



Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien -Elaboration, validation et applications-

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

► To cite this version:

Christian Piedallu, Jean-Claude Gégout, François Cornu Jean, Catherine Cluzeau. Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien -Elaboration, validation et applications-. 2006. hal-00835906

HAL Id: hal-00835906

<https://hal.science/hal-00835906>

Submitted on 20 Jun 2013

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.



*L*aboratoire d'*E*tude des *R*essources *FO*rêt-*B*ois
Unité Mixte de Recherches INRA-ENGREF 1092



UMR INRA – ENGREF 1092
Laboratoire d'Étude de la Ressource
FORêt Bois (LERFOB)
Équipe Écologie Forestière
14 rue Girardet, CS 14216,
540432 Nancy Cedex



INVENTAIRE FORESTIER
NATIONAL

Inventaire Forestier
National (IFN)
Échelon de Nancy
14 rue Girardet, CS 4216,
54042 Nancy Cedex



Convention de recherche ECOFOR/ENGREF n°2000.43
Convention de recherche SERFOB Lorraine (DRAF)/ENGREF-IFN

Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien

-Elaboration, validation et applications-

juillet 2006

**Christian PIEDALLU*, Jean-Claude GEGOUT*,
Jean-François CORNU* et Catherine CLUZEAU****
(*ENGREF, **IFN)

Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce aux financements du GIP ECOFOR, puis du SERFOB de la DRAF Lorraine.

Nous tenons en outre à remercier tout particulièrement l'Office National des Forêts pour sa collaboration à cette étude, notamment Richard Bœuf, Johann Beauvery et Olivier Sévéléder (pour l'Alsace et la Lorraine), pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette étude, ainsi que Sylviane Labbé de l'agence d'Epinal qui a fourni les codages de stations forestières relevés sur le terrain. Merci également à Bertrand Martinez, de l'Engref, pour l'aide apportée à la réalisation des cartes de ce rapport.

SOMMAIRE

Introduction	9
1 Région d'étude	10
2 Méthode et Outils	12
2.1 Méthodologie générale	12
2.2 Inventaire et organisation écologique des types de stations forestières du massif vosgien	15
2.2.1 Typologies de stations réalisées sur le massif	15
2.2.2 Inventaire et analyse des types de stations définis dans les catalogues	16
2.3 Utilisation des bases de données écologiques ou phytoécologiques	19
2.3.1 EcoPlant	19
2.3.2 La base de l'IFN	20
2.3.3 Les relevés de stations forestières réalisés par l'ONF	20
2.4 Calcul de la richesse chimique des substrats	20
2.5 Calcul de variables SIG pour la définition des unités stationnelles	22
2.5.1 Indices climatiques	22
2.5.2 Indices topographiques	24
2.5.3 Indices hydrologiques	26
2.5.4 Indices géologiques	26
3 Résultats	31
3.1 Caractérisation des trois facteurs écologiques structurant la flore forestière vosgienne	31
3.1.1 L'axe 1 de l'AFC : le niveau trophique	31
3.1.2 L'axe 2 de l'AFC : l'étage bioclimatique	32
3.1.3 Conclusions sur l'AFC et caractérisation de la réserve en eau des sols.	33
3.1.4 Essai de mise en relation de la topographie et des apports latéraux en eau	33
3.2 Modélisation des facteurs écologiques par les variables numériques spatialisées	34
3.2.1 Modélisation du niveau trophique	35
3.2.2 Modélisation du facteur bioclimatique	43
3.2.3 Modélisation des réserves en eau du sol	50
4 Cartographie prédictive des stations	59
5 Comparaison des stations issues du modèle et relevées sur le terrain	65
5.1 Essai de correspondance entre les différentes typologies de stations	65
5.2 Comparaison entre les types de stations des catalogues et de la carte prédictive.	66
5.2.1 Stations des Vosges gréseuses Lorraines	66
5.2.2 Stations des Vosges cristallines Lorraines	69
5.2.3 Conclusion sur la correspondance entre stations relevées sur le terrain et stations modélisées.	72
6 Application à la prediction de l'aire de distribution de deux essences	73
6.1 Potentialité de présence d'Abies alba	73
6.2 Potentialité de présence d'Acer pseudoplatanus	74
6.3 Conclusion quant à l'utilisation de la carte des stations pour prédire l'aire de distribution des espèces. Exemple avec Abies alba.	76
7 Conclusion	80

Liste des figures

Figure 1 : méthodologie générale.....	14
Figure 2 : représentation des relevés et de leur valeur de pH eau pour l'horizon A dans le plan 1-2 de l'AFC..31	
Figure 3 : représentation des altitudes sur le plan 1-2 de l'AFC.....	32
Figure 4 : coordonnées réelles de l'axe 1 de l'AFC en fonction des valeurs prédites à l'aide des variables SIG uniquement.....	37
Figure 5 : relation entre les coordonnées factorielles réelles des relevés sur l'axe 1 (trophique) de l'AFC et les coordonnées prédites par les variables SIG. Les limites des classes de niveau trophique sont représentées par des droites verticales.	37
Figure 6 : Niveau trophique issu de l'axe 1 de l'AFC en fonction des valeurs prédites sur les jeux de calibration et de validation.	42
Figure 7: relation entre les coordonnées factorielles réelles des relevés sur l'axe 2 (climatique) de l'AFC et les coordonnées prédites par les variables spatialisées. Les limites des classes de bioclimat sont représentées par des droites verticales.	44
Figure 8 : relation entre l'altitude et l'indice bioclimatique modélisé par les variables spatialisées. Les limites des classes sont figurées par des droites verticales.	45
Figure 9 : Bioclimat issu de l'axe 2 de l'AFC en fonction des valeurs prédites sur les jeux de calibration et de validation.	49
Figure 10 : réserves utiles modélisées en fonction des valeurs mesurées.....	52
Figure 11 : découpage des classes de réserve en eau	58
Figure 12 : répartition des 970 relevés réalisés en forêt par type de station prédite et surface de ces stations sur la zone d'étude (en km ²).	59
Figure 13 : regroupement et numérotation des codes de stations (59 classes) et présentation des effectifs sur la base EcoPlant (n=970).	61
Figure 14 : simplification des types de stations en 12 classes.	64
Figure 15 : définition des stations de la carte prédictive équivalentes à celles du catalogue Vosges gréseuses Lorraines.	67
Figure 16 : finition des stations de la carte prédictive équivalentes à celles du catalogue Vosges cristallines Lorraines.	71
Figure 17 : répartition des placettes de la base EcoPlant (n = 1198) au sein des station prédites et taux de présence d' <i>Abies alba</i> par type de station (657 présences). La couleur rouge indique un taux de présence supérieur à 80%, orange entre 60 et 80%, et jaune entre 40 et 60%. Les valeurs sont en italique lorsque les effectifs sont inférieurs à 15 par type de station.	73
Figure 18 : répartition des placettes de la base EcoPlant (n = 1198) au sein des station prédites et taux de présence d' <i>Acer pseudoplatanus</i> par type de station (265 présences). La couleur rouge indique un taux de présence supérieur à 70%, orange entre 50 et 70%, et jaune entre 30 et 50%. Les valeurs sont en italique lorsque les effectifs sont inférieurs à 15 par type de station.....	74

Liste des tableaux

Tableau 1 : inventaire des types de stations du massif vosgien selon les régions des études de référence et les principaux facteurs écologiques (voir la liste des abréviations dans le texte)	17
Tableau 2 : Abréviations du Tableau 1. Ces abréviations concernent la nomenclature des stations utilisée dans les travaux de Drapier (1988) et Piquet (1987).....	18
Tableau 3 : nombre de placettes avec un relevé floristique, des sols ayant fait l'objet d'analyses en laboratoire et une localisation précise (≤ 50 m) dans la base de données phytoécologique réunie pour le massif vosgien.	19
Tableau 4 : coefficients et seuils de signification des variables écologiques de la régression multiple permettant d'expliquer les coordonnées factorielles des relevés sur l'axe 1 de l'AFC ($R^2=0,80$)	32
Tableau 5 : modélisation du niveau trophique des stations exprimé par l'axe 1 de l'AFC avec les variables écologiques de terrain ($n = 972$, $R^2 = 0.433$)	35
Tableau 6 : coefficients et seuils de signification (p) des paramètres du modèle permettant de prédire le niveau trophique des stations à partir des variables SIG (l'appartenance de chaque substrat géologique aux classes de roches du modèle et indiquée en annexe). R^2 du modèle : 0,362, $n = 955$	36
Tableau 7 : présentation des espèces forestières indicatrices des classes de niveau trophique.....	38
Tableau 8 : classes créées à partir de l'estimation du niveau trophique par les variables spatialisées et principales caractéristiques floristiques et édaphiques.....	39
Tableau 9 : Matrice de reclassement des modalités de niveau trophique selon selon le modèle comprenant des données de terrain (en bleu) et le modèle constitué uniquement de données SIG (en noir).....	41
Tableau 10 : Matrice de reclassement des modalités de niveau trophique selon selon le jeu de calibration (EcoPlant, en bleu) et le jeu de validation (Base IFN, en noir).....	42
Tableau 11 : modélisation du niveau trophique sur le jeu de validation de l'IFN.....	43
Tableau 12 : coefficients et seuils de signification des variables écologiques de la régression multiple permettant d'expliquer les coordonnées factorielles des relevés sur l'axe 2 de l'AFC $N = 951$ relevés, $R^2 = 0,721$	43
Tableau 13 : étages bioclimatiques créées à partir de l'estimation du facteur bioclimatique par les variables spatialisées.	45
Tableau 14 : présentation des espèces forestières indicatrices des conditions bioclimatiques.....	46
Tableau 15 : Matrice de reclassement des modalités de bioclimat selon selon le jeu de données d'EcoPlant.....	48
Tableau 16 : Matrice de reclassement des modalités de bioclimat selon selon le jeu de calibration (EcoPlant, en noir) et le jeu de validation (Base IFN, en bleu).	49
Tableau 17 : modélisation du bioclimat avec le jeu de données de l'IFN.....	50
Tableau 18 : Modélisation de la réserve utile ($R^2 0.433$).....	50
Tableau 19 : correspondance entre les modalités topographiques codées sur le terrain dans la base EcoPlant et le bilan en eau.	53
Tableau 20 : modèle de l'indice de drainage latéral en eau du à la topographie par les variables spatialisées. $N=1200$	53
Tableau 21 : matrice de reclassement entre les apports en eau codés sur le terrain et ceux prédits par le modèle.	55
Tableau 22 : correspondance entre les classes de bilan latéral en eau, et les modalités topographiques d'EcoPlant et de la base IFN.....	55
Tableau 23 : Matrice de reclassement des modalités du bilan latéral en eau en fonction du jeu de calibration EcoPlant (en bleu) et du jeu de validation de l'IFN (en noir).	56
Tableau 24 : nomenclature des classes créées pour découper les 3 facteurs écologiques utilisés pour réaliser la typologie automatique des stations.	59

<i>Tableau 25 : tentative de mise en correspondance entre les stations des catalogues Vosges gréseuses Lorraines, Vosges cristallines Lorraines, et la carte prédictive des stations.....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 26 : concordance entre chaque station du catalogue Vosges gréseuses Lorraines et la station optimale SIG, les stations équivalentes SIG, et taux de prédictions selon les gradients trophiques, bioclimatiques, et hydriques.</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 27 : concordance entre chaque station du catalogue Vosges cristallines Lorraines et la station optimale SIG, les stations équivalentes SIG, et taux de prédictions selon les gradients trophiques, bioclimatiques, et hydriques.</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 28 : matrice de confusion entre les valeurs prédites et les valeur observées pour la présence d'Abies alba, avec le jeu de données de l'IFN (n = 6228).</i>	<i>76</i>

Liste des cartes

Carte 1 : présentation de la région d'étude

Carte 2 : Localisation des relevés de la base EcoPlant

Carte 3: Localisation des relevés de la base IFN

Carte 4 : Localisation des stations forestières relevées par l'ONF

Carte 5 : Présentation des variables climatologiques

Carte 6 : présentation des variables topographiques

Carte 7 : présentation des variables hydrologiques

Carte 8 : substrats géologiques du massif Vosgien

Carte 9 : Richesse chimique des substrats géologiques du massif Vosgien

Carte 10 : Modèle de niveau trophique des stations du massif Vosgien

Carte 11 : Modèle de bioclimat du massif Vosgien

Carte 12 : Modèle de réserve utile des substrats géologiques du massif Vosgien

Carte 13 : Modèle de bilan latéral en eau

Carte 14 : Modèle de distribution spatiale de la réserve en eau disponible pour les plantes sur le massif Vosgien

Carte 15 : Cartographie prédictive des stations forestières du massif Vosgien (extrait au 1/50000 ème de la région Donon-Col de Saales).

Carte 16 : Carte simplifiée des stations forestière du massif Vosgien

Carte 17 : Probabilité de présence du sapin pectiné

Carte 18 : Probabilité de présence de l'érable sycomore

Carte 19 : Probabilité de présence du sapin pectiné, validation de la carte avec les données de l'IFN.

Avant propos

Nous avons mené entre 2000 et 2002 un travail de cartographie automatisée des types de stations sur l'ensemble du massif Vosgien à partir d'informations écologiques numériques et spatialisées (Gégout et Piedallu, 2002). La carte des stations obtenue fournit une information homogène pour tout le massif Vosgien et permet une analyse globale, tout en conservant une résolution suffisamment fine pour pouvoir travailler à l'échelle de la forêt (l'information étant codée au quart d'hectare).

Ce travail, financé par le GIP ECOFOR et la région Lorraine, a fait l'objet d'une restitution fin 2002 sous forme d'un rapport et de communications au séminaire FORBOIS du 13 décembre 2001 et au séminaire Forêt, vent et risques du 5-6 décembre 2002.

Cependant, la carte des stations réalisée a permis de déceler un certain nombre d'erreurs, provenant par exemple du codage de la carte numérique géologique. De plus, les données disponibles et les moyens de calcul ayant évolués, il était possible d'améliorer les équations initialement présentées. Aussi, nous avons repris le travail déjà réalisé, qui a été corrigé et amélioré de façon relativement conséquente.

Ainsi, pour des raisons de cohérence et de compréhension du document, nous avons choisi de reprendre complètement dans ce rapport la méthode et la réalisation de la carte des stations, prenant ainsi en compte toutes les modifications qui y ont été apportées. Ensuite est présenté le travail financé par la convention établie avec le SERFOB, c'est à dire la validation du modèle et la présentation d'une application en terme de potentialité de présence d'essences.

INTRODUCTION

Le choix d'essences adaptées aux conditions de milieu est fondamental, particulièrement au lendemain de la tempête de 1999 qui a eu pour effet la mise en place d'importantes zones à reboiser. Pour cela, le forestier dispose de catalogues de stations forestières, qui déterminent chacun des types de stations dont les conditions écologiques sont homogènes et permettent le choix des essences à favoriser.

Cependant, ces catalogues sont élaborés à l'échelle de petites régions naturelles, et ne couvrent pas la totalité du territoire. D'autre part, des types de stations sont définis dans chacun des catalogues sans l'établissement de correspondances avec les catalogues voisins. Enfin, la cartographie des stations, longue à mettre en œuvre, n'a été effectuée que sur une fraction limitée du territoire. Il est donc difficile -voire impossible- d'avoir une vision globale de la nature et de la répartition des types de stations à une vaste échelle. Dans ce contexte, l'objectif de ce projet est de proposer une méthode de cartographie rapide des stations forestières sur une vaste emprise géographique, le massif Vosgien, par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique et de données écologiques numériques spatialisées.

Un inventaire des types de stations définis dans les Vosges et des facteurs qui permettaient de les discriminer a d'abord été réalisé, mettant en évidence le rôle prépondérant du niveau trophique, du bioclimat, et de réserve en eau des sols. Un indicateur le plus souvent floristique a été défini pour caractériser ces trois facteurs, à l'aide d'une base de données de 2650 relevés phytoécologiques constituée au centre Nancéen de l'ENGREF. Des modèles ont ensuite été établis entre les valeurs des facteurs écologiques ainsi définis et les variables spatialisées. La modélisation de ces facteurs a nécessité le calcul et parfois la numérisation des données spatialisées édaphiques, topographiques, et climatiques sur le massif Vosgien. Grâce à l'utilisation exclusive de variables obtenues sous systèmes d'informations géographiques, une cartographie des principaux gradients responsables de la diversité des stations dans les Vosges a pu être réalisée. La combinaison sous système d'information géographique des couches issues de la modélisation des trois facteurs, trophiques, bioclimatiques, et hydriques, a permis d'obtenir une nouvelle donnée constituée d'unités homogènes selon les principales variables écologiques discriminant les stations forestières des Vosges. On peut donc considérer que cette donnée est représentative des « stations forestières », dont elle permet la cartographie. Ensuite, les types de stations déterminés à l'aide des variables spatialisées ont été rattachés à ceux des catalogues afin de faciliter la correspondance entre les deux systèmes.

Les données ont été validées de deux manières complémentaires :

- à l'aide des données phytoécologiques relevées par l'IFN. Cette approche a pour but de comparer, à partir des 6175 placettes de l'IFN réalisées sur le massif vosgien, la valeur réelle et la valeur prédite des indices trophiques, hydriques et de bioclimat tels que nous les avons estimés.
- à l'aide des codages stationnels réalisés par l'ONF. Il existe un certain nombre de forêts dont les stations, cartographiées sur le terrain, ont été numérisées sous SIG et qui se trouvent sur les zones couvertes par le modèle réalisé par l'Engref. Ces codages vont nous permettre de mettre en correspondance les « types de stations » issues des cartographies réalisées sur le terrain par les forestiers et les stations prédites par notre modèle, dans le but d'estimer la qualité de prédiction du modèle.

Dans un troisième temps, nous allons étudier l'application de cette carte prédictive des stations pour étudier les potentialités de présence de deux espèces, l'une très communément répandue dans les Vosges, le sapin (*Abies alba*), l'autre caractéristique d'un type de milieu spécifique, comme l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), qui nécessite pour se développer des milieux chimiquement riches relativement rares dans les Vosges.

1 REGION D'ETUDE

La région concernée par cette étude est le massif Vosgien, surface couvrant 8800 km² située dans le nord-est de la France. Elle s'étend du nord au sud de Saverne à Belfort et d'ouest en est de Epinal à Colmar (Carte 1). D'un point de vue administratif, elle couvre une partie des régions Lorraine, Alsace et Franche-Comté. Les limites précises ont été définies de façon à respecter une certaine homogénéité géologique, géomorphologique et géographique. La limite géologique des grès coquilliers du Muschelkalk inférieur a été fixée. Toutes les zones situées sur des substrats plus récents, donc marneux ou calcaires, sont exclues de l'étude. Il en résulte que seules les surfaces à substrat magmatique ou gréseux offrant un relief marqué sont étudiées. Spatialement, cette zone d'étude est continue.

Les précipitations annuelles moyennes varient de 1000 mm environ au pied du versant lorrain pour atteindre 2000 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 9° C à 350 m à 4° C sur les sommets les plus élevés du massif. L'isotherme 7° C est situé à 700 m en moyenne sur les ubacs et au fond des vallées. Il passe à 850 m en moyenne sur les adrets (Cartes climatiques détaillées de Strasbourg 1983 et de Mulhouse 1988). Le nombre de mois "froids" (T<7°C) varie de 4 à 8 dans la région (les mois de novembre à février sont systématiquement concernés).

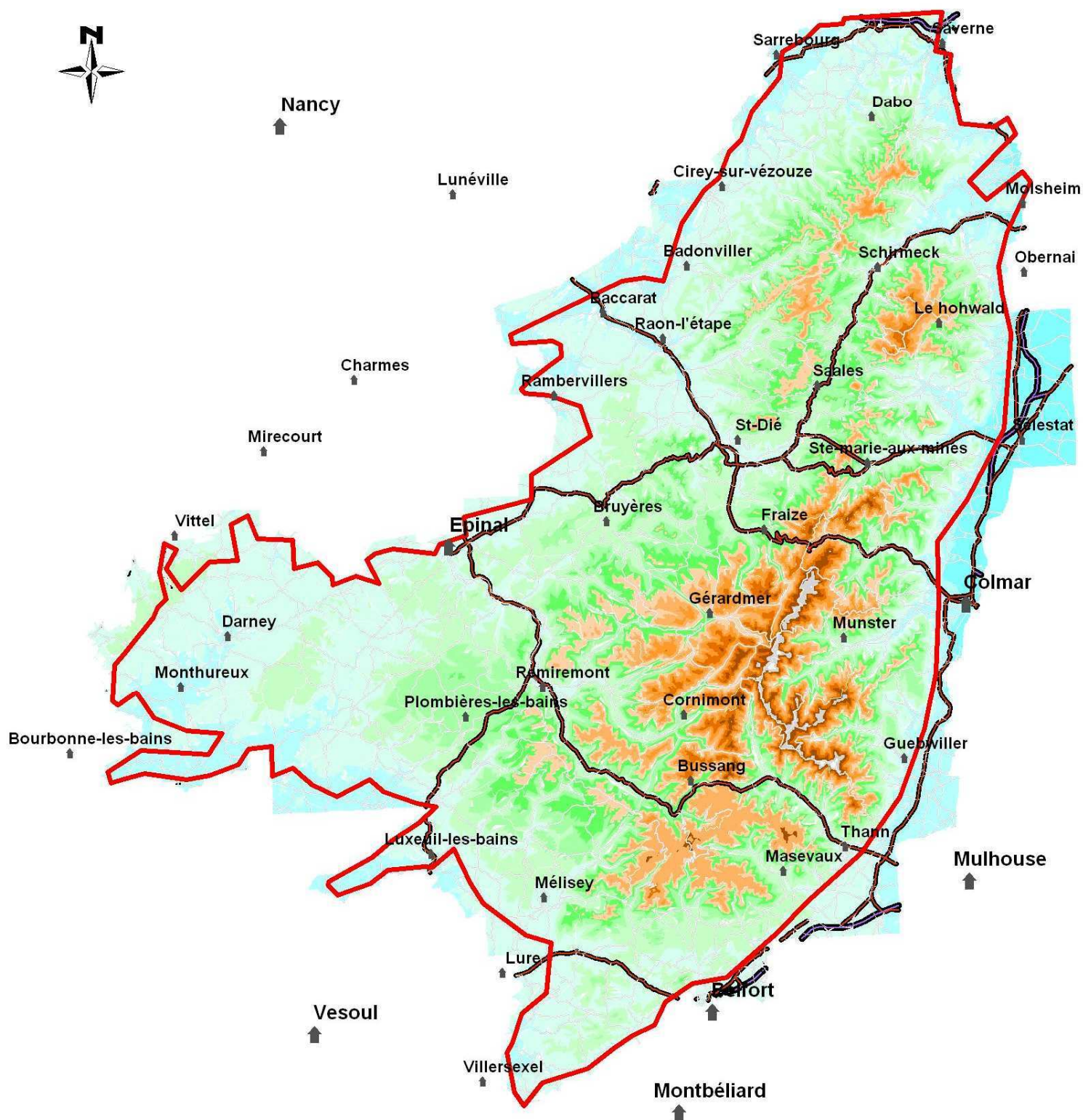
Sur le plan géologique, le massif Vosgien peut être subdivisé en deux grands ensembles : les Vosges gréseuses et les Vosges hercyniennes cristallines. Les Vosges gréseuses correspondent à des couvertures sédimentaires déposées au permien et au trias inférieur. Elles occupent de vastes surfaces à l'ouest et au nord du massif. Les substrats de cette région sont constitués de grès souvent de couleur rose et de granulométrie variable (Perriaux 1961) : les grès permien les plus anciens ; le grès Vosgien très épais ; le conglomérat principal très résistant à l'érosion et qui occupe la partie supérieure de nombreux sommets et enfin les grès du Buntsandstein supérieur (grès intermédiaires et grès à Voltzia) qui sont développés au sud-ouest et à l'ouest du massif. Le grès à Voltzia est parfois recouvert de grès coquilliers déposés au Muschelkalk inférieur.

Trois grandes régions sont individualisées dans les Vosges hercyniennes (Von Eller 1984). Les Vosges cristallines du nord s'étendent à proximité de la ville de Schirmeck. Les substrats sont composés de granites, de diorites et de formations volcaniques d'âge silurien ou carbonifère. Les Vosges moyennes sont situées entre les latitudes de Saint-Dié et de Gérardmer. Les substrats géologiques sont formés de roches métamorphiques (gneiss, migmatites) qui alternent avec des granites et des syénites. Les Vosges méridionales sont occupées par des terrains carbonifères et granitiques.

Les sols les plus développés dans le massif appartiennent aux classes des sols brunifiés et des sols podzolisés (Souchier 1971; Bonneau, Faivre et al. 1978). 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 (Issler 1937; Timbal 1979; Dion 1985; Rameau, Mansion et al. 1989; Rameau, Mansion 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 1100 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.

Carte 1 : présentation de la région d'étude



0 10 20 30 40 km

2 METHODE ET OUTILS

2.1 Méthodologie générale

L'objectif de ce travail est de modéliser et de cartographier les principaux facteurs écologiques identifiés par les catalogues de station existant à l'échelle du massif Vosgien, qui sont le niveau trophique, l'étage bioclimatique, et la réserve en eau des sols.

Pour cela, une base de données phytoécologiques est utilisée, EcoPlant, contenant 2650 relevés dont plus de 550 contiennent une analyse de sol et 1200 sont finement localisés (*Figure 1*). Une analyse factorielle des correspondances a été réalisée sur le tableau floristique en présence absence des 395 espèces présentes dans plus de 2 relevés extrait d'un jeu de 2404 relevés réalisés hors milieu calcaire par des phytoécologues. La signification des axes factoriels est étudiée par des régressions multiples entre les coordonnées factorielles des relevés et les valeurs des variables écologiques relevées sur les placettes ou issues du SIG. Les modèles obtenus permettent d'exprimer les gradients issus de l'AFC comme des fonctions des variables écologiques. Le R^2 associé au modèle fournit un indice du caractère explicatif du modèle.

L'intérêt de cette approche méthodologique est multiple :

- L'AFC permet de connaître les grands facteurs écologiques responsables de la distribution de la végétation à l'échelle du massif ;
- Ces facteurs ont une signification écologique claire ;
- Les coordonnées factorielles des relevés représentent des indices biologiques synthétiques de la valeur de ces facteurs ;

Enfin, ces indices reposent sur le même critère –la flore– que ceux utilisés dans les catalogues réalisés dans le massif vosgien.

Les deux premiers axes de cette AFC représentent les gradients trophiques et bioclimatiques, en concordance avec les deux premiers facteurs écologiques identifiés par les catalogues de stations forestières. Cependant, aucun indicateur ne synthétise la réserve en eau des sols, pourtant identifiée comme un facteur explicatif majeur par les catalogues. Par conséquent, nous allons la caractériser à travers deux de ses composantes, la réserve utile, qui peut être calculée à partir des relevés de terrain de l'IFN, et les apports latéraux qui sont dépendants de la topographie qui est également codée sur le terrain. Leur addition permettra une approximation de la réserve en eau des sols.

Chacun de ces trois grands gradients est modélisé à l'aide de variables SIG et relevées sur le terrain, dans un premier temps, afin d'obtenir les résultats les plus fiables possibles, puis uniquement à partir de variables SIG dans un deuxième temps, permettant ainsi une cartographie. Pour cela, 1200 relevés issus d'EcoPlant, correctement géoréférencés (précision inférieure à 100 mètres) ont été croisés avec plusieurs centaines de variables climatiques, édaphiques, hydrologiques, ou topographiques réalisées sous SIG, afin d'obtenir le tableau d'analyse (*Figure 1*). Ces données sont utilisées pour modéliser les axes 1 et 2 de l'AFC (facteurs trophiques et bioclimatiques), et les apports latéraux en eau, indexés sur la position topographique relevée sur le terrain et synthétisée en trois grandes classes (apports, départs en eau, zone d'équilibre). En ce qui concerne la réserve utile, une base de 6175 relevés de l'IFN sera utilisée pour la calibration et la validation du modèle.

Les techniques de régression linéaire multiple seront utilisées pour la quasi-totalité des modèles, sauf pour le modèle de bilan latéral en eau où la technique de régression logistique polynomiale (Proportional Odds Model) est plus adaptée. Les valeurs obtenues pour chacun des modèles sont

ensuite discrétisées en un nombre réduit de classes, déterminées de façon à être les plus cohérentes possibles avec les paramètres observés sur le terrain.

Un jeu complémentaire de relevés de terrain avec inventaire floristique, issu des données de l'IFN (6175 relevés totalement indépendants de la base EcoPlant) permet la validation de chaque facteur écologique. La position factorielle vis à vis des axes 1 et 2 de l'AFC a été recalculée pour chacun des relevés de l'IFN. Chaque espèce possédant une valeur indicatrice selon chacun de ces axes, le moyennage des valeurs indicatrices des espèces présentes dans un relevé permet de bio-indiquer la valeur de l'axe pour chacun des 6175 relevés de terrain. Le modèle initialement élaboré est ensuite appliqué sur ce jeu de validation, une valeur de r^2 permettant d'évaluer la qualité du modèle sur ce jeu de données n'ayant pas servi à la calibration du modèle. Cette méthode permet la validation des facteurs trophiques et bioclimatiques (Axes 1 et 2 de l'AFC). En ce qui concerne la réserve en eau, le modèle de réserve utile élaboré à partir des données de l'IFN a été calibré sur 60% des 6175 valeurs, les 40% restantes étant utilisés pour la validation. Les apports latéraux en eau, calibrés à l'aide de la position topographique relevée sur le terrain à partir de la base EcoPlant, sont validés à l'aide de la position topographique relevé sur le terrain à l'aide de la base de l'IFN. Ainsi, chacune des composantes du modèle de stations peut être validé à l'aide d'un jeu de données (*Figure 1*).

Une fois les composantes trophiques, bioclimatiques, et la réserve en eau des sols modélisées, discrétisées, et validées, ces trois composantes sont combinées afin d'obtenir une couche de données caractérisant les stations dont la résolution est de 50 mètres de coté, et dont chaque pixel est identifié selon chacun de ces trois grands gradients. Une comparaison de la carte prédictive des stations sera ensuite réalisée avec environ 13000 relevés de terrain issus de deux bases de données réalisées par l'ONF, concernant deux catalogues de stations différents, Vosges gréseuses Lorraines et Vosges cristallines Lorraines. Les codes des différentes stations relevées sur le terrain seront comparés au codes attribués par la carte prédictive obtenus par croisement sous SIG, afin d'en tirer des enseignements sur la qualité des prédictions et l'adéquation entre les deux nomenclatures utilisées.

Pour terminer, nous évoquerons les possibilités d'utilisation de la carte prédictive ainsi réalisée, à travers la cartographie des potentialités de présence du sapin pectiné et de l'érable sycomore. Ces deux essences, très différentes aussi bien en terme d'écologie que de distribution, verront leur probabilité de présence cartographiée par le biais de la carte des stations. Nous étudierons pour cela les taux de présence par type de station afin de déterminer si certaines stations sont plus favorables que d'autres à ces espèces. La présence potentielle de ces deux arbres sera ensuite confrontée à la distribution réelle donnée par les relevés de la base EcoPlant.

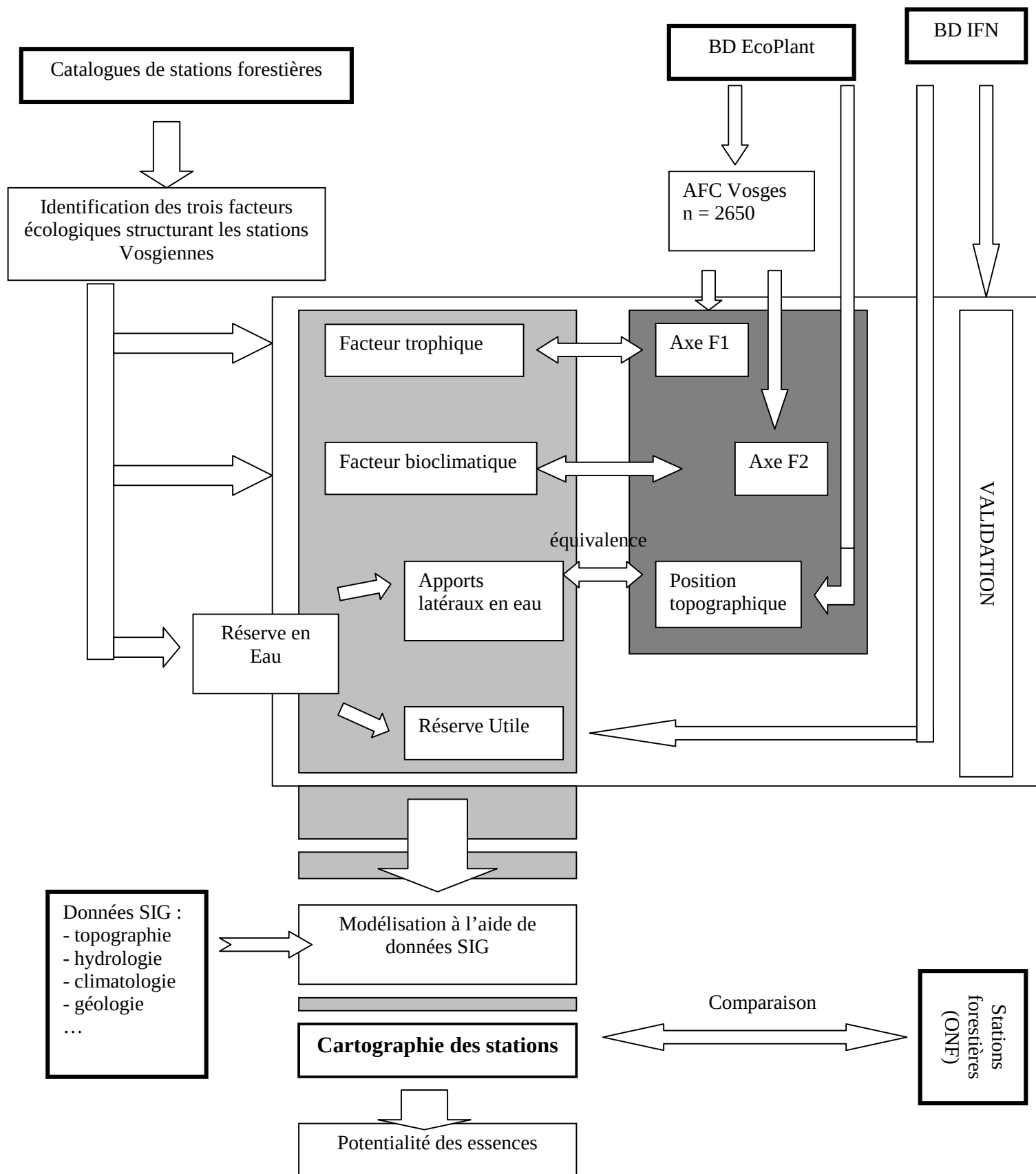


Figure 1 : méthodologie générale

2.2 Inventaire et organisation écologique des types de stations forestières du massif vosgien

2.2.1 Typologies de stations réalisées sur le massif

Les typologies de stations réalisées dans le massif vosgien peuvent être regroupées en trois catégories : les catalogues de stations, les catalogues simplifiés et les autres études typologiques. Plusieurs études concernent la même région (i.e. : les catalogues et certains catalogues simplifiés). Dans ce cas, seront retenus pour ce travail les documents les plus précis et si besoin les plus récents.

2.2.1.1 Catalogues des types de stations forestières réalisés sur le massif vosgien

Les catalogues des stations forestières concernant le massif vosgien sont les suivants :

- Gégout J.C., 1993.- Catalogue des types de stations forestières de la région des Mille-Etangs (Haute-Saône).- Ministère de l'agriculture - Région de Franche-Comté, 211 p.

Cette typologie concerne une partie seulement des Vosges franc-comtoises. Elle exclut notamment le massif forestier de Saint-Antoine et le horst de Luxeuil gréseux.

- Oberti D., 1990.- Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n°1 : Généralités, types stationnels des Vosges cristallines.- Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, 373 p.
- Oberti D., 1990.- Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n°2 : Types stationnels des Hautes Vosges gréseuses.- Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, 203 p.
- Oberti D., 1990.- Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n°3 : Types stationnels des collines sous-vosgiennes.- Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, 324 p.

Les trois fascicules du catalogue des Vosges alsaciennes couvrent toute la partie Est du massif, des crêtes sommitales à la plaine alsacienne.

- Timbal, 1985.- Types forestiers d'Alsace.- I.N.R.A. - Office National des Forêts, 443 p.

Ce document concerne les principaux types de stations forestières d'Alsace déterminées de façon empirique. Plus ancien que le catalogue de D. Oberti, il est moins précis et a été remplacé par ce dernier. Il ne sera pas utilisé dans ce travail.

2.2.1.2 Documents de vulgarisation

- Braud, J., E. Durand, et al. (1993). Le choix des essences forestières dans les Vosges alsaciennes, Document de vulgarisation, C.R.P.F. Lorraine-Alsace.
- Gégout, J. C., C. Allegrini, et al. (1993). Le choix des essences forestières dans la région des Mille-Etangs, Document simplifié des typologies des stations, maison de l'environnement des Vosges du sud.
- Madesclaire, A., E. Lacombe, et al. (1999). Les milieux forestiers dans les Vosges gréseuses lorraines, C.R.P.F. de Lorraine-Alsace.
- Madesclaire, A., J. C. Rameau, et al. (1995). Le choix des essences forestières dans les Vosges cristallines lorraines, Document de vulgarisation, C.R.P.F. de Lorraine Alsace.

Les documents de Braud et al. (Braud, Durand et al. 1993) et Gégout et al. (Gégout, Allegrini et al. 1993) sont les documents simplifiés des catalogues des stations forestières correspondants. Ils ne seront pas utilisés dans ce travail. Les travaux de Madesclaire, et al. (Madesclaire, Rameau et al. 1995; Madesclaire, Lacombe et al. 1999) concernent des régions non couvertes par des catalogues de stations.

2.2.1.3 Autres typologies des stations forestières

Ces typologies, qui sont toutes des mémoires de DEA, sont les suivantes :

- Drapier, N. (1988). Eléments pour une typologie forestière de la Vôge. Nancy, ENGREF-Université de Nancy, 83p.
- Gégout, J.C. (1989). Etude phyto-écologique de la région des Mille-Etangs en vue d'une typologie forestière. Nancy, ENGREF-Université de Nancy, 143p.
- Hubert, A. (1986). Typologie des stations forestières dans la vallée de Masevaux. Nancy, Université de Nancy I: 15.
- Morlot, D. (1986). Typologie des stations forestières dans les Vosges moyennes et méridionales (massifs forestiers entre vallée de la Moselle et vallée de la Moselotte). Nancy, Université de Nancy I-ENGREF, 147p.
- Oberti, D. (1987). Typologie des stations forestières du massif circonscrit entre Brushe et Giessen (Bas-Rhin). Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts- Université de Nancy, 133p.
- Piguet, A. (1987). Typologie des stations forestières dans les Vosges du sud. Nancy, Université de Franche-Comté - E.N.G.R.E.F., Nancy, 116p.

Les travaux de Gégout (Gégout 1989) , Hubert (Hubert 1986), Morlot (Morlot 1986) et Oberti (Oberti 1987) concernent des régions couvertes soit par des catalogues de stations forestières soit par des documents simplifiés. Ils ne seront donc pas utilisés dans cette étude. Par contre les travaux de Drapier (1989) et de Piguet (Piguet 1987) concernent des régions non couvertes par un catalogue ou un document simplifié. Ils seront donc étudiés dans ce travail.

2.2.1.4 Documents de base utilisés comme références pour élaborer la cartographie automatique des stations

Les documents choisis concernent des régions distinctes et sont sélectionnés en priorité parmi les catalogues de stations, puis dans les documents simplifiés et enfin dans les autres études typologiques. Les documents retenus sont donc les catalogues de Gégout (Gégout 1993) et d'Oberti (Oberti 1990; Oberti 1990), les documents de vulgarisation de Madesclaire et al. (1995 et 1999) et les DEA de Drapier (1988) et de Piguet (1987). La localisation des limites de ces travaux est indiquée dans la carte 2.

2.2.2 Inventaire et analyse des types de stations définis dans les catalogues

L'inventaire de l'ensemble des types de stations définis dans les six documents sélectionnés pour identifier les types de stations permet d'individualiser 193 types de stations dans le massif vosgien qui correspondent chacun à un type d'écosystème particulier (Tableau 1 et Tableau 2). La comparaison des types de stations entre documents différents conduit à regrouper les stations semblables d'une région à l'autre pour parvenir à 71 types de stations principaux. L'analyse de la structuration des

Variables stat. : engorgement/Eb	Etage bioclim./Altitude	Flore/niveau trophique	Economie de l'eau	Vège	Vosges lorraines gréseuses	Vosges lorraines cristallines	Vosges alsaciennes cristalline	Vosges alsaciennes gréseuses	Col. sous-Vosg. cristallines	Col. sous-Vosg. gréseuses	Col. sous-Vosg. calcaires et dolo	Col. sous-Vosg. limoneuses	Vosges du sud	Mille-Etangs zone gréseuse	Mille-Etangs zone éruptive
Bord de rivière		mésocacidiphile			E, 4			B11540							
		acidicline					A11740								
		mésoneutrophile			5	3	A16840 A11840	B15830 B11820				C571	AF	14 15	14 15
Suintements		mésoneutrophile		AF		9									
Milieux à eau stagnante proche de la surface		acidiphile		PB P ha	3	1	A11130	B17130 B11130						17 18	17
		acidicline		CpB		2	A17720	B16620							
		neutrophile		AF ac AF mn			A16820	B15820				C561 C581	A	16	16
Eboulis		Hyperacidiphile						B23140 B22140							
		acidiphile			2	4	A23240	B23240							7a
		mésocacidiphile					A23540						CE à Pa		
		acidicline											CE t		
		mésoneutrophile				5	A22840 A28840						E CE à Mp		7c 7b No
Autres milieu	>1150m	acidiphile					A25240								
		mésocacidiphile				6	A25440								
		acidicline					A25740								
	950-1150	acidiphile	superficiel				A24210								
			profond			8 (>950m)	A24240								
		mésocacidiphile					A24440						H ma		
		acidicline				7 (>950m)	A24640						H ac et na		
			humide												
		mésoneutrophile					A24740						H mn		
	<950 Vosges alsaciennes Vosges mérid.	Hyperacidiphile			6			B21140							
			chaud		7								HC ha et x		
		acidiphile strict	superficiel			15	A21210	B21210						1 Pl	
			profond			9	A21240	B21240					H ha		10
			profond, frais			8									
		acidiphile	superficiel				A21310	B21310						2 HdP	8a
			profond			1	A21340	B21340					H ap	3	
		acidiphile doux	superficiel				A21410								6
			profond			10	A21440	B21440					H ad		11
		mésocacidiphile				11	A21540	B21540					HS ma		12
		acidicline	superficiel				A21610								8b
			profond				A21640	B21640					HS ac	5	
		Neutroacidicline			12								HS na		
		mésoneutrophile				10	A21740	B21740					HS mn		
		neutrophile					A21840	B21840					HS n		13 9
	<500/700 m Vosges lor. gréseuses région de savenne Vosges als. grés.	acidiphile strict	superficiel						C112	C213			C ha sur SS		
			profond		Cs/SOP				C111	C211 C212			HC ha à Vm		
		acidiphile	superficiel			19		B24340	C114	C215			C ha et xp		
			superficiel, chaud		Cs/SBO	A									
			profond		CsM/SBO H t.xero.	B	18		C113	C214			CH ap		
		acidiphile doux	Toute profondeur		H à Df					C216			CH ad		
			superficiel						C116						
			profond						C115						
		mésocacidiphile	superficiel						C122						
			profond		H à Ll	C		B24540	C121	C221			HCCh ma	4	
			profond, No		HS										
			profond, hvdr.							C222					
		acidicline	superficiel						C124	C421					
			profond		H à Dc			B24640	C123	C223			HCCh ac	5	
			profond, No, BdP												
			profond, peu hvdr		Cp à Dc					C224					
			Profond, très hvdr		Cp					C225		C523			
	neutroacidicline mésoneutrophil neutrophile neutronitrophile calicicole				D										
		Bas de pente		H mn		16			C125			C531			
									C126	C226	C422		HS n		13
													HCCh à Pe, HCCh à Gr		
		superficiel, plateau									C351 C322				
		profond, plateau									C321				
		profond, pente									C323				
		profond, chaud									C341				

Tableau 1 : inventaire des types de stations du massif vosgien selon les régions des études de référence et les principaux facteurs écologiques (voir la liste des abréviations dans le texte).

Ordre alphabétique ap : acidiphile A : Aulnaie ac : acidicline ad : acidiphile doux C : Chênaie Ch : Charmaie Cp : Chênaie pédonculaie Cs : Chênaie sessiliflore Dc : Deschampsia cespitosa Df : Deschampsia flexuosa E : Erablière F : Frênaie Gr : Geranium robertianum H : Hêtraie ha : hyperacidiphile hc : hygrocline HdP : Haut de pente Hh : Hedera helix hp : hygrophile M : mélangée mn : mésoneutrophile Mp : Mercurialis perennis n : neutrophile No : Nord P : pessière Pl : Plateau Pr : Primula elatior Pt : Pteridium aquilinum S : Sapinière SBO : sol brun ocreux SOP : sol ocre podzolique t : typique xc : xérocline xp : xérophile Vm : vaccinium myrtillus	Ordre logique ha : hyperacidiphile ap : acidiphile ad : acidiphile doux ac : acidicline mn : mésoneutrophile n : neutrophile hc : hygrocline hp : hygrophile xc : xérocline xp : xérophile A : Aulnaie C : Chênaie Cp : Chênaie pédonculaie Cs : Chênaie sessiliflore Ch : Charmaie E : Erablière F : Frênaie H : Hêtraie P : pessière S : Sapinière Dc : Deschampsia cespitosa Df : Deschampsia flexuosa Gr : Geranium robertianum Hh : Hedera helix Mp : Mercurialis perennis Pr : Primula elatior Pt : Pteridium aquilinum Vm : vaccinium myrtillus SBO : sol brun ocreux SOP : sol ocre podzolique HdP : Haut de pente Pl : Plateau No : Nord T : typique M : mélangée
---	--

Tableau 2 : Abréviations du Tableau 1. Ces abréviations concernent la nomenclature des stations utilisée dans les travaux de Drapier (1988) et Piquet (1987).

catalogues met en évidence trois facteurs écologiques qui conditionnent la différenciation des stations dans le massif. Il s'agit de l'altitude, du niveau trophique du sol et du bilan hydrique de la station. La variable indicatrice du bilan hydrique est liée dans les catalogues à la profondeur du sol, à son hydromorphie temporaire, à l'exposition, et à la position topographique. En outre certaines stations sont liées à la présence de conditions très particulières présentes sur de très faibles surfaces (éboulis, tourbières, bords de rivières).

Dans chaque région ou sous-région géographique individualisée dans les catalogues, ces quatre grands types de facteurs permettent de discriminer la plupart des types de stations forestières. Dans les typologies, le niveau trophique est généralement indiqué par le caractère indicateur de la végétation forestière, l'étage bioclimatique est fourni par la végétation ou le plus souvent par des limites altitudinale et le bilan hydrique est diagnostiqué à partir de caractères édaphiques (épaisseur du sol, hydromorphie ...) ou topoclimatiques (exposition).

2.3 Utilisation des bases de données écologiques ou phytoécologiques

Pour la réalisation de ce travail, différentes bases de données sont nécessaires, soit pour leurs relevés floristiques (EcoPlant et IFN), soit pour les paramètres écologiques relevés sur le terrain, que ce soient la réserve utile ou la position topographique (EcoPlant et IFN), des analyses de sols (EcoPlant), ou le codage des stations forestières (ONF).

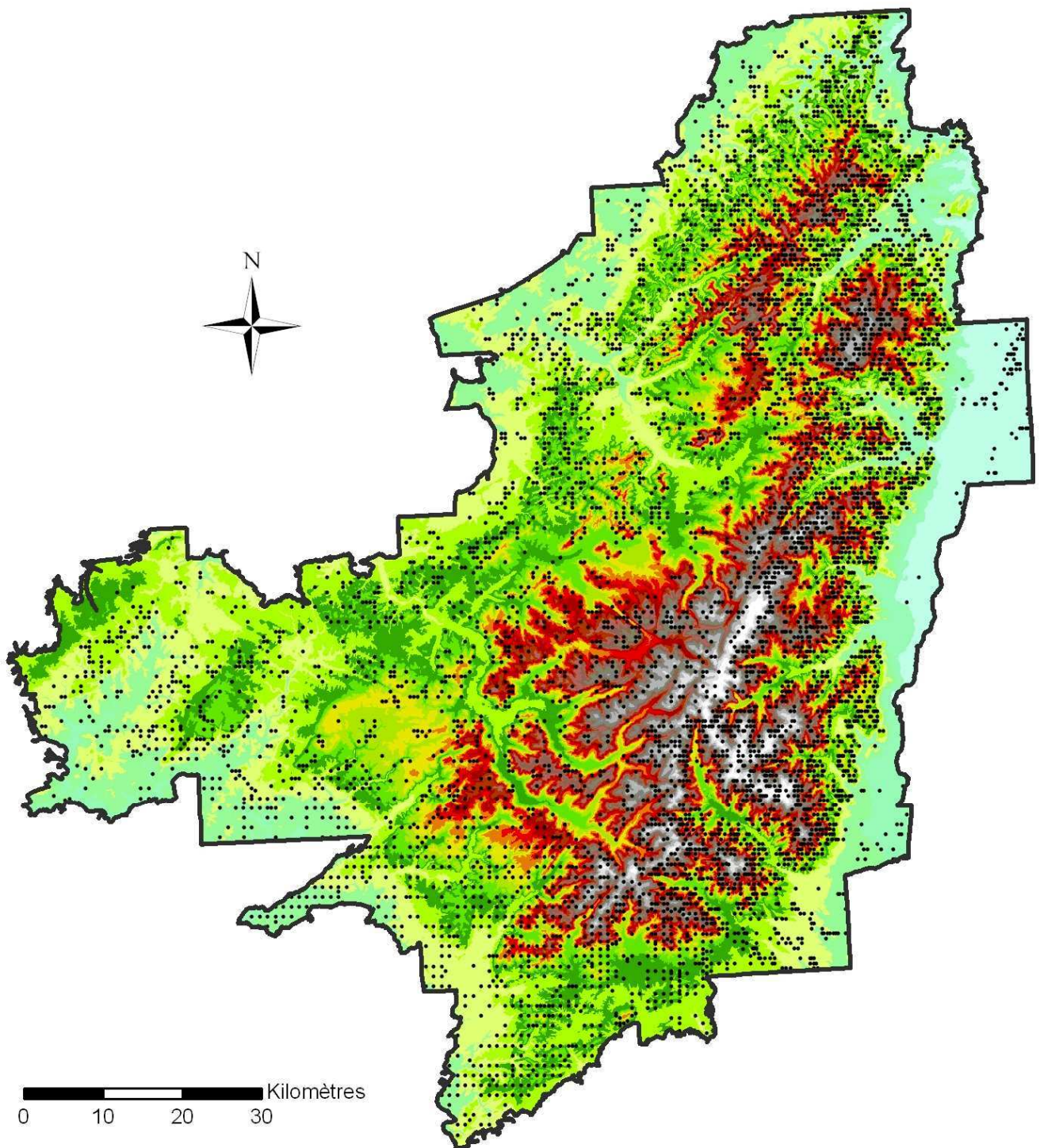
2.3.1 EcoPlant

EcoPlant, est une base de données réalisée par l'Engref de Nancy (Gégout, et al, 2005), contenant pour les Vosges 2650 relevés phytoécologiques, dont 553 contiennent des analyses de sol et 1206 sont localisés avec une précision inférieure ou égale à 50 m. (Carte 2). Les études intégrées, mentionnées dans la bibliographie, sont les suivantes (*Tableau 3*) :

Auteur	Année	Etude (titre abrégé)	Nb de relevés floristiques	Nb d'analyses de sol	Nb de localisations précises
Badeau V. et al.	1998	Réseau européen	19	19	19
Bonneau M. et G. Landmann	1988	Vosges sapin	15	15	0
Drapier J.	1983	Massif vosgien sapin	85	85	85
Drapier N.	1988	Voge	215	0	204
Gégout J. C.	1993	Mille-Etangs	26	22	26
Gégout J. C.	1993	Mille-Etangs relevés	287	0	287
Gégout J.C.	1995	Massif vosgien phytoécologie	152	152	152
Gégout J.C.	2001	Exercice phyto 2001	345	0	345
Girompaire L.	1986	Vosges dépérissement	68	68	68
Morlot D.	1994	Hospices Morlot	19	19	0
Oberti D.O	1990	Vosges alsaciennes	167	104	0
Oberti D.O	1990	Vosges alsaciennes relevés	791	0	0
Penel M.	1979	Massif vosgien humus	49	49	0
Piguet A.	1987	Vosges méridionales	392	0	0
Timbal J.	1985	Alsace	20	20	20
Total			2650	553	1206

Tableau 3 : nombre de placettes avec un relevé floristique, des sols ayant fait l'objet d'analyses en laboratoire et une localisation précise (≤ 50 m) dans la base de données phytoécologique réunie pour le massif vosgien.

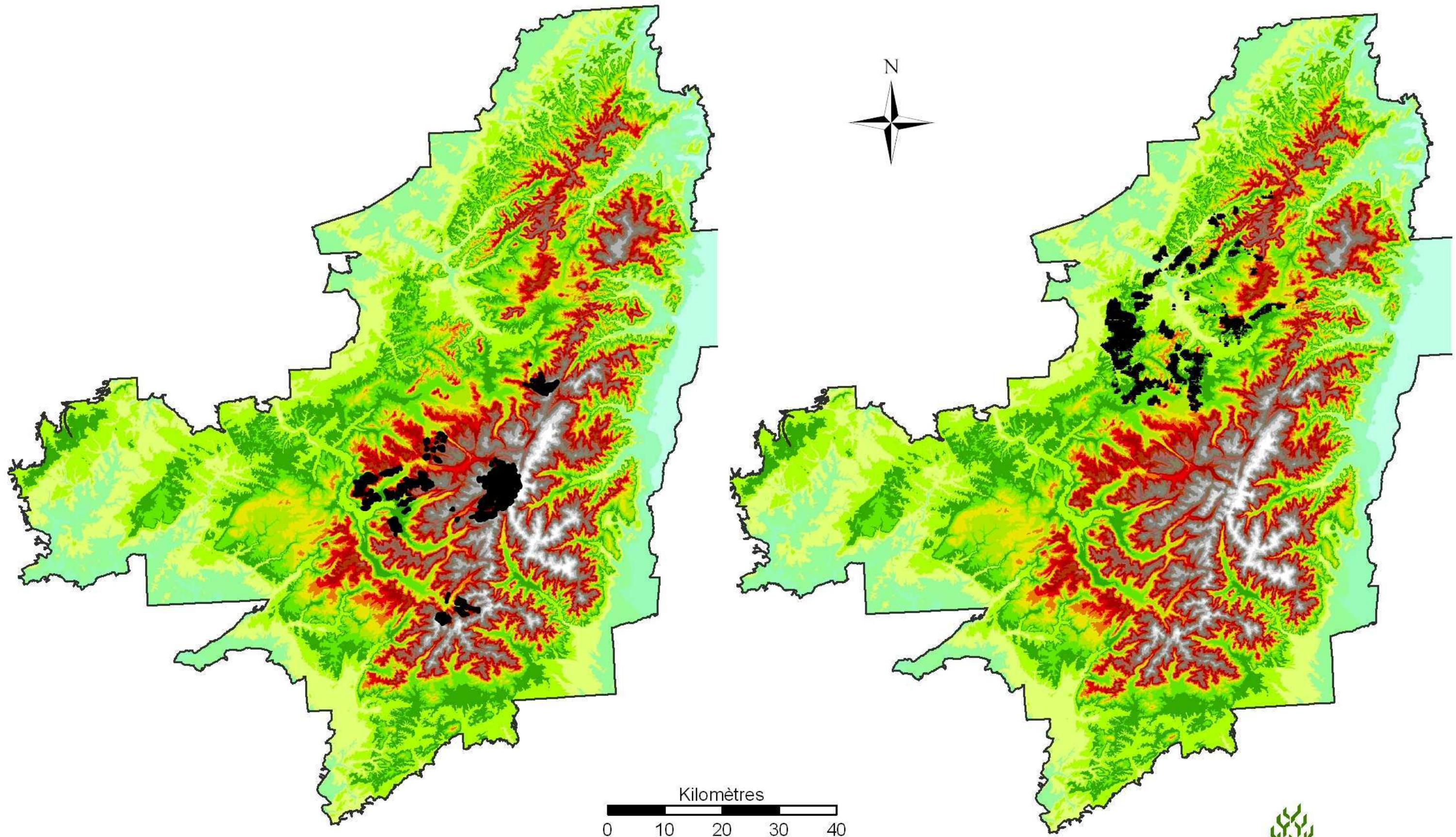
Carte 3 : Localisation des relevés de la base IFN



Carte 4 : Localisation des stations forestières relevées par l'ONF

Catalogue des vosges cristallines lorraines
(n=9971)

Catalogue des vosges gréseuses lorraines
(n=3601)



Kilomètres
0 10 20 30 40

L'inventaire des substrats géologiques tels qu'ils sont décrits dans les cartes géologiques au 1/50 000 du massif conduit à inventorier 486 types de substrats dont les noms sont harmonisés entre les différentes cartes géologiques. Une première simplification de la nomenclature conduit à retenir 104 types de substrats en regroupant les roches très proches l'une de l'autre d'un point de vue minéralogique.

Une deuxième simplification conduit à une nomenclature en 5 classes de richesse chimique. Les substrats qui contiennent au moins 4 analyses chimiques de roches issues de la base du CRPG sont regroupés en classes en fonction des valeurs du rapport $Si/(Ca+Mg+Fe)$ calculé à partir de l'analyse chimique de la roche. Certains substrats n'ont pu être classés selon cette approche du fait du faible nombre d'analyses de roches permettant de les caractériser. Dans ce cas, les relevés phytoécologiques de la base Ecoplant sont utilisés afin de bio-indiquer une valeur de niveau trophique. Les substrats marginaux ont été regroupés sous des appellations plus larges comme "Granite peu acide non différencié", "Granite assez acide non différencié", ou "Granite acide non différencié". Lorsque aucune information n'a pu être obtenue sur la richesse chimique du substrat un terme générique a été affecté, comme « granites indifférenciés ».

Les substrats ou groupes de substrats ainsi créés ont été regroupés en 5 classes de richesse chimique croissante (codées de a à e, du plus acide au plus riche), par regroupement de toutes les roches ayant des coefficients semblables. L'appartenance de chaque roche à l'une de ces classes est mentionnée en Annexe 1. Cette classification sera utilisée pour traduire en terme trophique à la fois les substrats relevés sur le terrain et les données géologiques numériques.

2.5 Calcul de variables SIG pour la définition des unités stationnelles

Les variables importantes pour la définition des types de stations concernent le climat et le sol des territoires forestier, et plus particulièrement les composantes hydriques et trophiques des sols. Nous allons donc élaborer un certain nombre d'indices permettant de caractériser ces facteurs. L'approche topographique permet également d'élaborer des indices synthétiques qui peuvent indirectement caractériser la richesse et l'humidité des sols, mais aussi le climat.

2.5.1 Indices climatiques

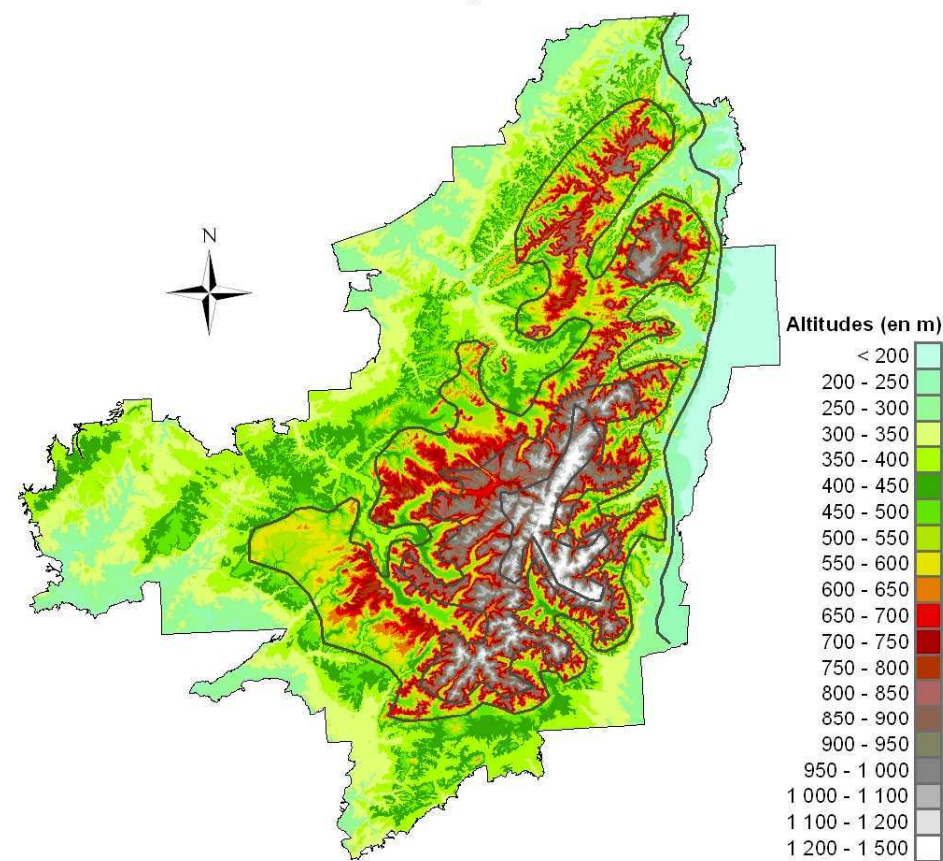
Un certain nombre d'indices climatiques sont calculés directement à partir du modèle Aurelhy de météo France (Benichou et Lebreton, 1987). Ces données sont fournies au pas kilométrique et ont été ré-interpolées au pas de 50 m. D'autres indices ont été calculés, à l'aide des données du modèle Aurelhy ou du Modèle Numérique de Terrain « Bdalti » au pas de 50 m de l'IGN (Carte 5A).

Il s'agit des variables suivantes :

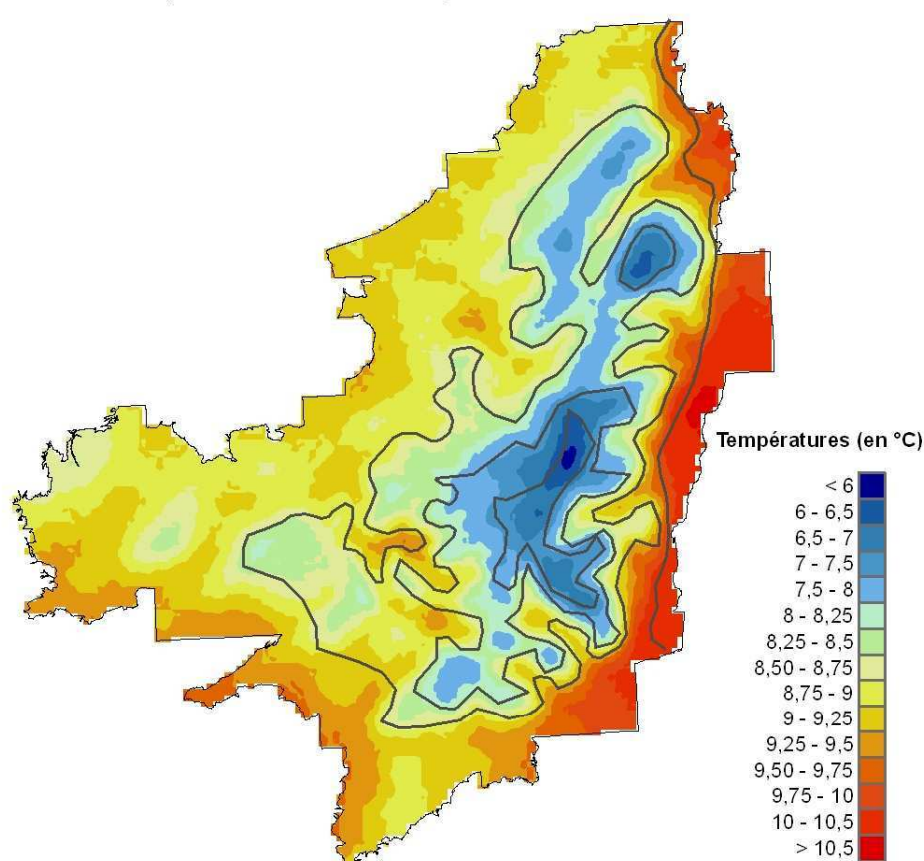
- Températures minimales (Tmin) et moyennes (Tmoy) et maximales mensuelles et annuelles (Carte 5B),

Carte 5 : Présentation des variables climatologiques

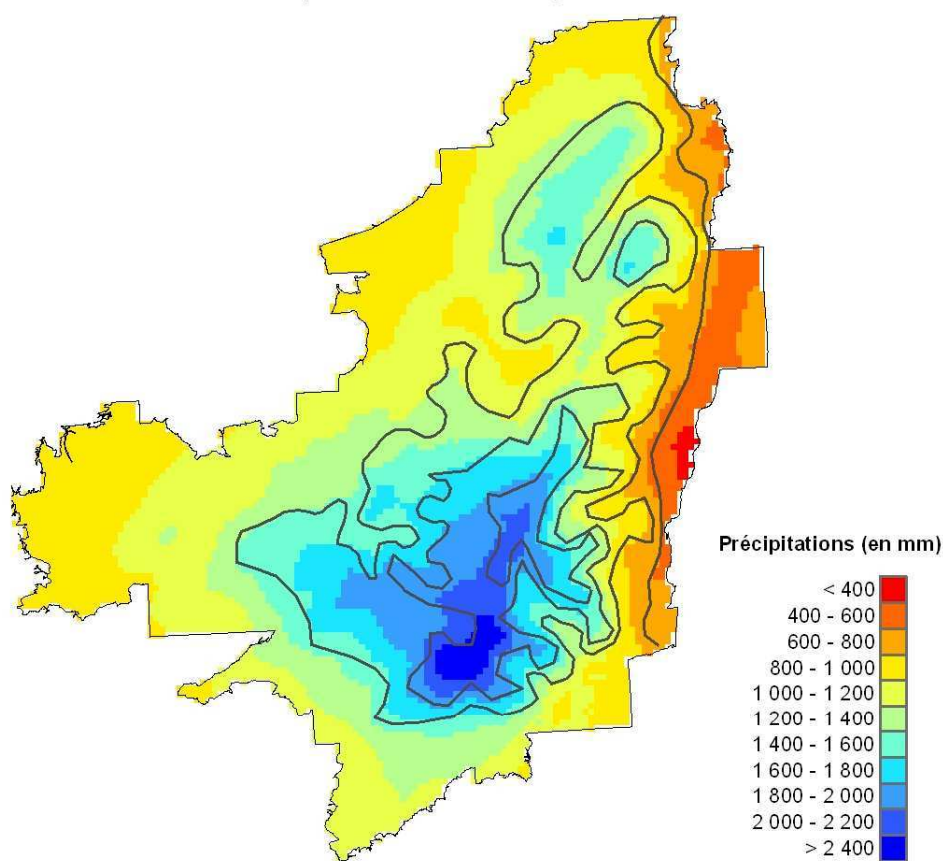
A : Altitudes à partir du MNT



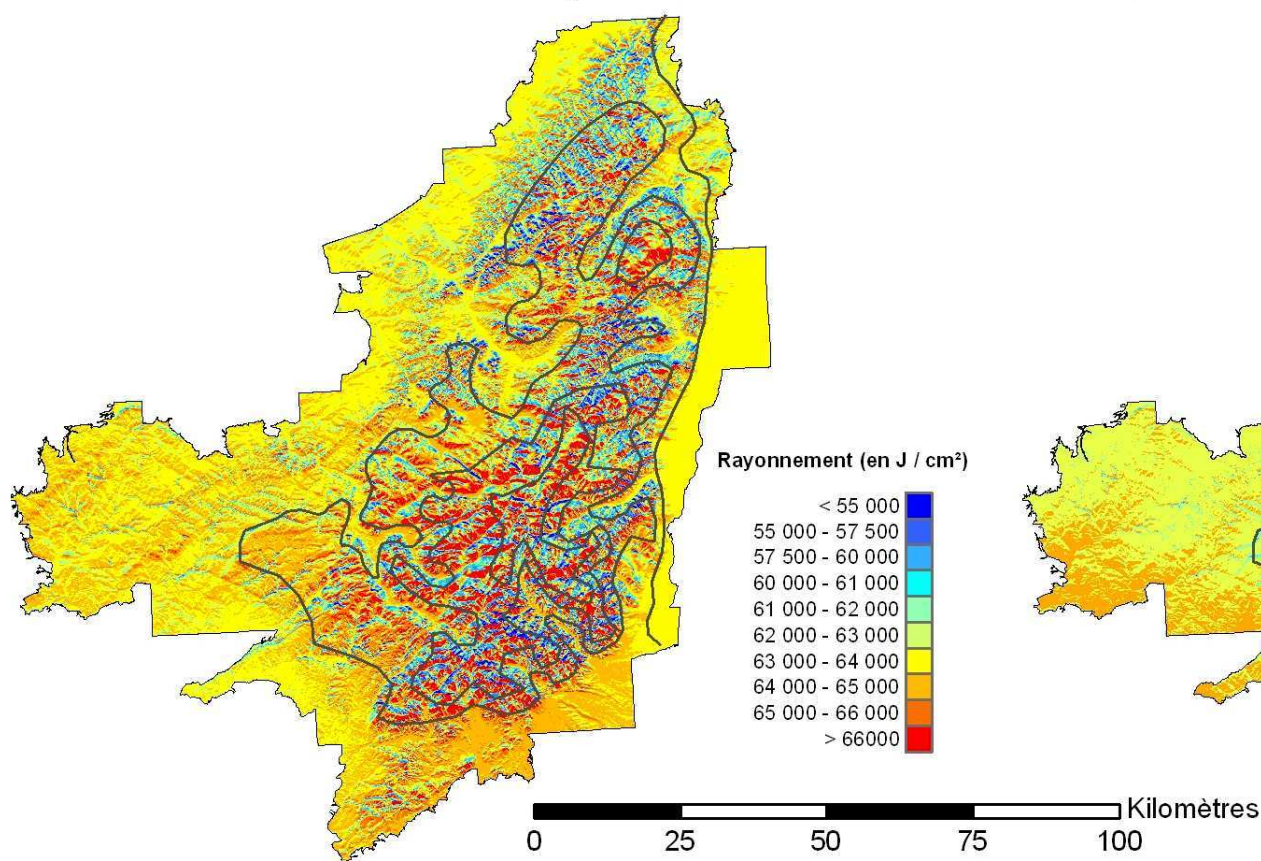
B : Températures moyennes annuelles



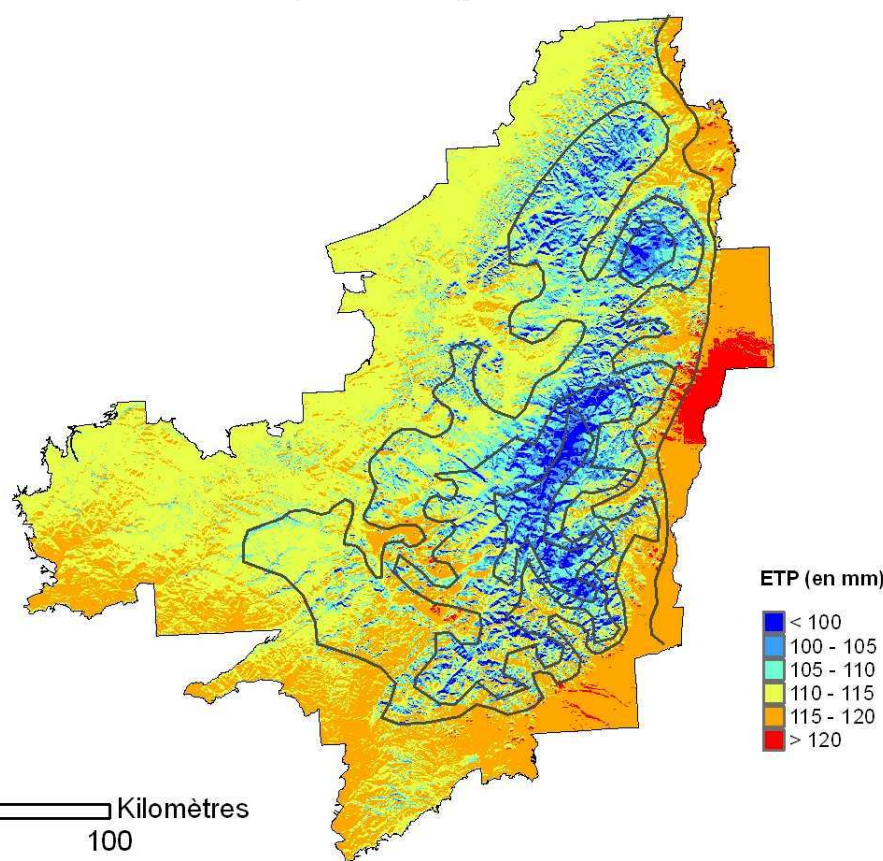
C : Précipitations moyennes annuelles



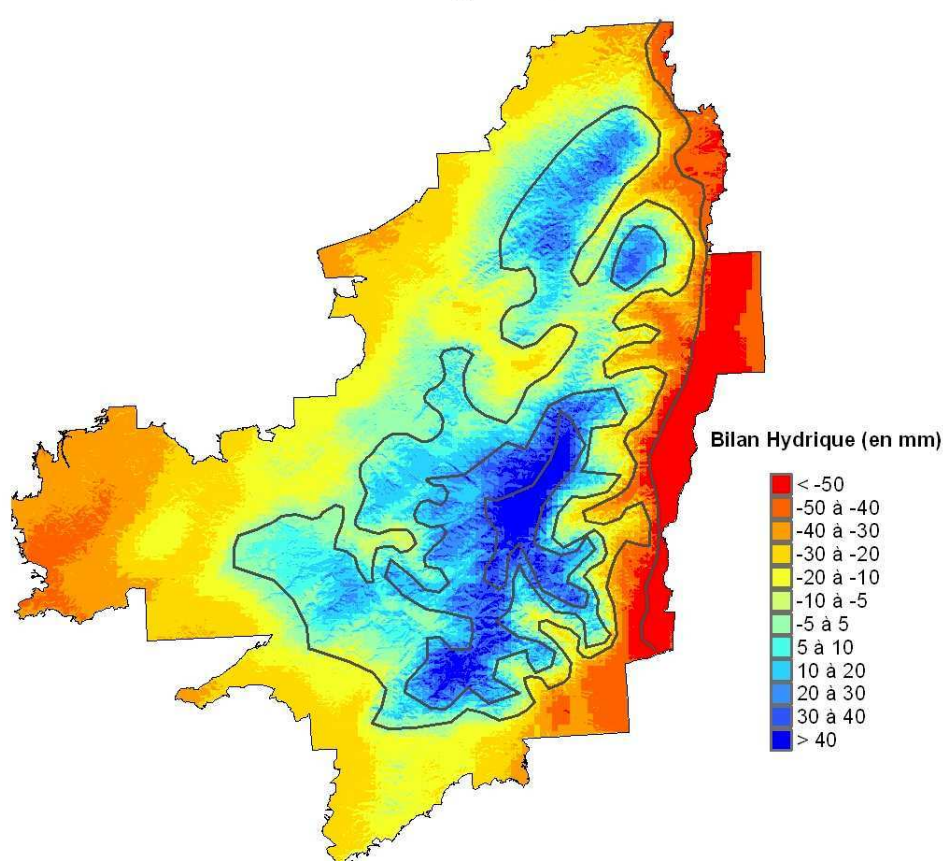
D : Radiations de juin



E : Evapo-transpiration potentielle de Juin



F : Bilan hydrique de Juin



- Nombre de jours de gels mensuels et annuels (njg)
- Précipitations moyennes mensuelles et annuelles (P) (Carte 5C).
- intensités radiatives (rad) théoriques mensuelles calculées avec le modèle Helios (Carte 5D), annuelle, et cumulées pendant la période de végétation (mars à septembre inclus). La modélisation de la course du soleil permet le calcul de l'intensité radiative théorique en J/cm². L'indice prend en compte, la pente et l'orientation du site ainsi que l'effet de masque occasionné par les reliefs environnants, tout comme la nébulosité et la latitude.
- ETP turc théoriques mensuelles (ETPt_u) (Carte 5E), annuelle, et cumulée pendant la période de végétation (mars à septembre inclus).

$$ETP \text{ (mm/mois)} = 0.4 * (R_g + 50) * (T / (T + 15)),$$
 où T est la température moyenne mensuelle en °C et R_g est le rayonnement global en cal/cm²/j. Les intensités radiatives théoriques modélisées ci-dessus sont utilisées.
- Bilan hydrique climatique théorique (Bhct_u) (Carte 5F) pour chaque mois (BH = P – ETP turc), annuel, et cumulé pendant la période de végétation (mars à septembre inclus).
- Déficit hydrique (Dhct_u) : somme des bilans hydriques présentant des valeurs négatives (ETP > P).
- Angle de continentalité hydrique de Gams (Gams) : $\cot(a) = P/A$, avec a comme angle de continentalité hydrique, P = précipitations (mm), et A = altitude (m). Cet indice permet de s'affranchir de l'altitude pour l'examen de la répartition des pluies. Cet indice a été corrigé par Michallet (1991) pour être applicable à des altitudes inférieures à 900 m.
- Indice d'aridité de De Martonne (Demart) : $I = P / (T + 10)$, où P représente les précipitations annuelles moyennes en mm et T les températures moyennes annuelles en °C. (De Martonne, 1926)

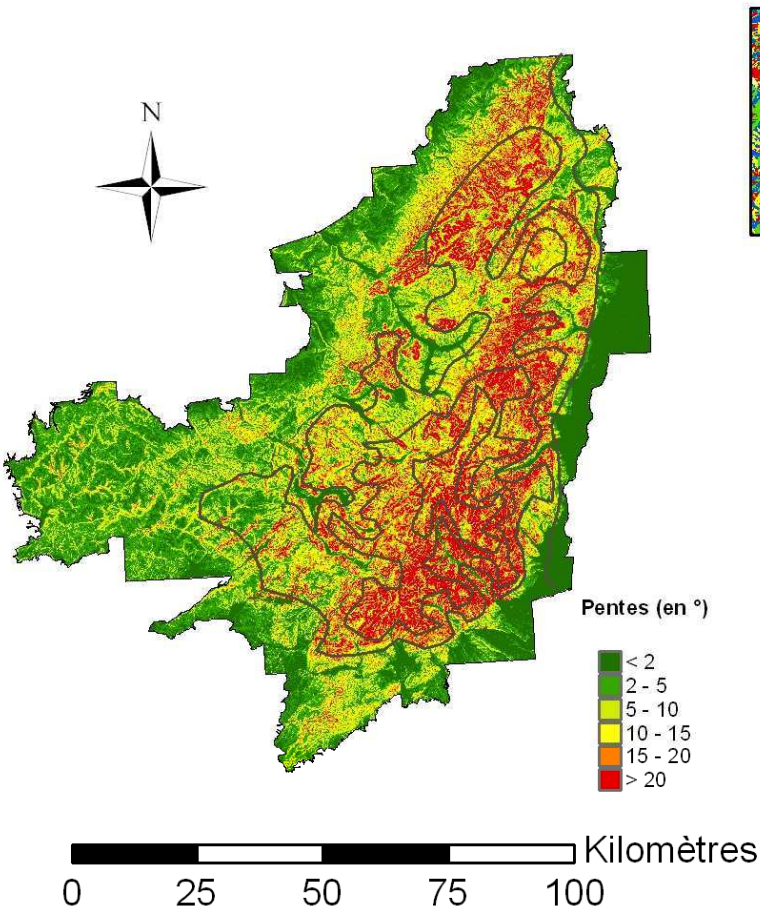
2.5.2 Indices topographiques

Les indices topographiques sont tous issus de l'analyse du modèle numérique de terrain au pas de 50 m., traité sous forme de modèle maillé. Tous ces indices sont calculés pour une cellule de 50 m de coté :

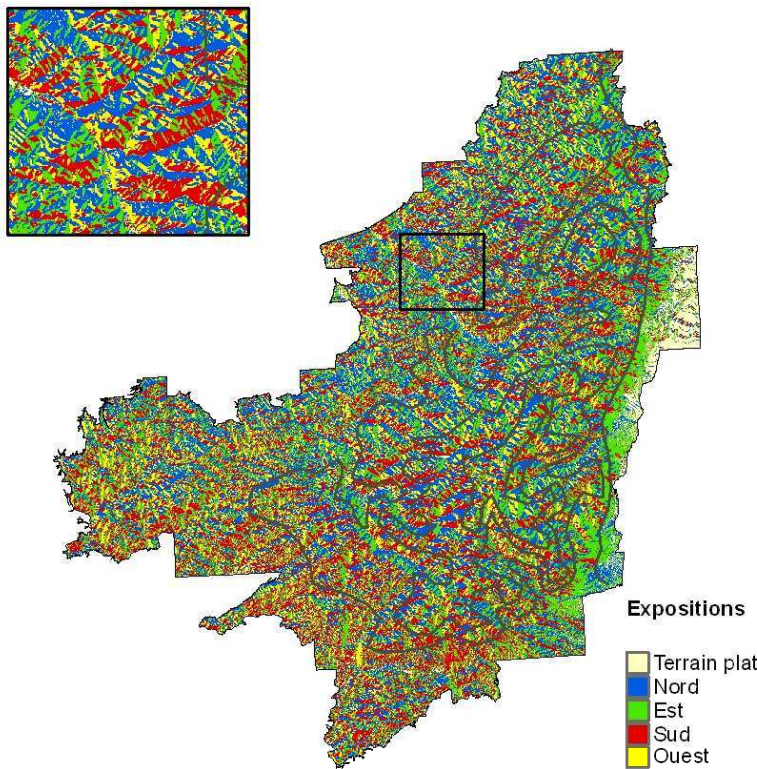
- Pentes (pte) (Carte 6A) : le calcul des pentes passe par la recherche du plus grand changement de valeurs d'altitudes entre la cellule concernée et ses plus proches voisines (Burrough, 1986).
- Expositions (expo) (Carte 6B) : le calcul des expositions calcule la direction de la plus grande pente entre la cellule concernée et ses cellules voisines.
- Opposition nord/sud (cosexpo) : cet indice est égal au calcul du cosinus de l'exposition en radians.
- Indice de position sur le versant (IPV) : c'est le rapport entre la distance à la crête sur la distance totale du versant. L'indice varie de 0 à 1, les faibles valeurs représentant les hauts de versant et les faibles valeurs les bas de versant.
- Positions topographiques (Positopo) (Carte 6C) : il s'agit d'un découpage réalisé à partir du MNT selon des critères hydrologiques, permettant la segmentation du territoire en 11 types de positions, allant de la crête à la plaine en passant par le milieu de versant ou la vallée.
- Indice de forme du relief (Curv) (Carte 6D) : c'est un indice de concavité/convexité de la surface topographique basé sur le calcul du changement d'altitude entre la cellule concernée et les cellules voisines. L'indice varie d'environ -4 à +4, une valeur positive représentant une zone convexe, une valeur négative une zone concave (Moore et al, 1991, Zevenbergen et al, 1987)
- Indice de Dénivellation (ID) (Carte 6E) : indice permettant d'apprécier l'importance du dénivelé absolu environnant une placette dans un rayon déterminé par une distance donnée (ex : ID250 = rayon de 250 m.). $ID = z_{\max} - z_{\min}$, avec $z_{\max}$ = altitude maximale de la zone définie, et $z_{\min}$ = altitude minimale de cette même zone.

Carte 6 : Présentation des variables topographiques

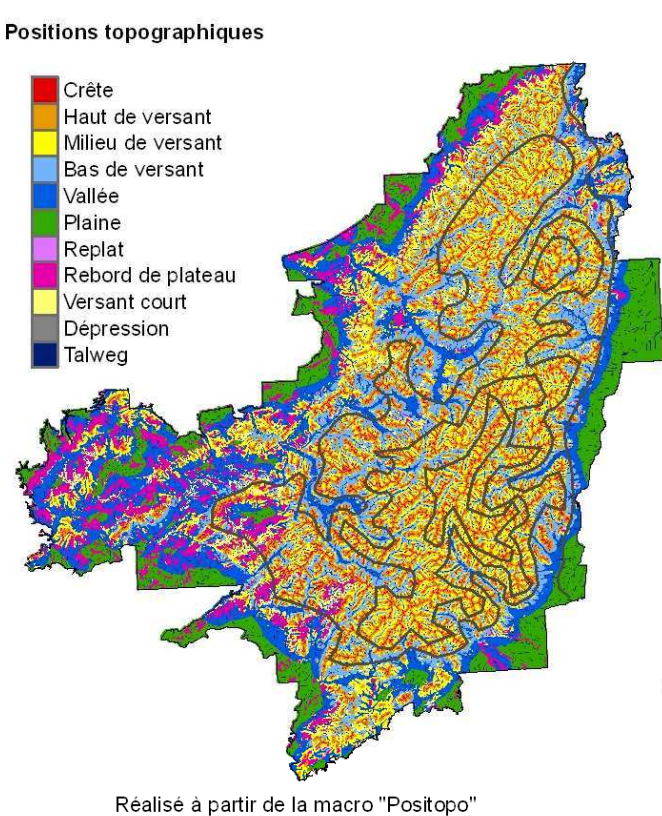
A : Pentes du massif vosgien



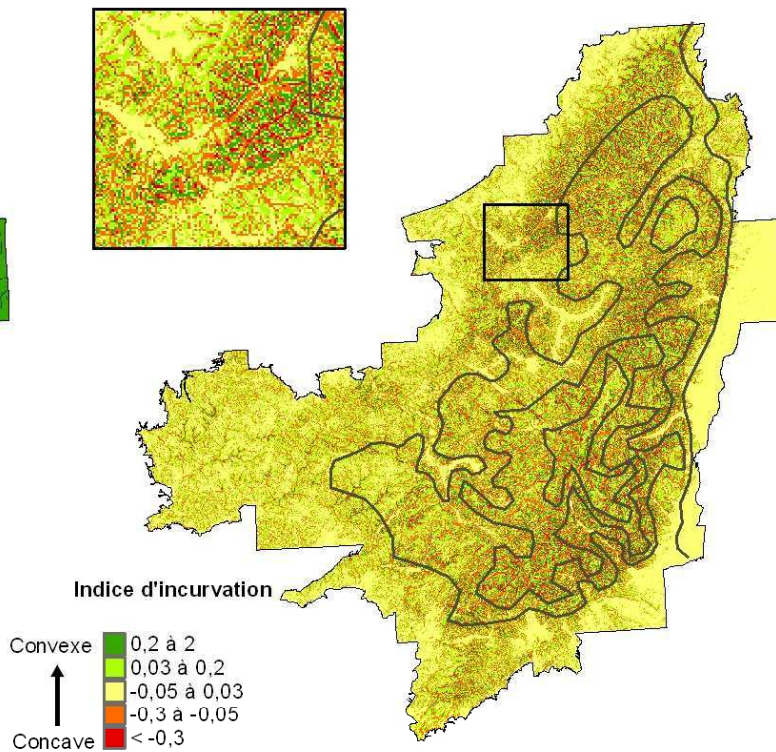
B : Expositions du massif vosgien



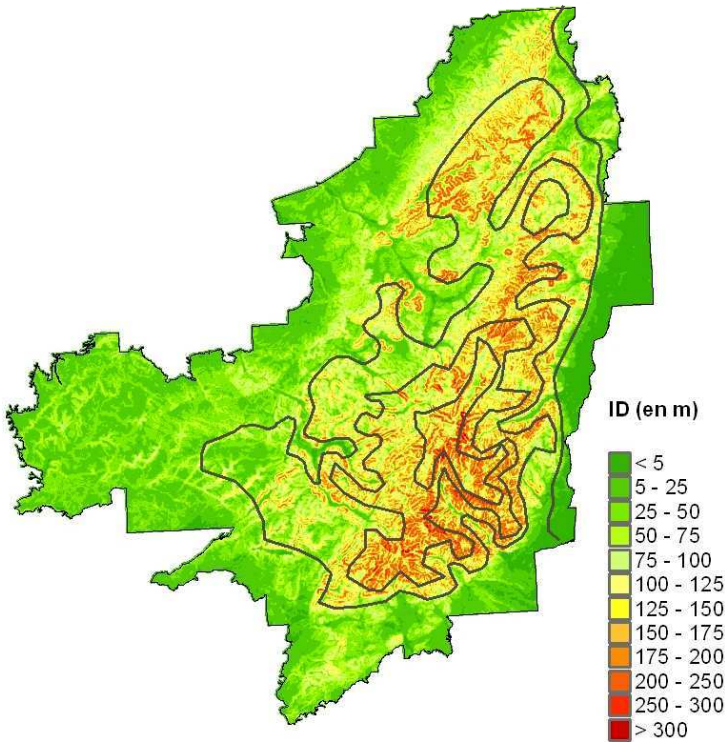
C : Positions topographiques



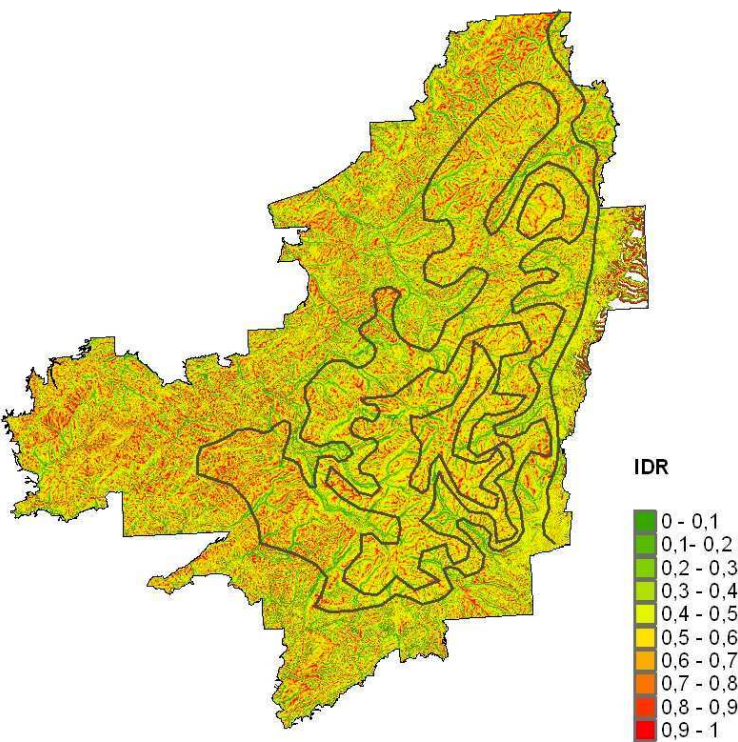
D : Formes du relief (sur un pixel de 150 m de côté)



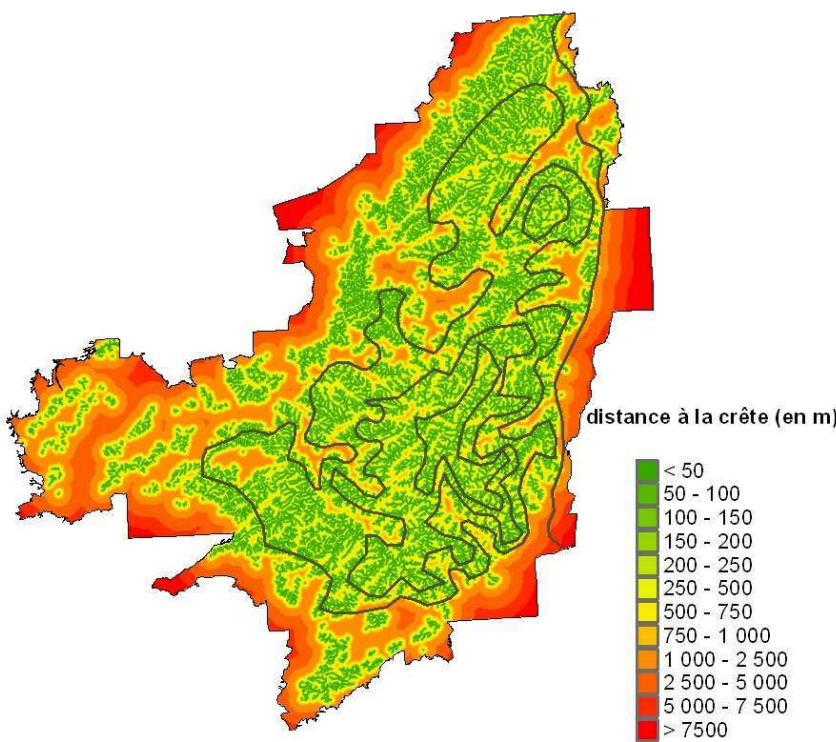
E : Indice de dénivellation (pour un rayon de 250 m)



F : Indice de Dénivellé Relatif (pour un rayon de 250 m)



G : Distance à la crête



- Indice de Dénivelé Relatif (IDR) (carte 6F) : indice permettant d'apprécier la position topographique relative d'un pixel par rapport à la topographie environnante. L'indice se calcule en rapportant le dénivelé existant entre le pixel considéré et l'altitude minimale observée sur la zone d'emprise sur le dénivelé total de cette zone. Une valeur élevée témoigne d'une position haute dans un environnement donné.
- Indice de confinement (Conf) : Indice permettant d'estimer le confinement à partir de fenêtre coulissante. Calculé comme étant la différence entre l'altitude du point de référence avec l'altitude moyenne sur un espace au rayon environnant de xx pixels (soit $xx * 50$ mètres), l'indice prend alors la valeur ainsi obtenue si celle-ci est négative, 0 si elle est positive. Plus la valeur absolue de l'indicateur est forte, plus l'on se trouve dans une position basse dans un environnement haut.
- Altitude focale (Fz) : Altitude moyenne d'une zone de rayon déterminé divisé par l'altitude moyenne du site d'étude.
- Distance à la crête (discr) (Carte 6G) : cet indice représente une distance entre le centre du pixel concerné et le pixel le plus proche identifié comme crête. L'identification des crêtes est calculée par la combinaison d'indices hydrologiques et d'indices topographiques, en limitant la notion de crête à des secteurs où le dénivelé est supérieur à 100 mètres dans un rayon de 1 km.
- Distance au talweg (distal) : il est basé sur le calcul de la distance euclidienne entre le pixel concerné et le talweg le plus proche, les talwegs étant identifiés automatiquement grâce à l'utilisation de fonctions hydrologiques et de seuillage.

2.5.3 Indices hydrologiques

Ces indices sont tous dérivés à partir du modèle numérique de terrain Bdalti de l'IGN :

- Indice de Moore encore appelé CTI (Compound Topographical Index, $CTI = \ln(a/\tan b)$, avec a = bassin versant amont drainé, et b = pente du pixel (Carte 7A).
- Indice de flux drainant (flacc) (Carte 7B) : l'indice calcule le nombre de cellules drainantes par rapport à la cellule étudiée. Cet indice est basé sur le calcul du sens d'écoulement déterminé à partir de l'orientation des pentes (Jenson, 1988)
- Zones alluviales (zalluv) : isolées de façon automatique, les zones alluviales sont définies comme les pixels présents dans un rayon de 1000 m autour d'un talweg et dont le dénivelé positif n'exède pas deux mètres.
- Bassins versants (BV) : les cellules dont l'écoulement se fait vers le même point sont assemblées, et identifiées comme un bassin versant unique (Strahler, 1957).

2.5.4 Indices géologiques

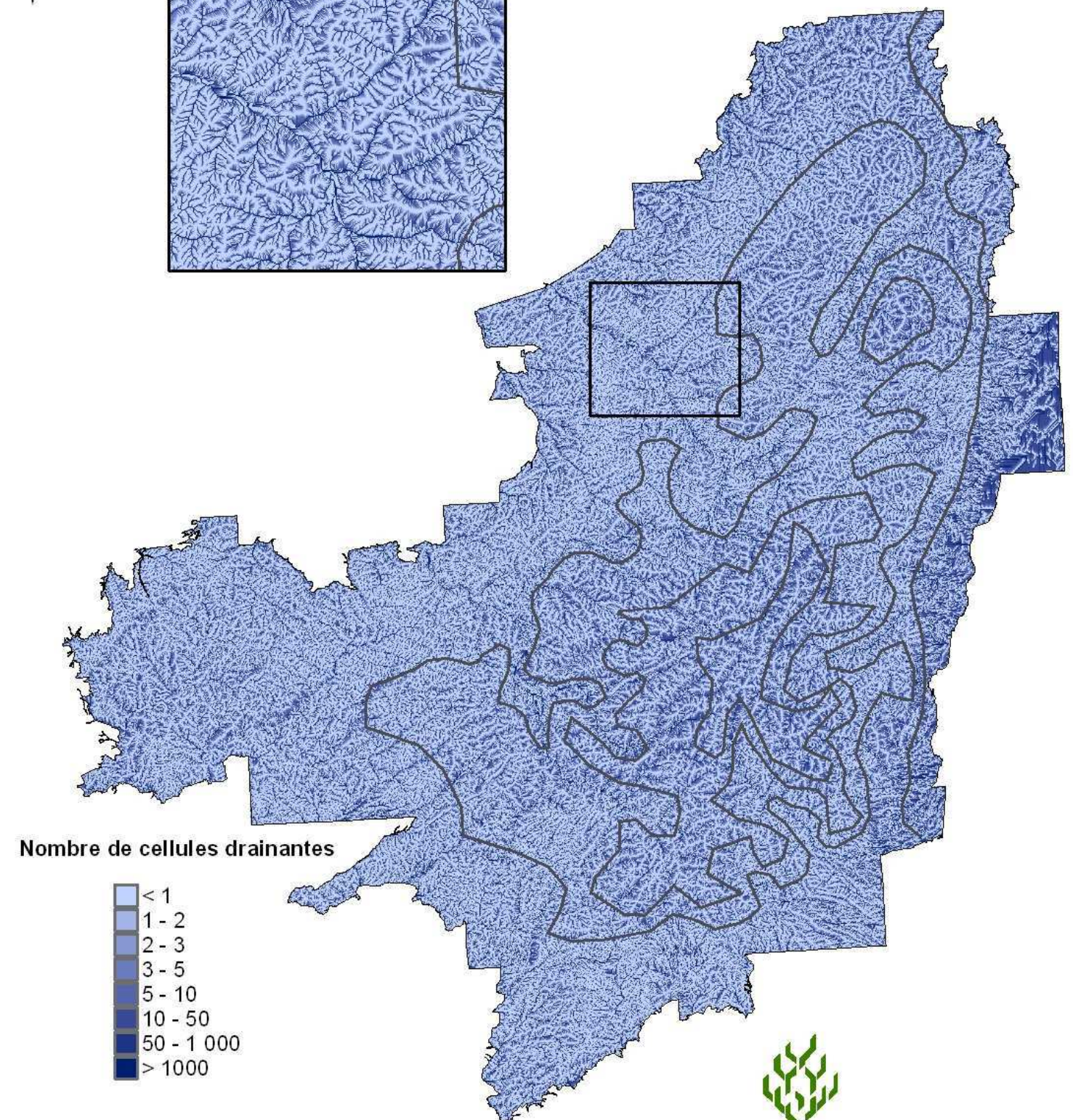
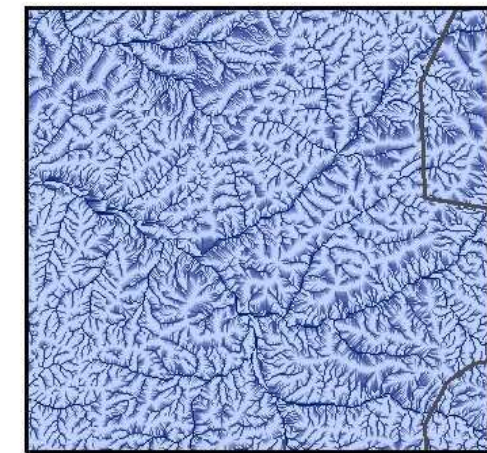
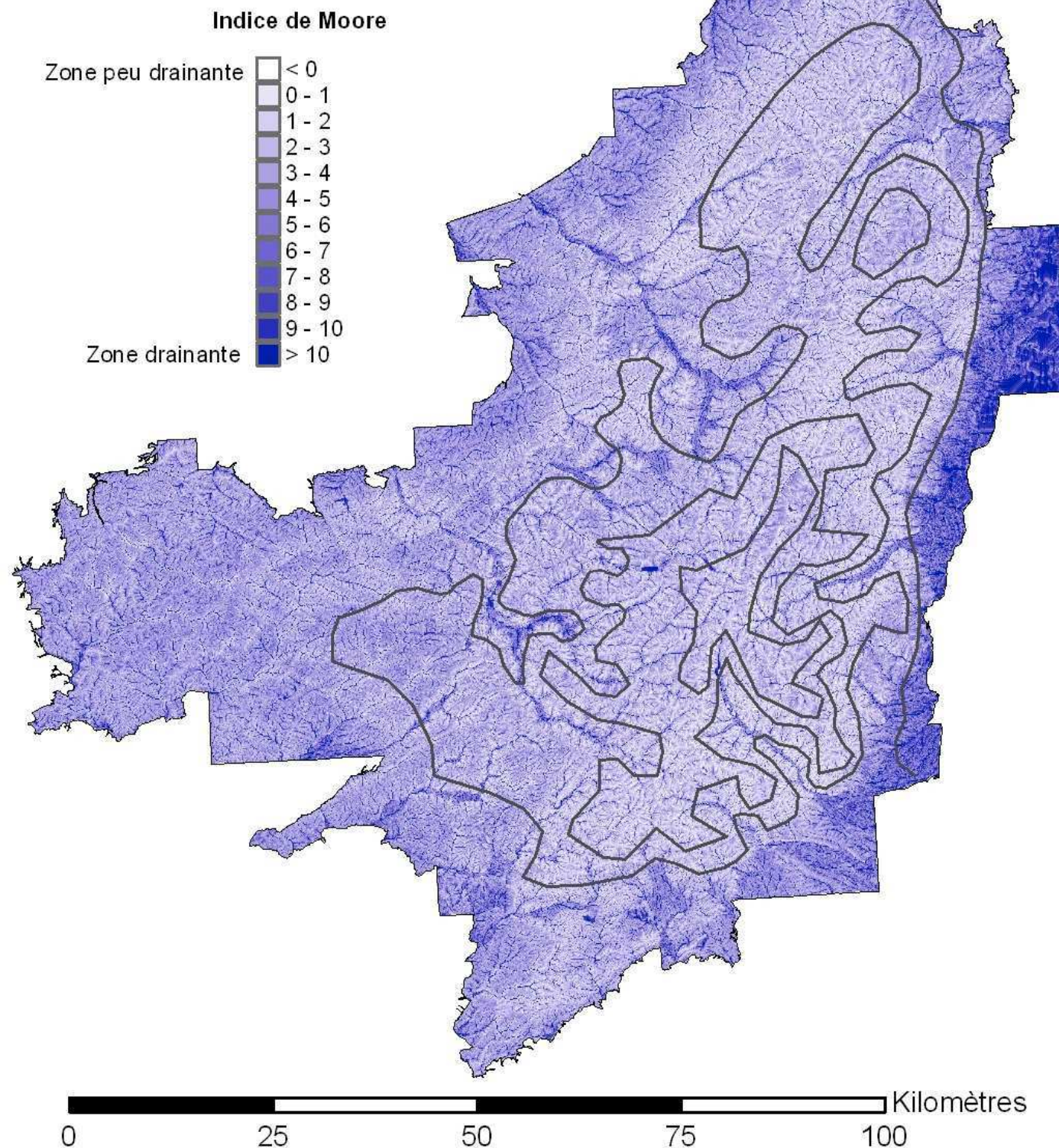
Les variables numériques spatialisées disponibles sur le massif vosgien ne concernaient que les facteurs climatiques. Aucune variable relative aux conditions édaphiques n'avait été numérisée préalablement à cette étude. Une carte pédologique au 1/100 000ème et des cartes géologiques au 1/50 000ème sont cependant disponibles au format papier pour la région concernée. La carte pédologique ne concerne malheureusement que la région de Saint-Dié et, de ce fait, est loin de couvrir l'ensemble du massif vosgien concerné par l'étude. Les cartes géologiques au format papier couvrent l'ensemble du massif et sont a priori intéressantes pour déterminer les stations car la composition minéralogique et chimique des roches influe directement sur les conditions édaphiques sus-jacentes. La numérisation des 26 cartes géologiques de la région a donc été entreprise dans le cadre de ce travail.

Carte 7 : Présentation des variables hydrologiques

A : Indice de Moore



B : Indice d'accumulation des eaux (flacc)



La démarche de numérisation s'est déroulée en plusieurs étapes :

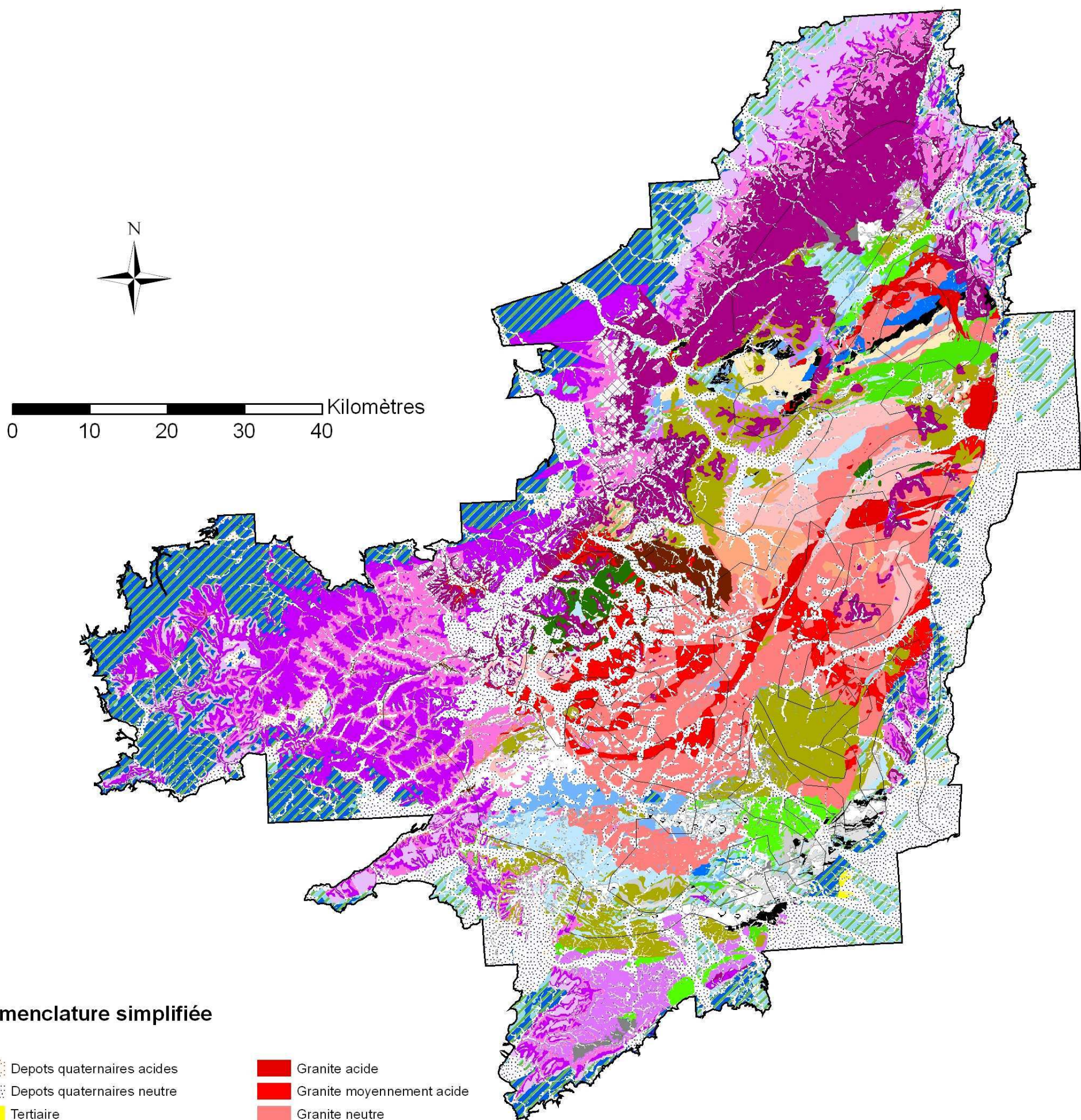
- Digitalisation des 25 cartes concernant le massif et affectation à chaque polygone des codes des substrats saisis sur la carte géologique. La digitalisation a été réalisée par un bureau d'étude (A.L. Thomas) ;
- Extraction des 857 codes différents issus des 25 cartes ; saisie de la dénomination complète des substrats correspondants ; harmonisation du code et de la nomenclature en faisant correspondre les substrats ayant la même définition dans les notices accompagnant les cartes. Une première simplification visant à homogénéiser le niveau de détail de chaque carte est également réalisée à cette étape. On obtient ainsi une liste de 486 substrats, répartis dans deux champs, l'un concernant les formations superficielles, l'autre la formation sous jacente. Pour une même unité cartographique, ces deux champs peuvent être remplis lorsque l'information est présente sur la carte papier ;
- Transformation des 25 couvertures dans un système de projection commun ; mise en conformité des tables attributaires et concaténation des 25 fichiers. Affectation, par programmation, des codes et des dénominations harmonisés. La couverture obtenue contient 21250 polygones 53400 arcs ;
- Vérification de la qualité du positionnement, de la cohérence topologique des polygones, et du contenu des tables ainsi que de la validité de l'uniformisation ; correction des erreurs.
- Elimination des polygones de taille inférieure à 3000 m² (d'une surface d'environ 50 m de côté sur le terrain correspondant à 1mm de côté sur les cartes au 1/50 000) et interprétation des vides entre deux cartes liés à des imprécisions de calage. La carte obtenue contient 19 000 polygones et 486 types de substrats (392 substrats de profondeur et 94 formations superficielles) ;
- Création d'une deuxième série de codes et de nomenclatures par simplification des identifiants afin de les faire correspondre à la nomenclature utilisée dans les analyses de données. On obtient ainsi une couverture contenant une centaine de types de substrats différents correspondant à 15000 polygones, et pour lesquels un code de niveau trophique peut être affecté.

Deux autres niveaux de simplifications successifs seront encore employés, afin de produire des documents cartographiques lisibles à l'échelle du massif (Carte 8). Un recodage des unités en terme de richesse chimique a également eu lieu selon la méthodologie décrite en 2.4 (Carte 9).

Pour chaque unité géographique, l'ensemble des codes depuis la saisie des cartes papier a été conservé afin de permettre les modifications ou mises à jour de la carte géologique numérique. Pour terminer, il y a eu vérification de la cohérence spatiale, et de la concordance avec les cartes papier, ce qui a entraîné la correction des erreurs constatées (environ 5% des polygones concernés).

L'ensemble de ces opérations correspond à environ 10 mois de travail à plein temps, le tiers pour la saisie des cartes géologiques papier, les deux autres tiers pour l'harmonisation géographique et attributaire aboutissant à une carte cohérente pouvant être simplifiée.

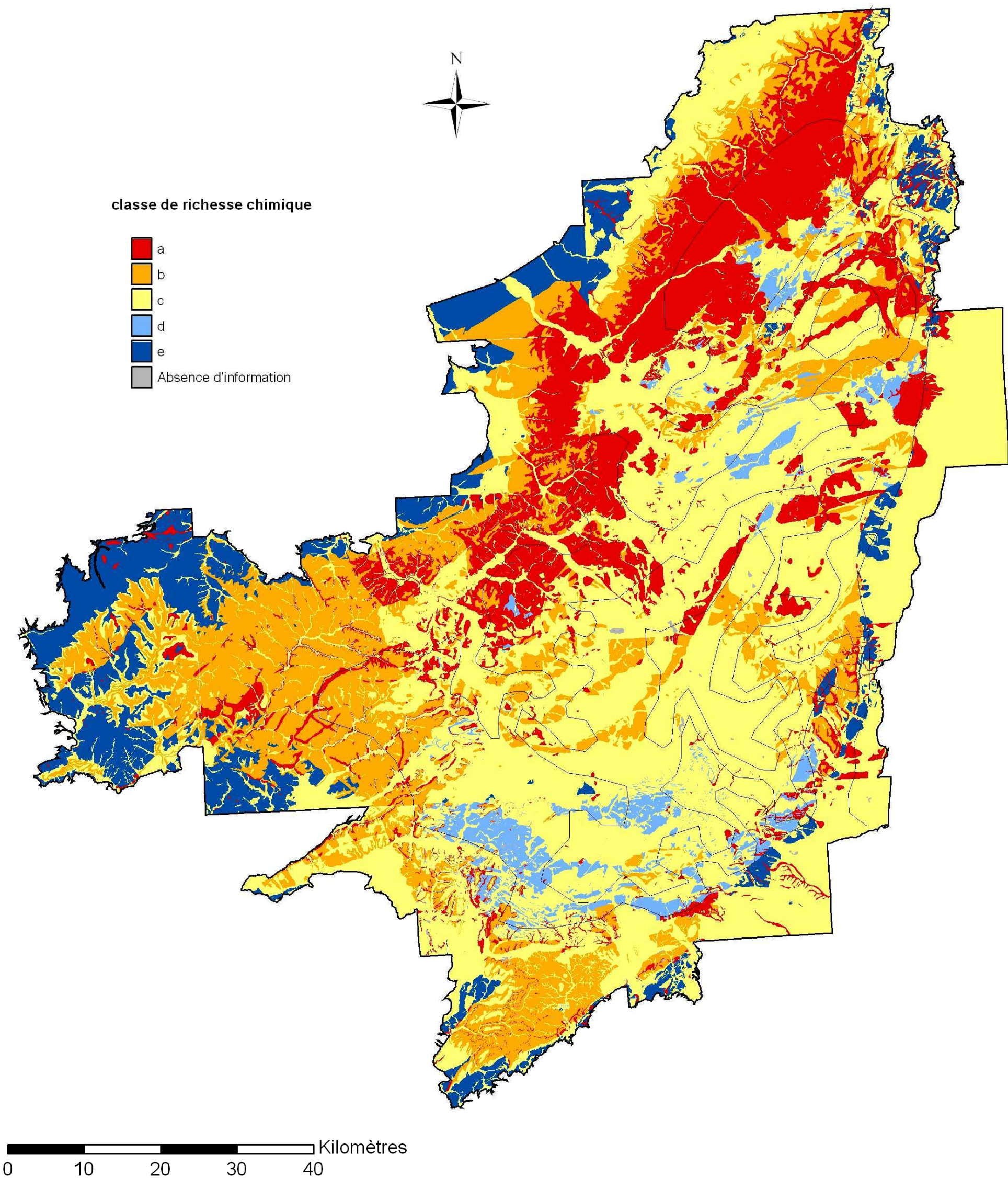
Carte 8 : Substrats géologiques du massif vosgien



Nomenclature simplifiée

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Depots quaternaires acides | Granite acide |
| Depots quaternaires neutre | Granite moyennement acide |
| Tertiaire | Granite neutre |
| Roche sedimentaire | Gneiss neutre |
| Roche sedimentaire acide | Roche magmatique moyennement acide |
| Roche sedimentaire neutre | Roche magmatique neutre |
| Roche sedimentaire basique | Roche magmatique basique |
| Conglomerat principal acide | Roche metamorphique acide |
| Gres indifferencie acide | Roche metamorphique moyennement acide |
| Gres vosgien acide | Roche metamorphique neutre |
| Gres a Voltzia moyennement acide | Roche metamorphique basique |
| Gres permien moyennement acide | Roche volcanique acide |
| Gres intermediaire moyennement acide | Roche volcanique moyennement acide |
| Gres coquilliers neutre | Roche volcanique neutre |
| Primaire neutre | Roche volcanique basique |
| Gabbro neutre | Roche volcanique pyroclastique |
| Granito-gneiss neutre | Roche volcanique pyroclastique neutre |
| Granodiorite neutre | autre |
| migmatites acides | |

Carte 9 : Richesse chimique des substrats géologiques du massif vosgien



3 RESULTATS

3.1 Caractérisation des trois facteurs écologiques structurant la flore forestière Vosgienne

Afin de chercher un indicateur biologique synthétique permettant de caractériser les trois facteurs structurant la flore forestière des Vosges identifiés dans les catalogues de stations forestières, nous avons réalisé une AFC. Les pourcentages d'inertie de l'AFC, égaux à 2.91, 2.04, 1.91, 1.26, 1.25 pour les axes factoriels 1 à 5 laissent apparaître 3 axes importants.

3.1.1 L'axe 1 de l'AFC : le niveau trophique

La distribution des relevés et de leur valeur de pH dans le plan 1-2 de l'AFC (Figure 2) montre un lien clair entre le pH de l'horizon A et l'axe 1

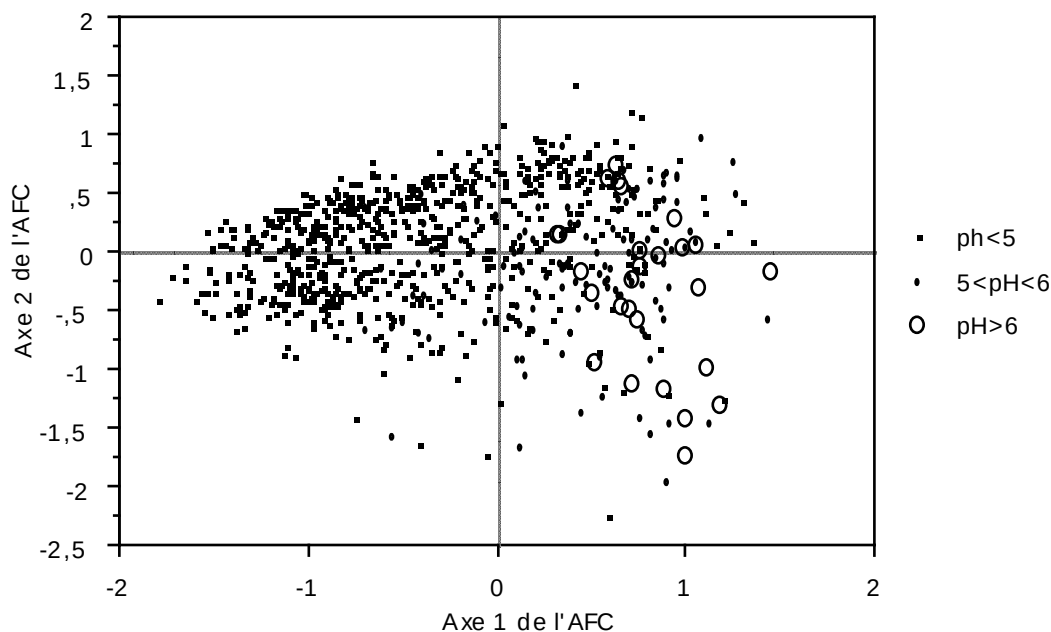


Figure 2 : représentation des relevés et de leur valeur de pH eau pour l'horizon A dans le plan 1-2 de l'AFC

Ce lien entre l'acidité du sol et axe 1 semble indiquer que le niveau trophique est le principal facteur écologique qui régit la répartition de la végétation dans le massif vosgien. L'analyse plus approfondie par régression multiple, du lien entre les coordonnées des relevés sur l'axe 1 et les variables écologiques confirme cette première approche (tableau 4) : l'axe 1 est corrélé à la quantité d'éléments minéraux échangeables, à la nutrition azotée et aux turn-over de la matière organique.

Variable	Coefficient	Valeur de p
Terme constant	0,10	0,34
Log Ca échange.	0,60	<0,0001
Log H échange.	-0,17	<0,0005
Log K échange.	-0,32	<0,0002
C/N	-0,039	<0,0001
Dysmoder-mor	-0,32	<0,0001
Moder	-0,14	<0,0063
Mésomull	0,23	<0,0001
Eumull	0,37	<0,0001

Tableau 4 : coefficients et seuils de signification des variables écologiques de la régression multiple permettant d'expliquer les coordonnées factorielles des relevés sur l'axe 1 de l'AFC ($R^2=0,80$)

Les coordonnées factorielles augmentent en effet 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 avec l'augmentation d'acidité, un C/N plus défavorable et en présence d'humus de type moder. Les coordonnées des relevés sur l'axe 1 de l'AFC constituent donc un excellent bioindicateur de la nutrition des sols.

3.1.2 L'axe 2 de l'AFC : l'étage bioclimatique

L'axe 2 de l'AFC est corrélé à l'altitude (Figure 3). Les relevés situés au pôle positif de l'axe sont localisés à altitude élevée. C'est l'inverse pour les relevés situés au pôle négatif.

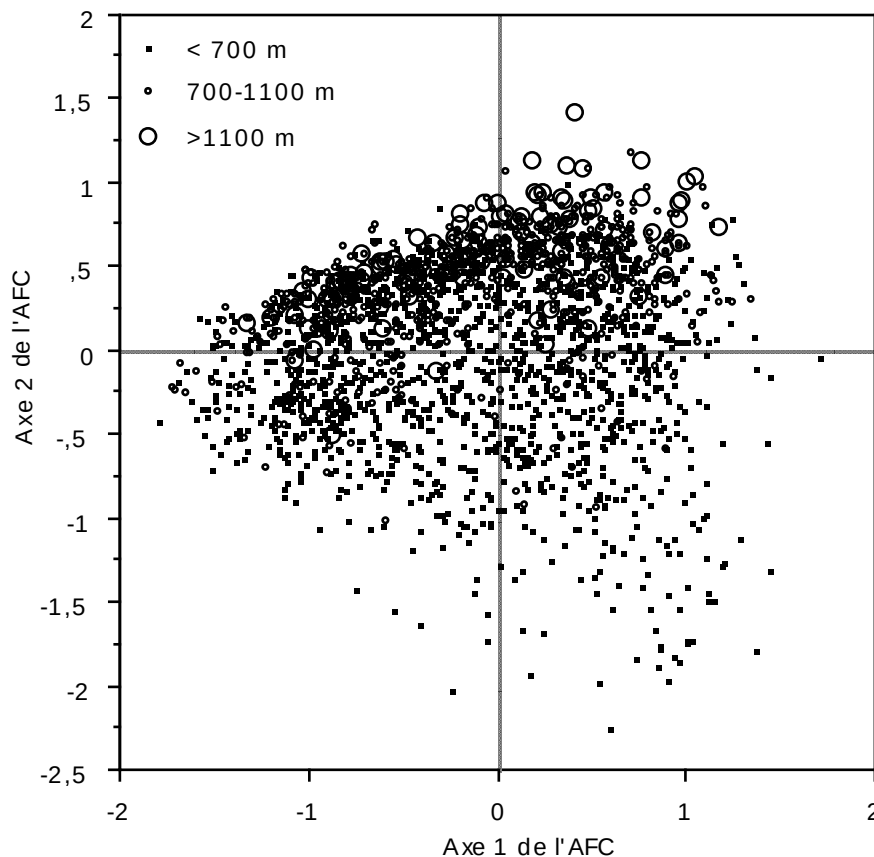


Figure 3 : représentation des altitudes sur le plan 1-2 de l'AFC

La prise en compte des variables obtenues par traitement SIG met en évidence le rôle majeur de la température qui est la variable la plus corrélée à l'axe 2. L'utilisation conjointe de la température moyenne annuelle, du cosinus de l'exposition (opposition Nord-sud) et du bilan hydrique moyen du mois de juin permet d'obtenir le modèle le plus explicatif ($R^2 = 0,49$).

Le second gradient le plus important dans la région pour expliquer la distribution des espèces végétales est donc l'étage bioclimatique exprimé par les températures moyennes annuelles, complétées par l'exposition qui indique que la végétation est plus montagnarde sur les versants nord par rapport aux versants sud et par le bilan hydrique d'un mois de forte croissance, le mois de juin. La composition floristique des sites à température chaude et stress hydrique marqué (basse altitude, exposition sud) s'oppose donc à celle des sites à température fraîche et stress hydrique faible (altitude élevée, exposition nord).

Les coordonnées des relevés sur l'axe 2 de l'AFC sont un indicateur biologique du climat des sites. La modélisation des coordonnées de cet axe fournira un indice bioclimatique pertinent pour expliquer les changements de composition floristique à l'intérieur du massif vosgien.

3.1.3 Conclusions sur l'AFC et caractérisation de la réserve en eau des sols.

Les typologies locales sont structurées essentiellement selon 3 grands types de facteurs, le niveau trophique du sol, l'étage bioclimatique, le bilan hydrique des stations et les situations écologiques particulières (tourbières, bords de rivières, suintements, éboulis).

L'analyse des relevés de la base phytoécologique permet de définir, à l'échelle du massif vosgien :

- un indicateur floristique synthétique du niveau trophique représenté par les coordonnées des relevés sur l'axe 1 de l'AFC ;
- un indicateur floristique du climat représenté par les coordonnées des relevés sur l'axe 2 de l'AFC.

Le bilan hydrique des stations, isolé à l'échelle des catalogues pour son importance pour les potentialisés forestières, ne se traduit pas, à l'échelle du massif comme un facteur influençant la végétation herbacée. Il n'y a donc pas d'indicateur biologique synthétique de la réserve en eau des stations. Ceci dit, celle-ci peut être estimée directement à travers les paramètres édaphiques appropriés. La réserve en eau des sols est caractérisée par la réserve utile, qui définit le volume d'eau stocké dans le sol, et qui peut être pondérée par les écoulements latéraux. Il est possible de calculer ces deux indices, la réserve utile pouvant être estimée à partir des analyses de sol relevées sur le terrain, et le bilan latéral en eau étant lié à la topographie qui a été observée sur le terrain pour chaque relevé. Il est cependant nécessaire de faire la correspondance entre la position topographique et le surplus ou le manque d'eau potentiel, à travers la bibliographie des études existantes.

3.1.4 Essai de mise en relation de la topographie et des apports latéraux en eau

Il est très difficile d'évaluer de façon quantitative l'effet des apports et des départs latéraux sur la quantité d'eau disponible pour les plantes. Ce facteur lié à la topographie est difficilement modélisable. Il est cependant possible de l'évaluer indirectement par son effet sur la croissance des essences.

Dans son étude sur la croissance du Chêne sessile dans l'Est de la France, Berges (Berges 1998) distingue 3 classes apports > départs, équilibre, départs > apports. Le passage de la meilleure classe à

la plus mauvaise correspond à une variation de 4,2 m de croissance en moyenne. Cette variation équivaut à l'effet de 230 mm de réserve utile dans les équations de croissance.

Pour le Chêne rouge d'Amérique, Le Goff et al (Le Goff, M. et al. 1994) distinguent 4 classes de topographie (1 : pertes>apports, 2 : pertes=apports, 3 : pertes<apport, 4 : pertes<<apports). Le passage de la meilleure classe à la plus mauvaise correspond à la variation de 5,1 m de hauteur du Chêne rouge. Le passage de 50 à 150 mm de réserve utile correspond à une augmentation de hauteur de 1,9m. Dans cette étude, l'effet d'une augmentation de RU sur la hauteur est cependant variable : il est plus élevé lorsque la réserve utile est faible et réduit lorsque la RU est forte (c'est le log de la RU qui est pris en compte dans les équations). Chez le Chêne rouge le passage de la meilleure classe à la plus mauvaise correspond donc à environ 270 mm de RU.

Pour le Frêne en nord Picardie, Le Goff et Levy (Le Goff and Lévy 1984) distinguent 5 classes de drainage latéral topographie (1 : pertes>apports, 2 : pertes=apports, 3 : pertes<apport, 5 : pertes<<apports, pas de limitations d'alimentation hydrique). Le passage de la meilleure classe à la plus mauvaise correspond, toutes choses étant égales par ailleurs, à une variation de hauteur de 5,1 m. Le passage de 50 à 150 cm de profondeur correspond également à une augmentation de hauteur de 5,1m. ici aussi c'est le log de la profondeur qui est pris en compte dans les équations. Si on assigne en moyenne un mm de RU par cm de sol, pour le Frêne en nord Picardie, le passage de la meilleure classe à la plus mauvaise correspond à environ 100 mm de RU.

Pour L'Épicéa commun en Auvergne (massif du Lingas), Curt et al. (Curt, Dole et al. 1996) distinguent 5 classes de drainage latéral topographie (1 : pertes>>apports, 2 : pertes>apports : 3 pertes=apports, 4 : pertes<apport, 5 : pertes<<apports, pas de limitations d'alimentation hydrique). Le passage de la meilleure classe à la plus mauvaise correspond, toutes choses étant égales par ailleurs, à une variation de hauteur d'environ 8 m chez l'épicéa. Le passage d'une RU très faible (<30 mm) à une réserve utile supérieure à 150 mm occasionne une variation de hauteur d'environ 12 m. Chez l'épicéa le passage de la meilleure classe de drainage latéral à la plus mauvaise correspond donc à l'équivalent d'une variation de plus de 100 mm de réserve utile.

En conclusion, le drainage latéral a un effet sur la croissance des essences au moins égal aux variations de réserves utiles du sol. On peut fixer de façon un peu arbitraire un effet équivalent à environ 100 mm de variation de RU entre les situations défavorables (départs d'eau) et les situations favorables (apports d'eau).

3.2 Modélisation des facteurs écologiques par les variables numériques spatialisées

Pour chacune des 2650 placettes de la base EcoPlant réparties sur le massif vosgien, nous pouvons calculer avec la flore un indice de niveau trophique (la coordonnée sur l'axe 1 de l'AFC), un indice bioclimatique (la coordonnée sur l'axe 2 de l'AFC), et grâce aux mesures de terrain nous avons une valeur de réserve utile, et de bilan latéral en eau par l'intermédiaire de la position topographique. Ce seront les différentes variables à expliquer. Par croisement avec les données SIG, nous obtenons pour ces mêmes points tous les indices climatiques, topographiques, hydrologiques ou géologiques décrits au paragraphe 2.5.

La cartographie des 3 facteurs écologiques sur l'ensemble du massif vosgien va donc reposer sur leur modélisation par les variables numériques spatialisées à partir des placettes de terrain des différentes bases de données. Les modèles ont principalement été établis à l'aide de régression linéaires multiples qui permettent de sélectionner uniquement les variables spatialisées qui ont un effet significatif et de trouver la combinaison de ces variables la plus pertinente pour expliquer le facteur écologique à déterminer.

Les conditions stationnelles particulières (éboulis, tourbières, bords de rivières) ne correspondent pas directement à des variables déjà spatialisées. Par contre, il existe un lien net entre les bords de rivières et le réseau hydrographique cartographié. Les milieux très mouillés semi-courants (résurgences) ou stagnants (tourbières) ainsi que les éboulis de surface importante sont cartographiés sur les cartes au 1/25 000. Ils peuvent être digitalisés pour permettre de cartographier les stations correspondantes. Il est probable que les milieux très humides ou les éboulis de petite taille absents des cartes topographiques ne pourront pas être cartographiés. Ces stations particulières, de surface très faible dans le massif, n'ont pas été traitées dans le cadre de ce projet. Une digitalisation manuelle des éboulis et tourbières de surface importante pourra être réalisée directement selon les besoins à partir des cartes au 1/25000 par les services gestionnaires forestiers.

3.2.1 Modélisation du niveau trophique

3.2.1.1 Modélisation du niveau trophique utilisant des variables relevées sur le terrain

Ce modèle réalisé à partir des relevés d'EcoPlant comprend à la fois des variables relevées sur le terrain (la géologie) et des variables élaborées sous SIG (ID, IDR, log Flacc, Discr), et ayant un lien significatif au seuil statistique de 0.001 avec le niveau trophique indiqué par l'axe 1 de l'AFC du tableau floristique (*Tableau 5*). Deux variables, la région naturelle et la géologie, sont qualitatives, les autres étant continues. L'explication concernant la méthode de calcul des variables est détaillée au chapitre 2.5.

Variable	Modalité	Coeff.	t-value	p-value
	Roche, classe b	-0,381	-6,957	0,000
	Roche, classe c	-0,669	-13,685	0,000
	Roche, classe d	-0,973	-13,674	0,000
	Roche, classe e	-1,201	-3,199	0,001
Indice de Dénivellation (ID) calculé sur un rayon de 250 m.		-2,482 ^{E-3}	-6,650	0,000
IDR calculé sur un rayon de 250 m.		0,632	6,792	0,000
Log Flacc (calculé sous SIG)		-0,157	-5,231	0,000
Discr (m)		-1,804 ^{E-4}	-5,722	0,000
Région naturelle	Vosges gréseuses lorraines, Vôge, Mille-Etangs	0,264	6,403	0,000

Tableau 5 : modélisation du niveau trophique des stations exprimé par l'axe 1 de l'AFC avec les variables écologiques de terrain (n = 972, R² = 0.433)

L'effet des variables écologiques est le suivant :

- plus le substrat géologique est siliceux, plus le niveau trophique est faible ;
- plus la placette est dans un point bas (IDR 250 m.), loin de la crête (Discr) et l'environnement proche est montagneux (ID 250 m.), plus le PH est fort ;
- plus la zone drainée est importante (log Flacc), plus le PH est fort.

On observe donc différents effets : celui, logique, du substrat, celui de la position topographique qui joue à travers 4 variables, et qui indique probablement un effet du colluvionnement, les zones d'accumulation de bas de versant étant plus riches, et ceci étant d'autant plus vrai que la surface drainée y est importante. On observe également un effet marqué de la région naturelle sur laquelle se trouvent les relevés. Ainsi, la région des Mille-Etangs et des Vosges gréseuses Lorraines (dont la Vôge) ont, toutes choses étant égales par ailleurs, une végétation plus acidiphile que le reste du massif. Puisque l'effet des différents substrats, notamment gréseux, est pris en compte, il est difficile

d'expliquer ce phénomène. La végétation plus acidiphile des Mille-Etangs peut cependant être expliquée par le recouvrement de la majeure partie du plateau par des dépôts glaciaires de faible épaisseur assez rarement mentionnés dans les relevés ou les cartes géologiques de cette zone.

3.2.1.2 Modélisation du niveau trophique avec les variables SIG uniquement.

Le modèle qui permet d'estimer le niveau trophique indiqué par la végétation utilisant uniquement des variables SIG conserve la logique du modèle précédent (Tableau 6) :

Variable	Modalité	Coeff.	t-value	p-value
Géologie SIG	Roche, classe b	-0,258	-4,469	0,000
	Roche, classe c	-0,468	-9,666	0,000
	Roche, classe d	-0,511	-7,942	,000
	Roche, classe e	-1,046	-8,005	0,000
ID sur un rayon de 250 m.		-3,191 ^{E-3}	-7,788	0,000
IDR sur un rayon de 250 m.		0,813	8,519	0,000
Indice de Moore (A_tan_B)		-3,600 ^{E-2}	-3,359	0,001
Distance euclidienne à la crête (Discr)		-1,332 ^{E-4}	-3,889	0,000
Région naturelle	Vosges gréseuses lorraines, Vôge, Mille-Etangs	0,203	4,542	0,000

Tableau 6 : coefficients et seuils de signification (p) des paramètres du modèle permettant de prédire le niveau trophique des stations à partir des variables SIG (l'appartenance de chaque substrat géologique aux classes de roches du modèle et indiquée en annexe). R² du modèle : 0,362, n = 955.

Seul l'indice de Moore se substitue à la variable log(Flacc), cet indice ayant cependant un sens tout à fait similaire, la principale différence résidant dans la prise en compte de la pente du pixel dans le calcul, plus le bassin versant drainant étant important et la pente du pixel faible, plus la valeur étant élevée.

On constate cependant que le R² passe de 0.433 dans la première équation à 0.362 dans la deuxième. Cette diminution s'explique par la substitution de la géologie relevée sur le terrain par la géologie issue de la carte géologique numérisée. Cette diminution est logique, du fait de la plus grande précision des relevés de terrain, qui permet la plupart du temps de coder le type de substrat réellement présent, contrairement à la carte, qui présente l'information sous un angle plus synthétique, avec une délimitation interprétée, et des formes plus généralisées. Les variables géologiques restent cependant clairement significatives.

3.2.1.3 Découpage en classes du niveau trophique en vue de la typologie des stations

Selon les altitudes, 3 à 10 classes de niveau trophique sont présentes dans les typologies réalisées sur le massif vosgien. Plusieurs d'entre elles sont assez proches et il semble possible de découper le gradient trophique en 6 classes correspondant à 6 grands types d'humus et aux 6 niveaux trophiques de la flore forestière française.

Comme la relation entre les valeurs modélisées de l'axe 1 et les valeurs réelles est linéaire et que la distribution ne présente pas de seuils, les limites de classes ont été fixées de façon un peu arbitraire en isolant les milieux calcaires dans une classe, les milieux riches dans 2 classes (végétation neutrophile et végétation acidiphile) et les milieux nettement acides dans deux classes (végétation hyperacidiphile et végétation acidiphile). Enfin, les milieux faiblement acides, très fréquents dans les Vosges, sont isolés dans une classe médiane (Figure 4).

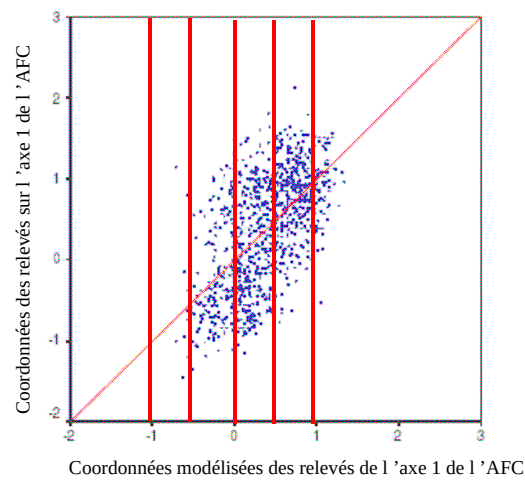


Figure 4 : coordonnées réelles de l'axe 1 de l'AFC en fonction des valeurs prédites à l'aide des variables SIG uniquement

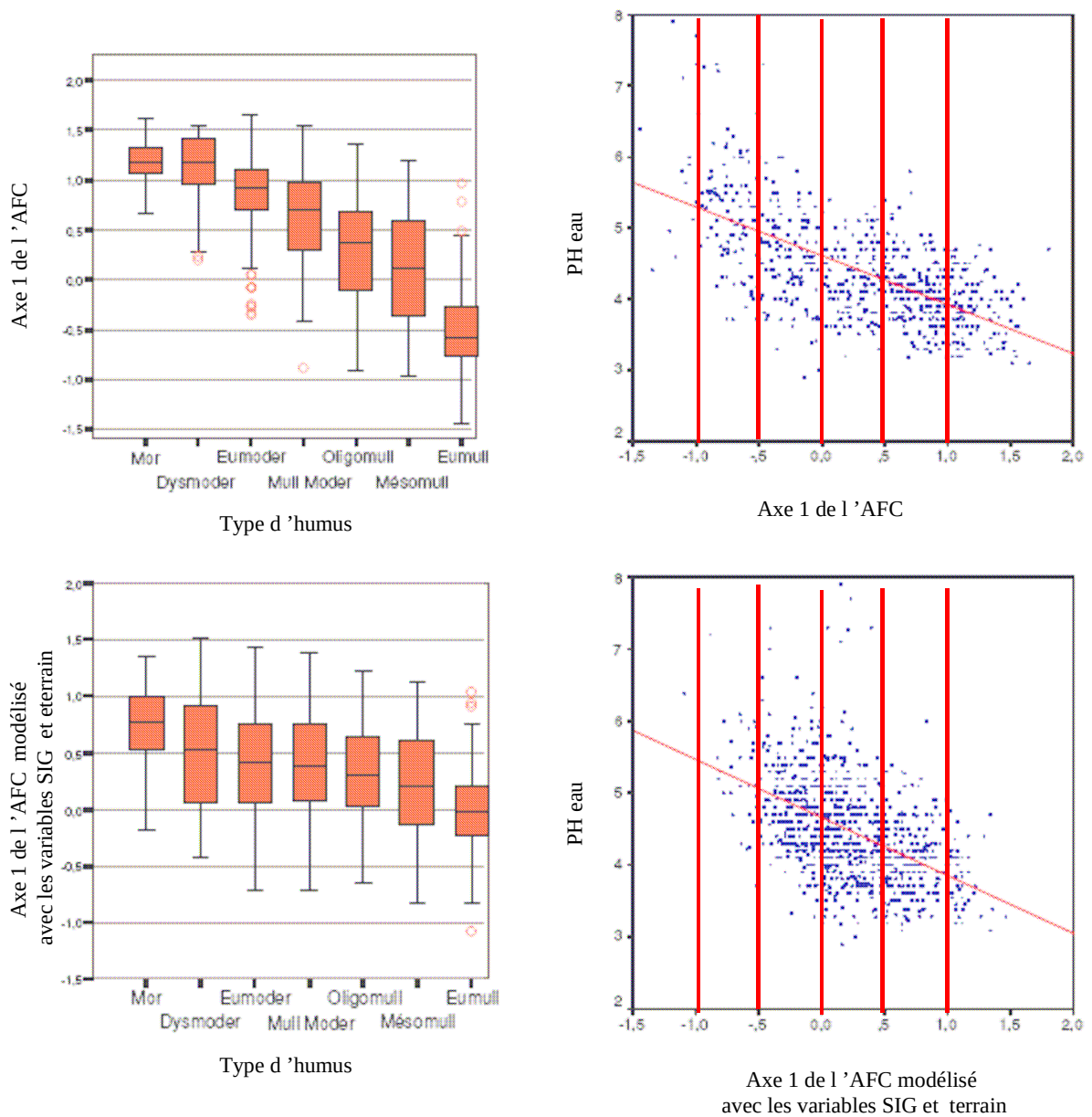


Figure 5 : relation entre les coordonnées factorielles réelles des relevés sur l'axe 1 (trophique) de l'AFC et les coordonnées prédites par les variables SIG. Les limites des classes de niveau trophique sont représentées par des droites verticales.

Le lien entre les valeurs de niveau trophique observées sur l'axe de l'AFC puis modélisées par les variables spatialisées et des variables de niveau trophique classiquement déterminées sur les placettes (pH de l'horizon A et forme d'humus) est indiqué dans la Figure 5. Ce lien montre une vaste gamme de valeurs de pH et de types d'humus pour les indices modélisés de niveau trophique compris entre 0 et 0,5. Pour cette gamme de valeurs un diagnostic précis du niveau trophique nécessitera probablement une visite de terrain.

Il est possible d'indiquer les espèces les plus caractéristiques de chaque classe en observant les coordonnées des espèces dans l'AFC réalisée à partir des 2650 relevés floristiques (Tableau 7).

Classes de niveau trophique	Espèces les plus caractéristiques	Niveau trophique
1 – Hyperacidiphiles	<i>Calluna vulgaris</i> , <i>Leucobryum glaucum</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Pleurozium schreberii</i>	> 1
2 – Acidiphiles	<i>Deschampsia flexuosa</i> , <i>Dicranum scoparium</i> , <i>Melampyrum pratense</i> , <i>Polytrichum formosum</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i>	0,5 à 1
3 – Mésoacidiphiles	<i>Albies alba</i> , <i>Digitalis purpurea</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Lonicera periclymenum</i> , <i>Luzula luzuloides</i> , <i>Luzula sylvatica</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Prenanthes purpurea</i> , <i>Quercus petraea</i> , <i>Teucrium scorodonia</i>	0 à 0,5
4 – Acidiclinales	<i>Atrichum undulatum</i> , <i>Adenostyles alliaria</i> , <i>Anemone nemorosa</i> , <i>Athirium filix-femina</i> , <i>Coryllus avellana</i> , <i>Deschampsia cespitosa</i> , <i>Dryopteris filix-mas</i> , <i>Festuca altissima</i> , <i>Galeopsis tetrahit</i> , <i>Luzula pilosa</i> , <i>Milium effusum</i> , <i>Poa chaixii</i> , <i>Polygonatum verticillatum</i> , <i>Rumex arifolius</i> , <i>Sambucus racemosa</i> , <i>Senecio fuchsii</i>	0 à -0,5
5 – Neutrophiles	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Ajuga reptans</i> , <i>Brachypodium sylvaticum</i> , <i>Carex sylvatica</i> , <i>Epilobium montanum</i> , <i>Fragaria vesca</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Galium odoratum</i> , <i>Geranium robertianum</i> , <i>Hedera helix</i> , <i>Impatiens noli-tangere</i> , <i>Lamium galeobdolon</i> , <i>Melica uniflora</i> , <i>Mercurialis perennis</i> , <i>Paris quadrifolia</i> , <i>Plagiomnium multiflorum</i> , <i>Polygonatum multiflorum</i> , <i>Silene dioica</i> , <i>Stachys sylvatica</i> , <i>Stellaria nemorum</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Viola reichenbachiana</i> , <i>Viola riviniana</i>	-0,5 à -1
6 – Calcicoles	<i>Acer campestre</i> , <i>Cornus mas</i> , <i>Cornus sanguinea</i> , <i>Geum urbanum</i> , <i>Evonymus europaeus</i> , <i>Helleborus foetidus</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Melittis melissophyllum</i> , <i>Prunus spinosa</i>	< -1

Tableau 7 : présentation des espèces forestières indicatrices des classes de niveau trophique

Le rangement de ces espèces dans les classes facilite la réalisation des correspondances entre les types de station obtenus de façon automatique et ceux des catalogues de stations. Ils pourront d'autre part, permettre de conforter le diagnostic de terrain.

Les caractéristiques floristiques et édaphiques des classes de niveau trophiques modélisées et spatialisées sont synthétisées dans le Tableau 8.

Classe	Valeurs limites des classes de Niveau trophique	Type de végétation	Forme d'humus	Gamme de pH
1	> 1	Hyperacidiphile	Dysmoder – mor	< 4
2	0,5 à 1	Acidiphile	Moder	3,5 à 5,5
3	0 à 0,5	Mésoacidiphile	Mull moder – oligomull	4 à 5
4	-0,5 à 0	Acidicline	Mésomull	4,5 à 5,5
5	-1 à -0,5	Neutrophile	Eumull	5 à 6
6	< -1	Calcicole	Eumull calcique	> 6

Tableau 8 : classes créées à partir de l'estimation du niveau trophique par les variables spatialisées et principales caractéristiques floristiques et édaphiques.

3.2.1.4 Cartographie, évaluation du modèle

Il est désormais possible de calculer le modèle non plus sur les placettes de relevés d'EcoPlant, mais sur la totalité du jeu de données SIG, afin d'obtenir une carte de Niveau Trophique (Carte 10).

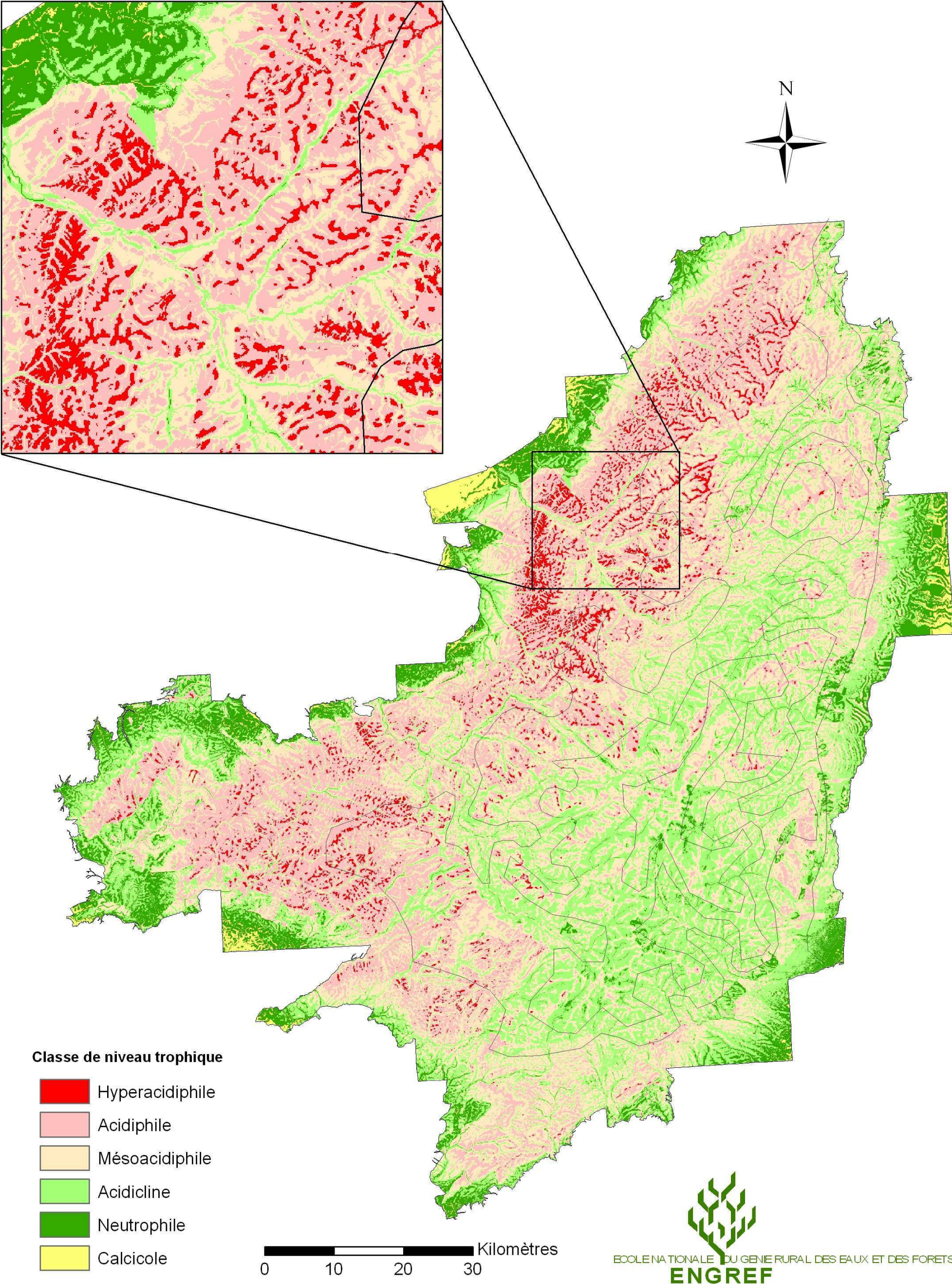
La carte présente en Annexe 2 représente la distribution des résidus standardisés des 951 enregistrements de la BD EcoPlant. Ce document témoigne d'une bonne dispersion des prédictions sur l'ensemble du terrain étudié sans qu'il ne soit réellement possible d'identifier des zones où les erreurs liées au modèle seraient plus importantes.

Nous allons maintenant examiner les prédictions du modèle réalisé avec les données de terrain puis uniquement avec les données SIG, une fois les valeurs discrétisées selon les classes définies ci-dessus. La matrice suivante (Tableau 9) met en relation la classe de niveau trophique « observée » (discrétisation sur la coordonnée d'axe d'AFC) avec la classe de niveau trophique « modélisé » (discrétisation sur la coordonnée d'axe d'AFC modélisée) pour chacun des deux modèles.

La matrice de reclassement montre que le modèle « SIG » s'avère produire 32,7 % de prédiction correcte. En toute logique le modèle réalisé avec les données de terrain est légèrement plus efficace (36,6%).

En regardant de plus près les capacités de prédiction des classes de niveau trophique de notre modèle SIG, on constate que le taux de prédiction correcte est particulièrement bas pour les niveaux hyperacidiphiles (13 %), neutrophiles (4,7 %) et nul concernant le niveau calcicole. Cette dernière observation s'explique d'une part par la seule présence de 12 placettes appartenant originellement à cette classe, et d'autre part par le fait que nous utilisons un indicateur de niveau trophique basé sur l'exploitation d'une AFC ayant évincé la plupart des relevés sur substrat calcaire. Les classes intermédiaires correspondant aux stations acidiphiles, mésoacidiphiles et acidiclinales sont mieux appréhendées avec respectivement 51,3 %, 48,9 % et 31,4 % de prédictions correctes.

Carte 10 : Modèle de niveau trophique des stations du massif vosgien

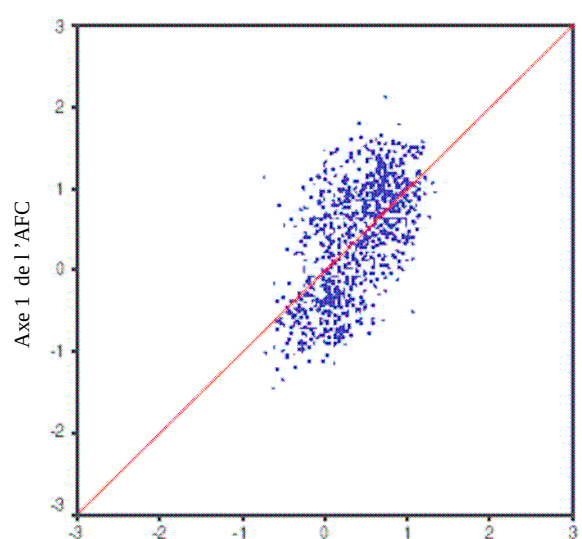


		Niveau trophique Prédit						Modalités observées correctement reclassées (%)
		1 – Hyperacidiphile	2 – Acidiphile	3 – Mésoacidiphile	4 – Acidicline	5 – Neutrophile	6 – Calcicole	
Niveau Trophique observé (AFC)	1 – Hyperacidiphile	40 25	99 113	43 46	3 7	0 1	0 0	23,9 13,0
	2 – Acidiphile	30 21	133 141	91 85	17 27	2 1	0 0	48,7 51,3
	3 – Mésoacidiphile	13 7	49 61	88 87	27 23	1 0	0 0	49,4 48,9
	4 – Acidicline	0 0	13 14	90 103	64 55	6 3	0 0	37,0 31,4
	5 – Neutrophile	0 1	2 4	47 59	60 57	17 6	0 0	13,4 4,7
	6 – Calcicole	0 0	0 0	3 2	5 6	3 4	1 0	8,3 0
	Modalités prédites correctement reclassées (%)	51,7 46,3	44,9 42,3	24,3 22,8	36,1 31,4	58,6 40,0	100,0 0	36,6 32,7

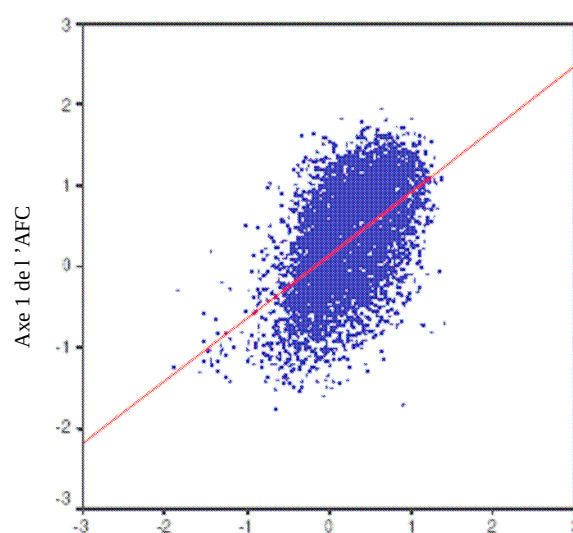
Tableau 9 : Matrice de reclassement des modalités de niveau trophique selon le modèle comprenant des données de terrain (en bleu) et le modèle constitué uniquement de données SIG (en noir).

3.2.1.5 Validation du modèle de niveau trophique

Les relevés phytoécologiques de base de l'IFN ont été repositionnés par rapport à l'axe 1 de l'AFC précédemment réalisée, puis la valeur prédite a été calculée à l'aide de l'équation réalisée uniquement avec des variables SIG présentée ci dessus (paragraphe 3.2.1.2). On obtient un R^2 de 0.277 entre la valeur initiale de l'axe 1 de l'AFC et la valeur modélisée, contre un R^2 de 0.362 obtenu avec le jeu de calibration. On observe que la difficulté de prédiction des valeurs extrêmes de l'axe 1 de l'AFC est clairement visible sur la *Figure 6*. Par contre, le nombre de relevés correctement reclassés est quasiment identique (32.8 contre 32.7% avec EcoPlant, *Tableau 10*)



Valeur prédite de l'axe 1 sur le jeu de calibration



Valeur prédite de l'axe 1 sur le jeu de validation

Figure 6 : Niveau trophique issu de l'axe 1 de l'AFC en fonction des valeurs prédites sur les jeux de calibration et de validation.

		Modalité Prédite						Modalités observées correctement reclassées (%)
		1 – Hyperacidiphile	2 – Acidiphile	3 – Mésoacidiphile	4 – Acidicline	5 – Neutrophile	6 – Calcicole	
Modalité observée (AFC)	1 – Hyperacidiphile	89 25	487 113	345 46	65 7	1 1	0 0	8,9 13,0
	2 – Acidiphile	75 21	576 141	729 85	235 27	9 1	0 0	35,5 51,3
	3 – Mésoacidiphile	28 7	334 61	715 87	463 23	28 0	2 0	45,5 48,9
	4 – Acidicline	7 0	145 14	511 103	562 55	60 3	3 0	43,6 31,4
	5 – Neutrophile	4 1	31 4	142 59	280 57	55 6	10 0	10,5 4,7
	6 – Calcicole	0 0	3 0	21 0	66 0	38 0	16 0	11,1 0
Modalités prédites correctement reclassées (%)		43,8 46,3	36,3 42,3	29,0 22,8	33,6 31,4	19,9 40,0	51,6 X	32,8 32,7

Tableau 10 : Matrice de reclassement des modalités de niveau trophique selon le jeu de calibration (EcoPlant, en bleu) et le jeu de validation (Base IFN, en noir).

L'utilisation du jeu de validation conduit à un moins bon reclassement des relevés hyperacidiphiles, acidiphiles, ou mésoacidiphiles, mais à un meilleur reclassement des relevés acidiclinales, neutrophiles ou calcicoles. Une des raisons de ces différences peut résider dans l'importance différence d'effectifs entre les deux bases ($n = 955$ pour EcoPlant, $n = 6175$ pour la base IFN). On obtient donc un R^2 plus faible avec le jeu de validation, mais un taux de bons reclassements équivalent.

Afin d'évaluer l'origine de cette baisse de R^2 , nous avons modélisé pas à pas les valeurs de l'axe 1 de l'AFC pour le jeu de l'IFN, sans la contrainte d'appliquer l'équation développée à l'aide du jeu de données EcoPlant. On obtient ainsi avec le jeu IFN une valeur de R^2 assez proche de celui obtenu avec EcoPlant (0.351 contre 0.362) et un modèle également très similaire (Tableau 11).

Variable	Modalité	Coeff.	t-value	Sign.
Géologie	Roche, classe b	-0,375	-18,407	0,000
	Roche, classe c	-0,575	-31,726	0,000
	Roche, classe d	-0,629	-19,320	0,000
	Roche, classe e	-1,047	-24,693	0,000
Indice de Dénivellation sur un rayon de 250 m.		-1,791 ^{E-3}	-12,531	0,000
Indice de Dénivellation Locale sur un rayon de 250 m.		0,253	6,703	0,000
Indice de Moore ($A \tan B$)		-3,971 ^{E-2}	-9,050	0,000
Distance euclidienne à la crête		-1,058 ^{E-4}	-16,998	0,000
Précipitations annuelles		3,425 ^{E-3}	13,564	0,000
Région naturelle	Vosges gréseuses lorraines, Vôge, Mille-Etangs	0,169	9,829	0,000

Tableau 11 : modélisation du niveau trophique sur le jeu de validation de l'IFN.

Comme pour l'équation développée avec le jeu de calibration, on retrouve les classes de niveau trophique hiérarchisées dans le même ordre, ainsi que ID et IDR sur des rayons de 250 m, l'indice de Moore, et l'effet des régions naturelles Vosges gréseuses lorraines, Vôge, et Mille-Etangs. La principale différence consiste en l'introduction des précipitations, qui acidifient le milieu. L'arrivée de cette variable est totalement logique, en complément des variables topographiques qui prédisent un sol plus riche en zone d'accumulation.

Par conséquent, nous pouvons conclure à une relative bonne stabilité de l'équation de niveau trophique entre le jeu de calibration et le jeu de validation, en dépit d'une baisse de R^2 non négligeable. En effet, on obtient à la fois une matrice de reclassement dans les modalités définies de qualité équivalente à celle initialement proposée, et le modèle développé librement sur la base IFN conduit à une équation très proche de celle proposée pour le jeu de calibration.

3.2.2 Modélisation du facteur bioclimatique

3.2.2.1 Elaboration du modèle bioclimatique

Le modèle SIG du gradient bioclimatique (axe 2 de l'AFC) est directement présenté car aucune variable saisie sur le terrain ne rentre dans l'équation (Tableau 12) :

Variable	Coeff.	t-value	Sign.
Latitude	34,516	9,941	0,000
Température annuelle au pas de 50 m.	-0,217	-8,794	0,000
Bilan hydrique climatique cumulé sur la période de végétation (avril-septembre)	1,477 ^{E-3}	11,766	0,000
Cosinus de l'exposition (opposition nord-sud)	6,483 ^{E-2}	4,220	0,000

Tableau 12 : coefficients et seuils de signification des variables écologiques de la régression multiple permettant d'expliquer les coordonnées factorielles des relevés sur l'axe 2 de l'AFC $N = 951$ relevés, $R^2 = 0,721$

L'indice bioclimatique augmente lorsqu'on monte en altitude (la température baisse, le bilan hydrique devient de plus-en-plus favorable), lorsqu'on se situe en exposition nord, ou lorsque la latitude augmente.

3.2.2.2 Découpage en classes du facteur bioclimatique en vue de la typologie des stations

Le lien entre les valeurs prédites de l'axe 2 (bioclimatique) de l'AFC et les valeurs réelles n'est pas linéaire : lorsque les valeurs modélisées sont faibles, les valeurs réelles varient fortement, lorsqu'elles sont fortes, les valeurs réelles varient plus faiblement (Figure 7).

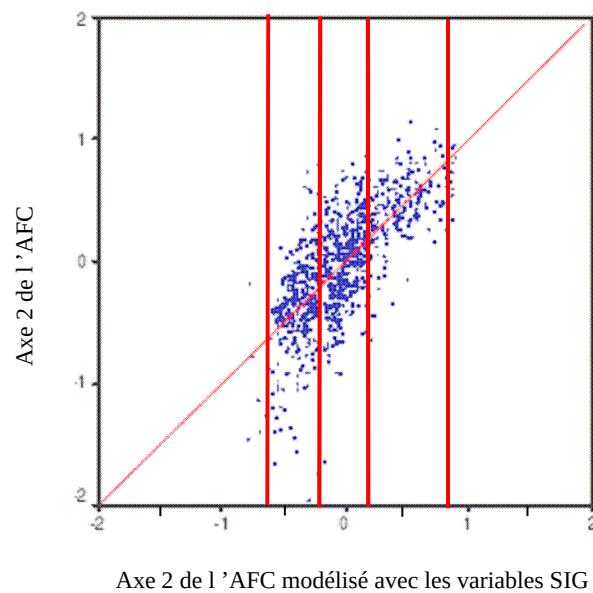


Figure 7: relation entre les coordonnées factorielles réelles des relevés sur l'axe 2 (climatique) de l'AFC et les coordonnées prédites par les variables spatialisées. Les limites des classes de bioclimat sont représentées par des droites verticales.

La relation entre l'indice bioclimatique modélisé et l'altitude est assez nette (Figure 8). Les variations autour de la droite de régression sont dues, pour une même altitude, à l'imprécision du modèle mais aussi et surtout aux variations spatiales d'exposition, de température et de bilan hydrique pour une même altitude.

Ainsi pour une altitude donnée, la valeur de l'indice est faible en exposition sud et élevée en exposition nord (Figure 8). Inversement, pour une valeur de l'indice bioclimatique, les sites exposés au sud seront à altitude plus élevée que ceux exposés au nord. Les étages bioclimatiques définis dans le cadre de ce projet se trouveront donc à des gammes d'altitude variables en fonction de la situation géographique et de l'exposition.

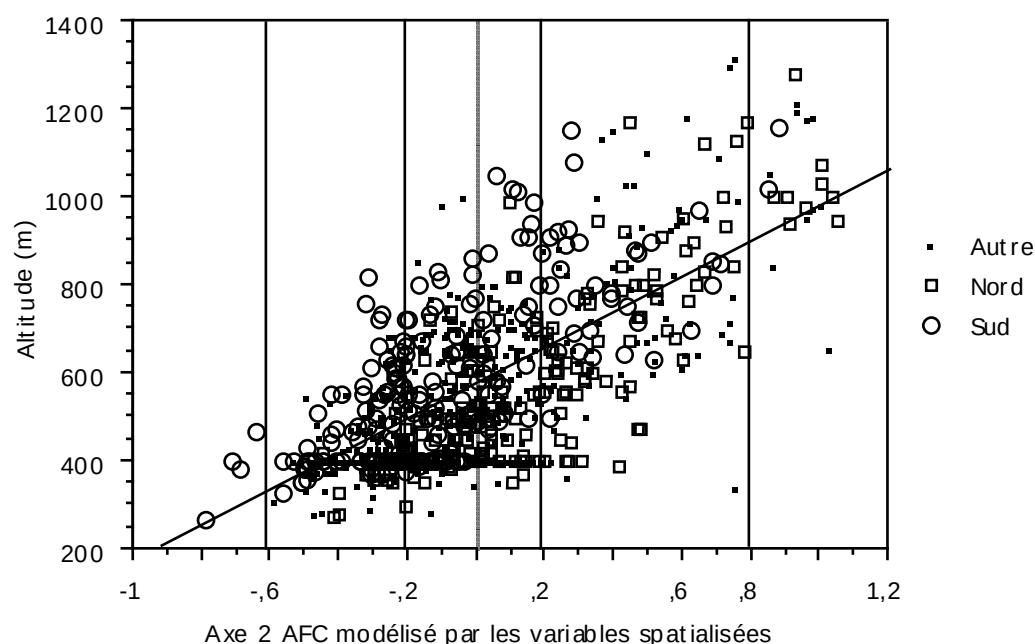


Figure 8 : relation entre l'altitude et l'indice bioclimatique modélisé par les variables spatialisées. Les limites des classes sont figurées par des droites verticales.

Les limites des classes ont été positionnées de façon à tenir compte de la relation entre les coordonnées des relevés sur l'axe climatique de l'AFC et les coordonnées modélisées : les classes de valeurs faibles ont été créées avec une amplitude relativement étroite pour tenir compte du fort changement de végétation pour ces valeurs.

La limite de la première classe isole les sites les plus chauds de l'étage collinéen localisés le plus souvent dans les collines sous-vosgiennes alsaciennes et correspondant à des milieux particuliers (chênaies pubescentes dans les cas extrêmes). La limite de la dernière classe a été positionnée pour isoler les placettes d'altitude les plus élevées correspondant à l'étage subalpin. Enfin deux classes ont été créées à l'étage montagnard, l'une correspondant au montagnard inférieur et l'autre au montagnard moyen et supérieur. L'ensemble de ces informations est résumé dans le *Tableau 13*.

Classe	Valeurs limite des classes de la variable modélisée	Etage bioclimatique	Gamme d'altitudes
1	< -0,6	Collinéen chaud	<600 m
2	-0,6 à -0,2	collinéen	<600 m
3	-0,2 à 0,2	Montagnard inférieur	400 - 800
4	-0,2 à 0,8	Montagnard	600 - 1000
5	>0,8	Subalpin	>900

Tableau 13 : étages bioclimatiques créées à partir de l'estimation du facteur bioclimatique par les variables spatialisées.

Les espèces caractéristiques de ces quatre étages peuvent être déterminées grâce aux résultats de l'AFC. Elles sont mentionnées dans le *Tableau 14*. Les espèces de l'étage le plus chaud se trouvent à l'étage collinéen dans les conditions les plus chaudes. Les espèces des étages collinéen et montagnard inférieur ont souvent une assez large amplitude. Les espèces de l'étage montagnard sont typiques de cet étage. Enfin les espèces de l'étage subalpin n'apparaissent qu'à proximité des crêtes vosgiennes.

Esp. Collinéennes xerocline.	Collinéennes	Esp. Collin./montagn.	Esp. Montagnardes	Esp. subalpines
Acer campestre Anthoxanthum odorat. Berberis vulgaris Brachypodium sylvat. Calluna vulgaris Castanea sativa Convallaria majalis Cornus sanguinea Crataegus laevigata Crataegus monogyna Fragaria vesca Hieracium murorum Lathyrus montanus Ligustrum vulgare Lonicera xylosteum Melampyrum pratense Melica nutans Melittis melissophyll. Pleurozium schreberii Polygonatum odorat. Polypodium vulgare Primula veris Prunus spinosa Quercus pubescens Rosa arvensis Rosa canina Sesleria coerulea Stellaria holostea Teucrium chamaedris Teucrium scorodonia Viburnum lantana Vicia sepium Vincetoxicum hirund.	Alliaria petiol. Carpinus betul. Hedera helix Holcus mollis Leucobryum gl. Lonicera per. Pinus sylvestris Poa nemoralis Polygonatum multiflorum Quercus petraea	Anemone nem. Atrichum undul. Carex sylvatica Coryllus avellan. Deschampsia ce. Fagus sylvatica Luzula pilosa Melica uniflora	Abies alba Acer pseudoplatanus Athyrium filix-mas Digitalis purpurea Dryopteris carthusiana Dryopteris dilatata Dryopteris filix-mas Festuca altissima Impatiens noli-tang. Miliun effusum Oxalis acetosella Plagiomnium undul. Polygonatum vertic. Prenanthes purpurea Rubus idaeus Senecio fuchsii Silene dioica	Adenostyles alliariae Aruncus dioicus Athyrium distentif. Chrysosplenium alt. Chrysosplenium op. Cicerbita alpina Lunaria rediviva Rosa pendulina Rumex arifolius Stellaria nemorum

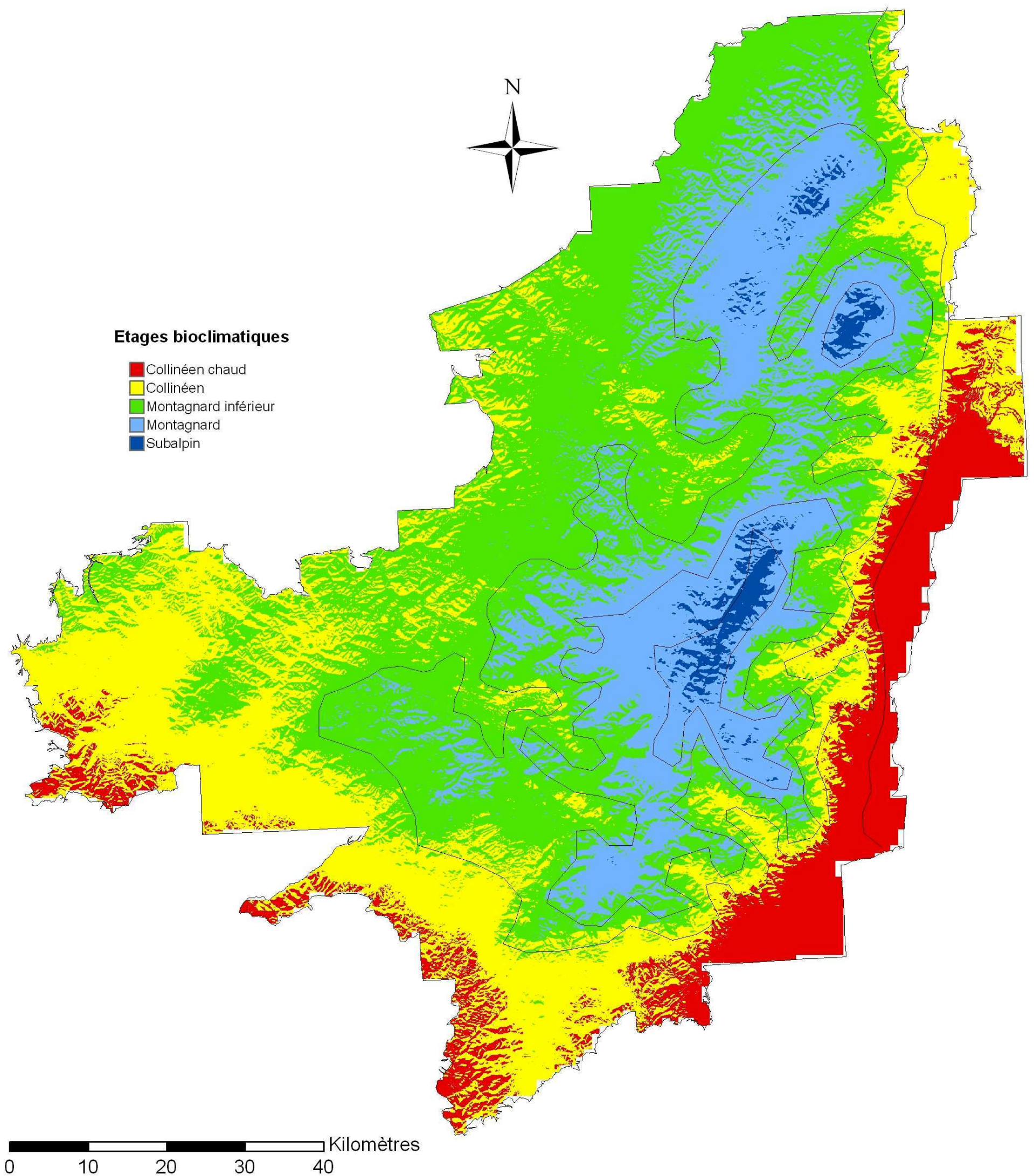
Tableau 14 : présentation des espèces forestières indicatrices des conditions bioclimatiques

3.2.2.3 Cartographie, évaluation du modèle

La spatialisation du modèle est présentée en Carte 11. La cartographie des résidus (Annexe 3) montre la distribution des résidus standardisés. On constate une dispersion assez homogène des résidus hormis en ce qui concerne les marges du massif où les prédictions sont moins bonnes. L'utilisation des variables de position topographique ou de l'indice de dénivellation ne sont cependant pas intervenus dans le modèle.

La matrice suivante (Tableau 15) met en relation l'indice bioclimatique « observé » (discrétisation sur la coordonnée d'axe d'AFC) avec la classe d'indice bioclimatique « modélisé » (discrétisation sur la coordonnée d'axe d'AFC modélisée) :

Carte 11 : Modèle de bioclimat dans le massif vosgien



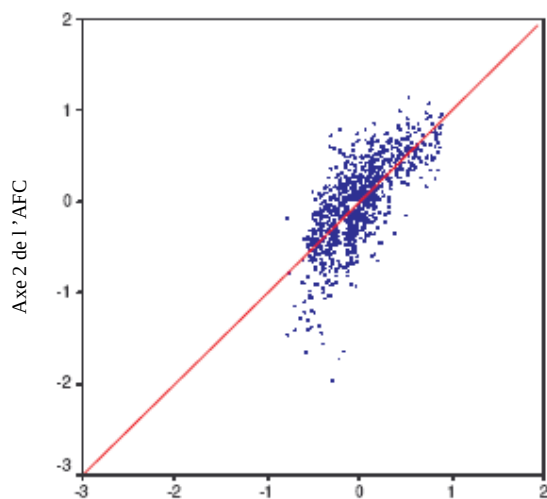
		Modalité Prédite					Modalités observées correctement reclassées (%)
		1 – Collinéen chaud	2 – Collinéen	3 – Montagnard inférieur	4 – Montagnard	5 – Subalpin	
Modalité observée (AFC)	1 – Collinéen chaud	7	62	15	1	0	8,2
	2 – Collinéen	0	158	95	4	0	61,5
	3 – Montagnard inférieur	1	82	203	22	0	65,9
	4 – Montagnard	0	16	120	139	13	48,2
	5 – Subalpin	0	0	1	14	5	25,0
Modalités prédites correctement reclassées (%)		87,5	49,7	46,8	77,2	27,8	53,4

Tableau 15 : Matrice de reclassement des modalités de bioclimat selon le jeu de données d'EcoPlant.

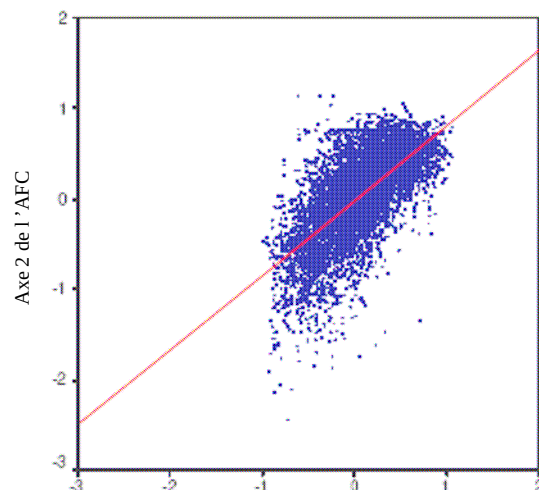
Avec 53,4% de prédictions correctes, le reclassement des modalités s'avère plutôt satisfaisant, principalement pour les étages du collinéen et du montagnard inférieur, qui dépassent 60% de bons reclassements. Le collinéen chaud est le plus mal prédit avec 8.2% de prédictions correctes. Les erreurs de prédiction de plus d'une classe sont rares.

3.2.2.4 Validation du modèle

L'application du modèle réalisé précédemment avec les données SIG sur la base de donnée de validation de l'IFN conduit à un R^2 de 0.437 contre 0.519 avec le jeu de calibration (Figure 9), et un taux de reclassement de 50.2% contre 53.4%, avec une meilleure prédiction du collinéen chaud mais une moins bonne prédiction du subalpin (Tableau 16).



Indice bioclimatique prédit avec le jeu de calibration



Indice bioclimatique prédit avec le jeu de validation

Figure 9 : Bioclimat issu de l'axe 2 de l'AFC en fonction des valeurs prédites sur les jeux de calibration et de validation.

		3.2.2.4.1.1.1 Modalité Prédite (OLS)					Modalités observées correctement reclassées (%)
		1 – Collinéen chaud	2 - Collinéen	3 – Montagnard inférieur	4 - Montagnard	5 - Subalpin	
Modalité observée (AFC)	1 – Collinéen chaud	163 7	356 62	115 15	10 1	0 0	25,3 8,2
	2 – Collinéen	88 0	539 158	485 95	69 4	2 0	45,6 61,5
	3 – Montagnard inférieur	26 1	341 82	1005 203	412 22	9 0	56,1 65,9
	4 – Montagnard	5 0	128 16	725 120	1281 139	116 13	56,8 48,2
	5 - Subalpin	1 0	6 0	19 1	62 14	8 5	8,3 25,0
Modalités prédites correctement reclassées (%)		57,6 87,5	39,3 49,7	42,8 46,8	69,8 77,2	5,9 27,8	50,2 53,4

Tableau 16 : Matrice de reclassement des modalités de bioclimat selon le jeu de calibration (EcoPlant, en noir) et le jeu de validation (Base IFN, en bleu).

La réalisation d'une nouvelle équation par la méthode du pas à pas conduit à une équation caractérisée par un R^2 de 0.496 (Tableau 17).

Variable	Coeff	t-value	Sign.
Latitude	23,417	23,193	0,000
Température annuelle	-6,794 ^{E-2}	-6,476	0,000
Bilan hydrique climatique cumulé sur la période de végétation (avril-septembre)	1,403 ^{E-3}	26,934	0,000
Indice de Dénivellation sur un rayon de 1500 mètres	7,453 ^{E-4}	23,114	0,000
Cosinus de l'exposition (opposition nord-sud)	5,306 ^{E-2}	8,107	0,000

Tableau 17 : modélisation du bioclimat avec le jeu de données de l'IFN.

On observe que les variables sont identiques à celles utilisées pour l'élaboration de l'équation sur le jeu de calibration, hormis l'indice de dénivellation qui nous indique un indice bioclimatique qui est plus important dans les zones de fort relief, ce qui est cohérent avec le modèle précédemment établi.

Comme pour le niveau trophique, la validation de l'indice bioclimatique se traduit par une baisse du R^2 associé au modèle, mais un taux de reclassement sensiblement identique à celui élaboré sur le jeu de calibration. D'autre part, l'équation réalisée avec le jeu de calibration est très proche de l'équation initiale.

3.2.3 Modélisation des réserves en eau du sol

Pour évaluer la réserve en eau des stations forestières, les typologies utilisent des critères simples relatifs à l'épaisseur du sol et parfois à l'exposition ou à la situation sur les pentes. La réserve utile étant plus pertinente que l'épaisseur du sol pour évaluer l'eau disponible pour les plantes, c'est cette variable qui a été plus particulièrement étudiée. Lorsque la topographie est marquée comme c'est le cas dans le massif vosgien, les bilans latéraux en eau ont d'autre part un effet important dans les réserves du sol disponibles pour les plantes. Les apports et les départs d'eau liés à la topographie étant difficiles à déterminer, ils ont été évalués au travers d'une étude bibliographique par leurs effets sur la croissance des essences. Enfin, l'aspect climatique du bilan hydrique n'est pas abordé dans cette partie car il a été pris en compte dans la modélisation du bioclimat effectuée précédemment.

3.2.3.1.1 Modélisation et validation de la réserve utile

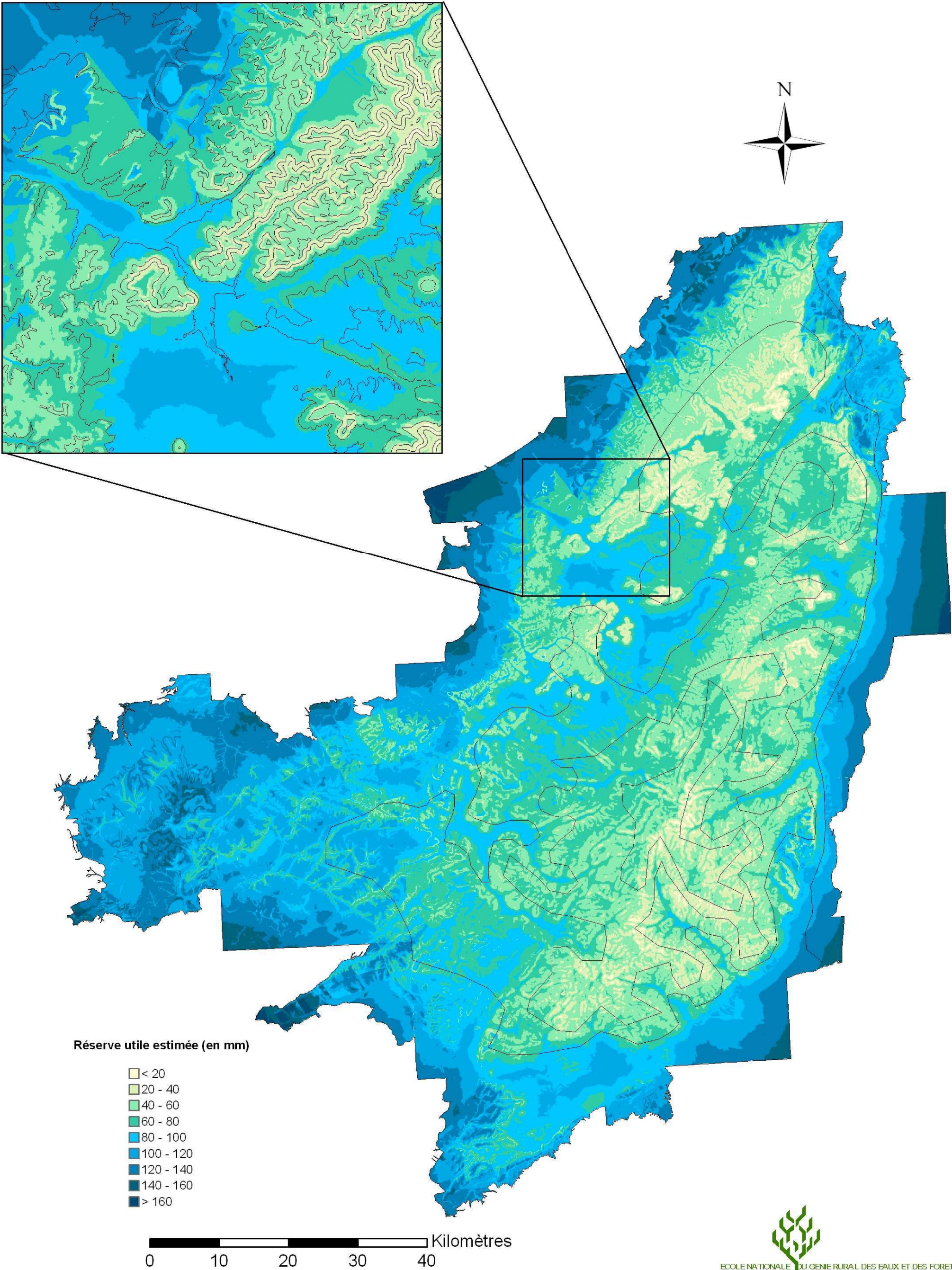
3674 relevés de la base de données de l'IFN pour lesquels les réserves utiles ont été calculées ont été utilisés pour créer le jeu de données de calibration permettant l'élaboration du modèle (Tableau 18).

Variable	Modalité	Coeff.	t-value	Sign.
Constante		104,266	50,861	0,000
Indice de Dénivellation sur un rayon de 250 m.		-0,188	-13,096	0,000
Indice de Dénivellation sur un rayon de 2000 m.)		-4,645 ^{E-2}	-9,487	0,000
Distance euclidienne à la crête (m.)		5,151 ^{E-3}	10,083	0,000
Géologie	Conglomérat principal acide	-32,607	-9,711	0,000
	Grès Vosgiens acides	-18,645	-10,733	0,000
	Grès intermédiaires moyennement acide	-12,733	-4,892	0,000
	Grès à Voltzia moyennement acide	14,949	5,889	0,000
	Roches sédimentaires basiques	18,585	4,960	0,000
	Grès coquilliers neutres	30,585	8,533	0,000

Tableau 18 : Modélisation de la réserve utile (R^2 0.433)

On obtient un modèle de réserve utile qualifié par un R^2 de 0.433 (Figure 10) et qui est déterminée à la fois par la topographie et par la géologie (Carte 12).

Carte 12 : Modèle de réserve utile des substrats géologiques du massif vosgien



Trois indices topographiques sont significatifs, dont les indices de dénivellation sur des rayons de 250 ou de 2000 mètres, qui interviennent de façon négative. Cela signifie que plus la RU sera d'autant plus élevée si la topographie est plane à fine échelle (rayon de 250 mètres) et à échelle un peu plus large (rayon de 2000 mètres), surpondérant les valeurs de réserve utile dans les plaines, fonds de vallées ou sur des petits plateaux ou des replats de versant. Cet indice est pondéré par la distance à la crête, la valeur de RU est d'autant plus forte qu'on est éloigné de la crête. On constate une certaine similitude avec le modèle de niveau trophique, la topographie jouant probablement un rôle comparable en terme de niveau chimique que de profondeur utile.

Un certain nombre de substrats interviennent positivement ou négativement sur la réserve utile. La présence de conglomérat principal acide diminue de 32 mm la réserve en eau, la présence de grès vosgiens acides de 18mm, tandis que les roches sédimentaires basiques augmentent la RU de 18mm et les grès coquilliers neutres l'augmentent de 30 mm. Ces valeurs sont cohérentes avec les connaissances granulométriques dont on dispose sur ces roches.

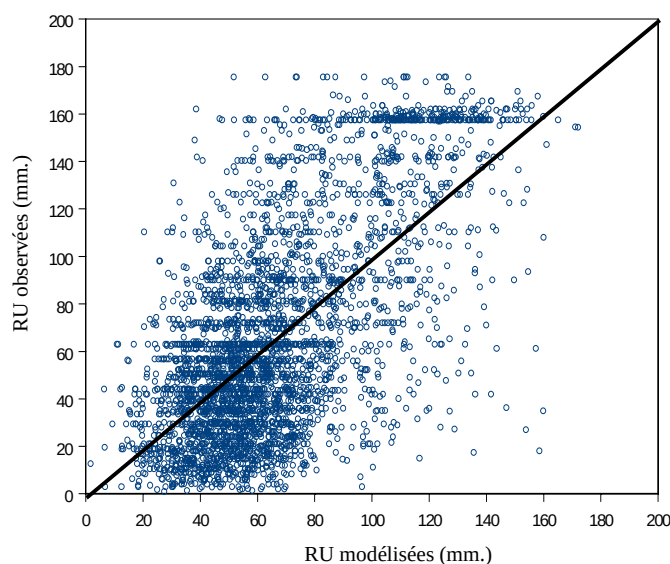


Figure 10 : réserves utiles modélisées en fonction des valeurs mesurées.

L'équation réalisée avec les 3674 relevés de la base de l'IFN a été validée avec les 40% des points qui n'ont pas été utilisés pour la calibration du modèle, soit 2501 relevés tirés au hasard. En appliquant l'équation sur ce jeu, on obtient un R^2 de 0.421 contre 0.433 avec le jeu de calibration, soit une différence très faible. L'équation initialement proposée est donc valide sur ce jeu de données indépendant.

3.2.3.1.2 Modélisation du bilan latéral en eau

La spatialisation du bilan des apports latéraux passe par la modélisation de la position topographique estimée pour le terrain sur les relevés de la base EcoPlant, à l'aide de données SIG. Dans un premier temps, les positions topographiques notées sur le terrain ont été synthétisées selon trois modalités, départ, équilibre, et apports. (Tableau 19).

Modalités	Modalités topographiques (codification ECOPLANTE)
1 - Départ	1 – Sommets, buttes ou croupes 7 – Tiers supérieur de versant
2 - Equilibre	3 – Plateau ou zone plate 8 – Milieu de versant 15 – Autre situation de vallée 16 – Position non déterminée sur le versant
3 – Apports	9 – Tiers inférieur de versant 11 – Replat de versant 12 – Vallon 4 – Dépression 5 – Lit majeur

Tableau 19 : correspondance entre les modalités topographiques codées sur le terrain dans la base EcoPlant et le bilan en eau.

L'indice ainsi créé comprend trois classes avec une classe correspondant à un départ d'eau (situations de haut de pente et de convexité marquée), une classe d'apport et de départs équilibrés (zone plane ou de milieu de versant rectiligne), une classe d'apports correspondant à des situations de concavité et de partie inférieure de versant. La synthèse bibliographique précédemment réalisée nous permet de faire correspondre à chaque classe de drainage latéral un équivalent en terme de réserve utile : -30 mm pour les zones de départ d'eau, 0 mm pour les zones d'équilibre, et +60 mm. pour les zones d'apport.

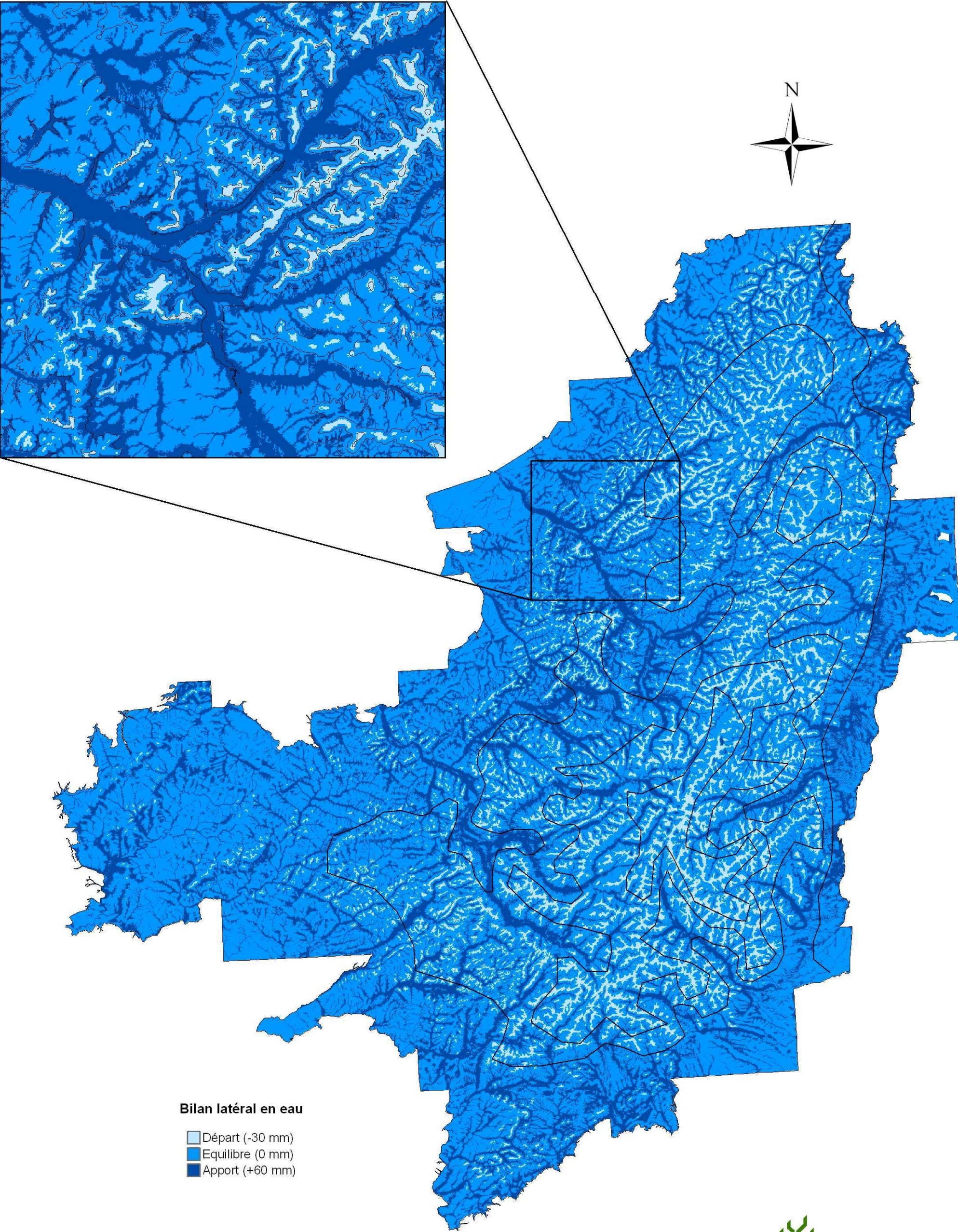
Le modèle polynomial permet de proposer une équation à trois paramètres caractérisée par un pseudo R^2 de Mac Fadden de 0.112 (Tableau 20).

Modalité	Variable	Coeff.	Err. Std	Wald	ddl	Sign.
Départ	Constante	-0,926	0,302	9,427	1	0,002
	Curv150	2,659	0,452	34,572	1	0,000
	IDR rayon 1500 m.	3,410	0,469	52,953	1	0,000
	Indice de Moore (A_tan_B)	-0,395	0,062	40,122	1	0,000
Equilibre	Constante	0,459	0,233	3,868	1	0,049
	Curv150	1,327	0,360	13,620	1	0,000
	IDR rayon 1500 m.	1,379	0,374	13,562	1	0,000
	A_tan_B	-0,176	0,038	21,744	1	0,000

Tableau 20 : modèle de l'indice de drainage latéral en eau du à la topographie par les variables spatialisées. N=1200

L'indice de forme de relief (curve) calculé à une résolution de 150 mètres, l'Indice de dénivelé local qui caractérise la position du pixel par rapport à l'environnement, calculé ici sur un rayon de 1500 mètres, et l'indice de Moore, qui caractérise l'apport d'eau potentiel à la placette. Plus le terrain est convexe, plus on est situé haut dans l'environnement, et moins on est en position drainante, plus on est situé en zone de départ d'eau (Carte 13).

Carte 13 : Modèle de bilan latéral en eau



Bilan latéral en eau

- Départ (-30 mm)
- Equilibre (0 mm)
- Apport (+60 mm)

0 10 20 30 Kilomètres

L'application de l'équation permet le reclassement selon les trois modalités (*Tableau 21*) :

		Modalité Prédite			Modalités observées correctement reclassées (%)
		Départ	Equilibre	Apports modérés	
Modalité observée	Départ	108	190	12	34,8
	Equilibre	56	452	48	81,3
	Apports	20	184	127	38,4
Modalités prédites correctement reclassées (%)		58,7	54,7	67,9	57,4

Tableau 21 : matrice de reclassement entre les apports en eau codés sur le terrain et ceux prédits par le modèle.

On obtient un taux de prédiction de 57.4 %, avec une prédominance de bons reclassements pour la modalité d'équilibre, avec plus de 80% de prédictions correctes. Ce sont les meilleurs résultats ayant pu être obtenus, deux autres méthodes ayant été évaluées, à partir du modèle topographique « Positopo », et directement à partir de l'indice de Moore, avec de moins bons résultats (Cornu, 2004).

3.2.3.2 Validation du bilan latéral en eau

Le bilan latéral en eau a été validé à l'aide des relevés de l'IFN. Pour cela, une correspondance entre les positions topographiques relevées sur le terrain par l'IFN et les trois classes de drainage ont été établies (*Tableau 22*).

Modalité du BLE-2	Modalités topographiques concernées (codification ECOPLANTE)	Modalités topographiques concernées (codification IFN)
1 - Départ	1 – Sommets, buttes ou croupes 7 – Tiers supérieur de versant	1 – Sommet 2 – Hauts de versant 5 – Mi-versant convexe
2 - Equilibre	3 – Plateau ou zone plate 8 – Milieu de versant 15 – Autre situation de vallée 16 – Position non déterminée sur le versant	3 – Mi-versant concave 4 – Mi-versant rectiligne
3 – Apports	9 – Tiers inférieur de versant 11 – Replat de versant 12 – Vallon 4 – Dépression 5 – Lit majeur	7 – Bas de versant 6 – Replat 8 – Vallée large 9 – Dépression, vallon étroit 0 – Terrain plat

Tableau 22 : correspondance entre les classes de bilan latéral en eau, et les modalités topographiques d'EcoPlant et de la base IFN.

L'application du modèle calculé précédemment conduit à l'élaboration de la matrice de confusion suivante (*Tableau 23*) :

		Modalité Prédite			Modalités observées correctement reclassées (%)
		Départ	Equilibre	Apports modérés	
Modalité observée	Départ	320 108	695 190	30 12	30,6 34,8
	Equilibre	319 56	2639 452	270 48	81,7 81,3
	Apports	65 20	1230 184	596 127	31,5 38,4
Modalités prédites correctement reclassées (%)		45,5 58,7	57,8 54,7	66,5 67,9	57,7 57,4

Tableau 23 : Matrice de reclassement des modalités du bilan latéral en eau en fonction du jeu de calibration EcoPlant (en bleu) et du jeu de validation de l'IFN (en noir).

Le taux de bonnes prédictions est quasiment identique avec la base de données de validation qu'avec celle ayant servi à la calibration, bien que les relevés en zone de départ et d'équilibre aient été légèrement moins bien prédits.

3.2.3.3 Modélisation de la réserve en eau disponible pour les plantes

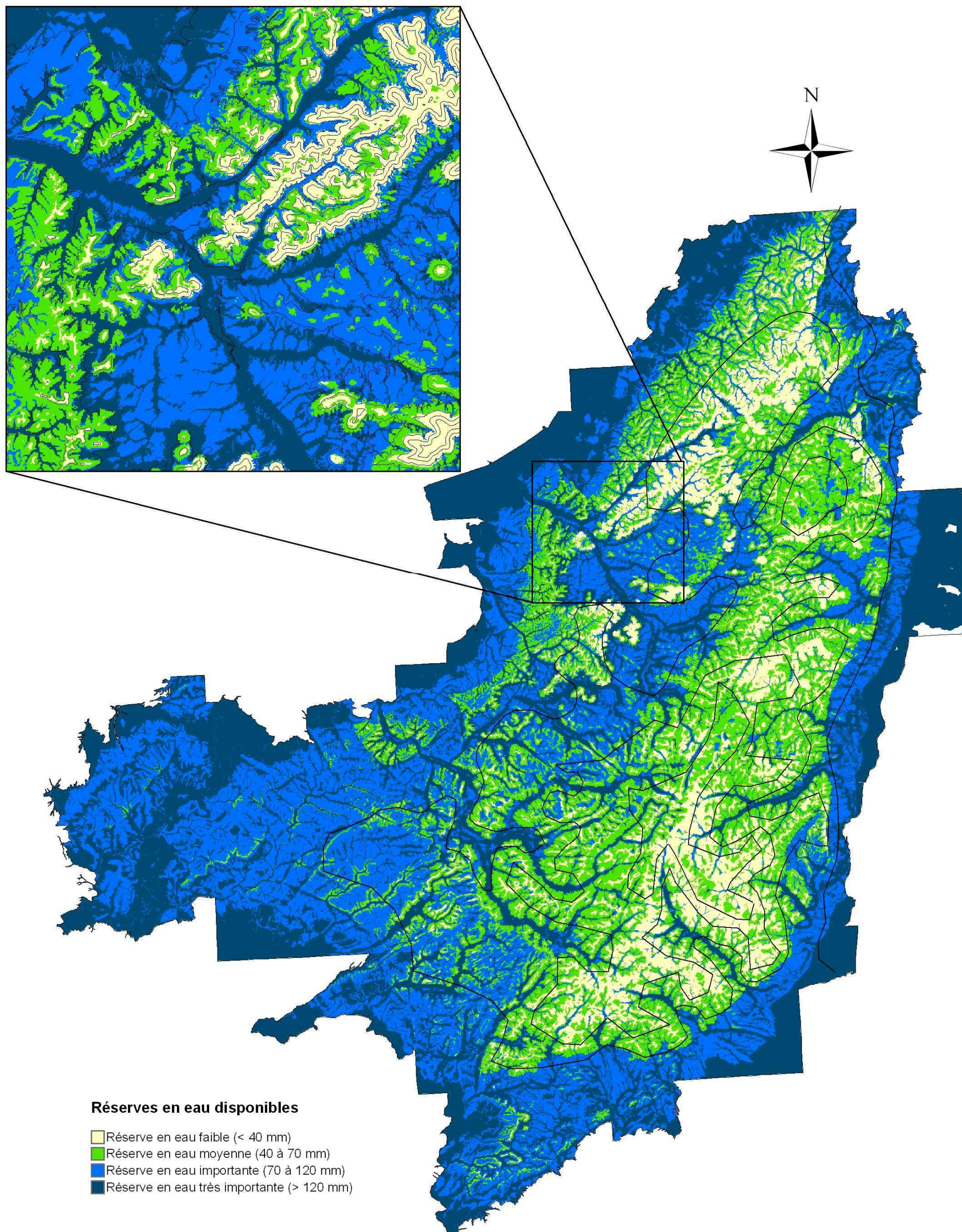
La réserve utile et l'indice de drainage latéral en eau étant exprimés en mm, il est possible d'additionner les valeurs obtenues avec chacun de ces modèles pour obtenir un indice de réserve en eau disponible pour les plantes. A la valeur de réserve utile précédemment calculée ont donc été ajoutés une valeur de -30, 0 ou +60 mm., selon si on est en position de départ, d'équilibre, ou d'arrivée d'eau. Ces valeurs ont été approximées en fonction de l'étude bibliographique présentée au paragraphe 3.1.4 .

La réserve utile du sol et l'estimation de l'indice de bilan latéral en eau ont été calculés de façon cohérente. Par contre, la conversion de l'indice topographique en valeur de réserve utile, bien que cohérent avec son effet sur la croissance des essences, est en partie arbitraire. Les valeurs obtenues pour l'indice final sont de ce fait probablement en partie erronées. Les valeurs de réserve en eau obtenues semblent cependant relativement liées avec la topographie (Carte 13), bien qu'il soit difficile de s'étalonner sur des mesures de terrain pour vérifier cette variable. L'intérêt de cette donnée est cependant certainement comparable et peut être meilleur que les indications données dans les catalogues sur l'épaisseur des sols pour distinguer les types de stations.

3.2.3.4 Découpage de la variable de réserve en eau modélisée dans le cadre de la réalisation de la typologie des stations

Quatre classes de réserve en eau peuvent être élaborées à partir de l'indice obtenu par modélisation, en s'aidant de l'histogramme de répartition des effectifs (Figure 11). La première, inférieure à 40 mm correspond aux situations de haut de pente ou de convexités marquées. Elle regroupe environ 26% des 3674 placettes de la base de l'IFN utilisée pour la modélisation des RU. La seconde classe comprend les valeurs comprises entre 40 et 70 mm et correspond à des situations de bilan latéral en eau équilibré. 35 % des placettes de la base rentrent dans cette classe. La troisième classe s'étend de 70 à 120 mm de réserve en eau. Elle correspond aux situations de bas de pente présents dans environ 23 % des placettes de la base. La quatrième et dernière classe, présente dans seulement 16 % des placettes, correspond aux situations les plus favorable le plus souvent en fond de vallon ou en bord de ruisseau. La répartition spatiale de ces classes est indiquée dans la carte 14.

Carte 14 : Modèle de distribution spatiale de la réserve en eau disponible pour les plantes sur le massif vosgien



0 10 20 30 40 Kilomètres

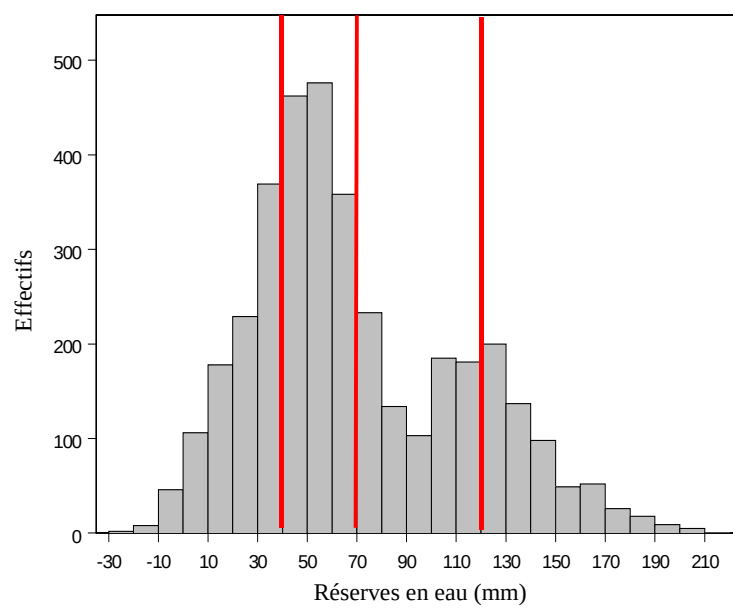


Figure 11 : découpage des classes de réserve en eau

4 CARTOGRAPHIE PREDICTIVE DES STATIONS

La typologie des stations est réalisée très simplement en combinant les classes définies pour chacune des trois variables modélisées. Le niveau trophique ayant été découpé en 6 classes, le bioclimat en 5 et la réserve en eau en 4 classes, 120 types de stations (6*5*4) peuvent être définis théoriquement.

La nomenclature adoptée pour la numérotation des stations est indiquée dans le tableau suivant (Tableau 24) :

Niveau trophique		Bioclimat		Réserve en eau du sol	
Très acide	1	Collinéen chaud	1	Réserve faible <40 mm	1
acide	2	Collinéen	2	Réserve moyenne : 40-70mm	2
Peu acide	3	Montagnard inférieur	3	Réserve importante : 70-120 mm	3
Faiblement acide	4	Montagnard	4	Réserve très importante >120 mm	4
neutre	5	Subalpin	5		
calcaire	6				

Tableau 24 : nomenclature des classes créées pour découper les 3 facteurs écologiques utilisés pour réaliser la typologie automatique des stations.

Un site très acide situé à l'étage collinéen avec une réserve utile moyenne sera donc codée 122 alors qu'un site en milieu neutre à l'étage montagnard avec une réserve utile importante sera codé 543.

		Niveau trophique								Niveau trophique					
		1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole			1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
Bioclimat	Rés. en eau							Bioclimat	Rés. en eau						
5 - Subalpin	1-faible	0	0	5	0	1		5 - Subalpin	1-faible	1	12	19	10	1	
	2-moderée	0	0	5	5	0			2-moderée	1	12	34	22	0	
	3-forte	0	2	0	2	1			3-forte	0	2	6	4	1	
	4-très forte	0	0	0	0	0			4-très forte	0	0	1	4	0	
4 - Montagnard	1-faible	3	18	36	16	3		4 - Montagnard	1-faible	42	146	237	142	10	
	2-moderée	2	21	31	23	0			2-moderée	20	204	273	243	0	
	3-forte	1	8	10	1	2			3-forte	6	99	154	49	9	
	4-très forte	0	2	2	5	0			4-très forte	0	19	63	100	5	
3 - Mont. <	1-faible	10	17	33	10	2	0	3 - Mont. <	1-faible	38	106	162	85	3	0
	2-moderée	13	47	53	15	1	0		2-moderée	61	289	281	245	0	0
	3-forte	10	68	47	9	3	0		3-forte	51	533	406	94	10	0
	4-très forte	0	6	35	34	3	0		4-très forte	1	151	421	390	159	45
2 - Collinéen	1-faible	0	9	6	3	0	0	2 - Collinéen	1-faible	2	20	46	18	0	0
	2-moderée	4	32	31	13	0	0		2-moderée	7	58	115	101	0	0
	3-forte	13	71	43	7	2	0		3-forte	27	374	349	179	19	0
	4-très forte	0	28	38	23	2	0		4-très forte	0	89	349	383	228	52
1 - Coll. chaud	1-faible	0	1	0	0	0	0	1 - Coll. chaud	1-faible	0	4	4	0	0	0
	2-moderée	0	4	0	3	0	0		2-moderée	0	9	22	12	0	0
	3-forte	0	0	4	1	0	0		3-forte	0	32	142	108	15	0
	4-très forte	0	0	3	1	1	0		4-très forte	0	7	95	264	163	18

Figure 12 : répartition des 970 relevés réalisés en forêt par type de station prédite et surface de ces stations sur la zone d'étude (en km²).

A la lecture de la *Figure 12*, il apparaît clairement que toutes les modalités ne sont pas présentes et que certaines classes correspondent à de faibles surfaces forestières. C'est pourquoi, il semble possible de proposer des regroupements de types de stations peu fréquents et proches d'un point de vue écologique. Par exemple, les stations subalpines concernent de faibles surfaces à proximité des crêtes du massif. Elles sont toutes situées en sommet ou haut de pente. Les stations à réserves utiles importantes sont donc absentes ou rares dans ces situations. La distinction des réserves utiles est donc inutile dans cet étage. D'autre part une simplification des niveaux trophiques en trois classes semble également suffisante.

A l'opposé, les stations collinéennes chaudes sont également rares en forêt. Localisées en Alsace, les terres sont souvent occupées par le vignoble. Des regroupements de stations proches semblent donc appropriés.

Les types de stations des étages collinéen à montagnard se rencontrent fréquemment sur le terrain. La sensibilité à la réserve en eau des plantes est d'autant plus grande que le climat est chaud. A l'étage montagnard où le stress hydrique est faible, il semble possible de distinguer seulement deux classes de réserves en eau plutôt que 4.

Enfin, aux différents étages, les stations très acides à bonne réserve en eau sont rares car les apports en éléments nutritifs sont liés aux apports en eau. Inversement, et pour la même raison, les stations neutrophiles à mauvaise réserve en eau sont également rares. Cette faible fréquence conduit à préconiser le regroupement des réserves utiles dans ces milieux.

L'ensemble de ces regroupements conduisent à proposer 59 types de stations au lieu de 120 qui pourraient être reconnus par les gestionnaires. A ces 59 types doivent s'ajouter les types marginaux correspondant aux bords de rivières, aux tourbières et aux éboulis qui n'ont pas été traités dans ce rapport.

Pour chacun de ces 59 types un code a été attribué permettant de les différencier (*Figure 13*). Comme pour les 120 types initialement définis, ce code à trois chiffres définit le niveau trophique, le bioclimat et la réserve en eau. Lorsque toutes les modalités d'un même facteur sont regroupées, le chiffre X remplace le code du facteur concerné. Lorsque le regroupement ne prend en compte qu'une partie des modalités, le choix s'est porté sur la modalité la plus proche de la moyenne. Par exemple, si on regroupe les deux classes de réserve en eau les plus faibles (codes 1 et 2), le regroupement prendra le code 2 car c'est la valeur la plus proche de la moyenne. C'est cette classification qui est à la base du document numérique issu de cette étude et de la carte qui en résulte (Carte 15)

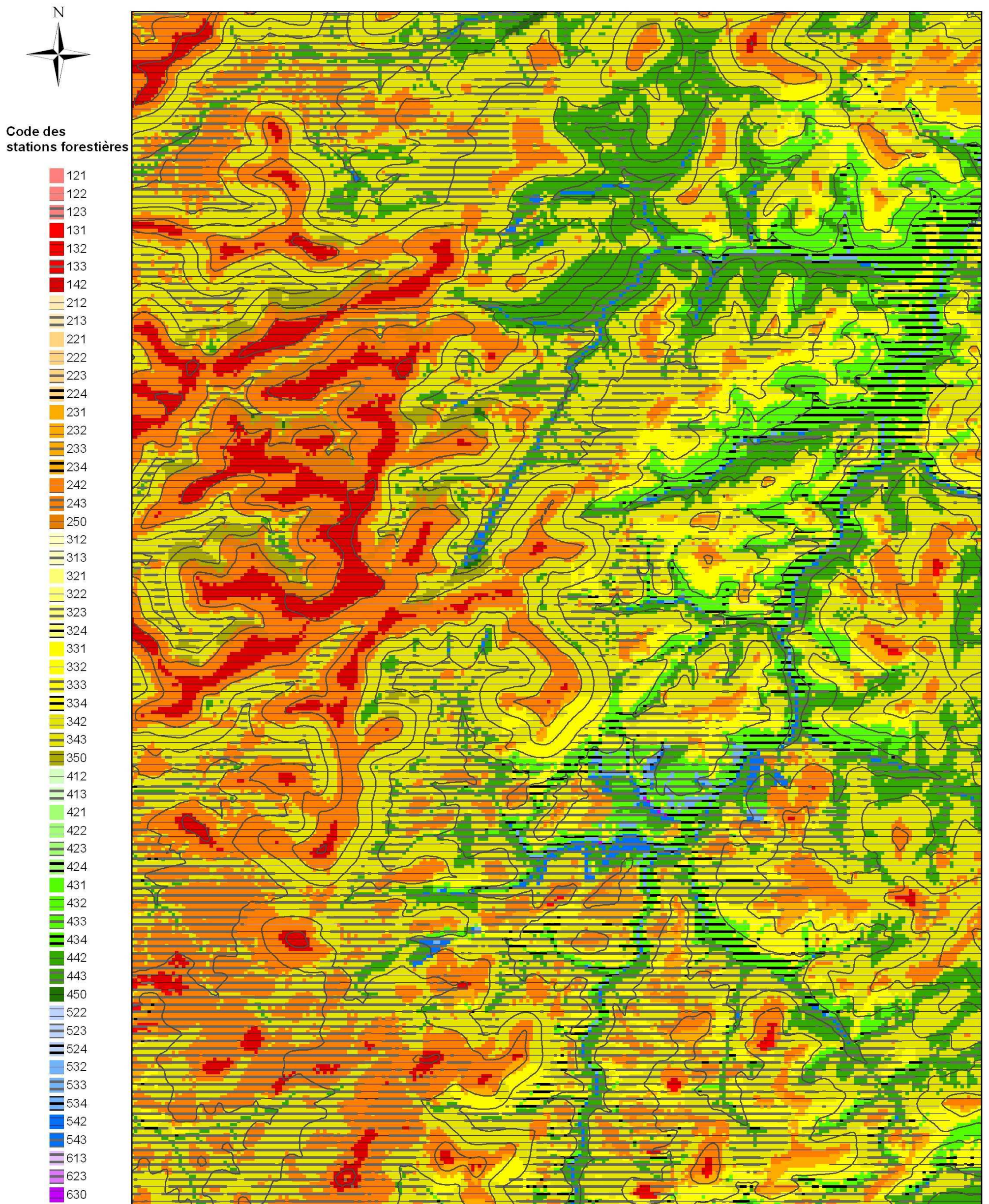
		Niveau trophique					
		1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
Bioclimat	Rés. en eau						
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	25X		35X		45X	
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	142	242	342	442	542	
		243		343	443	543	
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	131	231	331	431	532	63X
		132	232	332	432		
		133	233	333	433	533	
			234	334	434	534	
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	121	221	321	421	522	622
		122	222	322	422		
		123	223	323	423	523	623
			224	324	424	524	
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	212		312		412	612
		213		313		413	613

		Niveau trophique					
		1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
Bioclimat	Rés. en eau						
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2		10		9	
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5	39	67	39	3	
		11		12	6	2	
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	10	17	33	10	2	0
		13	47	53	15		
		10	68	47	9	3	
			6	35	34	3	
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	0	9	6	3	0	0
		4	32	31	13		
		13	71	43	7	2	0
			28	38	23	2	
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	10		0		3	0
		0		7		3	0

Figure 13 : regroupement et numérotation des codes de stations (59 classes) et présentation des effectifs sur la base EcoPlant (n=970).

Un deuxième niveau de regroupement a ensuite été opéré en 12 classes afin de permettre la production d'une carte synthétique pouvant être visualisée à l'échelle du massif (Figure 14). Seules les grandes tendances ont été prises en compte, la subdivision selon la réserve en eau ayant été abandonnée, et les classes de niveau trophique ayant été simplifiées. La distinction des étages bioclimatiques pour les zones calcicoles n'a également pas été faite. Ce document simplifié n'a pas pour vocation d'être un document de travail pour le forestier, mais permet une approche globale à l'échelle du massif afin de mettre en place des stratégies d'échantillonnage par exemple. Il permet également de produire une carte visible à l'échelle du massif (Carte 16).

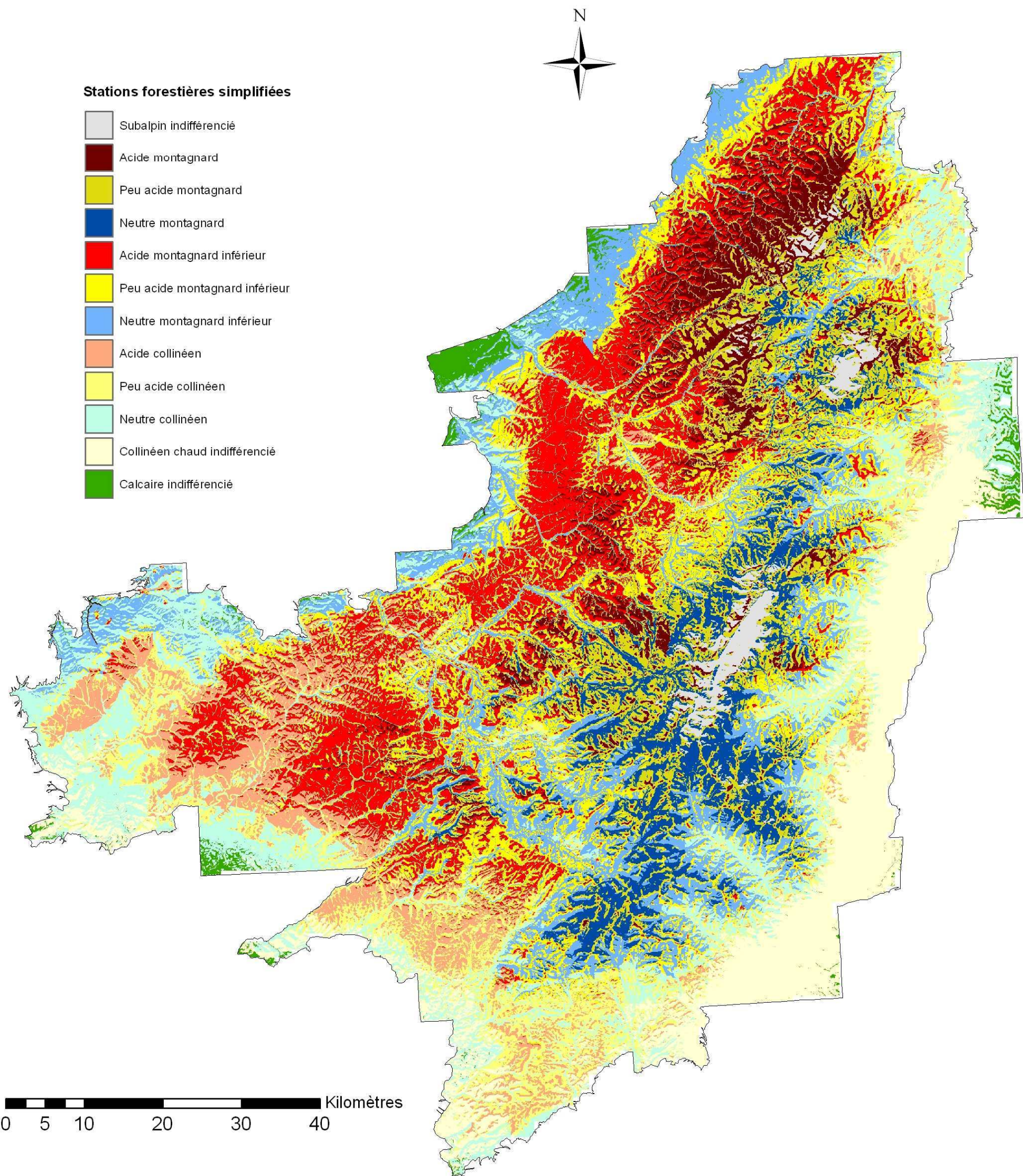
Carte 15 : Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien (extrait au 1/ 50000ème de la région du Donon-Col de Saales)



Le code des stations forestières est obtenu par la combinaison des modèles de niveau trophique, de bioclimat et de réserve en eau

0 1 010 2 020 3 030 Mètres

Carte 16 : Carte simplifiée des stations forestières du massif vosgien



		Niveau trophique					
		1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccicole
Bioclimat	Rés. en eau						
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1					
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	3	4			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5	6	7			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	8	9	10			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	11					

Figure 14 : simplification des types de stations en 12 classes.

La carte des stations obtenue montre une grande variabilité spatiale à l'échelle locale. Cependant, sa validité doit être vérifiée, à différentes échelles, par les gestionnaires. Ce travail va se faire en deux temps : nous allons dans un premier temps comparer la cartographie prédictive avec des relevés de terrain réalisés par les forestiers. Dans un deuxième temps, les cartes prédictives seront confiées aux gestionnaires afin de les évaluer sur le terrain, permettant d'avoir un retour sur son apport et ses limites.

5 COMPARAISON DES STATIONS ISSUES DU MODELE ET RELEVÉES SUR LE TERRAIN

L'objectif est dans un premier temps de faire une correspondance entre les codifications hétérogènes de différents catalogues, et la typologie de la carte prédictive que nous avons réalisé. Pour cela, nous allons nous focaliser sur deux catalogues couvrant une large gamme de stations, les catalogues Vosges gréseuses Lorraines et Vosges cristallines Lorraines. Ensuite, une comparaison des mesures de terrain et des valeurs prédites sera réalisée, les valeurs prédites ayant été calculées sur chaque point de relevé de l'ONF par croisement SIG pour environ 13000 relevés codés à l'aide des deux catalogues de stations.

5.1 Essai de correspondance entre les différentes typologies de stations

Dans un premier temps, un inventaire des types de stations existant dans les catalogues Vosges cristallines et gréseuses Lorraines a été réalisé. Une première tentative de correspondance entre le type du catalogue et celui de la carte prédictive a été réalisée, présentée en *Tableau 25*. Pour chaque station du catalogue, nous avons cherché à identifier le code correspondant le mieux sur la carte prédictive, à l'aide des informations fournies par le catalogue. Nous appellerons ce code le « code optimal ». La difficulté de tels regroupements réside dans le fait que pour un type défini sur le terrain, peuvent correspondre plusieurs types issus du SIG, ou vice-versa, les typologies ne respectant pas les mêmes critères de détermination. De plus, les types de stations définis sur les catalogues ne caractérisent pas toujours très clairement le comportement trophique, bioclimatique ou hydrique, pouvant poser des problèmes de correspondance. Ce problème est accentué par le fait que le découpage réalisé pour la cartographie prédictive est souvent plus détaillé que celui du catalogue.

S'il est délicat de définir une station SIG identique à celle identifiée sur le terrain, il est cependant possible de faire correspondre à la station du catalogue un ensemble de stations SIG, cet ensemble étant plus ou moins important en fonction de la précision de la définition sur le catalogue. Nous appellerons cet ensemble de stations « stations équivalentes ».

Nous allons nous focaliser sur les relevés de terrain codant les stations forestières pour les deux catalogues concernés. Ces relevés ont été fournis par l'ONF. Pour chacune des stations de ces catalogues, nous allons mettre en correspondance les stations codées sur le terrain et celles issues de la carte prédictive, afin de vérifier s'il y a concordance entre les deux.

Richesse chimique	Bioclimat - altitude	alimentation en eau	Vosges gréseuses	Vosges lorraines cristallines	Niveau trophique modélisé	Bioclimat modélisé	Réserve en eau modélisée
hyperacidiphile	montagnard <	faible	6, 7		1	3	1
		modérée	8		1	3	2
		forte	9		1	3	3
	subalpin	modérée	1		2	5	2
	montagnard			14, 15	2	4	2
acidiphile	montagnard <	forte	10		2	3	3
	collinéen	faible	A	19	2	2	1
		modérée		18	2	2	2
		forte	B		2	2	3
	subalpin	indifférencié		6	3	5	X
	montagnard	faible		12	3	4	1
mesoacidiphile		modérée		8, 13	3	4	2
	montagnard <	forte	11		3	3	3
		très forte	4, 5		3	3	4
	collinéen		C		3	2	3
	subalpin	indifférencié		7	4	5	X
	montagnard	modérée		11	4	4	2
acidicline		forte		9	4	4	3
	collinéen	forte	D		4	2	3
	montagnard	forte	10		5	4	3
neutrophile	montagnard <	forte	12		4	3	3

Tableau 25 : tentative de mise en correspondance entre les stations des catalogues Vosges gréseuses Lorraines, Vosges cristallines Lorraines, et la carte prédictive des stations.

5.2 Comparaison entre les types de stations des catalogues et de la carte prédictive.

5.2.1 Stations des Vosges gréseuses Lorraines

9 types de stations appartenant aux catalogues Vosges gréseuses Lorraines ont été étudiées sur notre site d'étude : 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12. Les stations non modélisées sous SIG ou dont les effectifs dans la base ONF sont très faibles n'ont pas été prises en compte. Toutes les stations étudiées appartiennent à la clé « montagne » du catalogue. Pour chacune de ces stations, nous avons regardé comment se distribuaient les effectifs des prédictions issus de la carte SIG par rapport au codage réalisé sur le terrain (*Figure 15*). Nous avons ensuite extrait le taux de bonnes prédictions par rapport à la station optimale et aux stations équivalentes correspondantes sous SIG, telles que définies en 5.1. Les taux de bonnes prédictions sont présentés de façon globale par station puis selon chacun des trois gradients, en comparant le nombre de relevés reclassés dans les bonnes modalités du gradient par rapport au nombre total de relevés (*Tableau 26*). Par exemple, pour une station montagnarde, nous calculons la part de relevés reclassés en montagne par rapport au nombre total de relevés.

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		1	3	1		
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte			4	6		
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Station 4

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Station 5

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	3				
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	10	12	2			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	15	39	1			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	3	4			

Station 6

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	8	20				
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	57	81	31			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	63	192	18			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	84	51			

Station 7

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	22	98	50			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	35	41	29			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	100	195	15			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	6	135	122			

Station 8

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	26	130	54	1		
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	42	56	48			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	29	141	14	1		
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	9	61	64	3		

Station 9

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	10	35	18			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	13	10	5			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	78	125	11			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	11	134	23			

Station 10

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	8	17	12			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	12	9	5			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	31	51	19	2		
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5	28	22	1		

Station 11

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Station 12

Figure 15 : définition des stations de la carte prédictive équivalentes à celles du catalogue Vosges gréseuses Lorraines.

station catalogue :	4	5	6	7	8	9	10	11	12
effectif relevés ONF	15	11	111	657	1064	773	582	293	19
station optimale SIG	334	334	131	131	132	133	233	333	433
bonnes prédictions/ station optimale SIG	40%	27%	17%	9%	9%	1%	23%	8%	0%
stations équivalentes SIG	233, 234, 333, 334	243, 343, 443, 134, 244, 344, 444	141, 241, 131, 132, 231, 232	142, 242, 131, 231, 132, 232	142, 242, 243, 132, 232, 133, 233, 234	142, 242, 243, 131, 231, 132, 232, 133, 233, 234	243, 343, 232, 332, 233, 333, 234, 334	243, 343, 332, 532, 233, 333, 234, 334	333, 334, 433, 434
bonnes prédictions/ station équivalentes SIG (%)	93	100	81	64	63	68	68	57	37
-> Bonnes prédictions/gradient trophique (%)	100	100	99	82	70	69	80	79	53
-> Bonnes prédictions/gradient bioclimatique (%)	100	100	94	98	99	99	100	95	79
-> Bonnes prédictions/gradient hydrique (%)	94	100	84	73	90	100	85	79	90

Tableau 26 : concordance entre chaque station du catalogue Vosges gréseuses Lorraines et la station optimale SIG, les stations équivalentes SIG, et taux de prédictions selon les gradients trophiques, bioclimatiques, et hydriques.

Dans un premier temps, nous constatons que le taux de bonnes prédictions vis à vis de la station optimale SIG est faible (de 0 à 40% selon la station), ce qui confirme l'analyse précédente. Aussi, pour une station du catalogue, 4 à 10 stations équivalentes ont été répertoriées selon le type de station, sur 59 types définis sous SIG. Ce type de regroupement présente indiscutablement un coté subjectif, plus le nombre de stations équivalentes sélectionnées étant importantes, plus les résultats seront favorables. Aussi, l'objectif a été de retranscrire de façon la plus fidèle possible les indications fournies par le catalogue, sachant que différentes interprétations auraient parfois pu aboutir à des correspondances différentes. Le regroupement se fait systématiquement sur le bioclimat, le catalogue ne distinguant en effet que deux étages, et sur le niveau trophique, les stations du catalogue ne nous permettant pas de distinguer 6 types de stations. Par exemple, nous avons fait correspondre les sols très acides du catalogue aux sols hyperacidiphiles et acidiphiles de notre classification, sauf pour le type de station 4 ou les stations acidiphiles et mésoacidiphiles ont été choisies, les stations de bord de cours d'eau étant généralement un peu plus riches. Les stations peu acides du catalogue correspondent aux classes mésoacidiphiles et acidiphiles, tandis que les stations « assez riches » correspondent aux classes mésoacidiphiles et acidicline. La réserve en eau est parfois clairement définie dans le catalogue (station 6 à faible réserve par exemple), et la correspondance a été réalisée avec deux classes de réserve en eau (réserve faible et modérée), parfois elle est très variable pour un même type de station (station 9 par exemple), auquel cas toutes les classes de réserves en eau sont prises en compte.

Le taux de bonnes prédictions est naturellement beaucoup plus important en considérant les stations équivalentes, variant entre 100% pour la station 5 à 37% pour la station 12. On peut noter une très bonne correspondance pour les stations humides (station 4, 93%, station 5, 100%) ou hyperacidiphiles sur versant chaud (station 6, 81% de bonnes prédictions). Les stations sur sols acides ou peu acides (7, 8, 9, et 10) sont quant à elles plutôt bien prédites (57 à 68 % de bonnes prédictions), les stations les plus riches (la 11 et surtout la 12) ayant la moins bonne concordance (57 % pour la 11 mais seulement 37% pour la 12).

Si on examine les différents gradients, il s'avère que le gradient bioclimatique, en deux classes seulement, est très bien prédit. En effet, seuls 50 relevés sont prédits à l'étage collinéen, soit plus de 98,5% de bonnes prédictions. Le gradient trophique est globalement assez bien prédit, avec de 69 à 100 % de stations bien reclassées selon ce gradient, si on exclut le type de station 12 (53% de bonnes prédictions). On constate cependant pour les stations les plus acides (7, 8 et 9) une tendance à prédire des stations mésoacidiphiles, et pour les stations les plus riches (10, 11 et 12), un taux de prédiction non négligeable dans les catégories hyperacidiphiles (stations 10 et 11) ou acidiphiles (station 12).

L'appréciation sur les apports en eau est la plus subjective, d'autant plus que le catalogue prend en compte à la fois la capacité de rétention en eau du sol mais aussi l'humidité atmosphérique, contrairement à la carte prédictive qui ne considère que le compartiment sol pour ce facteur. On arrive cependant à distinguer trois types de compartiments, les stations sèches (stations 6 et 7), les stations humides (station 4, 5, 8, 10, 11 et 12), et les stations indifférenciées (station 9). Le taux de prédiction des stations humides est remarquable (entre 93 et 100 % pour les types 4 et 5, bien que les effectifs soient faibles), montrant ainsi une apparente capacité prédictive du modèle de réserve en eau pour les stations les plus humides, qui serait à confirmer sur des effectifs plus importants. Ainsi, nous

constatons que le reclassement selon le gradient hydrique est tout à fait correct, le plus mauvais taux étant celui de la station 7 pour laquelle 73% des relevés sont correctement reclassés.

D'une manière générale, on constate une bonne prédiction du gradient bioclimatique, et dans une moindre mesure du gradient hydrique. Le gradient trophique, malgré plus de 60% de bonnes prédictions pour la plupart des stations, explique principalement les résultats un peu plus faibles des stations 8 à 12.

5.2.2 Stations des Vosges cristallines Lorraines

12 types de stations appartenant au catalogue Vosges Cristallines Lorraines ont été étudiées (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, et 19). Les taux de bonnes prédictions vis à vis des stations optimales définies en 5.1 varient entre 0 et 54% (*Tableau 27*), 6 stations présentant des taux supérieurs à 20% (6, 7, 8, 9, 12 et 13). Les stations équivalentes à celles du catalogue regroupent entre 1 et 9 stations définies sous SIG (*Figure 16*). Les mêmes règles de regroupement ont été utilisées que pour le catalogue Vosges gréseuses Lorraines. Les taux de bonnes prédictions varient entre 37% pour la station 10 et 87% pour la station 11. 5 types de stations ont une bonne à très bonne concordance entre le type défini sur le catalogue et les stations équivalentes sous SIG (plus de 70% de bonnes prédictions) : il s'agit des stations 6, 8, 9, 11 et 12. Les stations 6, 8 et 9 sont des stations très localisées aux étages du subalpin voire du montagnard supérieur. Les stations 11 et 12 sont des stations sur sol riche situées en montagne. 3 autres stations présentent de relativement bons taux de prédiction, entre 54 et 61% (stations 7, 14 et 19).

Trois stations sont moins bien prédites, allant de 37 à 43% de bonnes prédictions, ce sont les stations 10, 13 et 15. Pour ces trois stations, cela s'explique à la fois par un moins bon reclassement du gradient hydrique et du gradient trophique. La station 10 est plus particulièrement mal prédite selon le gradient hydrique, cette station est décrite avec des sols meubles et profonds, mais 53% des relevés sont prédits avec des réserves faibles ou modérées. Il s'agit probablement d'un biais lié au modèle de réserve en eau. En effet, la station 10 est principalement une station d'altitude (88% des relevés sont dans les étages montagnards et subalpins), rare et peu étendue. Il s'agit d'une station située en bas de versant à altitude relativement importante (> 800 m.). Or, le modèle de réserve en eau a tendance à prédire des réserves en eau faibles à ces altitudes. Il semblerait donc que notre modèle ait quelques difficultés à prédire ces stations marginales de bas de versant à sols profonds en altitude. La station 13 est difficile à qualifier au niveau trophique, et nous avons choisi de lui faire correspondre les milieux prédits dans la classe mésoacidiphile. Ce choix assez restrictif explique en partie le taux de prédiction du niveau trophique plus faible que la moyenne, de 58%. Enfin, la station 15 a tendance à être prédite un peu plus riche qu'elle ne l'est (34% des relevés étant classés acidiphile).

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	13	3			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		4	2			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	7	61	66			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	3	47	24	1		
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	22	124	63			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	51	212	15			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	10	1			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		16	50			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	12				
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	3	21				
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		3	16			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	13	20			
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	9	1			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	82	192			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	23	228	354	6		
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	12	24			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	9	15	25			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	47	375	464			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	119	820	864	18	
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	59	191	7		
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	10	28	37			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	10	53	123			

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	68	225	118			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	31	296	711	313		
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	27	263	158	3		
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	40	94	81	7		
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	195	302	93		

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésocacidiphile	4-Acidicline	5-Neutrophile	6-Calccole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	5	6			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	23	98	138	16		
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	8	62	13			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	15	22	6			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	60	39	9		

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2- Acidiphile	3- Mésoacidiphile	4- Acidicline	5- Neutrophile	6- Calcicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		2				
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	1				
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	3	1				
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2- Acidiphile	3- Mésoacidiphile	4- Acidicline	5- Neutrophile	6- Calcicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		1				
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		3	2			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2- Acidiphile	3- Mésoacidiphile	4- Acidicline	5- Neutrophile	6- Calcicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte			3			
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte		14	5			
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte						

Figure 16 : finition des stations de la carte prédictive équivalentes à celles du catalogue Vosges cristallines Lorraines.

Vosges cristallines Lorraines	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	19
station catalogue	24	209	501	105	73	1073	3351	3503	612	111	14	26
station optimale SIG	350	450	342	443	543	442	341	342	242	242	222	221
bonnes prédictions/ station optimale SIG	54%	32%	42%	20%	1%	6%	24%	20%	16%	2%	0%	0%
stations équivalentes SIG	25X, 35X, 45X	35X, 45X	25X, 35X, 343, 443	35X, 45X, 45X, 443, 453, 433, 533, 434, 534	35X, 45X, 342, 442	35X, 45X, 342, 442	35X, 331, 332, 321, 322	342, 242, 331, 332, 232, 221, 321	242, 231, 331, 232, 332, 322, 323	221, 321, 222, 322	322, 323	322
bonnes prédictions/ station équivalentes SIG (%)	75%	61%	82%	86%	37%	87%	82%	40%	60%	43%	71%	54%
-> Bonnes prédictions/gradient trophique (%)	100	95	84	100	66	97	94	58	84	66	71	73
-> Bonnes prédictions/gradient bioclimatique (%)	75	64	100	99	96	100	98	100	100	100	93	81
-> Bonnes prédictions/gradient hydrique (%)	100	100	100	87	47	91	91	77	63	66	100	85

Tableau 27 : concordance entre chaque station du catalogue Vosges cristallines Lorraines et la station optimale SIG, les stations équivalentes SIG, et taux de prédictions selon les gradients trophiques, bioclimatiques, et hydriques.

Tout comme pour le catalogue Vosges gréseuses Lorraines, le gradient bioclimatique est globalement très bien prédit, avec 10 stations sur 12 dont le taux de bonnes prédictions dépasse 80%. Seules les stations 1 et 2, normalement localisées au subalpin, sont parfois prédites au montagnard supérieur. La prédiction du gradient trophique dépasse 60% pour la plupart des stations, sauf pour la station 13 (58%). La prédiction de la richesse des sols est particulièrement remarquable pour les stations d'altitude (stations 7 à 9 entre 84 et 100% de bonnes prédictions) ou certaines stations de milieux riches (11 et 12 par exemple). Hormis pour la station 10, les plus mauvaises prédictions sont réalisées sur des stations de niveau trophique intermédiaire ou de l'étage collinéen qui ont tendance à être prédites avec des sols un peu plus riches qu'ils ne le sont, ce qui serait à confirmer avec un nombre de relevés plus important dans ces milieux.

Le gradient hydrique est au contraire très bien prédit pour les stations de l'étage collinéen (18 et 19), ainsi que pour les sols riches à faible réserve en eau (stations 11 et 12) ou les stations d'altitude (8 et 9) : pour toutes ces stations les taux de bonne prédiction s'échelonnent entre 85 et 100 %. Hormis pour la station 10 discutée précédemment, les moins bons taux de prédiction de la réserve en eau trouvent sur stations mésoacidiphiles à acidiphiles à faible réserve en eau (stations 13, 14 et 15).

5.2.3 Conclusion sur la correspondance entre stations relevées sur le terrain et stations modélisées.

Nous avons constaté qu'il était difficile voire impossible de déterminer d'équivalence une à une entre les stations du catalogue et celles du modèle. D'une manière générale, les stations du modèle sont plus détaillées que celles du catalogue, nécessitant de définir des « stations équivalentes » à celles du terrain. Nous avons veillé à être le plus restrictif possible dans la définition de ces stations équivalentes, afin de ne pas fausser les résultats dans un sens favorable. A partir des relevés des deux catalogues étudiés, il est possible de déterminer 3 types de comportement vis à vis de la réserve en eau (faible, forte, indifférenciée), et 3 types de comportement vis à vis du bioclimat (collinéen, montagnard au sens large, incluant le subalpin, ou subalpin. Le gradient trophique peut être divisé en 4 classes, indifférent, très acide, moyennement acide, ou riche. Bien évidemment, plus les classes équivalentes définies sont larges, plus il y a de chances que le taux de prédiction soit bon.

La correspondance entre ces stations équivalentes modélisées et les stations relevées sur le terrain est globalement bonne voire très bonne pour certaines stations. Sur 23 types de stations évaluées réparties sur 2 catalogues, le moins bon taux de prédiction est de 37 %, 7 stations dépassant 80% de bonnes prédictions, et 15 d'entre elles dépassant 60%, seules 4 stations étant inférieures à 50%. Pour les deux catalogues, le gradient bioclimatique est très bien prédit (entre 64 et 100% de bonnes prédictions, 18 stations prédites à plus de 80%). Concernant le gradient hydrique, 15 stations sur 23 sont prédites à plus de 80%, 12 d'entre elles l'étant pour le gradient trophique. Les principales difficultés rencontrées concernent donc le gradient hydrique, et surtout le gradient trophique. Ces difficultés sont cependant à relativiser, les moins bons taux de prédiction avoisinant 50% pour ces deux gradients.

L'utilisation de la notion de station équivalente a conduit à des correspondances multiples : pour une même station codée sur la carte prédictive, plusieurs stations codées sur le catalogue peuvent correspondre. Par exemple, la station 241 (acidiphile – montagnard- à faible réserve en eau) peut correspondre à la fois aux stations 14 et 15 du catalogue Vosges cristallines et aux stations 5, 6, 7, 8 et 9 du catalogue Vosges gréseuses. Aussi, cette mise en correspondance entre les types de stations est utile dans le but de valider la carte prédictive par rapport aux données de terrain, mais ne doit pas être utilisée pour tenter de faire correspondre aux valeurs du modèle des stations des catalogues. La carte prédictive est destinée à un usage à part entière, de façon indépendante et complémentaire à l'usage des catalogues.

A l'issue de cette analyse, nous constatons que la correspondance entre stations relevées sur le terrain et stations modélisées est possible, et que la carte prédictive a une cohérence vis à vis des données relevées sur le terrain. Cependant, il est difficile de distinguer la part liée aux erreurs ou imprécisions du modèle de la part d'erreurs de codage sur le terrain ou liées à la mise en correspondance entre les deux typologies. Aussi, la meilleure validation de la carte prédictive sera liée à l'utilisation sur le terrain et aux retours qui pourront être fait de la part des gestionnaires.

6 APPLICATION A LA PREDICTION DE L'AIRE DE DISTRIBUTION DE DEUX ESSENCES

La carte des stations précédemment réalisée peut avoir de nombreuses applications. L'une d'entre elle est la cartographie de la présence potentielle des essences. Nous allons évaluer l'utilité de la donnée afin de prédire la distribution des essences, pour deux espèces présentes dans le massif, une essence dominante, le sapin pectiné (*abies alba*), l'autre plus marginale et propre aux milieux riches, l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*). Pour cela, nous allons croiser la présence effective de ces deux essences issues de la base EcoPlant avec la carte prédictive des stations en 59 classes, et observer le taux de présence de chaque essence par station afin de déterminer s'il est possible d'identifier des stations propres ou impropres à ces espèces. Cette répartition sera ensuite comparée aux préconisations des catalogues.

6.1 Potentialité de présence d'*Abies alba*

La Figure 17 montre le taux de répartition d'*Abies alba* par type de station prédite. Nous pouvons constater une présence très large du sapin, notamment sur le gradient trophique. Cela est conforme aux connaissances de cette espèce, 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 catalogues pour les stations A à E du catalogue Vosges gréseuses Lorraines ou encore la station 19 du catalogue Vosges cristallines Lorraines. On note également une préférence du sapin pour les sols à réserve en eau faible ou moyenne.

Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidiline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5	14	12			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5	76	166	92	7	
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	9	21	64	41	3	0
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	12	19	8	2	0
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1	10	6	0		

Bioclimat	Rés. en eau	1-Hyperacidiphile	2-Acidiphile	3-Mésacidiphile	4-Acidiline	5-Neutrophile	6-Calicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	20	64	58			
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	100	82	71	64	43	
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	56	71	75	68	33	
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	100	50	74	75	0	
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	0	40	50			

Figure 17 : répartition des placettes de la base EcoPlant (n = 1198) au sein des stations prédites et taux de présence d'*Abies alba* par type de station (657 présences). La couleur rouge indique un taux de présence supérieur à 80%, orange entre 60 et 80%, et jaune entre 40 et 60%. Les valeurs sont en italique lorsque les effectifs sont inférieurs à 15 par type de station.

La carte 17 a été réalisée en sélectionnant les stations ayant au moins 40% de taux de présence du sapin pectiné. Cela correspond à 34 stations couvrant 50% du territoire d'étude, et représentant 92% des présences d'abies alba répertoriées. Le taux d'absences bien prédites est quant à lui de 40%, le taux de succès du modèle (présences et absences bien prédites par rapport au nombre total de relevés) étant de 68 %.

6.2 Potentialité de présence d'Acer pseudoplatanus

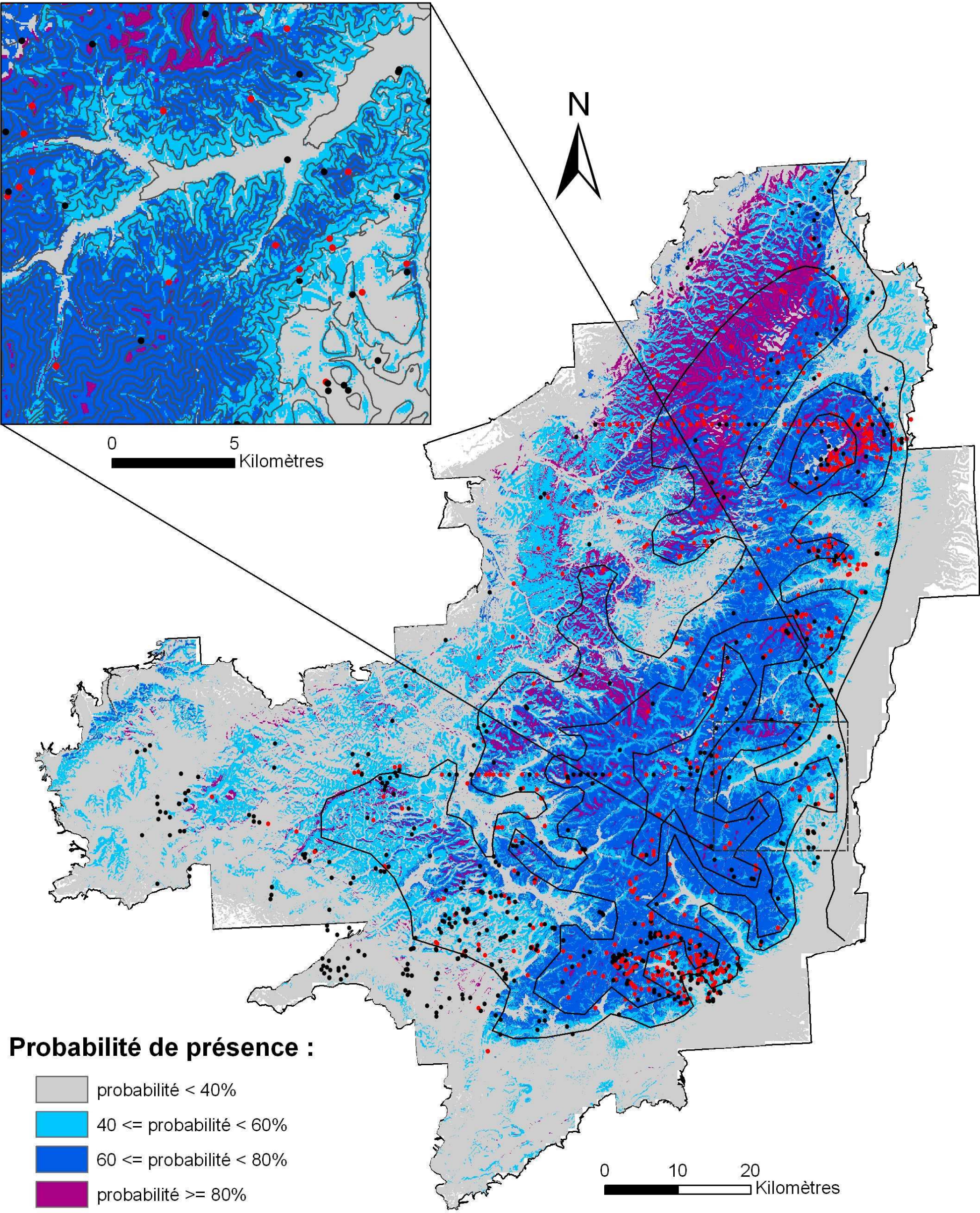
Le nombre d'occurrences de l'érable est nettement inférieur à celui du sapin pectiné (n = 265). Autant le sapin était présent sur une large gamme de gradients, autant on constate que l'érable est principalement présent dans les milieux les plus riches et de préférence en altitude. Cela correspond parfaitement aux informations des catalogues qui prédisent une bonne potentialité dans les milieux riches à forte humidité atmosphérique (station 5 du catalogue Vosges gréseuses Lorraines ou stations 7 et 10 du catalogue Vosges cristallines Lorraines). Cependant, le gradient hydrique auquel on aurait pu s'attendre n'apparaît pas clairement du premier abord, un certain nombre de présences se trouvant dans des compartiments stationnels à faible réserve, notamment au collinéen, ce qui peut paraître surprenant. Il faut cependant se méfier des effectifs, dans le cas présent (station 321) ces statistiques étant basées sur seulement 8 relevés. D'autre part, l'érable sycomore est surtout sensible à l'humidité atmosphérique, ce qui se traduit par le gradient bioclimatique et non par le gradient de réserve en eau.

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2- Acidiphile	3- Mésoacidiphile	4- Acidicline	5- Neutrophile	6- Calcicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5		14		12	
4 - Montagnard	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	5	76	166	92	7	
		16		18	19	4	
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	9	21	64	41	3	0
		7	41	65	47		
		4	42	33	15	5	
			6	23	29	2	
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	2	12	19	8	2	0
		1	16	39	36		
		11	27	27	8	2	0
			7	25	23		
1 - Coll. chaud	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	1		10	6	0	
		3		12	10	0	

Bioclimat	Rés. en eau	1- Hyperacidiphile	2- Acidiphile	3- Mésoacidiphile	4- Acidicline	5- Neutrophile	6- Calcicole
5 - Subalpin	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	40	29	50			
4 - Montagna	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	0	7	28	38	86	
		12,5	17	47	75		
3 - Mont. <	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	11	5	27	29	33	
		0	5	32	32		
		0	5	27	27	60	
		0	0	22	41	50	
2 - Collinéen	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	0	8	5	50	0	
		0	0	21	11		
		0	4	19	38	0	
		0	0	12	4		
1 - Coll. chau	1-faible 2-moderée 3-forte 4-très forte	0		10	0		
		0		17	20		

Figure 18 : répartition des placettes de la base EcoPlant (n = 1198) au sein des stations prédites et taux de présence d'Acer pseudoplatanus par type de station (265 présences). La couleur rouge indique un taux de présence supérieur à 70%, orange entre 50 et 70%, et jaune entre 30 et 50%. Les valeurs sont en italique lorsque les effectifs sont inférieurs à 15 par type de station.

Carte 17 : Probabilité de présence du sapin pectiné



Probabilité de présence :

- probabilité < 40%
- 40 ≤ probabilité < 60%
- 60 ≤ probabilité < 80%
- probabilité ≥ 80%

Présence réelle :

- 0
- 1

La carte 18 a été réalisée en sélectionnant les stations ayant au moins 30% de taux de présence de l'érable sycomore. Cela correspond à 14 stations couvrant 17% de la surface du site d'étude, et représentant près de la moitié des présences d'érable sycomore répertoriées (45%). Le taux d'absences bien prédites est quant à lui de 80%, le taux de succès du modèle (présences et absences bien prédites par rapport au nombre total de relevés) est de 72 %.

6.3 Conclusion quant à l'utilisation de la carte des stations pour prédire l'aire de distribution des espèces. Exemple avec *Abies alba*.

La carte prédictive des stations permet clairement d'individualiser des types de stations ayant des taux de présences importants pour chacune des deux essences étudiées, permettant la réalisation de cartes dérivées de répartition de ces espèces. Ces cartes permettent d'obtenir respectivement 68% de bonnes prédictions pour le sapin et 72% pour l'érable sycomore. Ces valeurs sont significativement supérieures à un tirage au hasard, qui permettrait d'obtenir en moyenne 50% de bonnes prédictions. Par conséquent, le codage stationnel réalisé dans cette étude est utile pour la cartographie des potentialités de présence des espèces.

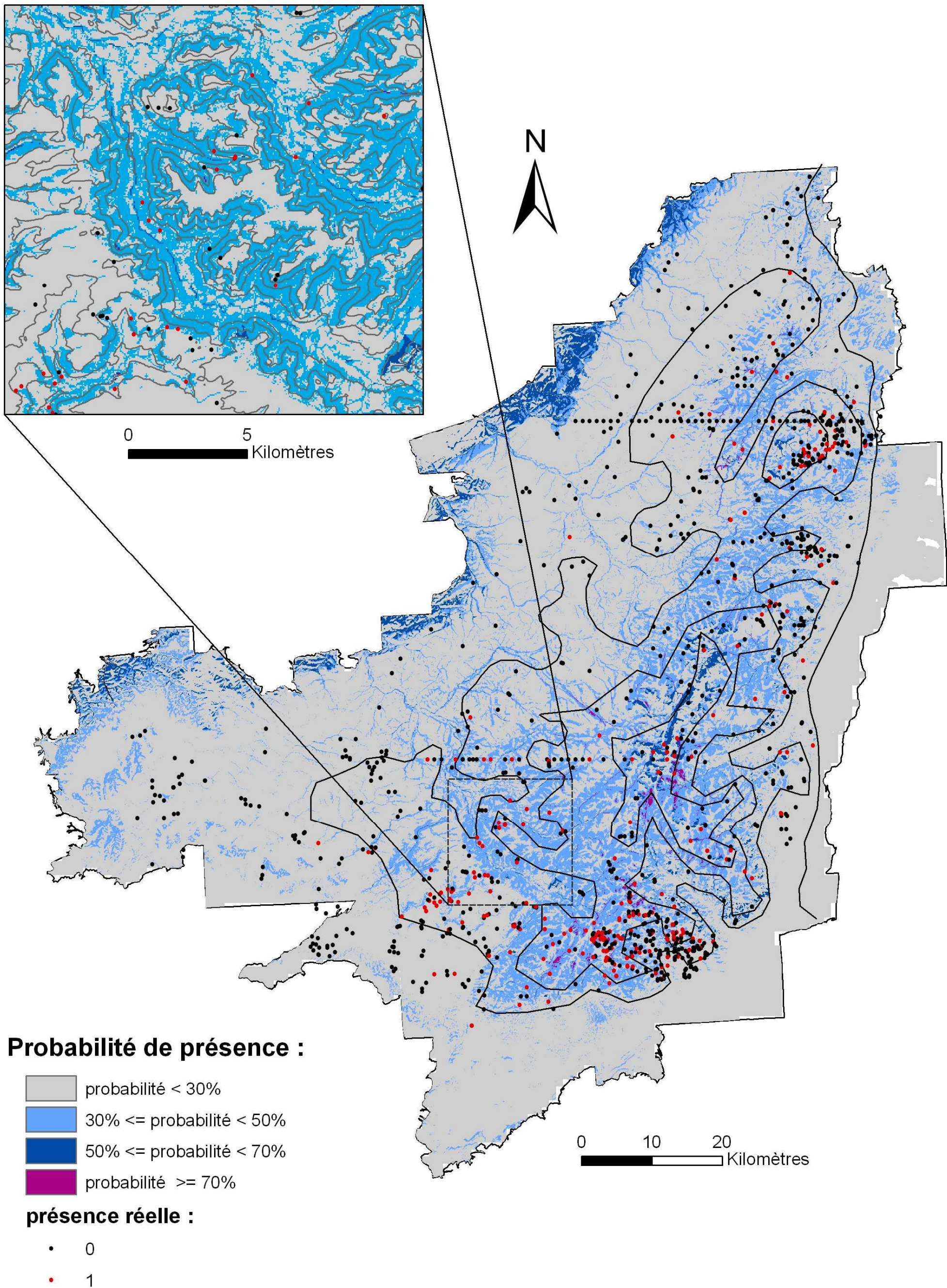
Cependant, des améliorations peuvent être réalisées pour obtenir de meilleurs résultats. Certains types de stations présentent un faible nombre de relevés de terrain, pouvant induire un biais dans la prédiction, car ce type d'unité peut représenter des surfaces importantes en périphérie du massif ou dans des zones peu inventoriées. Aussi, un complément d'échantillonnage serait à réaliser dans les unités présentant moins de 15 relevés, qui figurent en italique dans la *Figure 17* pour le sapin et dans la *Figure 18* pour l'érable. Une autre limite de cette méthode réside dans le choix du seuil pour identifier les présences et les absences prédites. Il a été fixé arbitrairement à 40% de taux de présence pour le sapin, très présent sur la zone, et 30% pour l'érable sycomore, plus rare. L'utilisation de courbes ROC serait à étudier, permettant un choix automatique du meilleur seuil de discrétisation entre présence et absences (Manel et al, 2001). En utilisant cette méthode, on peut envisager d'obtenir de meilleurs taux de prédiction que ceux présentés ici.

Enfin, une validation avec un jeu de données externes permettrait de mieux apprécier la réalité de ces cartes de distribution des espèces. Nous avons testé cette validation avec les 6228 relevés de la base de l'IFN, pour le sapin (Carte 19). Il s'avère qu'avec un jeu différent de celui ayant servi à réaliser la carte, 83% des présences sont bien prédites, et 51 % des absences le sont également, soit un taux de succès de 72% (*Tableau 28*).

	prédit :		Total
observe :	0	1	
0	1092	1055	2147
1	704	3376	4080
Total	1796	4431	

Tableau 28 : matrice de confusion entre les valeurs prédites et les valeurs observées pour la présence d'Abies alba, avec le jeu de données de l'IFN (n = 6228).

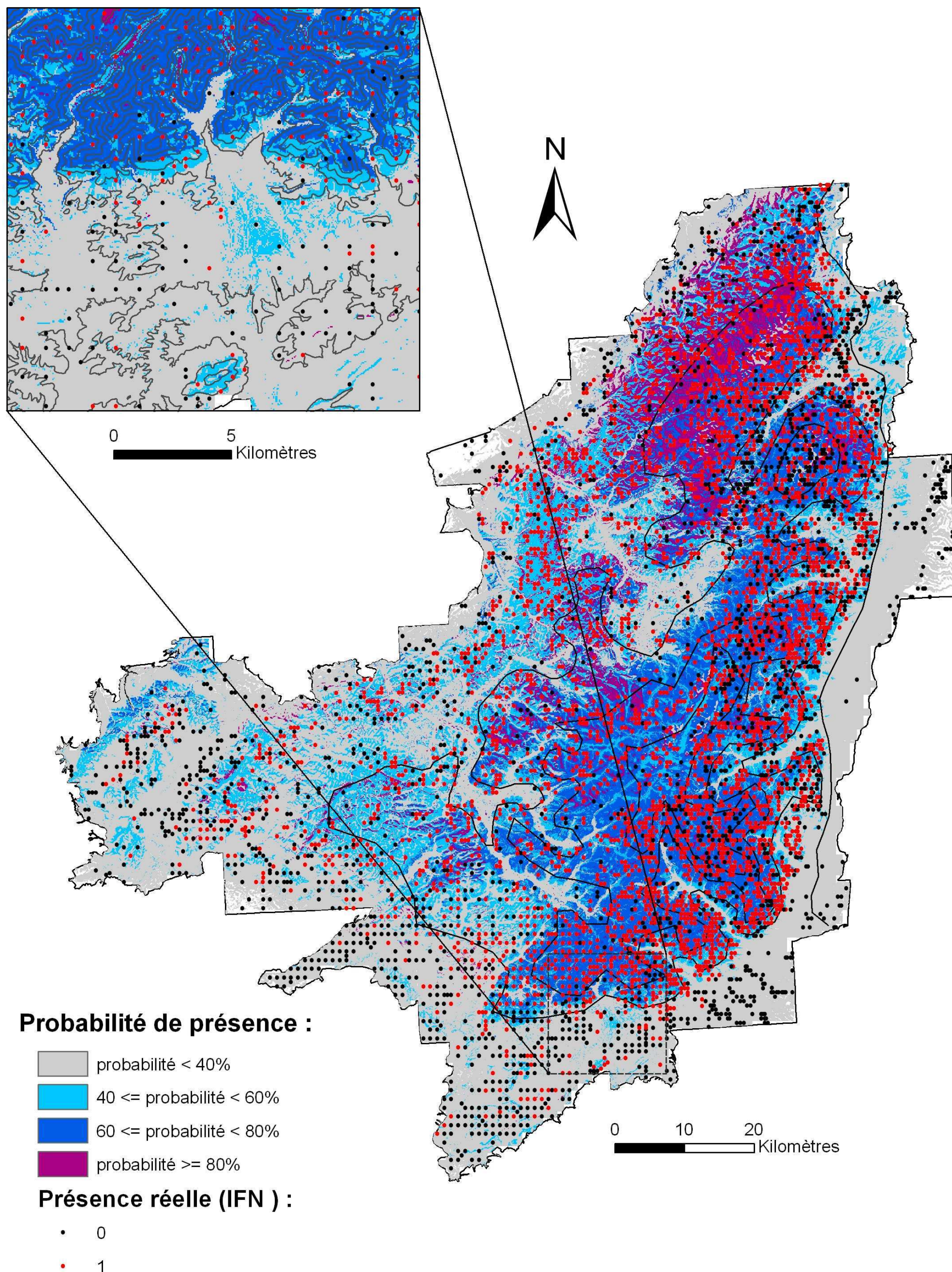
Carte 18 : Probabilité de présence de l'érable sycomore



On constate que les présences sont un peu moins bien prédites (83% contre 92% initialement), ce qui est compensé par une meilleure prédiction des absences (51% contre 40% avec le jeu de calibration). Il n'y a donc pas de dégradation des capacités prédictives du modèle pour cette espèce en utilisant un jeu de données indépendant, au contraire, le taux de succès global étant meilleur avec le jeu de validation qu'avec le jeu de calibration (72% au lieu de 68%).

Il serait intéressant par la suite de confronter cette approche à celle plus classiquement utilisée de modélisation de la niche avec des variables SIG, permettant la cartographie prédictive de l'aire de répartition des espèces (Py, 2005, Boiffin, 2006). Il est possible de comparer ces résultats avec un travail réalisé sur le même site d'étude ayant utilisé la régression logistique pour modéliser la niche du sapin (Garat et al, 2004). Des variables SIG identiques à celles décrites dans ce rapport avaient été utilisées. Les résultats aboutissaient à un taux de succès de 76% sur le jeu ayant servi à calibrer le modèle, à comparer avec 68% et 72% dans notre étude selon le jeu de donnée utilisé. Les résultats pour cette essence sont relativement proches selon la méthode utilisée, le modèle de niche étant légèrement plus performant. Cela est logique, le modèle de niche étant adapté à l'essence traitée, contrairement au modèle de station qui fournit des zones de potentialité équivalentes, quelque soit l'essence. Cette analyse serait à développer à partir de jeux de données identiques et sur d'autres espèces afin de pouvoir comparer les deux approches.

Carte 19 : Probabilité de présence du sapin pectiné validation de la carte avec les données de l'IFN



CONCLUSION

La cartographie automatique de la plupart des stations du massif vosgien a été réalisée sur toute la surface du massif. Seules les stations marginales, éboulis, bords de rivières et tourbières n'ont pas été cartographiées. La réalisation de cette cartographie a nécessité l'acquisition de données nombreuses et variées couvrant l'ensemble de la région étudiée : une base de données de plus de 900 analyses de roches, une autre base de 2650 relevés phytoécologiques, une couverture de 800 substrats géologiques, un modèle numérique de terrain au pas de 50 m, des centaines de variables climatiques, topographiques, ou hydrologiques spatialisées sous SIG, ainsi que 6000 relevés de l'IFN et de plus de 13000 relevés de l'ONF pour la validation.

Le traitement de ces données a permis de modéliser et de spatialiser les trois facteurs importants pour la détermination des types de stations forestières du massif sélectionnés lors de l'étude bibliographique : le niveau trophique du sol, sa réserve en eau et le climat local. La modélisation de ces facteurs à partir des variables spatialisées permet d'expliquer environ 33 % des variations de niveau trophique et 50 % des variations du bioclimat, valeurs fournies à l'aide d'un jeu de validation indépendant. La qualité de l'estimation de la réserve en eau des sols ne peut pas être évaluée directement car on ne sait pas la mesurer correctement sur le terrain. Cependant, nous avons expliqué 42 % de la variabilité de la réserve utile calculée sur les relevés de l'IFN et prédit 57 % des modalités topographiques utilisés 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).

Par rapport à une cartographie de terrain réalisée avec les catalogues de la région, la carte prédictive des stations présente certains inconvénients : l'évaluation du niveau trophique et l'estimation de la profondeur du sol sont moins précises du fait de l'utilisation de modèles, moins fiables que des relevés de terrain. La délimitation des stations sur le terrain est également plus arbitraire. En contrepartie, la cartographie prédictive présente plusieurs avantages : il n'y 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. D'autre part, certains facteurs sont évalués plus finement. Ainsi, les catalogues fournissent l'épaisseur du sol comme critère d'évaluation de la réserve en eau des stations. La typologie prédictive repose sur la modélisation de la réserve utile et la prise en compte des effets de la topographie. Pour l'évaluation du climat les catalogues se basent sur l'altitude et l'exposition. La modélisation du bioclimat permet d'être plus précis : elle prend en compte assez finement la température, l'exposition, l'évaporation et les précipitations à travers le bilan hydrique climatique. La carte prédictive a également le mérite d'exister sur l'ensemble du massif, un inventaire de terrain sur une surface équivalente demanderait des moyens énormes. Enfin, la typologie est uniforme quel que soit le secteur géographique, permettant des comparaisons et des statistiques très difficiles à réaliser autrement.

La qualité de ce document est dépendante de la résolution spatiale utilisée. Cette cartographie a été réalisée par pixel de 50 mètres de côté, correspondant à un échantillonnage avec une pression de 4 points par hectare. Elle a été validée à la fois avec un jeu de données indépendantes permettant d'évaluer chaque modèle (niveau trophique, bioclimat, réserve utile, apports latéraux en eau), et avec des données relevées sur le terrain permettant de valider la carte des stations potentielle. Les matrices de reclassement selon les modalités trophiques et de bilan en eau donnent des résultats équivalents entre le jeu de calibration et le jeu de validation (environ 33 % de bons reclassements pour le niveau trophique et environ 58 % pour les apports latéraux en eau). Les résultats pour le bioclimat sont légèrement inférieurs avec les données de la base IFN par rapport au jeu EcoPlant de calibration (50, 2% contre 53,4% de bons reclassements). Le modèle de réserve utile est également assez stable

quelles que soient les données utilisées ($R^2 = 0.43$ avec le jeu de calibration et $R^2 = 0.42$ avec le jeu de validation. D'autre part, la réalisation de modèles directement à partir des jeux de validation a conduit à des équations très similaires à celles issues des jeux de calibration. On peut donc considérer qu'il y a une bonne stabilité des différents modèles. Le moins performant est celui concernant le niveau trophique, mettant en évidence la difficulté à obtenir des variables concernant la richesse chimique pertinentes à l'échelle d'un massif.

La validation de la carte des stations avec des relevés de terrain a montré la difficulté de mettre en concordance des typologies réalisées avec des méthodes différentes. Elle n'utilise que des critères abiotiques pour la caractérisation de la station, contrairement aux catalogues qui prennent en compte les espèces présentes. Cela nous a conduit à regrouper certaines stations de la carte prédictive, sous le nom de stations équivalentes, afin de pouvoir faire le lien avec la station correspondante du catalogue, dont la description en terme d'alimentation en eau, en nutriments, et de conditions climatiques est souvent moins détaillée que notre typologie. La mise en relation des deux méthodes montre clairement que la carte prédictive discrimine correctement les stations selon chacun des trois gradients. La distinction entre deux stations aux conditions écologiques proches est plus ambiguë, le choix d'un nombre de stations plus limité aurait peut être permis d'être plus discriminant. Cependant, seule l'utilisation sur le terrain permettra de valider le découpage défini dans cette étude.

L'utilisation d'un tel document ouvre de larges horizons : prézonages, identification de secteurs particuliers, aide à l'échantillonnage, planification à l'échelle du massif, ou première approche de la variabilité stationnelle à l'échelle d'une forêt en sont quelques exemples. A l'échelle régionale (1/500 000ème), elle permet de connaître les surfaces des différents types de stations et de prévoir les surfaces des peuplements potentiels sur la région. A une échelle intermédiaire (1/100 000), elle permet d'observer la distribution des types de stations dans le paysage et de prévoir des cartographies de terrain complémentaires qui pourraient compléter la carte des stations prédictives.

Cependant, la validité de cette carte doit également être précisée à l'échelle de la forêt (1/25 000 à 1/10 000), en comparant la cartographie prédictive à des cartographies réalisées manuellement sur le terrain à l'aide des catalogues. Si la définition des types de stations et la localisation de leurs limites s'avéraient correctes à l'échelle de la forêt, au moins pour un grand nombre de types de stations, la réalisation d'une cartographie de terrain ne serait plus nécessaire que pour compléter les quelques types mal définis par le modèle (notamment ceux correspondant à un niveau trophique médian). La carte des stations pourrait ainsi être utilisée pour connaître la surface de chaque type stationnel, préparer les phases de terrain de cartographie complémentaire et définir les essences à favoriser dans le cadre de l'aménagement. Elle pourrait également être mise en relation avec des indices de fertilité, afin de conseiller les gestionnaires dans leurs choix. Cependant, la carte prédictive n'a pas pour vocation à se substituer à une cartographie de terrain, un examen visuel du terrain étant nécessaire afin de déterminer de façon optimale certains paramètres, comme la géologie par exemple. L'approche utilisant la carte prédictive se veut donc complémentaire de la cartographie de terrain et des catalogues existants.

Une première application en terme de prédiction d'essences potentielles a été réalisée à titre d'exemple. Elle montre que la carte des stations prédites est adaptée à la cartographie de la répartition des espèces. Ce travail doit être approfondi et confirmé avec un nombre plus important d'espèces, d'intérêt sylvicole ou présentant des enjeux environnementaux (espèces envahissantes ou à forte valeur patrimoniale par exemple). Ainsi, un inventaire des espèces potentielles ainsi que des espèces à éviter pourrait être réalisé pour chacune des stations.

La diffusion des cartes prédictives obtenues doit être systématisée auprès des gestionnaires forestiers publics et privés, pour qu'elles puissent être utilisées largement dans le cadre de la reconstitution des forêts après tempête et celui des aménagements forestiers. Un retour sur les expériences de terrain pourrait permettre une éventuelle amélioration du travail réalisé.

A moyen terme, le lien entre les stations prédites et les potentialités forestières (essences présentes et potentielles, fertilité prévisible, contraintes techniques ou environnementales) et l'intérêt patrimonial (correspondance avec les habitats, relation avec les espèces d'intérêt patrimonial) doit naturellement être développé afin de fournir des recommandations de gestion au forestier. Elles peuvent au début faire l'objet d'un consensus d'experts dans ce domaine. Ensuite, elles doivent être étudiées de façon plus formalisée. A ce titre, les données de l'IFN, qui sont localisées et qui contiennent des données sur la croissance des essences, semblent être appropriées pour essayer d'estimer les potentialités de chaque station prédite.

Ce projet fournit pour la première fois une carte des stations sur un territoire de la taille d'une région administrative. Ce nouvel outil, après validation sur le terrain, a pour vocation à être utilisé dans le cadre de la gestion forestière, en complément des catalogues existants. S'il s'avèrait performant, une généralisation de la méthode sur d'autres territoires ou sur de plus vastes échelles serait envisageable.

Bibliographie

- Augusto, L., J. Ranger, M. Bonneau (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Rev. For. Fr.* 52(6): 507-518.
- Badeau V., Landmann G., Ulrich E. (1998). Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers.
- Baize, D., B. Jabiol (1995). Guide pour la description des sols.
- Benichou, P. and O. Le Breton, (1987). Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7^{ème} série, n°19 p. 12.
- Berges, L. (1998). Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des forêts: 348.
- Boiffin, J. (2006). Cartographie prédictive de l'aire de répartition du chêne pubescent (*Quercus humilis*), du chêne vert (*Quercus ilex*) et du chêne sessile (*Quercus petraea*). Engref, Nancy: 29 p.
- Bonneau, M., P. Faivre, M. Gury, J. M. Hetier, F. Le Tacon (1978). Carte pédologique de France au 1/100.000 : St Dié. Notice explicative.
- Bonneau M. and G. Landmann (1988) Rapport final de la convention n° 86-1 entre l'INRA et le ministère de l'agriculture.- pp. 301 à 3-25.
- Braud, J., E. Durand, X. Gauquelin, A. Madesclaire, D. Oberti (1993). Le choix des essences forestières dans les Vosges alsaciennes, Document de vulgarisation, C.R.P.F. Lorraine-Alsace.
- Burrough, P.A., (1986). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press, New York, p. 50.
- Cachan, P. (1974). Etude bioclimatique du massif vosgien.
- Cornu, J.F., 2004 : Validation d'un outil de cartographie automatique des stations forestières du massif Vosgien, révision, amélioration et validation. Rapport d'étude, ENGREF, 123 p.
- Curt, T., S. Dole, G. Marmey (1996). Alimentation en eau et production forestière. Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le massif central. *Etude et Gestion des Sols* 3(2): 81-96.
- Dion, J. (1985). Les forêts vosgiennes. Etude biogéographique.
- Drapier J. (1983). Les difficultés de régénérations des sapinières vosgiennes. Importance de l'humus et rôle de l'allélopathie. Université de Nancy I, thèse, 120 p. + annexes.
- Drapier N. (1988). Eléments pour une typologie forestière de la Vôge. Nancy, ENGREF-Université de Nancy I: 83.
- Garat, J., Garin, C., Gibaud, G., Perier, H. (2004). Evaluation de la ressource forestière dans le massif Vosgien : prédiction de l'aire de répartition du hêtre, du sapin, et de l'épicéa, 47 p.

- Gégout, J. C. (1989). Etude phyto-écologique de la région des Mille-Etangs en vue d'une typologie forestière. Nancy, Université de Nancy I: 143.
- Gégout, J. C. (1993). Catalogue des types de stations forestières de la région des Mille-Etangs (Haute-Saône).
- Gégout J. C. (1993). Catalogue des types de stations forestières de la région des Mille-Etangs Haute-Saône. Relevés phytoécologiques effectués dans le cadre du catalogue.
- Gégout, J. C., C. Allegrini, B. de, P., L. Brouillet, D. Giard, A. Mariel (1993). Le choix des essences forestières dans la région des Mille-Etangs, Document simplifié des typologies des stations, maison de l'environnement des Vosges du sud.
- Gégout J.C. (1995). Etude des relations entre les ressources minérales du sol et la végétation forestière dans les Vosges. Thèse de l'université de Nancy I, Nancy I, 325 p.
- Gégout J.C. (2001). Relevés réalisés par la 11ème promotion de la formation des ingénieurs forestiers dans le cadre d'un exercice de phytoécologie effectué dans les Vosges du sud.
- Gégout J.C. et Piedallu C. (2002). Cartographie automatique des stations forestières du massif Vosgien, rapport d'étude financé par le GIP ECOFOR, 33 pages + Annexes.
- Gégout, J. C., C. Coudun, et al. (2005). "EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables." *Journal of Vegetation Science* **16**(2): 257-260.
- Girompaire L., (1986). Recherche de relations entre le dépérissement de la forêt et les conditions écologiques. Mémoire de D.E.A, Université de Nancy I, 145 p.
- Greenlee D. D. (1987). Raster and Vector Processing for Scanned Linework, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 53, No. 10, October 1987, pp. 1383-1387.
- Guillet, B. (1974). Les problèmes de l'évolution des podzols vosgiens et ses relations avec l'histoire de la végétation. *Rev. For. Fr.* 26(1): 31-44.
- Hubert, A. (1986). Typologie des stations forestières dans la vallée de Masevaux. Nancy, Université de Nancy I: 15.
- Issler, E. (1937). Les associations végétales des Vosges méridionales et de la plaine rhénane avoisinante. première partie : les forêts.
- Jenson S. K. and J. O. Domingue. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.
- Le Goff, N., G. Lévy (1984). Productivité du Frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie. B. - Etude des relations entre la productivité et les conditions de milieu. *Ann. Sci. For.* 41(2): 135-170.
- Le Goff, N., C.-B. M., G. Muller (1994). Croissance et productivité du chêne rouge dans le Nord-Est de la France. *Le Chêne rouge d'Amérique*. Paris, INRA: 158-176.
- Madesclaire, A., E. Lacombe, J. C. Rameau (1999). Les milieux forestiers dans les Vosges gréseuses lorraines, C.R.P.F. de Lorraine-Alsace.
- Madesclaire, A., J. C. Rameau, H. Voiry (1995). Le choix des essences forestières dans les Vosges cristallines lorraines, Document de vulgarisation, C.R.P.F. de Lorraine Alsace.

- Manel, S., H. C. Williams, et al. (2001). "Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence." *Journal of Applied Ecology* 38(5): 921-931.
- Mark, D. M. (1988). *Network Models in Geomorphology, Modelling in Geomorphological Systems*. John Wiley.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., and Landson, A. R., (1991). *Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications*, Hydrological Processes. Vol. 5.3-30.
- Morlot, D. (1986). *Typologie des stations forestières dans les Vosges moyennes et méridionales (massifs forestiers entre vallée de la Moselle et vallée de la Moselotte)*. Nancy, Université de Nancy I-ENGREF: 147.
- Morlot D. (1994). *Relevés phytoécologiques avec analyses de sols réalisés dans la forêt des Hospices de Nancy Vosges. Données non publiées*. Equipe Ecosystèmes forestiers. ENGREF, centre de Nancy.
- Oberti, D. (1987). *Typologie des stations forestières du massif circonscrit entre Brushe et Giessen (Bas-Rhin)*. Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts- Université de Nancy I: 133.
- Oberti, D. (1990). *Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n°1 : Généralités, types stationnels des Vosges cristallines*. Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.
- Oberti, D. (1990). *Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n°2 : Types stationnels des Hautes Vosges gréseuses*. Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.
- Oberti, D. (1990). *Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Fascicule n°3 : Types stationnels des collines sous-vosgiennes*. Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.
- Oberti D. (1990). *Catalogue des stations forestières des Vosges alsaciennes. Relevés effectués dans le cadre du catalogue*.
- Penel M. 1979. *Caractérisation physico-chimique et classification des humus forestiers acides en relation avec la végétation et ses exigences écologiques*.
- Perriaux, J. (1961). *Contribution à la géologie des Vosges gréseuses. Mémoire de la carte géologique d'Alsace lorraine*.
- Piguet, A. (1987). *Typologie des stations forestières dans les Vosges du sud*. Nancy, Université de Franche-Comté - E.N.G.R.E.F., Nancy: 116.
- Py, N. (2005). *Cartographie prédictive de l'aire de répartition et de la fertilité de quelques essences forestières. Application à l'érable champêtre (Acer campestre), au hêtre (Fagus sylvatica), et à l'épicéa (Picea abies) dans les Alpes Françaises*, Engref, Nancy: 72 p.
- Rameau, J. C., D. Mansion, G. Dumé (1989). *Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 1 : plaines et collines*.
- Rameau, J. C., D. Mansion, G. Dumé (1993). *Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 2 : montagnes*. Paris, Institut pour le Développement.

- Souchier, B. (1971). Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges).
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union. Vol. 8, Number 6, pp. 913-920.
- Stussi, J.M., (1995). 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.
- Tarboton D. G., R. L. Bras, I. Rodriguez-Iturbe. (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, Hydrological Processes. Vol. 5, pp. 81-100.
- Timbal, J. (1979). Notice détaillée des deux feuilles lorraines, N° 18 : Metz, N° 27 : Nancy. Carte de la végétation de la France, Ed. du CNRS: 118.
- Timbal (1985). Types forestiers d'Alsace, I.N.R.A. - Office National des Forêts.
- Von Eller, J. P. (1984). Guides géologiques régionaux. Vosges Alsace. Paris, Masson.
- Zeverbergen, L. W., and C. R. Thorne, (1987). 'Quantitative Analysis of Land Surface Topography', Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 12, pp 47 - 56.

Annexe 1 : nomenclature simplifiée des substrats géologiques du massif vosgien et richesses chimiques et réserves utiles associées.

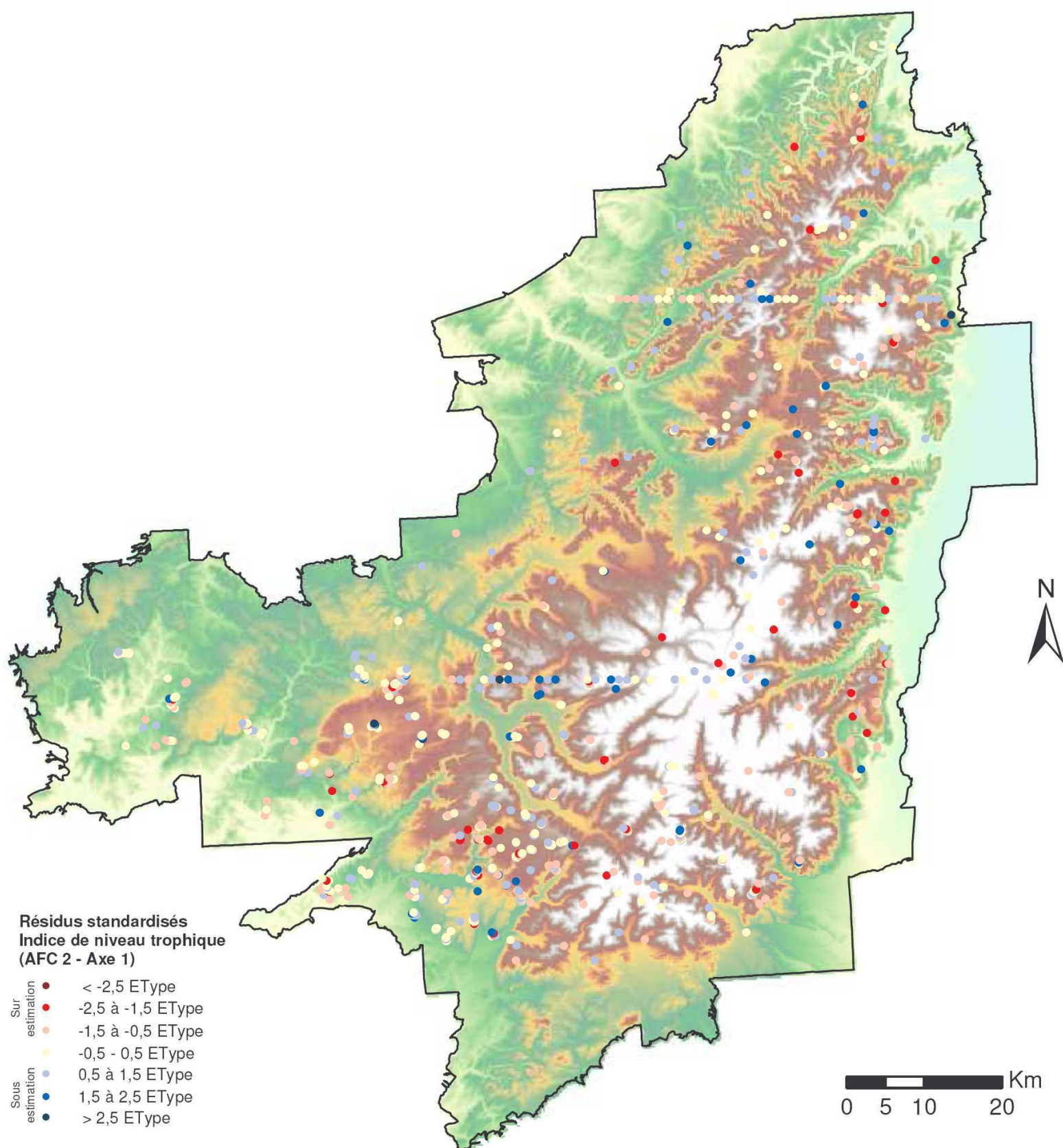
Les richesses chimiques varient de “a” (substrats les plus siliceux) à “e” (substrats calcaire). Voir le texte pour plus de détails.

Nom substrat	Code substrat	Niveau trophique
Amphibolite	_d	c
Andesite	_a	d
Breches	br_rK	c
Calcaire cristallin	C	e
calcaires recifaux	ca	e
Conglomerat principal	t1c	a
Corneenne	dA	d
depots artificiels	x	abs
Depots quaternaires	FG	c
Diorite	_h	c
Dolerite	i_s	c
Dolomie	dol	e
Dolomie et marnes	dolma	e
Durbachite	_z_g	c
Eboulis	E	a
Gabbro	_t	c
Gneiss	_z	c
Granite a biotite non differencie	_g3	c
Granite d Andlau	_g1A	c
Granite d Epinal	_g1E	a
Granite de Coravillers	_g1C	c
Granite de Dambach	_g1D	b
Granite de Fouday-Grendelbruch	_g1F	a
Granite de Gerardmer	_g1G	b
Granite de Goldbach	_g1Go	c
Granite de Grendelbruch	_g1Gre	a
Granite de Kagenfels	_g1Kg	a
Granite de l Altenberg	_g1An	b
Granite de Natzwiller	_g1N	b
Granite de Raon-l Etape	_g1Ra	a
Granite de Remiremont	_g1Re	b
Granite de Saint-Stail	_g1S	c
Granite de Thannenkirch	_g1Ta	c
Granite de Thiefosse	_g1Ti	b
Granite de Turckheim	_g1Tu	b
Granite de Waldersbach	_g1Wa	c
Granite de Wintzenheim	_g1Wi	b
Granite des Ballons	_g1B	c
Granite des Cretes	_g1Cr	c
Granite des Verreries	_g1Vr	c

Granite du Bilstein	_g1Bi	b
Granite du Bramont	_g1Bra	c
Granite du Brezouard	_g1Bre	a
Granite du Champ-du-feu	_g1Ch	c
Granite du Hohrodberg	_g1Hr	c
Granite du Hohwald	_g1Hd	c
Granite du Kaysersberg	_g1Ky	c
Granite du Lac vert	_g1L	b
Granite du Tholy	_g1To	b
Granite du Valtin	_g1Vl	b
Granite du Ventron	_g1Vt	b
Granite fondamental	_g5	c
Granite non differencie	_g	c
Granite porphyroblastique indifferencie	_g7	b
Granite porphyroide indifferencie	_g8	c
Granite syncinematique	_g9	c
Granito-gneiss	_g_z	c
Granodiorite du champ-du-feu	_g4	c
Granodiorite indifferencie	p_g	c
Granophyre	_g2a	c
Grauwackes indifferencieees	h2c1	c
Gres a Voltzia	t2b	b
Gres a Voltzia et couches intermediaires	t2	b
Gres coquilliers	t3	c
Gres indifferencie	gre	a
Gres intermediaire	t2a	b
Gres permien	r	b
Gres vosgien	t1	a
Ignimbrites indifferenciees	i_rr	c
Keratophyre quartzique	pK1	c
Kersantite	_u	c
Labradorite	_b(2)	c
lac, etang	lac	abs
Latite quartzifere	_a_j	d
Leptynite indifferenciee	_z1	a
Limons	OE	c
Marnes	mar	e
Microdiorite	_m_h	c
Microgranite indifferencie	_m2	c
Microsyenite	_m_s	c
Migmatite indifferencie	M	a
minerais de fer	ea	abs
Monzonite	_g3M	b
Oligocene	g1	c
Rhyolite indifferenciee	_r	b
Roche cristalline grenue ou microgrenue non differenciee	rcrnd	d
Roche non differenciee	nd	c
Roche sedimentaire coherente carbonatee non differenciee	scc	e
Roche sedimentaire coherente siliceuse non differenciee	scs	d
Roche sedimentaire meuble	arg	e

carbonatee non differenciee		
Roche sedimentaire meuble siliceuse non differenciee	sms	b
Roche volcanique massive non acide non differenciee	vna	a
Roche volcanique pyroclastique non differenciee	vs	d
Saxonien	r2	c
Schistes et grauwackes	h2	c
Schistes indifferencies	d-h	b
Spilites et diabases	hK3	d
Syenodiorite	_s_h	d
Trachyandesites	_j_a	d
Trachytes	_j	d
Tufs	K1	d
Tufs et ignimbrites rhyodacitiques	_r4	d
Vaugnerite	_s_u	c
Viseen	h	c

Annexe 2 : Distribution des résidus standardisés du modèle de niveau trophique (n = 951)



Annexe 3 : Distribution des résidus standardisés pour le modèle de bioclimat (n = 951)

