) ont, toutes choses étant égales par ailleurs, une végétation plus acidiphile que le reste du massif.

Le gradient trophique modélisé est découpé en 6 classes correspondant à 6 grands types d'humus et aux 6 niveaux trophiques de la flore forestière française : très acide (végétation hyperacidiphile), acide (végétation acidiphile), assez acide (végétation mésoacidiphile), peu acide (végétation acidicline), neutre (végétation neutrophile) et calcaire (végétation calcicole).

Le modèle bioclimatique explique plus de la moitié de la variance du gradient climatique de l'AFC ($R^2 = 0,52$, $n = 951$). L'indice augmente lorsqu'on monte en altitude (la température baisse, le bilan hydrique devient de plus en plus favorable), lorsqu'on est situé en exposition nord, ou lorsque la latitude augmente (tableau II, p. 46). Le gradient bioclimatique modélisé est découpé en 5 classes correspondant à 5 étages de végétation (collinéen chaud, collinéen, montagnard inférieur, montagnard, subalpin).

La réserve utile et le bilan des apports latéraux en eau constituent les deux termes du modèle de réserve en eau (tableau II, p. 46). La réserve utile est déterminée à la fois par la géologie et par la topographie ($R^2 = 0,43$, $n = 3\ 674$) (tableau II, p. 46). Les sols sur conglomérat principal ou grès vosgien ont de faibles réserves utiles alors que ceux sur grès à Voltzia et coquilliers ont des réserves plus importantes. Ces résultats sont cohérents avec les connaissances empiriques dont on dispose pour ces roches. Le dénivelé aux échelles hectométrique et kilométrique est également corrélé de façon significative à la réserve utile des sols : les topographies planes, qui traduisent des zones de plaines, plateaux, replats ou vallées sont liées à des réserves utiles importantes. De même, les distances à la crête importantes sont liées aux fortes réserves utiles.

Une étude bibliographique a été menée pour évaluer la lame d'eau qui s'ajoute ou se soustrait à la réserve en eau du sol du fait des apports ou des départs latéraux induits par la position topographique. Le bilan de ces apports et départs latéraux en eau, très difficile à évaluer directement, a été estimé indirectement par son effet sur la croissance des essences à partir des

TABLEAU II

Modèles spatialisés des facteurs de niveau trophique, bioclimat, réserve utile et apports latéraux en eau permettant d'élaborer la carte prédictive des stations du massif vosgien
(toutes les variables des modèles ont un effet significatif au seuil $p = 0,001$)

Niveau trophique =	$0 \times RM_a + 0,26 \times RM_b + 0,47 \times RM_c + 0,51 \times RM_d + 1,05 \times RM_e$ $- 0,813 \times IDR_{(rayon\ 250\ m)} + 1,33e^{-4} \times DC + 3,19e^{-3} \times ID_{(rayon\ 250\ m)} + 0,036 \times Moore$ $- 0,20 \times (\text{Région Vosges gréseuses lorraines, Vôge, Mille Étangs})$
Bioclimat =	$- 0,22 \times T_{annuelle} + 1,48e^{-3} \times BH_{cumulé}_{Avril-Septembre} + 0,0648 \times CosExpo + 34,52 \times Latitude$
Réserve en eau =	Réserve utile + Bilan des apports latéraux en eau
Avec :	
Réserve utile =	$104 - 33 \times \text{Conglomérat principal} - 19 \times \text{Grès Vosgiens} + 15 \times \text{Grès à Voltzia}$ $+ 19 \times \text{Roches sédimentaires basiques} + 31 \times \text{Grès coquilliers}$ $- 0,19 \times ID_{(rayon\ 250\ m)} - 0,046 \times ID_{(rayon\ 2\ 000\ m)} + 5,15e^{-3} \times DC$
Bilan des apports =	$- 30$ si $P_{Départ} > P_{Arrivée}$ ou $P_{Équilibre}$ 0 si $P_{Équilibre} > P_{Arrivée}$ ou $P_{Départ}$ $+ 60$ si $P_{Arrivée} > P_{Départ}$ ou $P_{Équilibre}$
Où la probabilité p de rencontre des modalités du bilan des apports latéraux est modélisée par un modèle logistique polynomial :	
$\ln\left(\frac{P_{Départ}}{1-p}\right) = - 0,93 + 2,66 \times Curve_{(rayon\ 150\ m)} + 3,41 \times IDR_{(rayon\ 1\ 500\ m)} - 0,395 \times Moore$	
$\ln\left(\frac{P_{Équilibre}}{1-p}\right) = - 0,46 + 1,33 \times Curve_{(rayon\ 150\ m)} + 1,38 \times IDR_{(rayon\ 1\ 500\ m)} - 0,176 \times Moore$	
$P_{Arrivée} = 1 - (P_{Départ} + P_{Équilibre})$	

études sur le Chêne sessile (Bergès *et al.*, 2005), le Frêne (Le Goff et Lévy, 1984), le Chêne rouge (Le Goff *et al.*, 1994), l'Épicéa et le Sapin (Curt *et al.*, 1996 ; Pinto *et al.*, 2007). La comparaison des effets de la réserve utile et du bilan des apports latéraux en eau montre que ces deux composantes de la réserve en eau des sols ont des effets comparables sur la croissance des essences. Le passage de situations défavorables (départs d'eau) à des situations favorables (apports d'eau) a un effet sur la croissance des essences équivalent à environ 100 mm de variation de réserve utile. C'est pourquoi des bilans latéraux de lame d'eau équivalent à - 30 mm, 0 mm et + 60 mm ont été attribués respectivement aux situations de départs d'eau (crêtes, hauts de versant), zones d'équilibre (plateau, zone plate, milieu de versant), et apports en eau (bas de versant, replat de versant, vallon, vallée).

La modélisation de ces trois situations par régression logistique montre le lien significatif entre les zones de départs latéraux d'eau liées à la topographie et une faible surface du bassin drainé situé en amont du pixel (indice de Moore faible), une convexité importante à l'échelle hectométrique (indice de convexité élevé) et une position haute par rapport au dénivelé défini à l'échelle kilométrique (IDR élevé). Les zones d'arrivées se situent dans des positions topographiques ayant des caractéristiques opposées à celles des zones de départs (tableau II, ci-dessus).

Les valeurs de réserve en eau ont été calculées en sommant la réserve utile et le bilan latéral. La réserve en eau obtenue a été découpée en 4 classes : < 40 mm, 40-70 mm, 70-120 mm, 120 mm.

Validation des modèles

La validation du modèle de niveau trophique par le jeu de données de l'IFN, indépendant du jeu de calibration, montre une diminution du R^2 entre le niveau trophique estimé par l'AFC et le niveau trophique spatialisé : le R^2 passe de 0,36 pour le jeu de calibration à 0,28 pour le jeu de validation. De façon générale, les niveaux trophiques prédits ne correspondent que dans 20 à 50 % des cas (tableau IIIa, p. 48). Par contre, le taux de bonnes prédictions atteint environ 80 % des cas lorsqu'on accepte un écart d'une classe entre le niveau trophique prédit et le niveau trophique mesuré par la flore sur le terrain (par exemple, un relevé acidiphile sur le terrain sera prédit mésoacidiphile, acidiphile ou hyperacidiphile).

En ce qui concerne le modèle bioclimatique, on constate également une baisse du R^2 (0,44 sur le jeu de validation contre 0,52 initialement). Le taux de bon classement, proche de 50 % en moyenne, atteint 90 % lorsqu'on accepte un écart d'une classe entre modalités prédites et observées sur le terrain (tableau IIIb, p. 48). La végétation subalpine observée sur le terrain présente la particularité d'être prédite avec un fort taux d'erreur.

La corrélation ($R^2 = 0,42$) entre la réserve utile spatialisée et la réserve utile des 2 470 sols du jeu de validation est équivalente à celle observée sur les données utilisées pour modéliser la RU. La carte des réserves utiles est assez efficace pour prédire la réserve utile des sols vosgiens. Le classement des zones de départs et d'arrivées d'eau par la carte des apports latéraux en eau est semblable dans 58 % des cas au classement de terrain réalisé sur les 6 159 placettes de l'IFN utilisées pour valider cette variable. Les mesures de terrain de référence pour la réserve utile et la topographie étant assez rapides, et réalisées par des opérateurs différents, il est possible que les différences de valeurs proviennent pour une part importante d'une mauvaise évaluation des variables sur le terrain.

Cette étape de validation montre la bonne cohérence des différents modèles pour discriminer les trois facteurs écologiques. Les modèles de bioclimat, de réserve utile, et d'apports latéraux en eau semblent être les plus prédictifs, tandis que le modèle de niveau trophique est moins performant, bien qu'expliquant plus d'un quart de la variance du niveau trophique indiqué sur le terrain par la flore. Ce sont généralement les valeurs extrêmes des variables qui sont les plus difficiles à prédire, bien que l'erreur de classement soit le plus souvent limitée à une modalité.

Cartographie prédictive des stations forestières

Chacun des trois facteurs écologiques ayant été modélisé à l'aide de variables spatialisées sous SIG, il est possible de cartographier pour chaque pixel de 50 mètres de côté du massif vosgien les classes de niveau trophique, de bioclimat, et de réserve en eau des stations (figure 4, p. 49). La carte prédictive des stations a ensuite été réalisée en combinant ces trois couches de façon à obtenir des unités homogènes pour les trois facteurs considérés simultanément. L'ensemble des stations possédant les mêmes classes pour les 3 facteurs sont rangées dans le même type de station. Les stations sont codées par un numéro à 3 chiffres correspondant à chaque facteur : il y a 6 modalités correspondant aux 6 classes de niveau trophique (codées 1xx à 6xx), 5 modalités de bioclimat (codées x1x à x5x), et 4 modalités de réserve en eau (codées xx1 à xx4). Ainsi, les polygones codés 322 de la carte du type de station sont assez acides (végétation mésoacidiphile), collinéens, et à réserve en eau prédite comprise entre 40 et 70 mm. Le regroupement de certains types absents des Vosges ou couvrant des surfaces faibles conduit à la définition de 59 types de stations (figure 5, p. 50). Une simplification en 12 classes permet enfin une cartographie lisible à l'échelle du massif vosgien (figure 6, p. 51).

TABLEAU III

Qualité de classement des placettes IFN, par la carte prédictive des modalités de niveau trophique (a) et bioclimat (b) observées sur le terrain (les données utilisées sont les données de validation)

(a)

Modalité prédite \ Modalité observée (AFC)	1 Hyper- acidophile	2 Acidophile	3 Més- acidophile	4 Acidicline	5 Neutrophile	6 Calcicole	Total	Correct. classées (%)	Classées +/-1 modal. (%)
1 - Hyperacidophile	89	487	345	65	1	0	987	9	58
2 - Acidophile	75	576	729	235	9	0	1 624	35	85
3 - Mésoacidophile	28	334	715	463	28	2	1 570	46	96
4 - Acidicline	7	145	511	562	60	3	1 288	44	88
5 - Neutrophile	4	31	142	280	55	10	522	10	66
6 - Calcicole	0	3	21	66	38	16	144	11	38
Total	203	1 576	2 463	1 671	191	31	6 135	33	
Correctement classées (%)	44	36	29	34	20	52			
Correctement classées +/-1 modalité (%)	81	89	79	78	80	84			81

(b)

Modalité prédite \ Modalité observée (AFC)	1 Collinéen chaud	2 Collinéen	3 Montagnard inf.	4 Montagnard	5 Subalpin	Total	Correct. classées (%)	Classées +/-1 modal. (%)
1 - Collinéen chaud	163	356	115	10	0	644	25	81
2 - Collinéen	88	539	485	69	2	1 183	46	94
3 - Montagnard inf.	26	341	1 005	412	9	1 793	56	98
4 - Montagnard	5	128	725	1 281	116	2 255	57	94
5 - Subalpin	1	6	19	62	8	96	8	73
Total	283	1 370	2 349	1 834	135	5 971	50	
Correctement classées (%)	58	39	43	70	6			
Correctement classées +/-1 modalité (%)	89	90	94	96	92			93

CARTES À FINE RÉOLUTION (pixel de 50 m x 50 m) DES MODÈLES DE NIVEAU TROPHIQUE, DE BIOCLIMAT ET DE RÉSERVE EN EAU

FIGURE 4

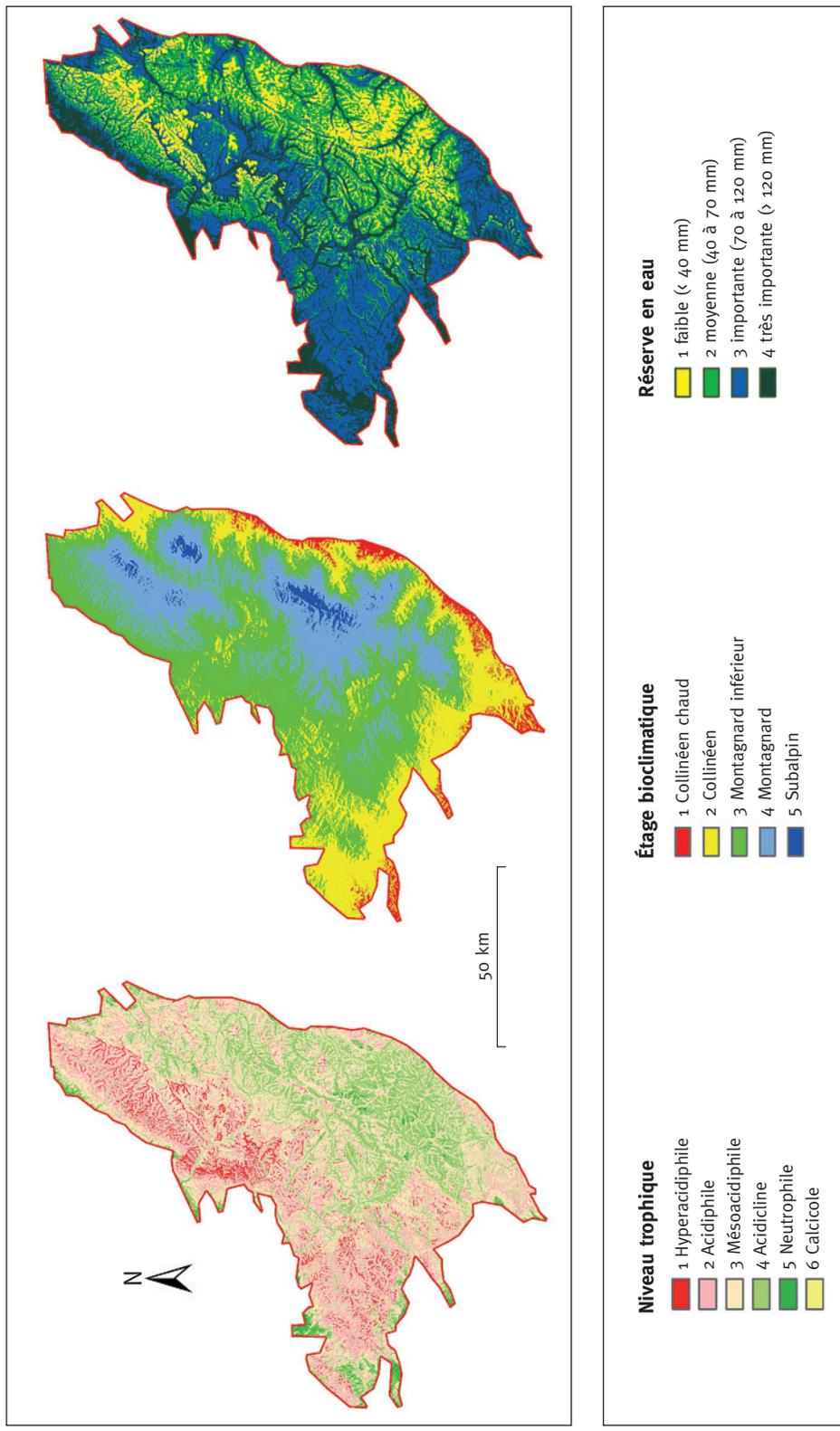
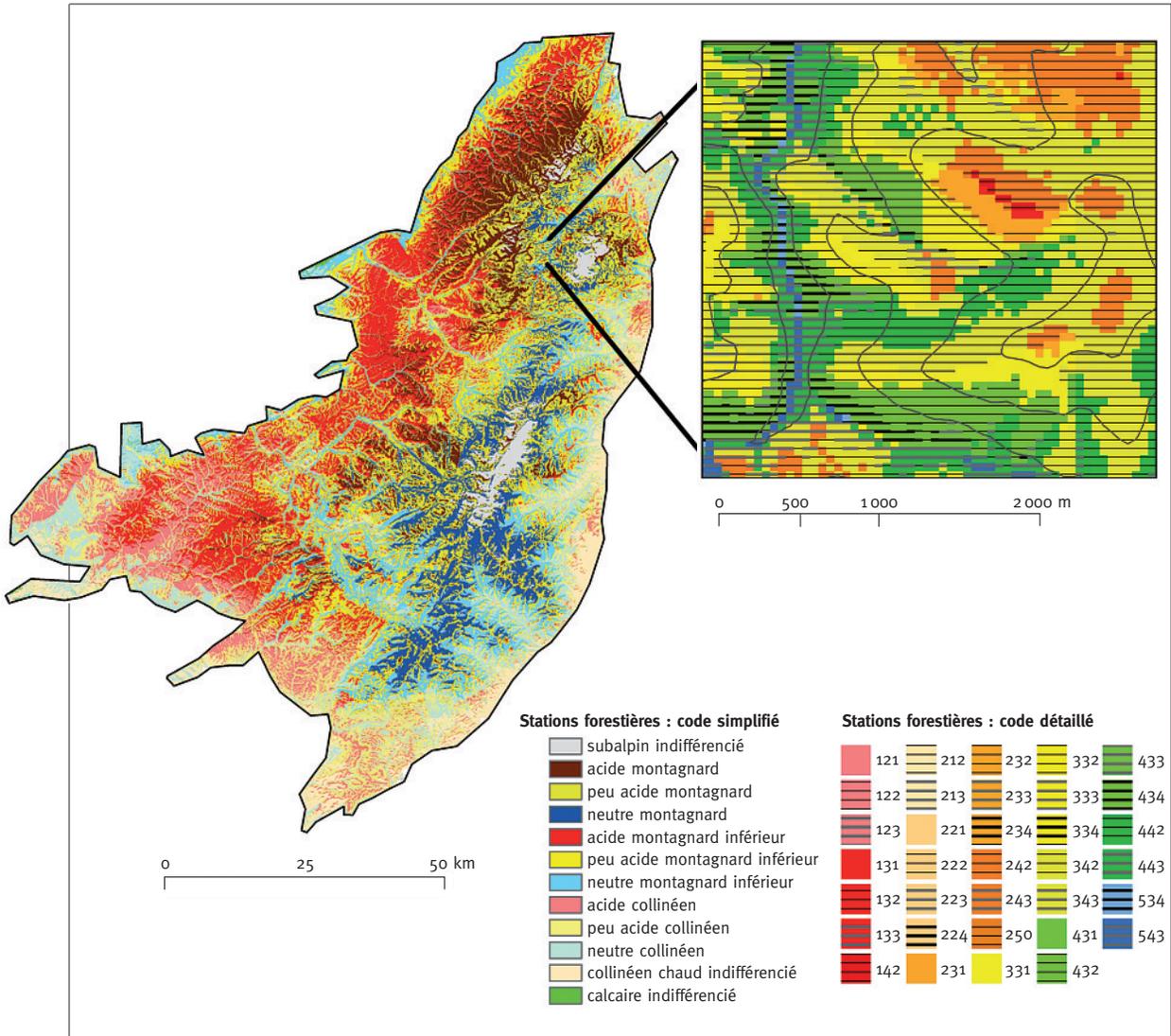


FIGURE 6 **CARTE PRÉDICTIONNE DES STATIONS DU MASSIF VOSGIEN :**
VUE SIMPLIFIÉE AU 1/1 000 000^e ET DÉTAIL AU 1/50 000^e DANS LA VALLÉE DE LA BRUCHE.
 La signification des codes est indiquée dans la figure 5



Nous avons choisi ensuite de nous focaliser sur un nombre restreint de stations représentatives :

- Aulnaie-sapinière sur sol humide de fond de vallée (VGL, type de station 4) ;
- Pîneraie à callune sur sol superficiel très acide (VGL, type de station 6) ;
- Sapinière-hêtraie à Fétuque sur sol peu acide (VGL type de station 11) ;
- Hêtraie sommitale (VCL, type de station 6) ;
- Hêtraie-sapinière sur sol riche (VCL, type de station 10) ;
- Hêtraie-sapinière sur sol très acide (VCL, type de station 14).

La distribution observée sur le terrain des stations d'un type se trouve dans une gamme relativement restreinte et cohérente de la typologie prédictive (figure 7a et b, ci-dessous). Ainsi, les stations observées dans les milieux humides (VGL 4) ou secs (VGL 6) correspondent à des types prédits sur sols respectivement à bonne et mauvaise réserve en eau. De même, les types rencontrés sur le terrain dans les milieux riches (VCL 10), peu acides (VGL 11) ou très acides (VGL 6)

Station 4 VGL :
Aulnaie sapinière sur
sol humide de vallée

Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésosacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
3 - Mont. infér.	1-faible						
	2-moderée		1				
	3-forte		3	1			
	4-très forte		4	6			
2 - Collinéen	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
1 - Collinéen ch.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						

Station 6 VGL :
Pineriaie à callune sur
sol superficiel très acide

Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésosacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible	2	3				
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
3 - Mont. infér.	1-faible	19	12	2			
	2-moderée	15	39	1			
	3-forte		3	4			
	4-très forte	1	3				
2 - Collinéen	1-faible						
	2-moderée	1	4				
	3-forte		2				
	4-très forte						
1 - Collinéen ch.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						

Station 11 VGL :
Sapinière hêtraie à Fétuque
sur sol peu acide

Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésosacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible	8	17	12			
	2-moderée						
	3-forte		18	9			
	4-très forte						
3 - Mont. infér.	1-faible	12	9	5			
	2-moderée	31	51	19	2		
	3-forte		28	22	1		
	4-très forte	5	8	12	8		
2 - Collinéen	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte		4	4			
	4-très forte	6		1			
1 - Collinéen ch.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						

FIGURE 7 a
CLASSEMENT À PARTIR
DE LA CARTE PRÉDICTIVE DES STATIONS,
DE RELEVÉS RATTACHÉS SUR LE TERRAIN
À 3 TYPES DE STATIONS
À PARTIR DU GUIDE SIMPLIFIÉ
“VOSGES GRÉSEUSES LORRAINES” (VGL)
Source des relevés : ONF

Les cases grisées correspondent aux conditions écologiques des types de stations définis dans le guide simplifié.

sont rencontrés de façon majoritaire dans des types prédits ayant un niveau trophique correspondant. Il est cependant impossible de réaliser une correspondance stricte entre les types de la cartographie prédictive et les typologies établies de façon traditionnelle, car à un type de terrain correspondent plusieurs types de la cartographie prédictive et, réciproquement, à un type de la cartographie prédictive correspondent généralement plusieurs types de terrain.

**Station 6 VCL :
Hêtre sommitale**

Bioclimat	Rés. en eau	Type de station					
		1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible						
	2-moderée	2					
	3-forte		13				
	4-très forte			3			
4 - Montagnard	1-faible						
	2-moderée			4	2		
	3-forte						
	4-très forte						
3 - Mont. infér.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
2 - Collinéen	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						
1 - Collinéen ch.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						

**Station 10 VCL :
Hêtre sapinière
sur sol riche**

Bioclimat	Rés. en eau	Type de station					
		1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte			3			
	4-très forte				16		
4 - Montagnard	1-faible						
	2-moderée		1	13	20		
	3-forte			1	9	1	
	4-très forte						
3 - Mont. infér.	1-faible						
	2-moderée		1	3			
	3-forte			1	1		
	4-très forte						
2 - Collinéen	1-faible						
	2-moderée				1		
	3-forte						
	4-très forte			2			
1 - Collinéen ch.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						

**Station 14 VCL :
Hêtre sapinière
sur sol très acide**

Bioclimat	Rés. en eau	Type de station					
		1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible						
	2-moderée	1					
	3-forte			5			6
	4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible	23	98	138	16		
	2-moderée						
	3-forte	8		62	13		
	4-très forte						
3 - Mont. infér.	1-faible	15	22	6			
	2-moderée	1	60	39	9		
	3-forte		4	30	1		
	4-très forte			5	5		
2 - Collinéen	1-faible		1	5			
	2-moderée			10	4		
	3-forte		7	6	2		
	4-très forte			7	3		
1 - Collinéen ch.	1-faible						
	2-moderée						
	3-forte						
	4-très forte						

FIGURE 7 b
CLASSEMENT À PARTIR
DE LA CARTE PRÉDICTIVE DES STATIONS,
DE RELEVÉS RATTACHÉS SUR LE TERRAIN
À 3 TYPES DE STATIONS
À PARTIR DU GUIDE SIMPLIFIÉ
“VOSGES CRISTALLINES LORRAINES” (VCL)

Source des relevés : ONF

Les cases grisées correspondent aux conditions écologiques des types de stations définis dans le guide simplifié.

Relations entre l'aire de distribution observée du Sapin pectiné et de l'Érable sycomore et les stations prédites

L'estimation des potentialités forestières constitue l'intérêt principal des cartographies stationnelles. De façon traditionnelle, les guides stationnels fournissent aux utilisateurs des préconisations dans le choix des essences à effectuer pour chaque type de station. Les essences sont conseillées dans des types de stations favorables à leur croissance et, lorsqu'elles sont autochtones, elles se trouvent naturellement avec une forte fréquence dans ces types de stations. Nous avons testé si la carte prédictive permettait d'isoler des stations présentant une fréquence importante de certaines essences par rapport à d'autres stations où ces essences seraient absentes ou faiblement présentes. Le Sapin et l'Érable sycomore ont été étudiés dans ce cadre. Le Sapin est l'essence dominante du massif vosgien alors que l'Érable sycomore est une essence plus marginale spécifique des milieux riches. La fréquence du Sapin par type de station selon la carte prédictive montre qu'il couvre quasiment tout le gradient trophique avec une fréquence un peu plus importante dans les milieux acides (figure 8, ci-dessous). Cela est conforme aux préconisations des guides, les potentialités étant favorables aussi bien pour les stations riches du catalogue Vosges cristallines lorraines (stations 10 ou 11 par exemple) que pour les stations hyperacidiphiles du catalogue Vosges gréseuses lorraines (stations 7 et 8 par exemple). Le Sapin est globalement moins présent dans les stations de faible altitude, ce que l'on retrouve dans les préconisations du catalogue pour les stations A à E du catalogue Vosges gréseuses lorraines ou

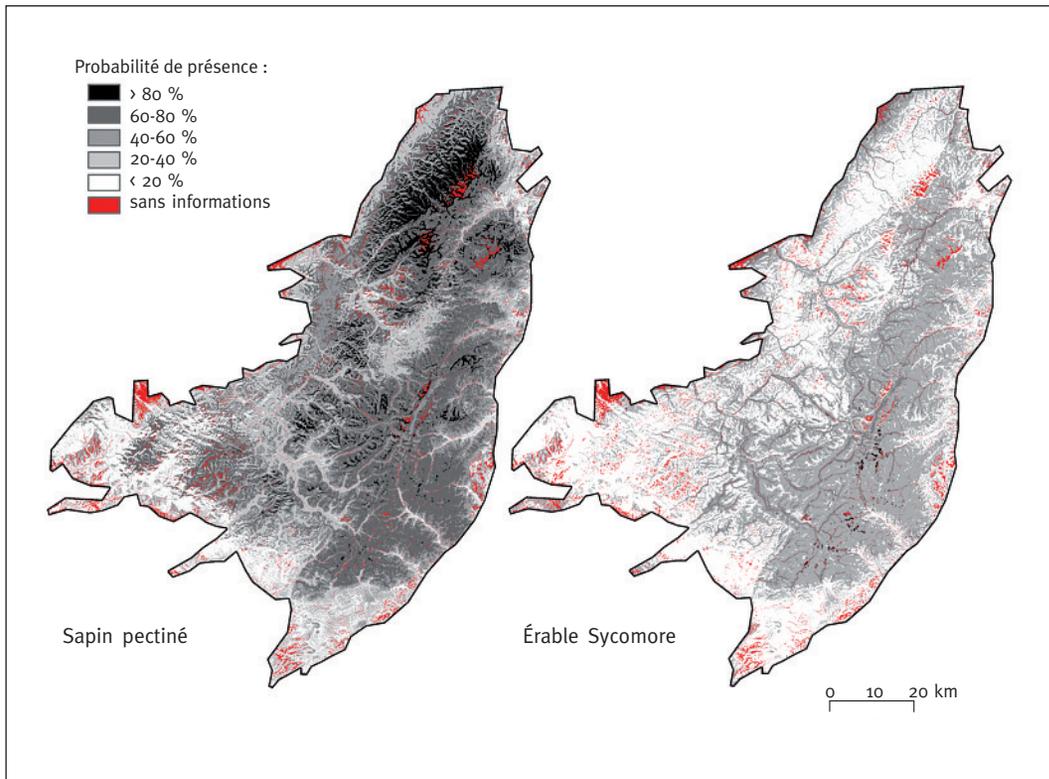
FIGURE 8 Taux de présence (%) du Sapin pectiné (657 cas de présence) et de l'Érable sycomore (265 cas de présence) par type de station
Source EcoPlant, n = 1198

Les 5 tons du blanc au gris sombre correspondent aux 5 classes de 20 % d'amplitude de fréquence des essences. Les types de stations présentant moins de 5 relevés dans EcoPlant n'ont pas été pris en compte et figurent en hachuré.

Sapin pectiné			Niveau trophique					
Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mesoacidiphile	4-Acidicole	5-Neutrophile	6-Calcicole	
5 - Subalpin	1-faible							
	2-modérée			64		58		
	3-forte							
	4-très forte							
4 - Montagnard	1-faible	100	82	71	64	43		
	2-modérée							
	3-forte	75	72	47				
	4-très forte							
3 - Mont. infér.	1-faible	56	71	75	68			
	2-modérée	43	59	58	62			
	3-forte		40	30	67	40		
	4-très forte		83	26	28			
2 - Collinéen	1-faible		50	74	75			
	2-modérée		25	54	50			
	3-forte	9	0	22	50			
	4-très forte		0	8	35			
1 - Collinéen ch.	1-faible				40	50		
	2-modérée							
	3-forte				33	10		
	4-très forte							

Érable sycomore			Niveau trophique					
Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mesoacidiphile	4-Acidicole	5-Neutrophile	6-Calcicole	
5 - Subalpin	1-faible							
	2-modérée			29		50		
	3-forte							
	4-très forte							
4 - Montagnard	1-faible	0	7	28	38	86		
	2-modérée							
	3-forte	13	17	47				
	4-très forte							
3 - Mont. infér.	1-faible	11	5	27	29			
	2-modérée	0	5	32	32			
	3-forte		5	27	27	60		
	4-très forte		0	22	41			
2 - Collinéen	1-faible		8	5	50			
	2-modérée		0	21	11			
	3-forte	0	4	19	38			
	4-très forte		0	12	4			
1 - Collinéen ch.	1-faible							
	2-modérée			10	0			
	3-forte							
	4-très forte			17	20			

FIGURE 9 PROBABILITÉS DE PRÉSENCE DÉRIVÉES DE LA CARTE PRÉDICTIVE DES STATIONS DU SAPIN PECTINÉ (À GAUCHE) ET DE L'ÉRABLE SYCOMORE (À DROITE) DANS LE MASSIF VOSGIEN



encore la station 19 du catalogue Vosges cristallines lorraines. On note également une corrélation de la présence du Sapin avec les sols à réserve en eau faible ou moyenne.

Autant le Sapin était présent sur une large gamme des gradients écologiques, autant on constate que l'Érable sycomore est principalement localisé dans les milieux les plus riches et de préférence en altitude de la carte prédictive des stations (figure 8, p. 54). Cela correspond parfaitement aux informations des guides stationnels qui préconisent l'Érable dans les stations riches à forte humidité atmosphérique (station 5 du guide Vosges gréseuses lorraines ou stations 7 et 10 du guide Vosges cristallines Lorraines). Cependant, le gradient hydrique auquel on aurait pu s'attendre n'apparaît pas clairement dans la carte prédictive du fait de cas de présence dans des compartiments stationnels à faible réserve en eau. Cela s'explique probablement par le fait que l'Érable sycomore se trouve essentiellement sur des sols à forte charge en pierres pour lesquels la réserve en eau calculée peut être faible.

Il est possible de cartographier la probabilité de présence de ces deux essences au comportement contrasté en se fondant sur la fréquence observée au sein de chaque type de station (figure 9, ci-dessus). Les surfaces représentant une probabilité de présence de plus de 40 % pour le Sapin pectiné couvrent 51 % du territoire et contiennent 91 % des présences observées dans EcoPlant. Pour l'Érable sycomore, plus diffus sur le massif, les surfaces représentant une probabilité de présence de plus de 20 % couvrent 43 % du territoire et contiennent 83 % des cas de présence

d'EcoPlant. Il serait donc possible de combiner l'utilisation de la carte prédictive des stations et les relevés géoréférencés de bases de données phytoécologiques situés hors plantations, comme ceux d'EcoPlant, afin de donner des conseils de choix des essences selon le type de station.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Une cartographie prédictive homogène des stations du massif vosgien a été réalisée sur tout le massif. Les trois facteurs importants pour la détermination des types de stations forestières du massif (le niveau trophique du sol, sa réserve en eau et le climat local) ont été identifiés par une étude bibliographique puis ont été modélisés et spatialisés. Seules les stations marginales, éboulis, bords de rivières et tourbières n'ont pas été cartographiées.

La modélisation des 3 facteurs importants à partir des variables spatialisées permet de prédire correctement environ 33 % des relevés dans les 6 classes de niveau trophique définies, et 50 % des relevés dans les 5 classes de bioclimat (valeurs fournies à l'aide d'un jeu de validation indépendant). La moindre performance concernant la caractérisation du niveau trophique s'explique en partie par l'utilisation de la carte géologique numérisée qui induit une perte d'informations par rapport au caractère bioindicateur de la flore relevé sur le terrain. D'autre part, nous avons expliqué 42 % de la variabilité de la réserve utile calculée sur les relevés de l'IFN et prédit correctement 57 % des modalités topographiques utilisées pour estimer les apports latéraux en eau, sachant que la définition et le calcul de la réserve utile et des positions topographiques demeurent empreints de subjectivité (tout comme l'effet de la position topographique sur les apports latéraux en eau, qui reste encore mal connu). Ces résultats montrent qu'il est possible de modéliser chacune des composantes caractérisant la station forestière à l'aide de variables numériques spatialisées existant sous SIG.

La comparaison des types de station de la carte prédictive avec ceux obtenus sur le terrain à partir de typologies traditionnelles a montré la difficulté de mettre en concordance des typologies réalisées par des méthodes différentes. La carte prédictive utilise des critères abiotiques pour la caractérisation de la station contrairement aux catalogues dont la typologie repose sur la flore présente sur les sites. La difficulté d'évaluation du niveau trophique est aussi en partie à l'origine d'écarts entre stations prédites et observées sur le terrain. Enfin, la définition des types de station est différente d'une typologie de terrain à l'autre, ce qui rend délicat toute tentative de réunion de plusieurs catalogues dans une typologie couvrant un plus vaste territoire. La cartographie prédictive couvrant le territoire de 8 typologies, il est normal qu'elle ne puisse pas être cohérente avec chacune d'entre elles.

Par rapport à une typologie traditionnelle, la cartographie prédictive des stations présente l'inconvénient d'une caractérisation du niveau trophique moins fiable. En contrepartie, certains facteurs sont évalués plus finement. Ainsi, les catalogues utilisent principalement l'épaisseur du sol ou parfois certaines positions topographiques comme critère d'évaluation de la réserve en eau des stations. La typologie prédictive permet une estimation de la RUM des sols en intégrant d'autres variables comme la géologie, la texture du sol, ou la charge en cailloux, et permet d'évaluer plus finement les apports latéraux en eau grâce à l'utilisation de modèles numériques de terrain (simulation de l'écoulement d'une nappe d'eau sur le sol, caractérisation de la forme du relief, ...). Pour l'évaluation du climat, les catalogues se basent sur l'altitude et l'exposition. La modélisation du bioclimat, plus précise, prend en compte la température, le rayonnement solaire, l'évapotranspiration et les précipitations à travers le bilan hydrique climatique. L'intégration explicite de la température et du bilan hydrique des stations dans le modèle bioclimatique facilitera la prise en compte des changements climatiques pour actualiser les cartes stationnelles futures.

Nous proposons une carte des stations disponible sur tout le massif vosgien, alors que les méthodes traditionnelles de terrain n'ont actuellement pas permis de réaliser cette opération, particulièrement longue et coûteuse. Il n'y a ainsi pas d'erreur de positionnement sur le terrain ni d'erreur d'évaluation d'un facteur ou d'un type de station par des opérateurs différents et de niveau technique variable. Enfin, alors que la cartographie traditionnelle des stations ne peut être réalisée qu'en milieu forestier fermé, la cartographie prédictive couvre tous les milieux dont les milieux forestiers ouverts affectés par des tempêtes ou des coupes ou les zones en déprise agricole à vocation forestière.

L'intérêt de la carte prédictive des stations est fortement lié à son utilité pour déterminer les potentialités forestières des parcelles. Nous avons pu mettre en évidence l'intérêt de la carte pour définir et cartographier les stations favorables et défavorables au Sapin et à l'Érable sycomore à partir de leur fréquence dans les conditions naturelles. Cette voie pourrait être étendue aux autres essences de façon à optimiser le choix des essences à favoriser en fonction des conditions stationnelles. Outre le choix des essences lié à leur capacité à se développer dans les stations, la variabilité de leur productivité en fonction des conditions stationnelles représente un critère important pour le forestier. Les travaux récents réalisés à vaste échelle spatiale sur la productivité du Hêtre, de l'Épicéa, du Chêne et du Sapin (Pinto, 2006 ; Seynave *et al.*, 2006 ; Seynave *et al.*, 2004) pourraient permettre de donner des valeurs de productivité de ces 4 essences pour chacune des stations du massif vosgien définies dans ce travail. Ce double travail sur la distribution et la productivité des essences offrirait la possibilité de formaliser les relations station-production en se fondant sur des paramètres environnementaux mesurables. Il ouvrirait la voie à la prise en compte conjointe de la variabilité spatiale des conditions stationnelles et des changements environnementaux à long terme pour un choix des essences justifié à l'échelle de leur révolution.

L'utilisation de la cartographie prédictive des stations ouvre de larges horizons. À l'échelle du massif forestier dans le cadre d'opérations d'aménagement, elle permet d'observer la distribution prévisible des types stationnels ou de prévoir des cartographies de terrain complémentaires notamment pour améliorer le diagnostic de niveau trophique dans les milieux riches favorables aux feuillus précieux (Frêne, Érables sycomore ou plane, Merisier). La carte numérique de base pourrait ainsi être corrigée dans certaines zones sensibles par l'apport de données de terrain sur le niveau trophique et complétée pour les types stationnels particuliers non étudiés ici. Il serait également possible de dériver une clé de détermination à partir d'espèces indicatrices, utilisable sur le terrain permettant d'affiner la cartographie lorsqu'il n'y a pas de catalogue de stations disponible. À l'échelle régionale, la carte prédictive permet de connaître les surfaces des différents types de stations, de prévoir les surfaces des peuplements potentiels, d'établir des pré-zonages ou de localiser certains types de stations spécifiques. Dans un cadre prospectif, la cartographie prédictive définit finement et de façon quantifiée le bioclimat et la réserve en eau des stations qui constituent des paramètres essentiels pour définir les potentialités forestières futures, dépendantes des changements climatiques. À ce titre, elle peut être utilisée pour distinguer les zones sensibles aux sécheresses futures de celles qui possèdent les bilans hydriques les plus favorables.

Ce projet fournit pour la première fois une carte des stations sur un territoire de la taille d'une région administrative. Ce nouvel outil a pour vocation à être utilisé et amélioré dans le cadre de la gestion forestière en complément des catalogues existants. Les données ont été largement diffusées aux organismes gestionnaires (ONF, CRPF, IFN, GIP Ecofor), ou à travers le web⁽¹⁾.

(1) Données accessibles sur le site de l'équipe écologie forestière : <http://efdp.nancy-engref.inra.fr/> ou du projet « système d'informations partagées pour la gestion forestière régionale » : <http://www.sinpa.ifn.fr/presentation.html> (accès réservé aux partenaires du projet).

La méthodologie mise au point et l'intérêt de cette carte se conjuguent au développement de nouvelles données numériques et des bases de relevés écologiques pour favoriser une généralisation de la méthode à des territoires différents ou plus vastes.

Jean-Claude GÉGOUT – Christian PIEDALLU – Jean-François CORNU

UMR1092 INRA-ENGREF, LERFoB
Équipe Écologie forestière
AgroParisTech - ENGREF
14, rue Girardet, CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(jean-claude.gegout@engref.agroparistech.fr)
(christian.piedallu@engref.agroparistech.fr)
(jfrancoisCORNU@aol.com)

Catherine CLUZEAU

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
14, rue Girardet, CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(catherine.cluzeau@ifn.fr)

Remerciements

Les auteurs remercient M. Bertrand Martinez et M^{me} Isabelle Anselme pour leur aide à la réalisation des figures et tableaux de cet article ainsi que M^{me} Sylvaine Labbé de l'Office national des Forêts qui a fourni les données stationnelles sur le massif vosgien.

BIBLIOGRAPHIE

- BAIZE (D.), JABIOL (B.). — Guide pour la description des sols. — Paris : INRA, 1995. — 375 p. (Collection technique et pratique).
- BECKER (M.), LE TACON (F.), TIMBAL (J.). — Les plateaux calcaires de Lorraine. Types de stations et potentialités forestières. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 1980. — 268 p.
- BENICHOU (P.), LE BRETON (O.). — Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. — *La Météorologie*, 7, 1987, pp. 23-34.
- BERGÈS (L.), CHEVALIER (R.), DUMAS (Y.), FRANC (A.), GILBERT (J.-M.). — Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. — *Annals of Forest Science*, vol. 62, 2005, pp. 391-402.
- BONNEAU (M.), FAIVRE (P.), GURY (M.), HETIER (J.-M.), LE TACON (F.). — Carte pédologique de France au 1/100 000^e : Saint-Dié. Notice explicative. — 1978.
- BRÊTHES (A.). — Catalogue des stations forestières du plateau lorrain. — Nancy : Office national des Forêts ; INRA, 1976. — 223 p.
- CACHAN (P.). — Étude bioclimatique du massif vosgien. — *Bulletin ENSAIA Nancy*, vol. XVI, n° 1-2, 1974, 45 p.
- CURT (T.), DOLE (S.), MARMEYS (G.). — Alimentation en eau et production forestière. Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le Massif central. — *Étude et Gestion des Sols*, 3, 1996, pp. 81-96.
- DION (J.). — Les forêts vosgiennes. Étude biogéographique. — Lille : Université de Lille, 1985. — 484 p. (Thèse).
- DRAPIER (N.). — Éléments pour une typologie forestière de la Vôge. — Nancy : ENGREF ; Université de Nancy I, 1988. — 83 p. (Diplôme d'étude approfondie).

- DUCHAUFOUR (P.), JACAMON (M.), DEBAZAC (E.-F.), PARDÉ (J.). — Un exemple d'utilisation pratique de la cartographie des stations : la forêt du Ban d'Étival (Vosges). — *Revue forestière française*, vol. X, 1958, pp. 507-530.
- GÉGOUT (J.-C.). — Catalogue des types de stations forestières de la région des Mille Étangs (Haute-Saône). — Maison de l'environnement des Vosges du Sud ; Ministère de l'Agriculture ; Région de Franche-Comté, 1993. — 211 p.
- GÉGOUT (J.-C.), COUDUN (C.), BAILLY (G.), JABIOL (B.). — EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. — *Journal of Vegetation Science*, 16, 2005, pp. 257-260.
- GUILLET (B.). — Les problèmes de l'évolution des podzols vosgiens et ses relations avec l'histoire de la végétation. — *Revue forestière française*, vol. XXVI, n° 1, 1974, pp. 31-44.
- JENSON (S.K.), DOMINGUE (J.O.). — Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. — *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1988, pp. 1593-1600.
- LEBOURGEOIS (F.), PIEDALLU (C.). — Comment appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 4, 2005, pp. 331-356.
- LE GOFF (N.), COLIN-BELGRAND (M.), MULLER (G.). — Croissance et productivité du Chêne rouge dans le Nord-Est de la France. In : Le Chêne rouge d'Amérique. — Paris : INRA, 1994. — pp. 158-176.
- LE GOFF (N.), LÉVY (G.). — Productivité du Frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie. B. Étude des relations entre la productivité et les conditions de milieu. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 41, 1984, pp. 135-170.
- MADESCLAIRE (A.), LACOMBE (E.), RAMEAU (J.-C.). — Les milieux forestiers dans les Vosges gréseuses lorraines. — CRPF de Lorraine-Alsace, 1999. — 47 p.
- MADESCLAIRE (A.), RAMEAU (J.-C.), VOIRY (H.). — Le Choix des essences forestières dans les Vosges cristallines lorraines. Document de vulgarisation. — CRPF de Lorraine-Alsace, 1995. — 50 p.
- MOORE (I.D.), GRAYSON (R.B.), LADSON (A.R.). — Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. — *Hydrological Processes*, 5, 1991, pp. 3-30.
- OBERTI (D.). — Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n° 1 : Généralités, types stationnels des Vosges cristallines. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 1990a. — 373 p.
- OBERTI (D.). — Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n° 2 : Types stationnels des Hautes Vosges gréseuses. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 1990b. — 23 p.
- OBERTI (D.). — Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n° 3 : Types stationnels des collines sous-vosgiennes. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 1990c. — 324 p.
- PAVIE (A.). — Précartographie des stations forestières : exemple sur la bordure Est du Massif central, à partir d'un modèle numérique de terrain. — Mémoire de licence professionnelle, 2005. — 40 p. + annexes.
- PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.). — Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modeling. — *Annals of Forest Science*, vol. 64, n° 8, 2007, pp. 899-909.
- PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.), CORNU (J.-F.), CLUZEAU (C.). — Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien - Élaboration, validation et applications. — Rapport final de la convention de recherche SERFOB Lorraine (DRAF)/ENGREF-IFN, Nancy, 2006. — 95 p.
- PIGUET (A.). — Typologie des stations forestières dans les Vosges du Sud. — Université de Franche-Comté ; Nancy : ENGREF, 1987. — 116 p. (Diplôme d'étude approfondie).
- PINTO (P.). — Écologie et croissance de *Abies alba* Mill. en peuplements purs et mélangés dans le Massif vosgien (Nord-Est de la France). — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 2006. — 175 p. (Thèse de doctorat).
- PINTO (P.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Changes in environmental controls on the growth of *Abies alba* Mill. in the Vosges Mountains, north-eastern France, during the 20th century. — *Global Ecology and Biogeography*, 16, 2007, pp. 472-484.
- RAMEAU (J.-C.), MANSION (D.), DUMÉ (G.). — Flore forestière française - guide écologique illustré. Tome 2 : montagnes. — Paris : Institut pour le Développement forestier, 1993. — 2421 p.
- SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.). — Facteurs écologiques et production du Hêtre en France. — *Forêt Entreprise*, 167, 2006, pp. 41-45.

- SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.), DRAPIER (J.), BRUNO (E.), DUMÉ (G.). — 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, pp. 537-550.
- SOUCHIER (B.). — Évolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). — Mémoire du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, 33, 1971, 134 p.
- STUSSI (J.-M.). — Projet charges critiques, écosystèmes forestiers des Vosges. Cartographie de sensibilité à l'acidification des roches-mères plutoniques des écosystèmes forestiers des Vosges. — Nancy : INRA, CNRS, 1995. — 33 p.

LA CARTOGRAPHIE PRÉDICTIVE DES STATIONS FORESTIÈRES : UN NOUVEL OUTIL AU SERVICE DU GESTIONNAIRE (Résumé)

Des données numériques spatialisées et une base de relevés phytoécologiques sont utilisées pour réaliser une cartographie homogène des stations forestières du massif vosgien. Trois principaux facteurs écologiques définissant les stations forestières sont d'abord identifiés à partir des catalogues des stations forestières de la région : le niveau trophique et l'eau du sol ainsi que le bioclimat. Des variables synthétiques de ces facteurs sont obtenues par l'analyse des relevés floristiques et écologiques disponibles dans le massif. Ces variables synthétiques sont modélisées à l'aide de variables écologiques spatialisées disponibles sous système d'informations géographiques pour élaborer trois couches numériques élémentaires du niveau trophique des sols, de leur réserve en eau et du bioclimat. Ces trois couches sont combinées pour produire la carte numérique des unités stationnelles homogène écologiquement à l'échelle du massif vosgien. L'intégration explicite de la température et du bilan hydrique des stations dans le modèle bioclimatique facilitera la prise en compte des changements climatiques pour actualiser les cartes stationnelles futures. La validité de la carte prédictive des stations a été vérifiée et elle a été comparée à des cartographies de stations réalisées sur le terrain. La distribution dans les types de stations du Sapin et de l'Érable sycomore a été analysée afin de vérifier le lien entre les types de stations prédits par cette nouvelle méthode et les potentialités forestières.

PREDICTIVE MAPPING FOR FOREST SITES – A NEW TOOL FOR FOREST MANAGERS (Abstract)

Spatial data layers and a phytoecological database were used to achieve a homogeneous mapping of the forest site types over a broad area (Vosges Mountains, Northeast France). Three main ecological factors defining forest types were firstly identified through the study of forest site classifications: soil nutrient content, soil moisture and bioclimate. Synthetic variables with these three factors were computed through the analysis of floristic and ecological data available in the area investigated. These three synthetic variables were then modelled with ecological layers using a Geographic Information System to obtain three elementary maps of soil nutrient content, soil moisture and bioclimate. A GIS combination of these maps provided the numerical map of ecological units homogeneous on the scale of the Vosges Mountains. The integration of temperature and water balance in the bioclimatic model will enable climate changes to be taken into account and so update future maps of ecological units. The validity of the predictive map of forest sites was checked and it was compared to mapping carried out in the field. The distribution of fir and sycamore in the site types was assessed in order to verify the link between the forest site types predicted by this new site classification method and the forest site potential.
