HAL open science

Assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêt

Christian Piedallu, Thomas Kochert, Gabriella Riofrio-Dillon, Julien Staub, Dominique Messant, Stéphane Asael, Damien Serrate, Vincent Perez, Jean Claude Pierrat, Bernard Jabiol, et al.

To cite this version:

Christian Piedallu, Thomas Kochert, Gabriella Riofrio-Dillon, Julien Staub, Dominique Messant, et al.. Assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêt. [Rapport de recherche] AgroParisTech; Office National des Forêts. 2010. hal-00835919

HAL Id: hal-00835919

https://hal.science/hal-00835919

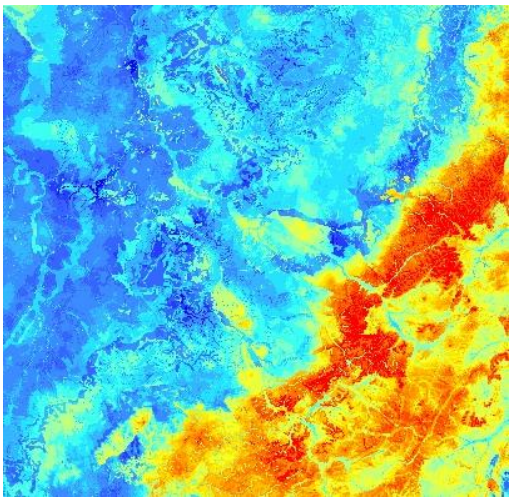
Submitted on 21 Jun 2013

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.

Partenaires	PEFC LORRAINE, CIPEBLOR, INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, Forêts & Bois de l'Est, Forêt Privée Française	
Avec la participation financière de	lorraine conseil régional	DRAAF Lorraine
Réalisation	AgroParisTech ENGREF, LEREOB	Office National des Forêts

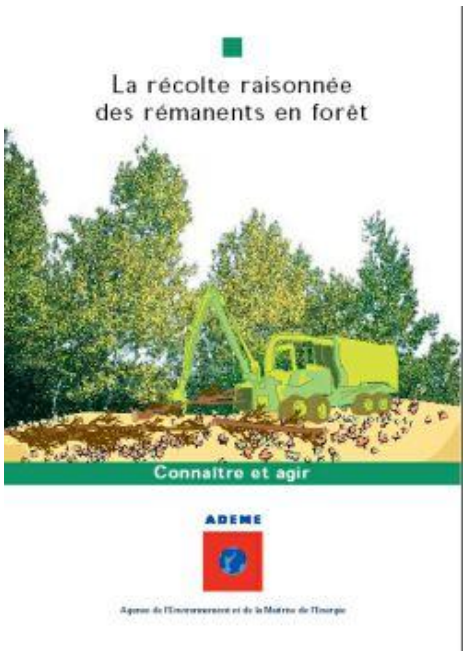
Projet 8 de la politique de qualité
PEFC Lorraine 2007-2012
« Assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêt »
Rapport final – Novembre 2010

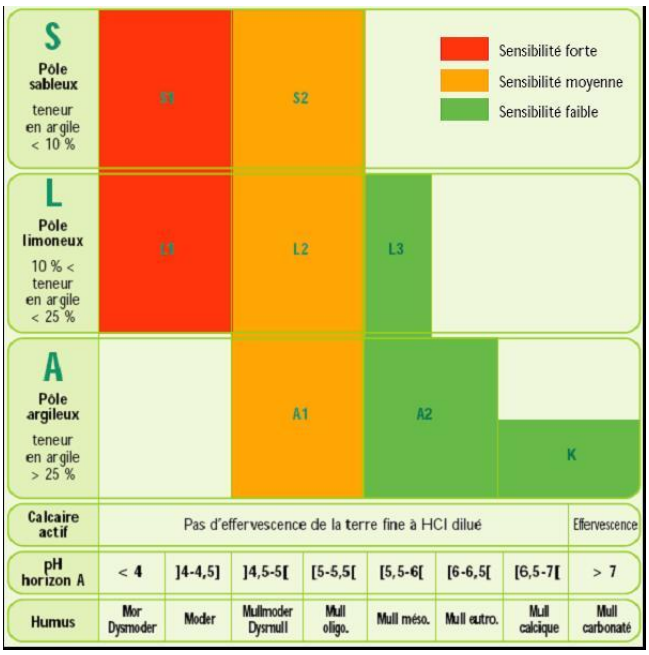


Participants : C. Piedallu (Agroparistech-Engref), T. Kochert (ONF), G.Riofrio-Dillon (Agroparistech-Engref), J. Staub (ONF), D. Messant (ONF), S Asael (CRPF), D. Serrate (forêt et bois de l'est), V.Perez (Agroparistech-Engref), JC Pierrat (Agroparistech-Engref), B. Jabiol (Agroparistech-Engref), M. Lecocq (IFN), JM Frémont (IFN)

1) Contexte et objectifs du travail

Le suivi des dépôts azotés en forêt, assuré à l'aide du réseau Renecofor, montre que certains sols naturellement acides dans le massif vosgien ont continué à s'acidifier entre 1970 et 1990 (Dupouey *et al.*, 1998). Ces études ont montré par exemple que les apports en calcium constitués par les dépôts atmosphériques et l'altération des minéraux du sol étaient inférieurs aux exportations par drainage et exportation des végétaux. Avec le développement des énergies renouvelables, la demande en matière de bois s'est accrue et les gisements de rémanents sont convoités. Or, si les branches, les feuilles ou les aiguilles représentent une faible partie de la biomasse au regard de l'arbre entier, elles peuvent contenir une part importante des nutriments. Aussi, la récolte d'arbres entiers ou des rémanents peut conduire à une exportation des nutriments multipliée par deux ou trois par rapport à la récolte des seuls troncs. Pour prévenir d'éventuels problèmes d'appauvrissement des sols, l'ADEME, dans son guide concernant la récolte raisonnée des rémanents en forêt, a été amené à recommander de ne pas réaliser d'exploitation intensifiée sur les sols les plus pauvres. Dans ce guide, différents degrés de sensibilité conduisant à des recommandations en matière de récolte ont été réalisés pour des sols non fertilisés, en fonction du pH du sol et sa texture (Figure 1).





	Peuplement	Recommandations de l'ADEME sans fertilisation
Sols peu sensibles	Futaie	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Taillis et TSF	Laisser au moins 15-20 ans entre 2 récoltes des arbres + rémanents (ou d'arbres entiers)
Sols moyennement sensibles	Epicéa commun	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Futaie hors épicéa ou TSF en conversion	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 1 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Taillis et TSF	Laisser au moins 30 ans entre 2 récoltes des arbres + rémanents (ou d'arbres entiers)
Sols très sensibles	Tous	Aucune récolte de rémanents ou d'arbres entiers

Figure 1. Préconisations du guide ADEME " la récolte raisonnée des rémanents en forêt ", concernant l'exportation de rémanents en forêt.

L'objectif du travail réalisé vise à présenter au gestionnaire, propriétaire et industriel un zonage de la Lorraine vis-à-vis des possibilités raisonnées de récolte des rémanents à partir des classes de sensibilité du guide ADEME. On entend par raisonnée, des pratiques qui n'ont pas de conséquences défavorables sur le sol tant par rapport à sa fertilité qu'à ses propriétés physiques.
La cartographie se fera selon les deux axes d'action utilisés dans le guide :
- cartographie en fonction du gradient d'acidité,
- cartographie en fonction du risque de dégradation physique.

2) Cartographie du gradient d'acidité

2.1) Objectif et méthode

Du fait du coût de la mesure, il existe relativement peu de mesures de pH des sols forestiers disponibles sur la France, limitant les possibilités de cartographie à partir de relevés de terrain. Une première carte des pH de l'horizon A a cependant été réalisée en 2008 par le LERFoB et l'IFN pour la France entière (Coudun *et al.*, 2006). Cette carte fournit des prédictions de pH par pixels de 1 km de coté, en utilisant la technique de bioindication à partir de 103864 relevés floristiques réalisés par l'IFN (Gegout *et al.*, 2003). La valeur bioindiquée a été calculée en moyennant les valeurs indicatrices des espèces présentes sur chaque relevé l'IFN. Les valeurs indicatrices ont été calibrées à partir de 3835 relevés floristiques de la base de données Ecoplant ayant des mesures de pH des horizons A (Gegout *et al.*, 2005). Pour réaliser cette carte, les valeurs de pH prédites par la flore sont ensuite interpolées à l'ensemble du territoire par krigeage. Une validation réalisée en utilisant 261 relevés indépendants du réseau européen comprenant des mesures de pH a mis en évidence que la carte ainsi réalisée permettait d'expliquer 58% de la variance du pH pour une erreur quadratique moyenne de 0.79 unités de pH. Ces performances sont relativement proches de celles des valeurs de pH bioindiquées directement sur la placette, qui présentent avec le même jeu de validation un R^2 de 0.61 et une erreur quadratique moyenne de 0.81 avec les valeurs mesurées. Si cette carte permet de fournir une information concernant le gradient d'acidité, la donnée par pixels de 1 km de coté est relativement grossière pour évaluer finement les possibilités de récolte des rémanents à l'échelle d'une région comme la Lorraine. Aussi, l'objectif de cette étude est d'utiliser d'autres techniques statistiques basées sur l'utilisation de covariables, dans le but d'essayer d'améliorer la qualité de la prédiction et de diminuer la résolution spatiale de la carte.

Les facteurs liés aux sols, tel le pH, sont pour la plupart finement liés à la position topographique, au climat, et aux substrats présents, ces relations ayant souvent été utilisées pour réaliser des prédictions à des endroits où aucune mesure n'était disponible (Kalivas *et al.*, 2002; McBratney *et al.*, 2003). En France, la nature du substrat géologique est disponible sous forme de cartes géologiques numériques commercialisées par le BRGM, et les indices topographiques peuvent être calculés à partir de modèles numériques de terrain existant à la résolution de 50 mètres de coté sur la France entière (BD alti de l'IGN par exemple). Pour réaliser une carte des pH à fine résolution, nous avons donc extrait les valeurs de pH bioindiquées sur les relevés IFN qui ont été utilisés pour réaliser la carte au pas kilométrique, et qui étaient présents sur la Lorraine (Drapier and Cluzeau, 2001). Afin d'éliminer les relevés où la qualité de la bioindication aurait pu être insuffisante, nous avons enlevé les relevés possédant moins de 9 espèces végétales sur la placette. Nous avons ensuite calculé sous système d'informations géographiques un nombre important de variables permettant potentiellement d'expliquer les valeurs de pH estimées, et décrivant la topographie, le climat, et la géologie. Une analyse par régression linéaire multiple a permis de sélectionner et de combiner les variables responsables des variations de pH, et combinée à un krigeage des résidus du modèle, elle a permis de réaliser des cartes à différente résolution spatiale sur l'ensemble de la Lorraine. Une validation avec des jeux de mesures indépendantes réalisés sur différentes emprises spatiales a permis de d'évaluer la qualité prédictive des cartes ainsi réalisées, de sélectionner la résolution spatiale optimale, et de comparer la qualité des cartes obtenues par cette méthode utilisant des covariables aux cartes obtenues par simple krigeage (Figure 2).

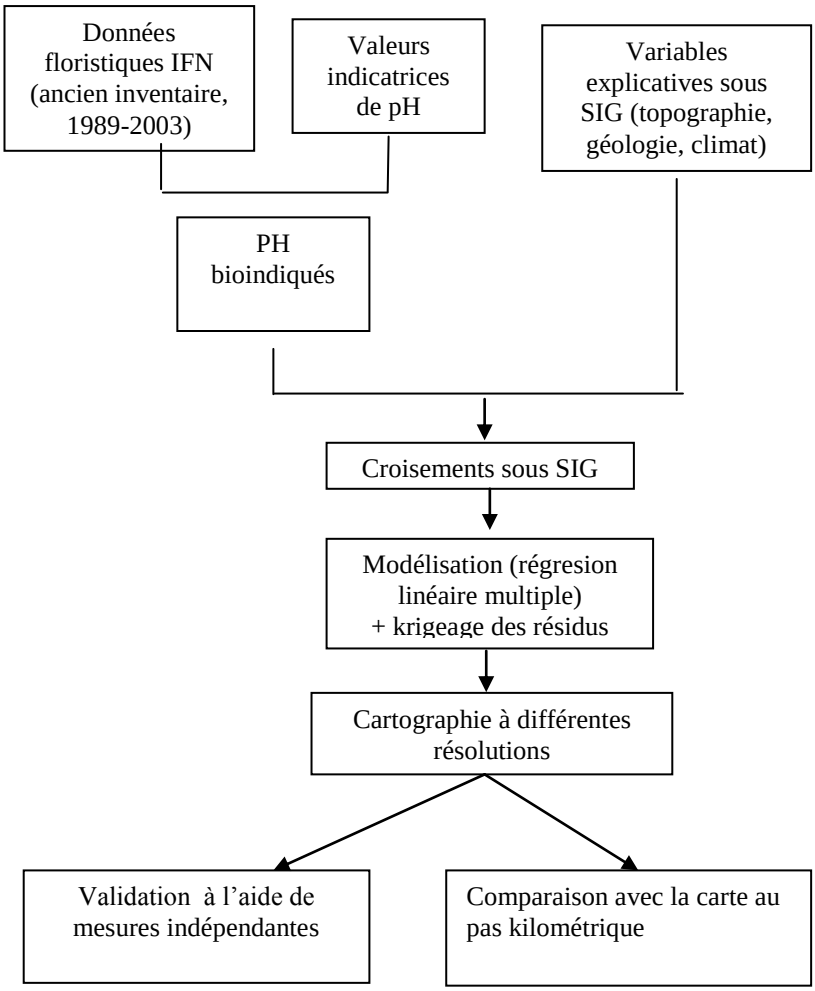


Figure 2. Méthodologie de réalisation de la carte des pH sur la Lorraine

Pour plus de renseignements concernant la méthodologie, se référer au rapport de stage de Gabriela Riofrio Dillon « predictive mapping of pH at fine resolution at regional scale » réalisé au Lerfob.

2.2) Variables utilisées pour la modélisation

2.2.1) Variable à expliquer

Du fait du manque de mesures de pH sur de vastes surfaces, la variable explicative a été calculée par bioindication à l'aide des plantes, en utilisant les relevés floristiques de l'IFN (Gégout *et al.*, 2003). Nous avons ainsi utilisé 13908 placettes géoréférencées issues de l'ancienne méthode d'inventaire, et collectées entre 1990 et 2005 (Figure 3). L'amplitude des valeurs bioindiquées est importante sur la Lorraine, avec des valeurs qui varient entre 3 et 8.4. Ces relevés géoréférencés seront ensuite croisés sous système d'information géographique avec les variables potentiellement explicatives qui seront utilisées pour la modélisation.

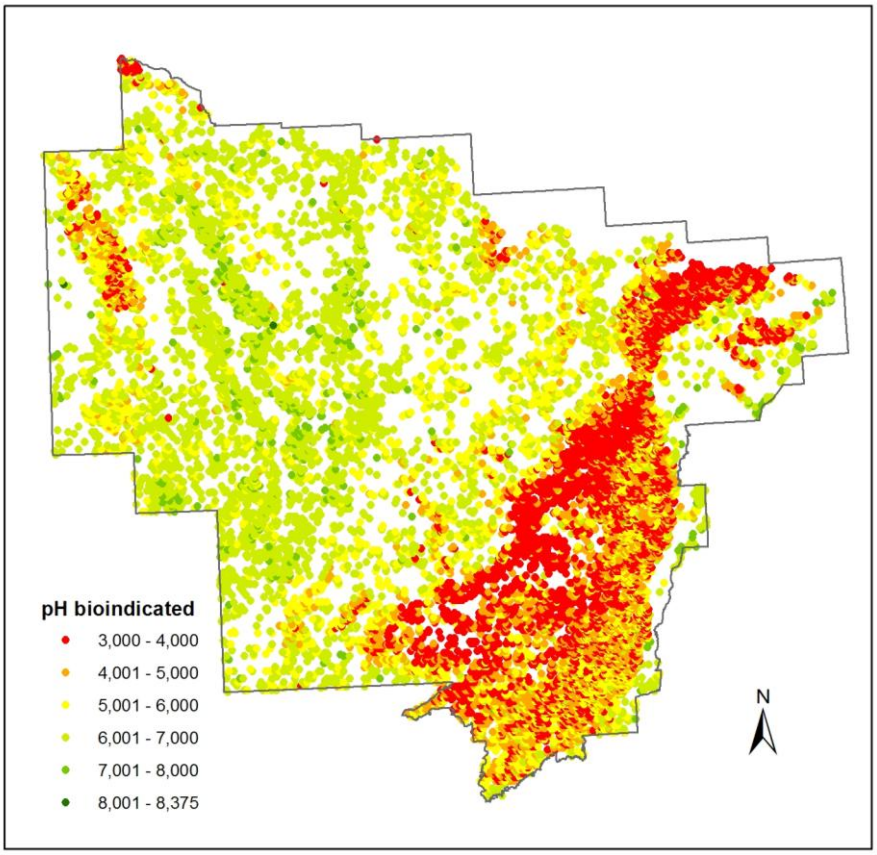


Figure 3. Distribution spatiale des pH bioindiqués sur les relevés IFN (période 1989-2003).

2.2.2) Variables potentiellement explicatives

2.2.2.1) Variables géologiques

Une des variables potentiellement explicative de la richesse chimique des sols est liée à la nature du matériau parental. En l'absence de carte des sols décrivant finement les variations sur la Lorraine, nous avons utilisé les cartes géologiques au 1/50000 eme du BRGM pour créer une variable qualitative permettant de différencier les principaux substrats en fonction de leur composition minérale. Pour cela nous avons acquis 56 cartes géologiques au format vecteur auprès du BRGM, que nous avons ajoutées aux 27 cartes déjà acquises lors d'un précédent projet concernant la montagne vosgienne (Gégout *et al.*, 2006; Piedallu *et al.*, 2006).

La concaténation des cartes numériques existantes permet d'obtenir 48476 polygones distribués selon 1973 unités géologiques (Riofrio-Dillon, 2010). Cependant, une même unité peut être codée selon des noms différents pour chacune des cartes géologiques où elle est présente. Un important travail d'harmonisation est alors nécessaire afin de déterminer un nom unique pour chacune des unités présentes, en fonction de la description de l'unité présente dans la notice de la carte. A la fin de cette étape d'harmonisation, le nombre de polygones est réduit à 44131 pour 583 unités géologiques. Une seconde harmonisation est alors nécessaire afin de réduire le nombre d'unités. Les unités ayant une richesse chimique semblable sont agrégées, afin d'obtenir 40516 polygones représentant 113 unités géologiques. La réalisation d'une régression linéaire entre les pH bioindiqués sur les relevés IFN et ces 113 unités géologiques permet le regroupement des unités ayant des coefficients proches, en 39 substrats représentant 37625 polygones (Table 1 et Figure 4).

3ème harmonisation	Nombre de placettes	PH moyen	Écartype pH
AIndifferencie	102	4,956	0,927
Alluvions acides	13	4,053	0,904
Alluvions neutres meubles	347	5,791	1,072
Alluvions riches meubles	92	6,583	0,544
Calcaire et dolomie neutres	208	5,939	0,684
Calcaire et dolomie riches	2235	6,544	0,442
Calcaire oolithique	349	6,506	0,459
Colluvions acides	17	4,306	1,160
Colluvions moyennement acides	110	5,055	1,222
Depots quaternaires acides	173	4,171	0,898
Dépôts quaternaires moyennement acides	267	4,754	0,979
Dépôts quaternaires neutres	819	5,642	0,748
Granites acides	859	4,016	0,826
Granites moyennement acides	439	4,718	0,811
Gres a Voltzia	366	4,414	0,893
Gres acide	666	4,120	0,812
Gres neutre	311	5,556	0,726
Gres permien	95	4,820	0,854
Gres vosgien et roches hyper acides	1646	3,529	0,586
Marnes et argiles acides	88	4,029	0,917
Marnes et argiles moyennement acides	153	4,771	0,746
Marnes et argiles neutres	1312	5,928	0,571
Marnes et argiles riches	204	6,512	0,422
Microgranite indifferencie	51	4,481	0,780
Milieu riche avec gres	34	6,414	0,363
Moyennement acides	603	4,981	0,934
Roches indifferenciees acides	87	3,997	0,907
Roches indifferenciees moyennement acides du primaire	168	4,695	0,846
Roches indifferenciees moyennement acides massifs du primaire	285	4,518	0,803
Roches indifferenciees neutres	84	5,792	0,675
Roches indifferenciees riches	33	6,503	0,410
Roches magmatiques acides	119	4,141	0,799
Roches magmatiques moyennement acides	608	4,493	0,894
Roches magmatiques neutres	16	5,208	0,858
Roches sedimentaires acides	190	4,322	0,903
Roches sedimentaires moyennement acides	450	4,710	0,913
Sables acides	100	4,297	0,924
Sables neutres	160	5,824	0,529
Terrain a chailles	49	6,555	0,509
Total sites	13908		

Table 1. pH moyen et écart type pour les 39 unités géologiques utilisées.

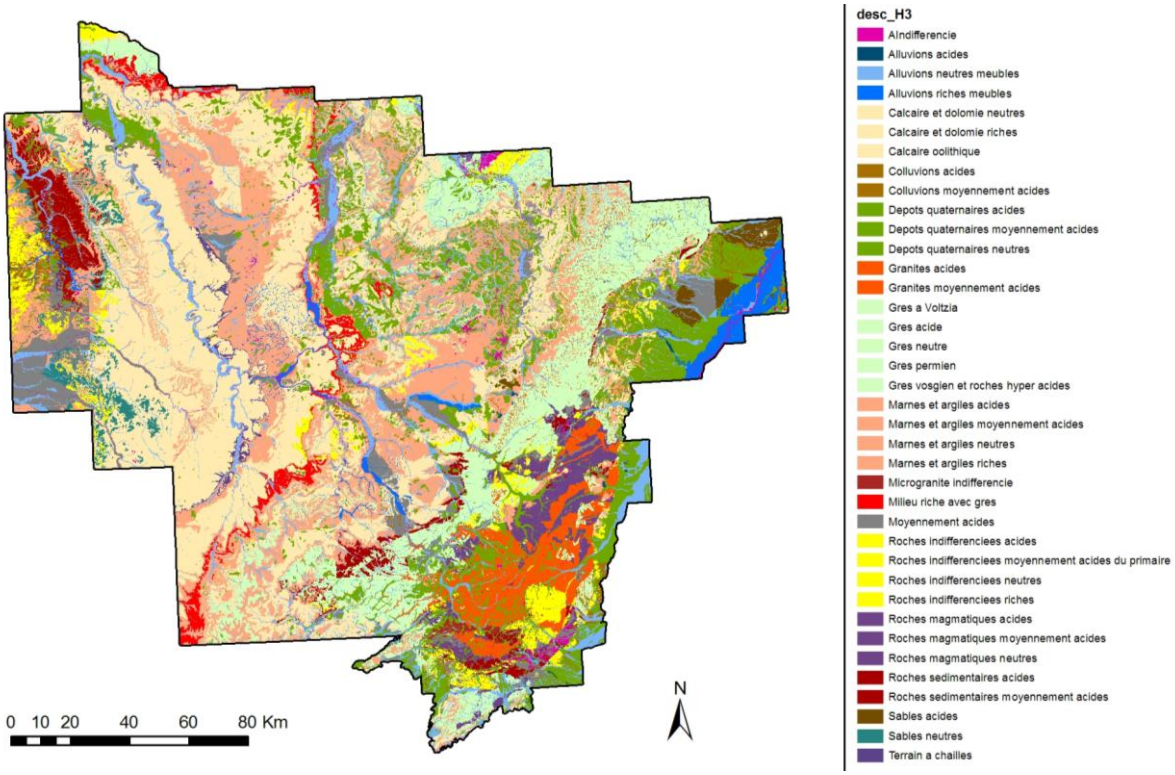


Figure 4. Carte géologique simplifiée en 39 unités géologiques

2.2.2.2) Variables topographiques et hydrologiques

Un nombre important de variables ont été calculées afin d'essayer de caractériser la topographie et l'écoulement en eau sur la Lorraine. Elles ont été estimées en utilisant la méthodologie développée lors de précédentes études (Piedallu *et al.*, 2006; Piedallu and Gegout, 2008; Riofrio-Dillon, 2010), certaines d'entre elles ayant été calculées sur des emprises plus ou moins importantes à l'aide de fonctions dites "focales" existant sous SIG en mode raster. Par exemple, un indice a été créé afin de caractériser la position topographique locale, basé sur la relation entre l'altitude du pixel centrale par rapport à l'altitude moyenne des pixels environnants (idr). Différentes emprises ont été utilisées afin de caractériser cet environnement, pour des cercles de 10, 15, 25, 35 et 50 pixels de rayon (sachant qu'une cellule fait 50 m. de coté). La liste de ces indices est répertoriée dans la table 2.

2.2.2.3) Variables climatiques

Les variables climatiques les plus susceptibles d'avoir une influence sur le pH des sols ont également été testées. Nous avons choisi pour cela un certain nombre de données issues du modèle AURELHY de Météo-France (Benichou and Le Breton, 1987), comme les températures ou les précipitations moyennes annuelles. Combinées avec des estimations de rayonnement solaire (Piedallu and Gegout, 2007; Piedallu and Gegout, 2008), celles ci ont permis le calcul de valeurs d'ETP selon la méthode de Turc (Turc, 1961; Lebourgeois and Piedallu, 2005), puis de bilan hydrique climatique(Piedallu *et al.*, 2007). L'utilisation de la carte des réserves en eau des sols forestiers a également permis le calcul de bilans hydriques édaphiques (Piedallu *et al.*, 2010) (Table 2).

Variable	Description	Type
desc_H2	2nd geological harmonisation	Geological
desc_H3	3rd geological harmonisation	Geological
desc_H4	4th geological harmonisation	Geological
moore	Moore's index raster: in function of size of draining basin and slope.	Hydrological
flacc_fr	Flux accumulation raster: number of draining cells	Hydrological

Variable	Description	Type
zaluv_ne	Alluvial areas raster: alluvial areas calculated depending their position respect to x meters to a stream	Hydrological
mnt50_fill	Elevation raster, 50m. resolution	Topographical
slope50	Slope raster, 50m. resolution	Topographical
curv50	Relief form index raster: shows convexity or concavity of topography, 50m. resolution	Topographical
concave50	Concavity raster, 50m. resolution	Topographical
convexe50	Concavity raster, 50m. resolution	Topographical
curv100	Relief form index raster: shows convexity or concavity of topography, 100m. resolution	Topographical
concave100	Concavity raster, 100m. resolution	Topographical
convexe100	Concavity raster, 100m. resolution	Topographical
curv250	Relief form index raster: shows convexity or concavity of topography, 250m. resolution	Topographical
concave250	Concavity raster, 250m. resolution	Topographical
convexe250	Concavity raster, 250m. resolution	Topographical
curv1000	Relief form index raster: shows convexity or concavity of topography, 1000m. resolution	Topographical
discr	Distance to crest raster, 50m. Resolution	Topographical
distal	Distance to valley raster, 50m. Resolution	Topographical
idr10	Relative altitudinal difference index raster, radius used for calculation (10 cells*50m side)	Topographical
idr15	Relative altitudinal difference index raster, radius used for calculation (15 cells*50m side)	Topographical
idr25	Relative altitudinal difference index raster, radius used for calculation (25 cells*50m side)	Topographical
idr35	Relative altitudinal difference index raster, radius used for calculation (35 cells*50m side)	Topographical
idr50	Relative altitudinal difference index raster, radius used for calculation (50 cells*50m side)	Topographical
ipv	Relative position between closest top and bottom, raster	Topographical
tmoy13	Mean annual temperature	Climatic
precip13	Total annual precipitation	Climatic
detot	Total water deficit in soil	Climatic
rad13	Total annual radiation	Climatic
etptu13	Mean annual potential evapotranspiration	Climatic
bhctu1	Turc's water balance of January	Climatic
bhctu2	Turc's water balance of February	Climatic
bhctu3	Turc's water balance of March	Climatic
bhctu4	Turc's water balance of April	Climatic
bhctu5	Turc's water balance of May	Climatic
bhctu6	Turc's water balance of June	Climatic
bhctu7	Turc's water balance of July	Climatic
bhctu8	Turc's water balance of August	Climatic
bhctu9	Turc's water balance of September	Climatic
bhctu10	Turc's water balance of October	Climatic
bhctu11	Turc's water balance of November	Climatic
bhctu12	Turc's water balance of December	Climatic
bhctu13	Turc's annual water balance	Climatic
ru1	Potential water reserve of January	Climatic
ru2	Potential water reserve of February	Climatic
ru3	Potential water reserve of March	Climatic
ru4	Potential water reserve of April	Climatic
ru5	Potential water reserve of May	Climatic
ru6	Potential water reserve of June	Climatic
ru7	Potential water reserve of July	Climatic
ru8	Potential water reserve of August	Climatic

Variable	Description	Type
ru9	Potential water reserve of September	Climatic
ru10	Potential water reserve of October	Climatic
ru11	Potential water reserve of November	Climatic
ru12	Potential water reserve of December	Climatic
EucDist_Rios	Euclidean distance to river	Geographical
EucDist_Gres	Euclidean distance to stoneware	Geographical

Table 2. Liste des variables explicatives utilisées afin de modéliser le pH des sols.

2.3) Cartographie du pH

2.3.1) Réalisation de la carte

Le pH bioindiqué par les plantes a été modélisé par régression linéaire multiple en utilisant le logiciel S+. Un programme a été réalisé afin de tester automatiquement et pas à pas chacune des variables candidates en fonction des variables préexistant dans le modèle. Les termes simples, quadratiques et cubiques ont été évalués pour chaque variable. Le programme été exécuté de façon incrémentale pour la sélection de chacune des variables, jusqu'à ce qu'aucune d'entre elles ne soit statistiquement significative ($p > 0.001$), ou que le gain de R^2 apporté soit très faible. A chaque étape, les corrélations avec les autres variables du modèle, ainsi que la pertinence du choix au regard des connaissances concernant le déterminisme du pH, ont été examinés, et sont entré en compte dans le choix de la variable.

Chacune des variables sélectionnées dans le modèle existant au format raster, l'équation a ensuite été calculée directement sous SIG afin de cartographier le pH à différentes résolutions. Les résidus du modèle ont ensuite été interpolés puis ont été ajoutés au modèle. On obtient ainsi 7 cartes de 50, 150, 250, 500, 1000, 2500 et 5000 mètres de résolution.

2.3.2) Validation et comparaison avec la carte préexistante au pas kilométrique

Trois jeux de données ont été utilisés afin de valider la carte ainsi produite. Le premier est issu de la base de données Ecoplant, d'où 414 placettes avec des mesures de pH ont été extraites sur la zone d'étude (Figure 5). Le deuxième jeu de données concerne la petite région naturelle voisinant la commune de Bure et comporte 82 mesures de pH. (Figure 5). Le troisième jeu de données a été créé dans le cadre de cette étude à l'échelle de la forêt, sur la commune de Rupt-sur-Moselle, dans le département des Vosges. Ce site à été choisi car il présentait une diversité à la fois topographique et géologique importante. Recouvrant deux vallées et trois versants différents, la zone de prélèvement de Rupt s'échelonne entre 300 et 800 mètres d'altitude, sur des substrats principalement représentés par des granites de composition variée, et des alluvions. Une centaine de placettes ont été échantillonnées durant l'été 2010 par « Forêt et Bois de l'Est » et le CRPF « Alsace-Lorraine », un relevé floristique, une description de fosse, et des prélèvements d'échantillon ayant été réalisés.(Figure 5). Les relevés floristiques ont permis de bioindiquer les valeurs de pH, tandis que les échantillons prélevés ont été envoyés à l'INRA d'Arras pour analyse. On obtient ainsi pour les trois jeux de données utilisées à la fois des valeurs de pH mesurées, bioindiquées, et prédites par les cartes, sur le même jeu de données.

La capacité prédictive des cartes réalisées aux 7 résolutions a été évaluée au regard de ces trois jeux de données, permettant de déterminer la résolution la plus performante en fonction de l'échelle considérée.

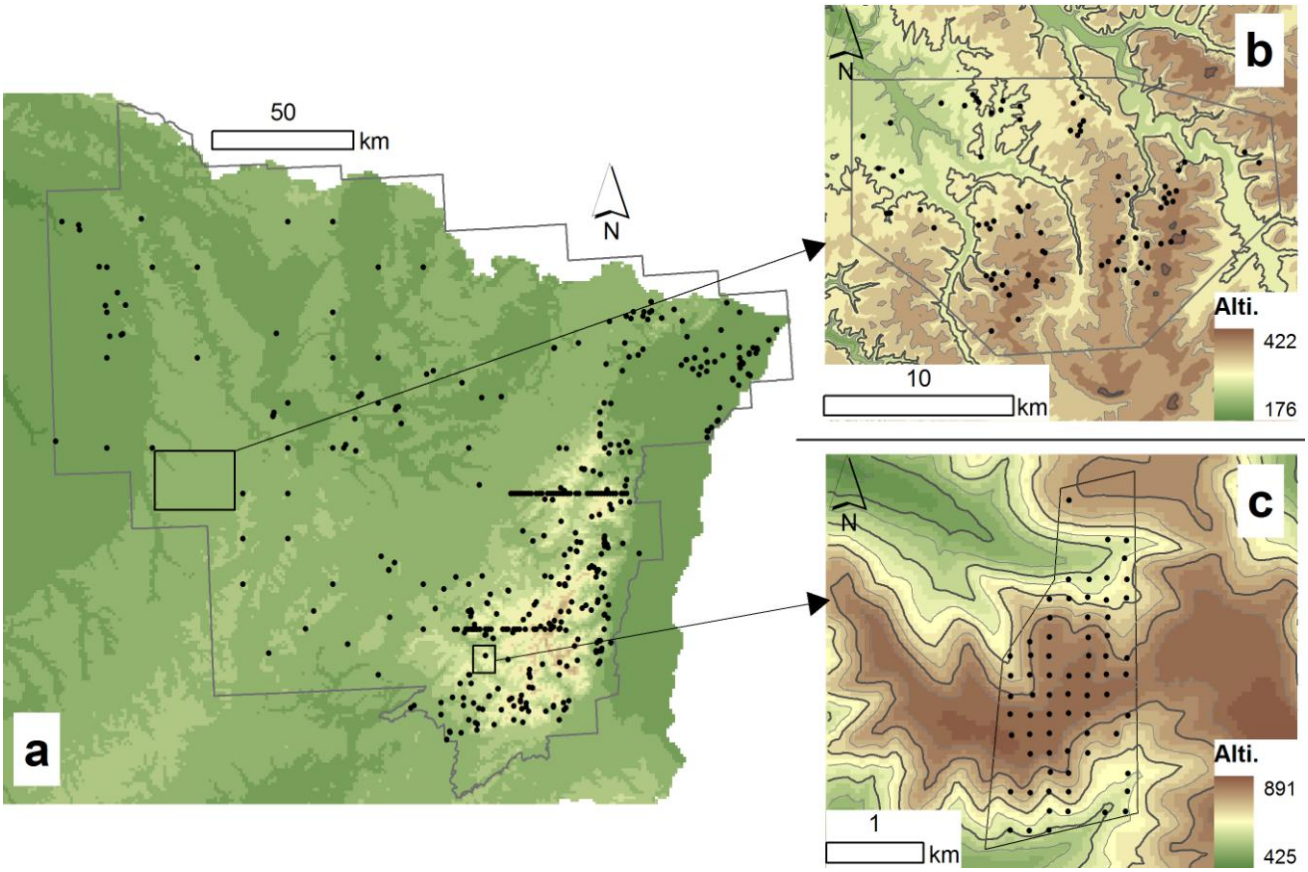


Figure 5. Localisation des pH analysés en laboratoire et utilisés pour valider les modèles à l'échelle de la Lorraine (a, n = 414), du site de Bure (b, n = 82) et de Rupt-sur-Moselle (c, n = 69).

2.4) Résultats

2.4.1) Modélisation du pH

Un modèle à 4 variables comprenant la géologie simplifiée en 33 classes, la pluie du début d'été (mois de mai), la forme du relief (curve 250) et la distance aux grès a été sélectionné (Table 3) :

PH = 7.31 + [descH3_coef] - 0.024 * [precip5] + 0.0001 * [precip5]² - 1.11 * [curve250] + 20.91 * [racine de distance aux grès] + 55.53 * [racine de distance aux grès]^2

Le R^2 de ce modèle s'établit sur le jeu de calibration à 0.74 avec une RSE de 0.63.

Value	coef	Std. Error	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	7.3074	0.1545	47.3077	0.0000
Alluvions acides	-1.1443	0.3156	-3.6259	0.0003
Alluvions neutres meubles	0.3227	0.0440	7.3273	0.0000
Alluvions riches meubles	1.0155	0.0734	13.8355	0.0000
Calcaire et dolomie neutres	0.5077	0.0512	9.9087	0.0000
Calcaire et dolomie riches	0.9132	0.0247	36.9399	0.0000
Calcaire oolithique	0.8058	0.0403	19.9828	0.0000
Colluvions acides	-0.9914	0.1852	-5.3520	0.0000
Colluvions moyennement acides	-0.3919	0.0741	-5.2860	0.0000
Depots quaternaires acides	-0.7652	0.0648	-11.8066	0.0000
Depots quaternaires moyennement acides	-0.4722	0.0512	-9.2275	0.0000
Granites acides	-0.9692	0.0347	-27.9518	0.0000
Granites moyennement acides	-0.5005	0.0400	-12.5162	0.0000
Gres a Voltzia	-0.4779	0.0557	-8.5740	0.0000
Gres acide	-0.7539	0.0488	-15.4417	0.0000
Gres neutre	0.4008	0.0558	7.1808	0.0000
Gres vosgien et roches hyper acides	-1.3054	0.0430	-30.3287	0.0000
Marnes et argiles acides	-1.3728	0.0840	-16.3371	0.0000
Marnes et argiles moyennement acides	-0.4866	0.0662	-7.3538	0.0000
Marnes et argiles neutres	0.3061	0.0278	10.9967	0.0000
Marnes et argiles riches	0.7423	0.0500	14.8570	0.0000
Milieu riche avec gres	0.7713	0.1150	6.7097	0.0000
Moyennement acides	-0.3249	0.0353	-9.2085	0.0000
Roches indifferenciees acides	-1.0548	0.0854	-12.3543	0.0000
Roches indifferenciees moyennement acides massifs du primaire	-0.3701	0.0506	-7.3134	0.0000
Roches indifferenciees riches	0.6810	0.1169	5.8239	0.0000
Roches magmatiques acides	-0.8071	0.0726	-11.1244	0.0000
Roches magmatiques moyennement acides	-0.7015	0.0374	-18.7541	0.0000
Roches sedimentaires acides	-0.5100	0.0607	-8.4081	0.0000
Roches sedimentaires moyennement acides	-0.8544	0.0412	-20.7315	0.0000
Sables acides	-1.2751	0.0726	-17.5652	0.0000
Sables neutres	0.2488	0.0564	4.4097	0.0000
Terrain a chailles	0.8476	0.0972	8.7222	0.0000
precip5	-0.0244	0.0031	-7.7891	0.0000
I(precip5^2)	0.0001	0.0000	3.3089	0.0009
curv250	-1.1102	0.0714	-15.5456	0.0000
Racdisgres	20.9086	6.9944	-2.9893	0.0028
I(racdisgres^2)	55.5334	61.9862	-0.1534	0.8781

Table 3. Coefficients, erreur standard, t et p value des différentes variables du modèle de pH des sols forestiers Lorrains.

Les coefficients présents pour les différentes unités géologiques permettent de définir une constante pondérant positivement ou négativement la richesse chimique des différents substrats présents dans le modèle (Table 3). On retrouve ainsi les grès vosgiens avec le coefficient le plus bas, les calcaires et les alluvions étant généralement les plus riches. L'ordre entre les différents substrats utilisés est cohérent avec les connaissances concernant leur

richesse chimique. La relation entre le pH et la pluie de mai suit une courbe décroissante (Figure 6), signifiant qu'à substrat égal les zones les plus pluvieuses sont les plus acides, probablement du fait du lessivage.

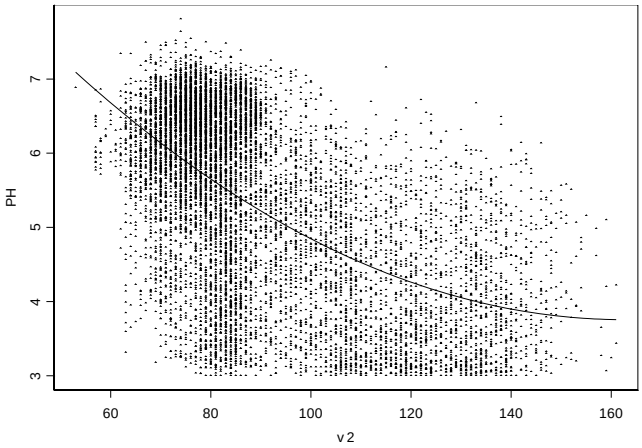


Figure 6 : Relation entre le pH des sols et la pluie du mois de mai

La relation entre le pH des sols et la forme du relief montre qu'à substrat et pluviométrie égale les zones convexes sont plus acides et les zones concaves sont plus riches, et ce en cohérence avec les connaissances de terrain (figure 7). Enfin, la Figure 8 montre un effet de proximité des zones gréseuses, qui ont tendance à acidifier les substrats alentours du fait de la dispersion d'éléments acides, et ce principalement sur une distance d'environ 200 mètres.

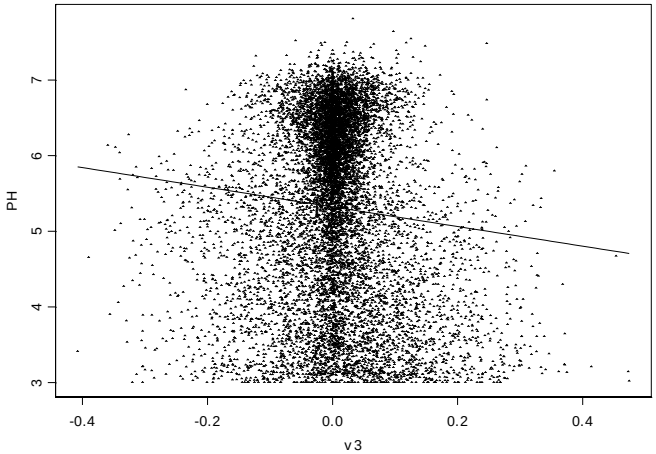


Figure 7 : Relation entre le pH des sols et la forme du relief (curve250)

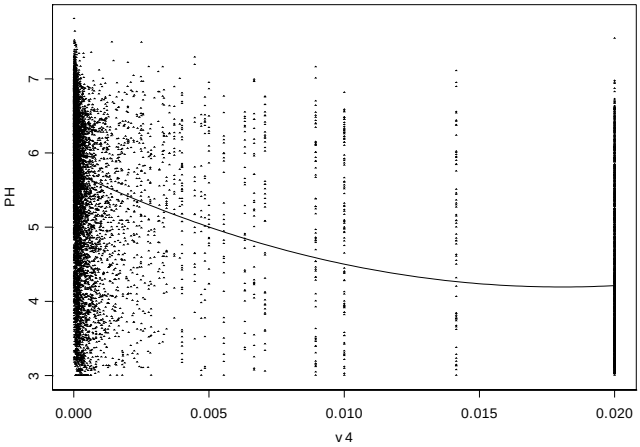
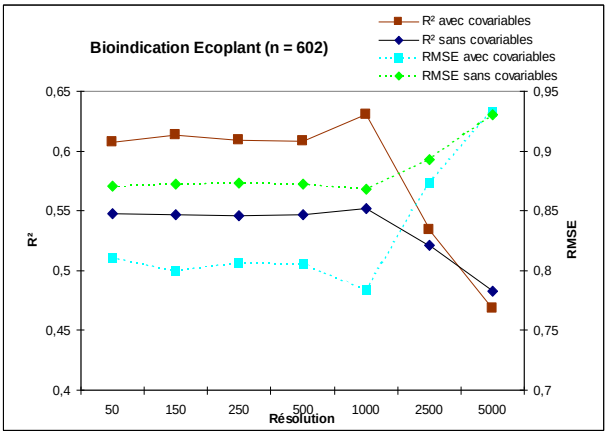
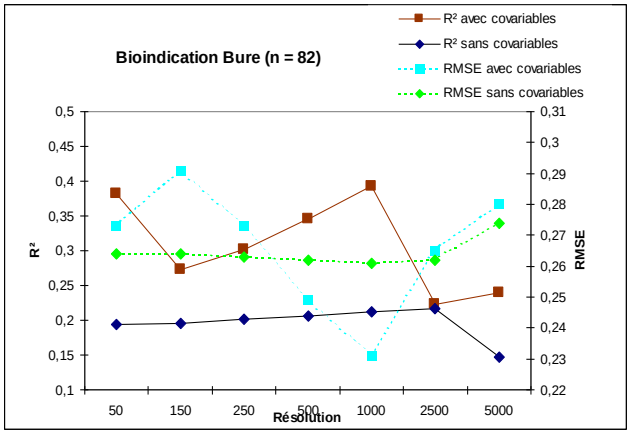


Figure 8 : Relation entre le pH des sols et la racine carré de la distance aux grès

2.4.2) Choix de la résolution optimale et comparaison avec la carte kilométrique

Le modèle a ensuite été calculé sous SIG en utilisant les variables existant au format raster, puis les résidus ont été interpolés sur l'ensemble de la zone d'étude et ajoutés aux valeurs calculées à l'aide du modèle, pour les résolutions suivantes : 50, 150, 250, 500, 1000, 2500 et 5000 mètres. La comparaison des performances des différentes cartes réalisées aux trois échelles montre logiquement une dégradation de la qualité prédictive des cartes lorsque la résolution augmente (Figure 5) . Cette dégradation est particulièrement importante au-delà du kilomètre. Nous avons choisi la résolution de 50 mètres pour réaliser le modèle final, cette résolution étant globalement la plus performante en prenant en compte les trois échelles étudiées (et particulièrement pour le site de Rupt où la RMSE de la carte au pas kilométrique est beaucoup plus forte que pour la carte au pas de 50 m. (Figure 9)).





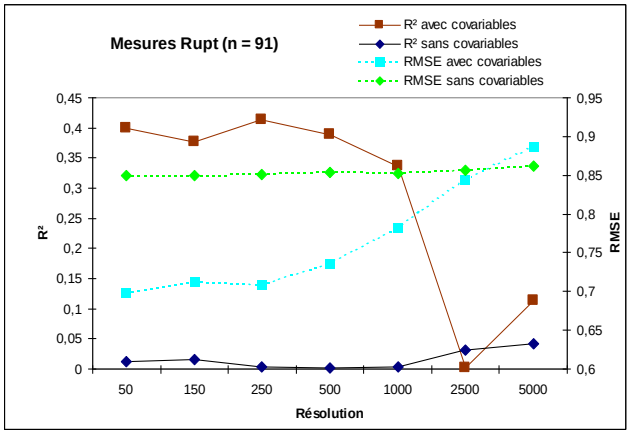


Figure 9 : R^2 et RMSE entre les valeurs extraites de la carte des pH réalisée à des résolutions variant entre 50 et 5000 mètres et trois jeux de validation contenant des mesures de pH réalisées à l'échelle régionale (Ecoplant, n = 414), à l'échelle de la petite région naturelle (Bure, n = 82), et de la forêt (Rupt, n = 69).

La comparaison entre les cartes produites à l'aide de covariables et les cartes réalisées par interpolation aux différentes résolutions testées montre que l'utilisation de covariables conduit à une meilleure qualité de prédiction pour la plupart des résolutions testées, et particulièrement pour les plus faibles valeurs (Figure 9). Ainsi, à l'échelle de la Lorraine, le R^2 avec les mesures de terrain est de 0.61 pour la carte au pas de 50 m élaborée à l'aide des covariables contre 0.55 pour la carte au pas de 50 m interpolée (n = 414), l'écart augmentant lorsque la taille du site d'étude diminue. En effet, la qualité de la carte interpolée s'érode assez rapidement lorsque la taille du site d'étude diminue, le R^2 avec les mesures de terrain pour la carte au pas de 50 m. étant de 0.19 sur le site de Bure (n = 82) et de 0,01 sur le site de Rupt (n = 69), contre respectivement 0.38 et 0.40 pour la carte réalisée à l'aide de covariables. Ces résultats montrent l'intérêt de la méthode utilisant des covariables pour réaliser une carte à fine résolution spatiale (Figure 10), et ce particulièrement en ce qui concerne des prédictions à l'échelle locale.

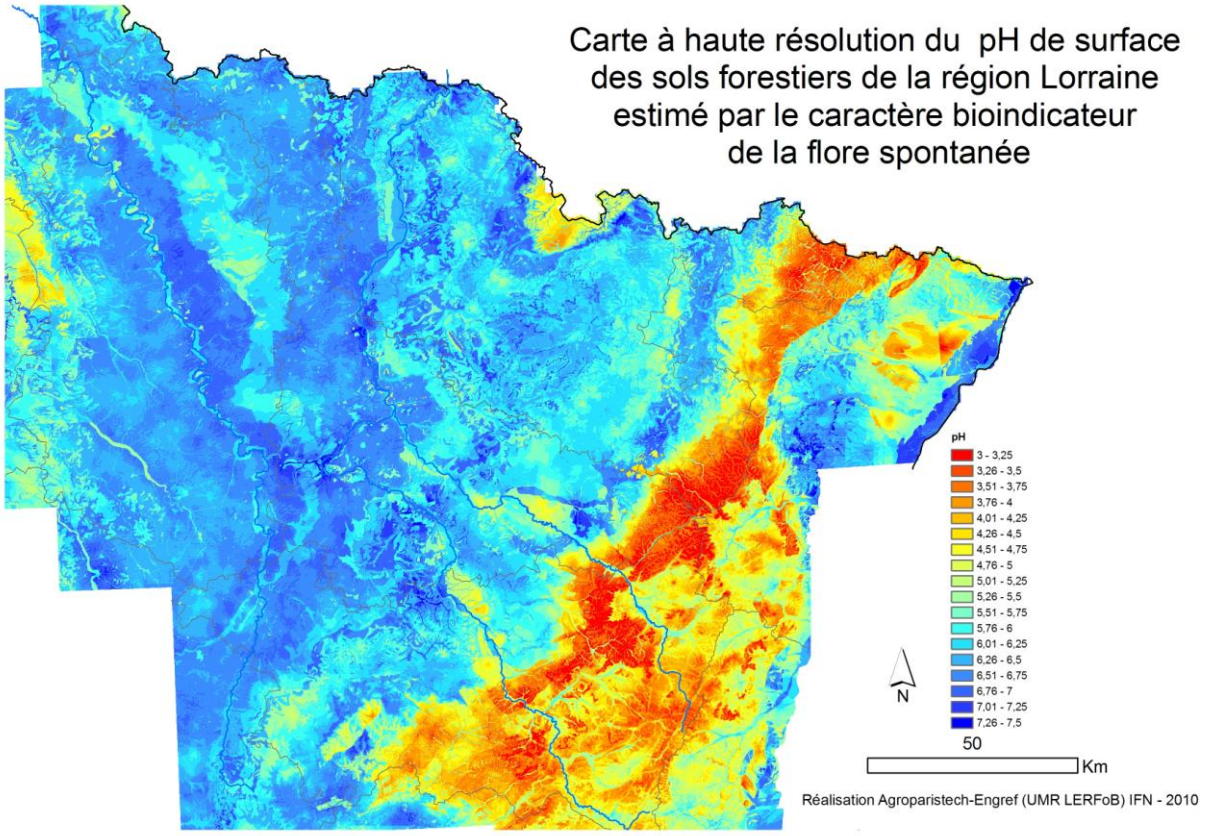


Figure 10 : carte des pH de surface des sols forestiers de la région Lorraine estimée par le caractère indicateur de la flore spontanée

La différence de structure spatiale entre les cartes produites en utilisant des covariables et les cartes produites par interpolation est clairement visible à l'échelle de la Lorraine (Figure 11). En effet, l'utilisation de covariables conduit à une hétérogénéité spatiale des prédictions plus importante que les cartes réalisées par interpolation, du fait de la prise en compte de l'hétérogénéité des substrats géologiques. Cependant, on remarque que la distribution spatiale des données présente d'importantes similitudes dans leur ensemble, laissant suggérer qu'il n'existe pas de biais pouvant être lié à l'une ou l'autre de ces méthodes.

La différence entre les deux méthodes apparaît de façon plus visible à des échelles plus locales. La carte interpolée lisse les données et ne permet pas de prendre en compte des spécificités locales liées par exemple à la présence de talwegs ou d'unités géologiques différentes de leur entourage (Figure 12).

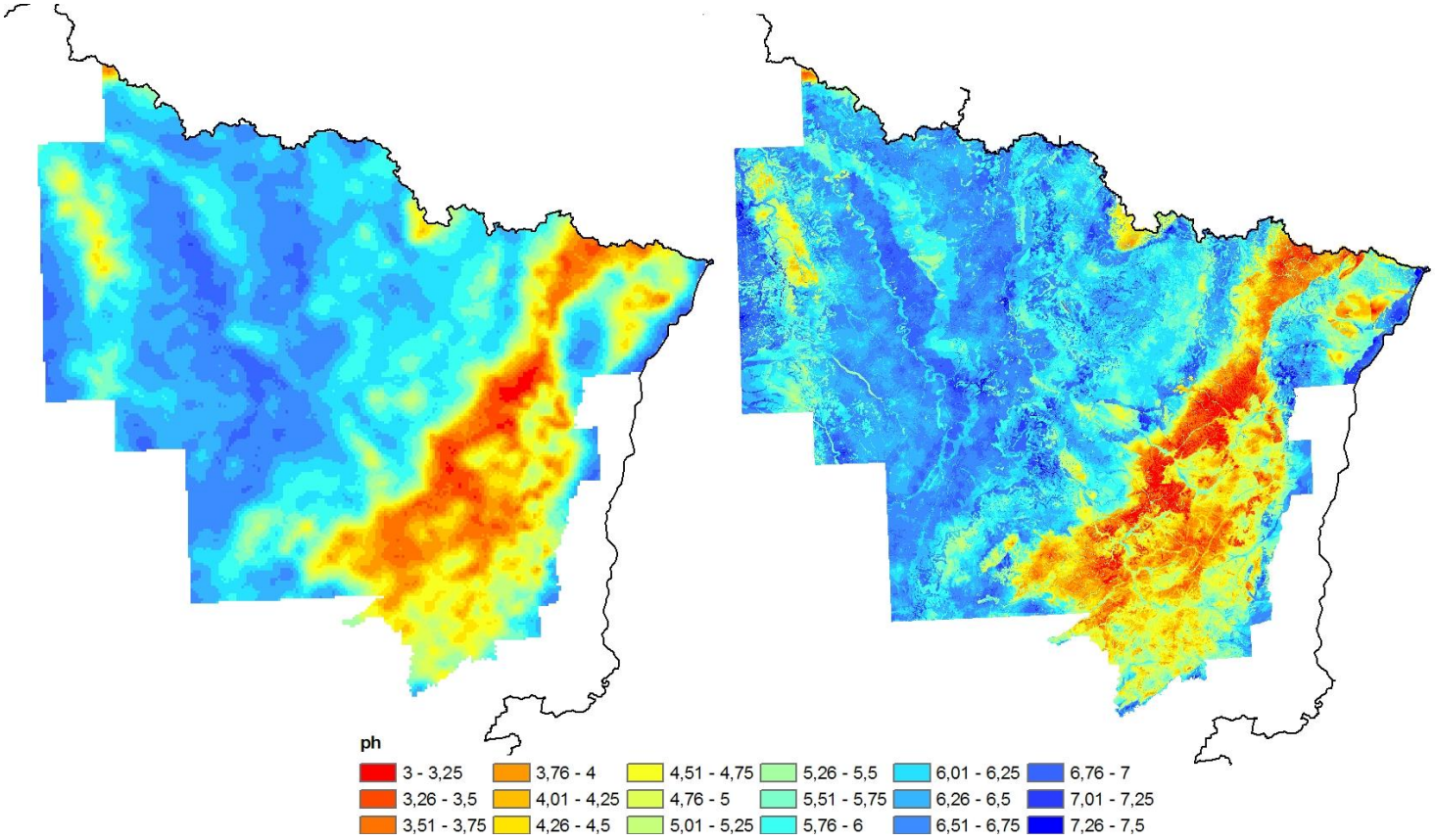


Figure 11. Comparaison entre la carte des pH de surface des sols forestiers de la région Lorraine réalisée par interpolation (à gauche) ou utilisant des covariables (à droite).

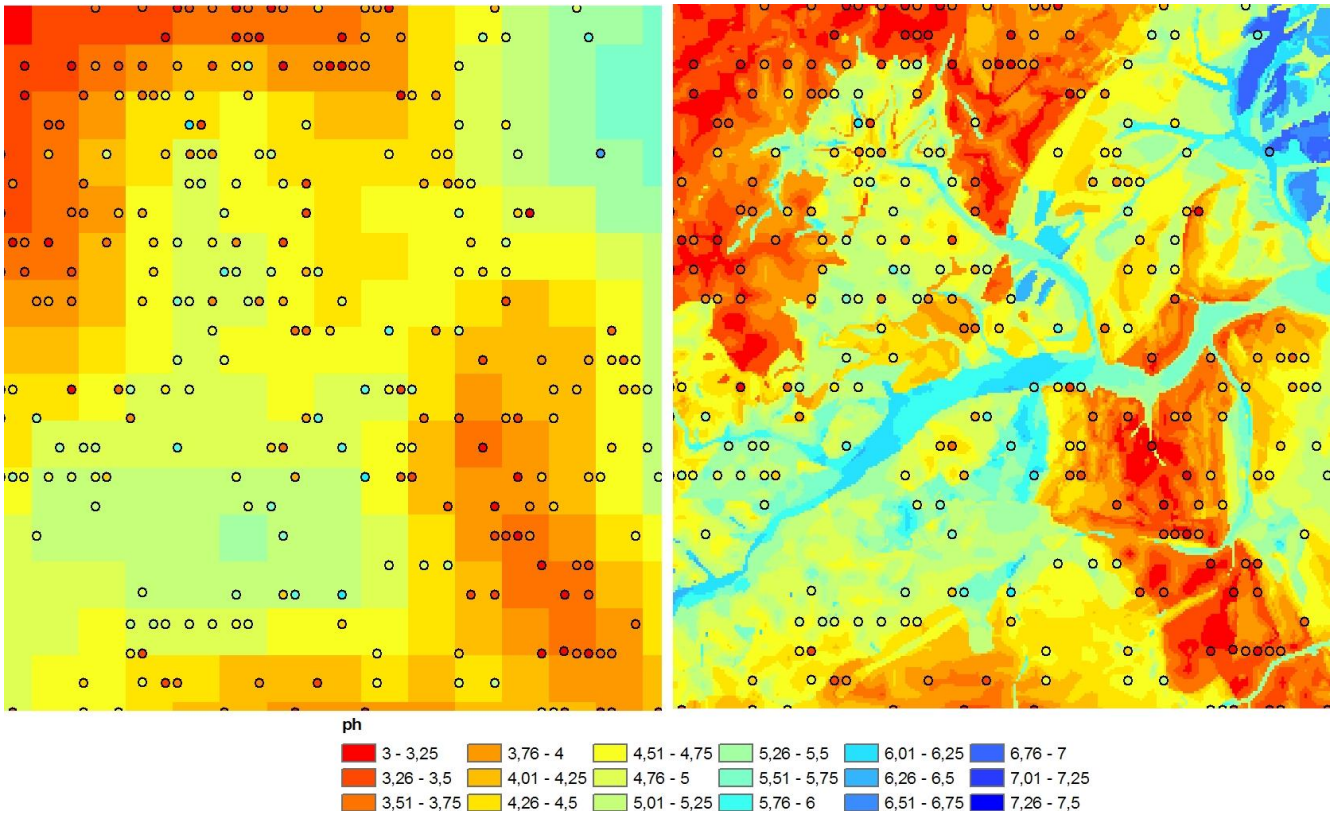


Figure 12. Extrait au 1/100000 ème de la carte des pH de surface des sols forestiers estimée par le caractère indicateur de la flore spontanée réalisée par interpolation (à gauche) ou utilisant des covariables (à droite).

2.4.3) Qualité des prédictions à l'échelle de la forêt

L'intérêt d'une carte à haute résolution spatiale réside dans la possibilité de réaliser des prédictions ayant un sens à l'échelle locale, celle de la forêt par exemple. Afin d'évaluer la capacité prédictive de la carte à cette échelle, nous avons échantillonné un site de 3 km sur 1 km environ, avec un pas de 200 mètres, situé à Rupt sur moselle, dans le massif Vosgien. Nous avons mis en évidence précédemment que la carte au pas de 50 m utilisant des covariables permettait de prédire environ 40 % de la variance mesurée sur le terrain, la carte interpolée ayant une capacité prédictive quasi nulle (Figure 9). La figure 13 permet de comparer la structure spatiale des données mesurées sur le terrain à la structure spatiale des prédictions issues de la carte. La diversité des unités géologiques (grès, granites de différentes richesses, alluvions) permet une variabilité importante des valeurs de pH mesurés, qui s'échelonnent entre 3.5 et 5.5. Les prédictions réalisées par la carte montrent pour le site de Rupt une distribution spatiale concordante, même si des différences peuvent apparaître localement.

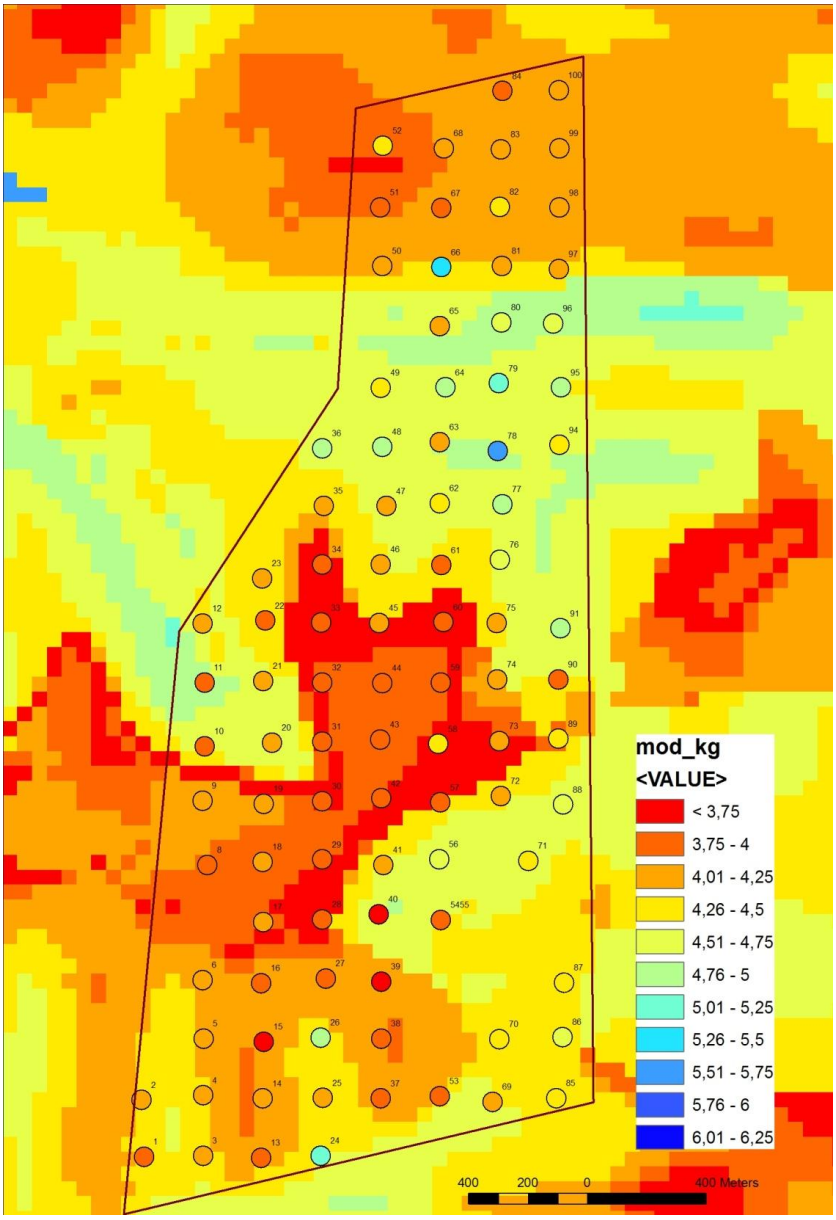


Figure 13. Comparaison des mesures de pH de l'horizon A (données ponctuelles, n = 69) et des prédictions réalisées par le modèle utilisant des covariables cartographié au pas de 50 mètres. Chaque point de la maille est distant d'environ 200 mètres.

2.5) Réalisation de carte de sensibilité des sols à l'extraction de rémanents en fonction du gradient d'acidité

La carte des pH réalisée précédemment au pas de 50 mètres a été utilisée pour produire une carte de sensibilité des sols forestiers à l'extraction de rémanents, en se basant sur les valeurs de seuil indiquées par le guide ADEME (Figure 1). La carte ainsi réalisée (Figure 14) met en évidence des zones de sensibilité moyenne à forte pour une part importante du massif vosgien, des Vosges du Nord, de la Warndt, et de l'Argonne. Sur le reste du territoire, des zones diffuses de sensibilité moyenne apparaissent localement, comme sur les alluvions de Meurthe et de Moselle.

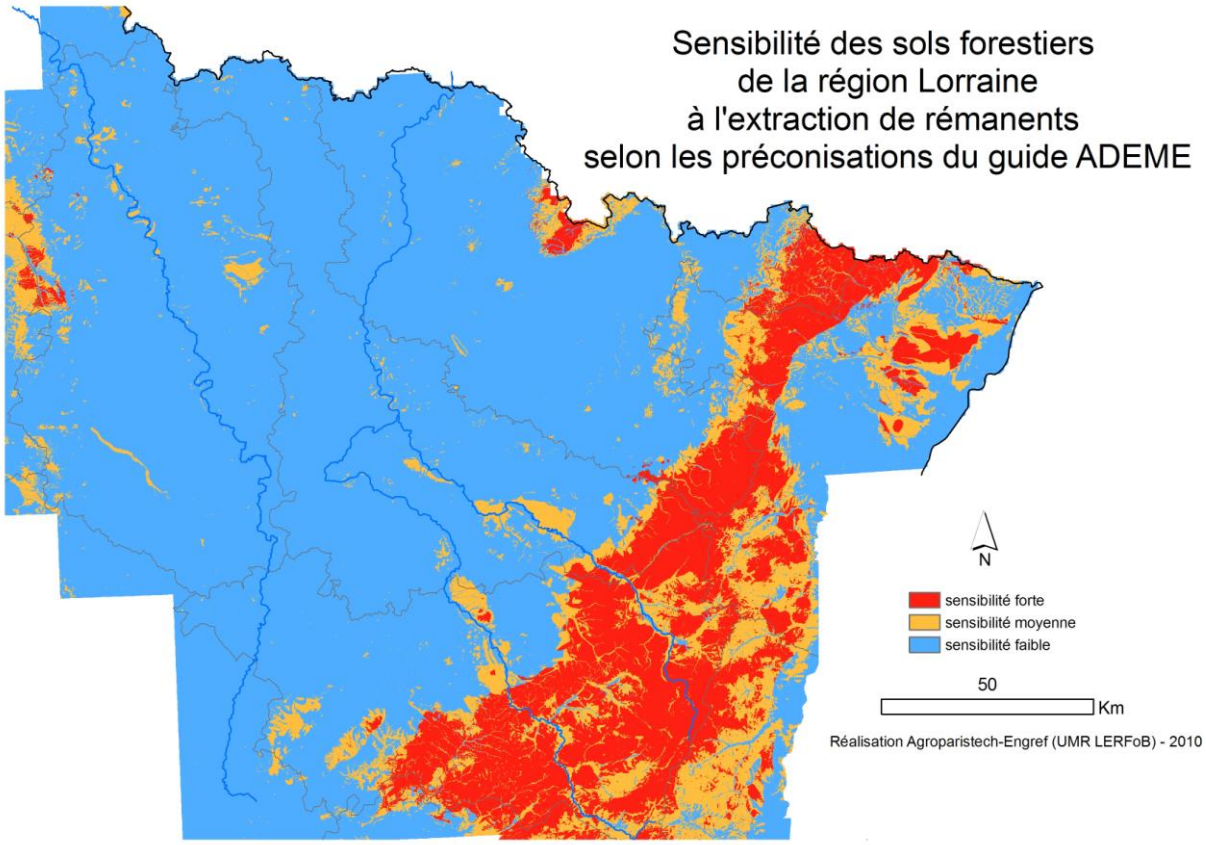


Figure 14. Carte de sensibilité des sols à l'extraction de rémanents établie selon les préconisations du guide ADEME.

2.6) Bilan et perspectives

Il est actuellement impossible de cartographier des pH sur de vastes emprises à partir de mesures, du fait du coût important de la collecte et de l'analyse des données, et par conséquent du faible nombre de données disponibles. L'étude réalisée montre l'intérêt des techniques de bioindication couplées aux techniques de modélisation à l'aide de covariables pour prédire la distribution dans l'espace des valeurs de pH. Elle montre également qu'en utilisant cette méthode il est possible de retranscrire une part de la variabilité des pH à des échelles régionales mais aussi plus locales, y compris à celle de la forêt, ce qui n'était pas le cas des cartes réalisées par interpolation. Ces résultats ouvrent de larges perspectives quant à l'utilisation des cartes prédictives réalisées, dans le cadre des aménagements forestiers, d'études de ressource, ou de l'impact du changement global sur les forêts.

La carte produite fournit une valeur de pH par pixel de 50 m de côté, indiquant une probabilité de rencontrer dans le pixel concerné une valeur de pH proche de la valeur indiquée, avec une marge d'imprécision de +- 0.81 unités de pH à l'échelle de la Lorraine. Cette incertitude est issue à la fois de la procédure de bioindication et de la phase de spatialisation, qui génèrent chacune leurs propres erreurs. La comparaison avec des mesures de pH entre les performances des pH bioindiqués sur les placettes et des pH issus de la carte réalisée à l'aide des covariables permet d'évaluer l'incertitude liée à chacune de ces opérations. A l'échelle de la Lorraine en utilisant le jeu d'Ecoplant, la bioindication sur les 414 placettes montre un R^2 de 0.63 et une RMSE de 0.80 au regard des mesures de pH sur ces placettes, contre un R^2 de 0.61 et une RMSE de 0.81 obtenu avec les valeurs issues de la carte. Ces valeurs, très proches, semblent montrer qu'une part importante de l'incertitude liée à la prédiction provient de l'étape de bioindication, la phase de cartographie ne semblant pas contribuer significativement à l'augmentation de l'erreur de prédiction. Cela s'explique probablement par un double effet lié à l'étape de spatialisation : un effet négatif inhérent à l'incertitude générée par la procédure, et un effet positif lié au lissage d'erreurs locales d'estimation lors de la bioindication du pH sur certaines placettes (engendré par l'utilisation d'espèces peu caractéristiques en matière de nutrition des sols par exemple). Cette proximité entre valeurs extraites de la carte et estimées sur la placette a déjà été observée lors de la réalisation de la carte des pH à l'échelle nationale, et d'une carte des RUM des sols de France (Piedallu *et al.*, 2010). Il semblerait donc que la qualité de prédiction fournie par la carte soit très proche de celle fournie par un relevé floristique de type IFN, alors qu'aucun effort de relevé ne soit nécessaire pour son obtention. Il est à noter également que la qualité de la prédiction relevée sur la carte de Lorraine (R^2 = 0.61 et RMSE = 0.81, n = 414) est très proche de celle rencontrée à l'échelle nationale (R^2 = 0.58 et RMSE = 0.79, n = 261), confortant ainsi les résultats obtenus.

Il est également important d'être conscient des limites liées à validation des cartes que nous avons réalisées, du fait de la comparaison des valeurs de la carte prédites sur une surface de 2500 m² à des valeurs relevées ponctuellement sur les placettes de mesure. En effet, outre l'imprécision de la mesure du pH sur la placette, la variabilité spatiale de la richesse chimique des sols peut engendrer des variations de pH au sein d'un même pixel. Aussi, la réalisation d'un grand nombre de mesures au sein d'un même pixel permettrait une meilleure estimation de la qualité prédictive de la carte.

Une carte de sensibilité des sols a été réalisée à partir de la carte des pH initiale, en suivant les recommandations du guide de l'ADEME. Cette carte a pour vocation de servir d'outil d'aide à la décision pour les gestionnaires, qui doit être utilisé en complément des outils traditionnels, pour une gamme d'échelles très variable allant de la région à la forêt. Elle permet d'indiquer pour une zone concernée le niveau moyen de sensibilité des sols, et sa variabilité spatiale présumée. Du fait de l'incertitude existant autour de la prédiction, il est fortement recommandé de compléter cette information par une vérification de terrain, et si besoin un échantillonnage complémentaire. L'existence de la carte de sensibilité permet cependant d'éviter des procédures lourdes d'inventaires, qui peuvent être remplacées par un protocole de vérification beaucoup plus léger. Il n'est cependant pas à exclure qu'il y ait très localement des erreurs de prédiction pouvant être importantes, du fait par exemple d'oublis ou d'imprécisions d'unités très spécifiques sur les cartes géologiques utilisées pour réaliser les modèles. Si de telles erreurs étaient détectées lors de la phase de vérification, une correction de la carte serait nécessaire à l'aide d'estimations de terrain. Dans tous les cas, la proximité d'un changement de zone de sensibilité sur la carte doit inciter à la prudence et à des vérifications de terrain.

Un certain nombre de développements à ce travail sont en cours et vont être continué au-delà de cette étude. Tout d'abord un complément d'inventaire a été réalisé sur le site de Rupt, visant à la fois à vérifier un certain nombre de placettes inventoriées l'année dernière, et à densifier l'échantillonnage afin d'évaluer la capacité prédictive de la carte à des échelles encore plus fines. Grâce à ces relevés, l'incertitude liée à la mesure de pH et la variabilité spatiale des pH à l'échelle locale pourront être évaluées. De même, l'implantation d'un dispositif similaire à celui de Rupt est prévu courant 2011 afin de vérifier si des résultats similaires peuvent être trouvés dans un contexte géologique très différent, celui des plateaux calcaires.

La méthode évaluée lors de cette étude est généralisable à d'autres zones géographiques ou d'autres facteurs liés au sol. Elle nécessite l'utilisation de relevés géoréférencés possédant les valeurs de l'indice à cartographier, et différentes covariables géologiques, topographiques, ou climatiques. Nous avons montré dans cette étude et à travers l'exemple du pH l'importance de la carte géologique numérique au 1/500 000, qui explique une part importante de la variabilité spatiale du pH. L'obtention de ces cartes et leur harmonisation attributaire au regard du facteur écologique considéré constitue assurément une part importante du travail à réaliser, et représente un coût d'achat de la donnée non négligeable (se renseigner auprès du BRGM pour avoir les tarifs). Cependant, leur utilisation s'avère indispensable pour la réalisation de prédictions de qualité.

3) Cartographie en fonction du risque de dégradation physique

La dégradation physique du sol recouvre plusieurs phénomènes tels que l'érosion, la solifluxion, le tassement. Dans le cadre de la présente étude, un focus a été réalisé sur l'aspect tassement, qui constitue le phénomène le plus facile à appréhender et celui aux conséquences découlant directement de l'exploitation et étant les plus visibles sur la sylviculture. Une carte régionale a été réalisée.
La réalisation d'une carte du risque d'érosion nécessiterait de disposer de la cartographie des cloisonnements d'exploitation, indisponible à l'heure actuelle mais envisageable à l'avenir.

3.1) Le tassement des sols forestiers

Le tassement des sols forestiers est un phénomène identifié depuis plus d'une vingtaine d'année en France ; ce phénomène était déjà connu dans le milieu agricole comme étant la conséquence de modes de culture intensive (apparition des semelles de labours). Sa réelle prise en compte est cependant beaucoup plus récente, notamment dans la gestion courante. Elle est notamment liée à la tempête de 1999 et à l'exploitation dans l'urgence des bois renversés. En effet, si les chablis eux-mêmes n'ont que des conséquences limitées sur les propriétés des sols, les conséquences des exploitations faites dans l'urgence ont été bien plus graves, du fait des conditions de travail très difficiles et des conditions météorologiques particulièrement défavorables.

Figure 15. Plus jamais ça ! Photo J.-M. Mourey (ONF)

Cette prise de conscience est renforcée de nos jours par la dynamisation de la sylviculture et la recherche de nouveaux produits forestiers tels que les rémanents. À ces paramètres se rajoutent la diminution des périodes de praticabilité liée aux changements climatiques.
Les perturbations causées au sol peuvent affecter de manière parfois durable l'ensemble des propriétés mécaniques, hydrauliques, chimiques et biologiques du sol. En particulier, le tassement induit par le passage d'engins d'exploitation peut entraîner une déstructuration des sols, une réduction de leur aération et de leur capacité de drainage, d'où une contrainte accrue pour la prospection des racines et une perte de stabilité et de productivité de la forêt. A noter que les engins n'impactent pas que les sols, ils sont également à l'origine de bien des dégâts aux arbres et aux peuplements.
Le sol est un ensemble de particules de tailles variables dont l'agencement dans l'espace définit sa structure. La combinaison des particules, de par leur nature et agencement, l'activité biologique et les effets climatiques vont conditionner la porosité du sol, à savoir le volume de vide. On distingue ainsi la macroporosité, constituée des pores les plus gros, occupée par l'air et l'eau circulant par gravité. La taille de ces pores permet la croissance et le développement des racines. L'eau utile pour ces dernières est située dans les micropores qui forment la microporosité du sol. La circulation d'engins sur un sol va entraîner un déplacement des particules, qui va modifier leur agencement et donc bien souvent la porosité du sol (voir figure 16). Les effets du tassement sont plus ou moins visibles, d'ornières spectaculaires au compactage en profondeur des horizons profonds du sol.
Dans le cas de sols humides, la déformation la plus forte a lieu lors des premiers passages, l'essentiel des modifications physiques ayant lieu lors des trois premiers passages.

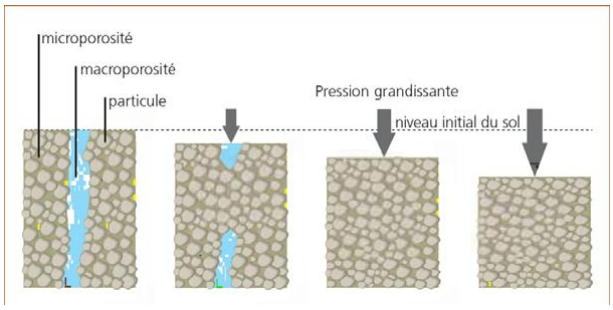


Figure 16. Effet du tassement sur la macro et microporosité du sol.
Source : PROSOL, d'après De Paul et Bailly/ Forêt Wallone

Le tassement du sol altère sa structure et réduit son aération. La perte de porosité entraîne un ralentissement des transferts d'eau et de gaz dans le sol, à l'origine de temps de ressuyage plus longs après les pluies, et des phénomènes d'engorgement et d'asphyxie plus fréquents. Elle provoque également une augmentation de la résistance du sol à la pénétration. Ces deux facteurs, en se répercutant sur la prospection des racines, impactent également la stabilité, la croissance et la capacité de régénération des peuplements forestiers. L'activité biologique des sols s'en trouve également altérée. La réversibilité naturelle de ces dégradations reste bien souvent incertaine sinon très lente, de même que pour les possibilités de remédiation artificielle, qui restent incertaines.
Les facteurs de sensibilité d'un sol dépendent de ses caractéristiques intrinsèques (texture, charge en cailloux, hydromorphie) mais aussi de son état d'humidité. La prise en compte de ce dernier élément, qui est dynamique, n'est pas une chose aisée pour le gestionnaire même si des techniques ont tenté de l'appréhender comme le logiciel « Profor ». Le risque de dégradation du sol ne pourra donc être évalué que la veille ou quelques jours avant une exploitation. Cependant, les caractéristiques intrinsèques du sol permettent d'appréhender différentes hypothèses de sensibilité au tassement suivant son état d'humidité.

Texture	État d'humidité*			
	Sol sec sur 50 cm de profondeur	Sol frais	Sol humide	Nappe d'eau à moins de 50 cm de la surface
Sol très caillouteux (Eléments grossiers > 50%)				
Sol très sableux (sable > 70%)				
Argile dominante				
Limon dominant et sable limoneux				

Sol non sensible au tassement

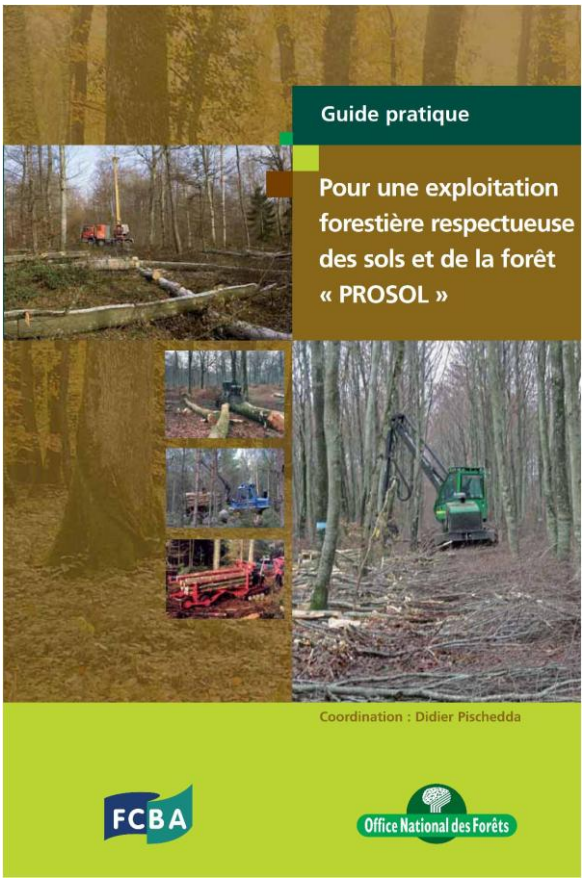
Sol sensible = précautions nécessaires pour le passage d'engins

Sol très sensible et impratiquable pendant une période de l'année = passage d'engins impossible

* Voir l'annexe 2 pour déterminer l'humidité et la texture d'un sol

Figure 17. Diagnostic de la sensibilité « instantanée » d'un sol forestier (source : Prosol).

3.2) Le guide PROSOL



La mécanisation fait aujourd'hui partie du quotidien de l'exploitation forestière. Si l'apport de rentabilité et de confort de travail que celle-ci procure n'est plus à démontrer, les gestionnaires s'inquiètent quant aux impacts de la circulation des engins forestiers sur les sols, notamment sur les plus sensibles d'entre eux. Un observatoire a ainsi été mis en place pour étudier l'impact des exploitations forestières pour déterminer les bonnes pratiques de ces dernières. Ces bonnes pratiques sont notamment permises par l'organisation du chantier.
Cependant, comme énoncé précédemment, la restauration naturelle ou artificielle des sols impactés est une chose non acquise. Il devient alors intéressant de prévenir l'apparition de ces dégâts. Cette prévention passe par l'application de règles strictes de circulation en forêt, ainsi que par le développement de systèmes dits alternatifs.

Ces systèmes alternatifs se démarquent des méthodes traditionnelles par leur très faible impact sur les sols forestiers qui les rendent plus compatibles avec une gestion durable des sols et de la forêt. Ces systèmes alternatifs trouvent ainsi toute leur place dans le cas des sols très sensibles au tassement.

C'est dans cette logique que s'inscrit le guide pratique PROSOL « Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt », finalisation d'un projet mené conjointement par l'ONF et le FCBA, avec le partenariat d'autres organismes. Cet ouvrage fait la synthèse des connaissances acquises en termes de tassement des sols et d'exploitation forestière. Il balaye de fait les différentes méthodes qui permettent au gestionnaire d'assurer une exploitation forestière dans les meilleures conditions possibles. On retrouve, dans la bibliographie, des classifications pour caractériser la sensibilité de certains type de sols au tassement. Cependant ces classifications ne concernent que certains types de sols ce qui limite leur généralisation à d'autres situations. Le guide PROSOL a l'avantage de proposer une classification générale de la sensibilité potentielle des sols forestiers en 4 classes grâce à des critères de diagnostic faisant appel à la texture, la charge en cailloux, la profondeur d'apparition de l'hydromorphie et le type d'engorgement (voir tableau 3).

Légende	Classe de sensibilité potentielle	Critères de diagnostic
	Sols praticables toute l'année avec peu de précautions	. Sol très caillouteux (éléments grossiers ≥ 50 %) . Aucune trace d'hydromorphie dans les 50 premiers cm . Sols très sableux (sables ≥ 70 %)
	Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions	. Sols à texture dominante argileuse . Aucune trace d'hydromorphie dans les 50 premiers cm
	Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année	. Sols à texture dominante limoneuse ou sablolimoneuse, et/ou . Présence d'un engorgement temporaire, traces d'hydromorphie dans les 50 premiers cm
	Sols très sensibles et impraticables toute l'année.	Sols tourbeux ou à engorgement permanent, traces d'hydromorphie dans les 50 premiers cm.

Tableau 3. Classes de sensibilité potentielle des sols forestiers et critères de diagnostic associés. Source : Prosol.

3.3) Méthodologie d'élaboration de la carte

La méthodologie de réalisation est empirique, et vise à reconstituer les classes du Guide Prosol à partir de données pédologiques disponibles par placettes. La validité est ensuite évaluée par comparaison avec un échantillon de données terrain collecté spécifiquement pour cette validation.

Nous avons principalement exploité les données pédologiques de l'IFN, rendues continues, interpolées sous SIG, puis discrétisées en classes en suivant les critères énoncés ci-dessus.
Comme dans le cas de la carte de sensibilité aux exportations, l'utilisation de covariables a été testée pour affiner le tracé.

Pour plus de détails, notamment pour obtenir le contenu des tables de reclassement, le lecteur est invité à se reporter au rapport établi par J.Staub, stagiaire AgroParisTech-Engref en 2009.

3.3.1) Données source

Les données IFN sont issues du troisième cycle d'inventaire de l'IFN sur les départements de la Meurthe-et-Moselle (1990), de la Meuse (1991), des Vosges (1992) et de la Moselle (1993). Ce troisième cycle correspond également à l'ancienne méthode d'inventaire utilisée à l'IFN, qui a été réactualisée depuis 2004. La moyenne est de 1 200 points inventoriés par département avec cette méthode, soit environ un point pour 130 ha. Dans le cas lorrain, 7 404 points sont disponibles au total, dont 7 342 points géoréférencés. Sur ces 7 342 points, 7 250 contiennent l'information pédologique nécessaire à la réalisation de la carte. Une surreprésentation existe dans les Vosges en lien avec la problématique d'acidification.

Les relevés de l'IFN fournissent plusieurs variables pédologiques utiles pour l'étude :
- la texture ;
- la profondeur du sol ;
- la charge en cailloux ;
- la profondeur d'apparition du pseudogley qui caractérise la profondeur d'hydromorphie à prendre en compte ;
- le type de sol.

Les autres données utilisées sont les suivantes :

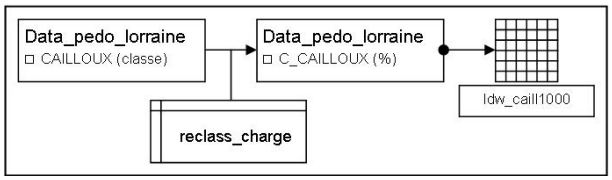
- Position topographique : macro fournie par le Lerfob pour exploiter les données MNT BD ALTI ® de l'IGN au pas de 50m ;

- Limite des régions forestières de l'IFN au 1:250.000 ;
- Masque forestier : synthèse de données ONF et IFN ;
- Géologie : cartes géologiques harmonisées issues de l'étude pH (Testé mais non utilisé) ;
- Pédologie : cartes pédologiques au 1:250.000 (Testé mais non utilisé).

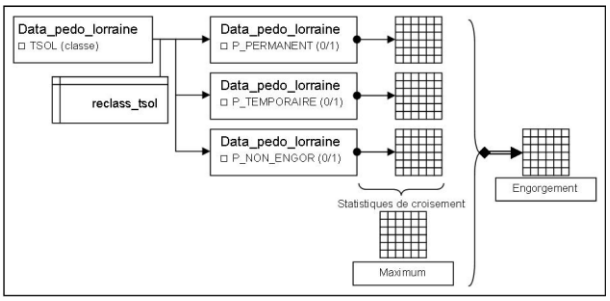
3.3.2) Reclassement et interpolation

Les reclassements visent à convertir les données qualitatives en données quantitatives par estimation de moyennes, barycentres des classes, ou encore de la probabilité d'appartenance à ces classes. Les variables quantitatives ainsi obtenues font par la suite l'objet d'une interpolation sous SIG.

La charge en cailloux fait l'objet d'un reclassement simple.



L'engorgement est défini par reclassement à partir du type de sol. Afin d'obtenir des valeurs numériques interpolables, une conversion en probabilité d'appartenir à la classe « engorgement permanent », « engorgement temporaire » ou « pas d'engorgement » est ensuite utilisé.



Les taux de sable, d'argile et de limons est donné par le barycentre de la classe correspondante dans le triangle de texture Jamagne. Une difficulté a été rencontrée ici en raison d'une correspondance non bijective avec les classes de textures IFN.

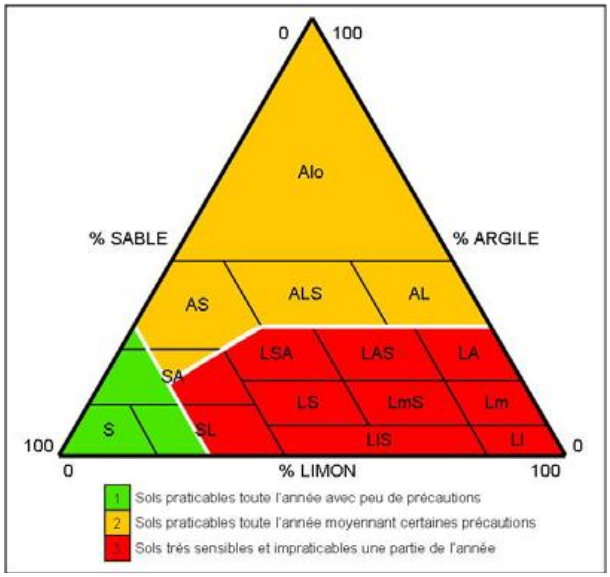
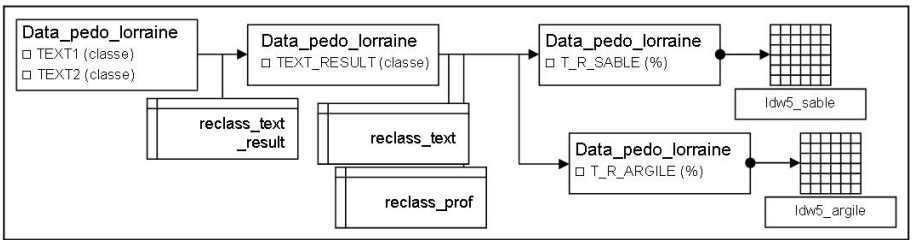
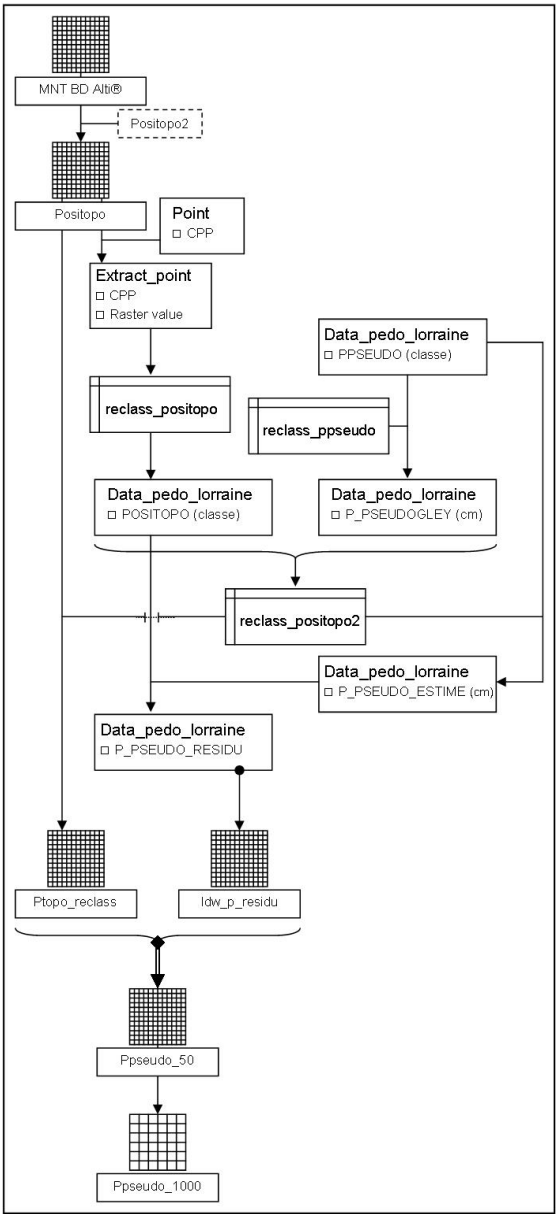


Figure 18. Le triangle de Jamagne. Les classes correspondantes dans la typologie Prosol sont ici représentées, toutes choses étant égales par ailleurs (charge en cailloux et engorgement).



Une règle de décision a également été mise en place afin de gérer les cas de répétitions de données IFN liées à la description de deux horizons du sol.

La profondeur d'apparition du pseudogley, marqueur de la présence de nappes temporaires ou permanentes, fait l'objet du traitement le plus complexe. Celle-ci est estimée par modélisation à partir de la position topographique. Les résidus sont interpolés au pas de 50 m puis généralisés au kilomètre.



A l'issue de ces opérations, toutes nos variables sont quantitatives :
- proportion d'argiles,
- proportion de sables,

(- la proportion de limons est déduite par différence des deux dernières)
- charge en cailloux,
- profondeur d'apparition du pseudogley,
- probabilité d'avoir un engorgement temporaire ou permanent.

L'interpolation est alors réalisée par la méthode IDW (inverse des distances pondérées) sous Geostatistical Analyst. Le pas retenu est le kilomètre.

La carte provisoire est issue d'un calcul basé sur les résultats, en suivant rigoureusement le classement énoncé par le guide Prosol.

3.3.3) Carte provisiore

La carte provisiore est celle obtenue par J.Staub à l'issue de son travail d'étude par reclassements et interpolation. C'est cette carte qui a fait l'objet de la procédure de validation.

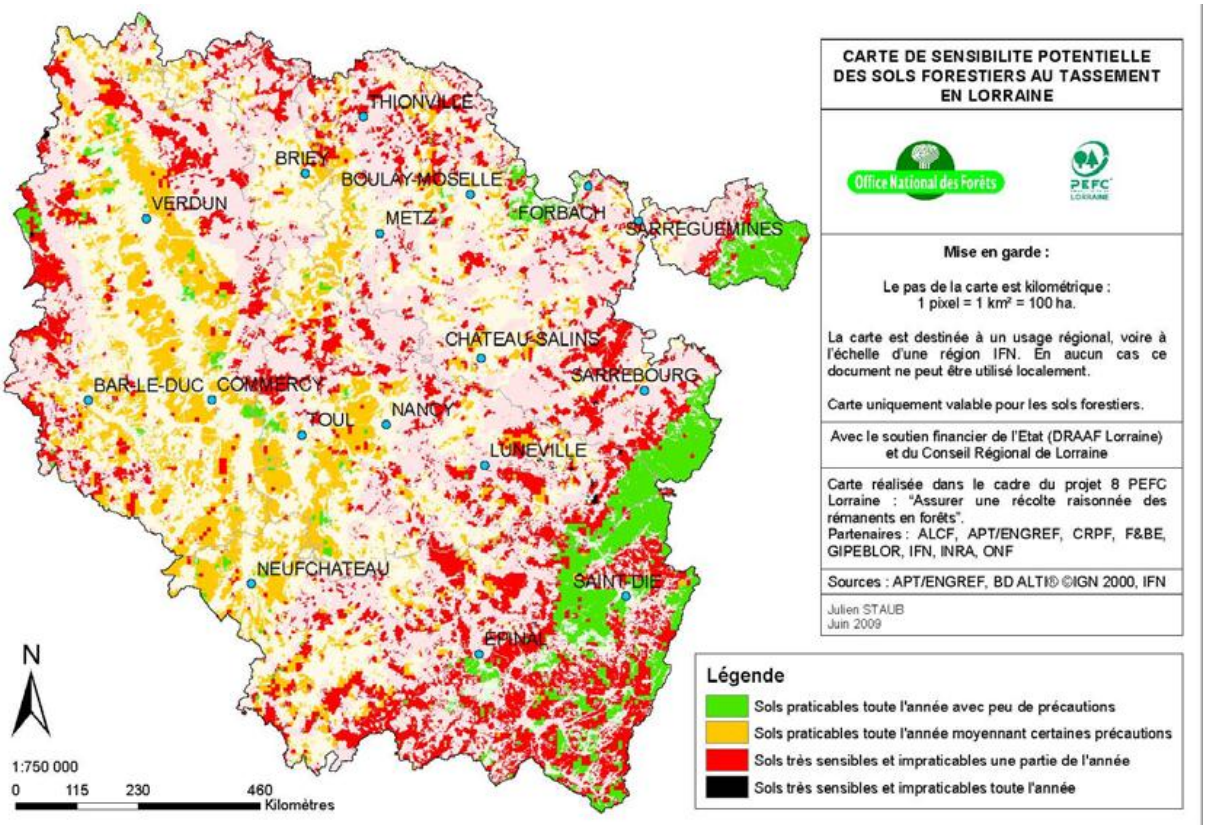


Figure 19. Carte régionale provisoire avant validation

3.3.4) Validation

La validation avait un double objectif : s'assurer d'une part de la qualité de l'interpolation sous SIG, et valider la cohérence de la carte dans sa globalité à partir d'éléments empiriques. Une double démarche de validation a donc été suivie :

- validation à partir d'un jeu de données terrain collecté spécifiquement,
- validation à dire d'expert.

3.3.4.1) Validation terrain

Un plan d'échantillonnage spécifique de 120 points, avec collecte de données, a été réalisé. Il a également été possible de bénéficier de données collectées par l'ONF dans le cadre de la gestion courante. Ces données ont ensuite pu être analysées afin d'estimer la qualité de l'interpolation l'impact du changement d'échelle.

Un échantillonnage systématique de 4 massifs forestiers de 500 ha a ainsi été effectué, à raison de 30 placettes de 400 m² par massif, distantes les unes des autres de 400 m, soit une placette pour 16 ha. Le choix de ces 4 sites, notés de A à D, s'est fait selon les critères suivants :
- être à la jonction d'au moins deux classes de sensibilité potentielle ;
- inclure si possible des propriétés privées dotées de PSG ;
- être situés dans l'une des trois régions IFN suivantes : Collines Sous Vosgiennes (1 site), Plateau Lorrain (2 sites), et Plateaux Calcaires (1 site).

Pour chaque placette, les données pédologiques nécessaires à la détermination de la sensibilité potentielle du sol au tassement sont collectées. Ainsi la texture, la charge en éléments grossiers et l'hydromorphie sont relevées, selon une méthode proche de celle de l'IFN, et à l'aide d'un sondage à la tarière pédologique. Le sondage à la tarière est complété dans certains cas par une fosse pédologique. La différence avec la méthode IFN se situe au niveau de la texture (description horizon par horizon), et de la fosse pédologique (jusque 50 centimètres). Les espèces végétales hygrophiles et méso-hygrophiles permettent quant à elles la bio-indication de sols à nappe permanente ou temporaire. Ce protocole a été réalisé avec la collaboration de Bernard Jabiol (AgroParisTech Engref) et d'Yves Lefèvre (INRA Champenoux) qui ont aidé au choix du maillage, et des variables à relever pour la partie pédologique, et de François Vernier (ONF) pour les espèces végétales de la partie floristique.

Le CRPF ainsi que F&BE ont assuré les relevés de terrain, ainsi que leur saisie informatique. Ces relevés se sont échelonnés de mi-mai à début juin. Les données ont été mutualisées avec AgroParisTech Engref pour la validation de la carte de pH.

Dans le cas de la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement, il a été calculé pour chacun des points issus du terrain la classe de sensibilité potentielle au tassement. Cette information a été recoupée avec l'information du même type fournie par la carte. La matrice dite « de confusion » qui en résulte est présentée au tableau 4.

		Carte				
		1	2	3	4	Total
Terrain	1	19	13	16	0	34
	2	7	0	4	0	11
	3	8	0	52	0	60
	4	0	0	1	0	1
	Total	34	13	73	0	120

	points	%
Total bien classés :	71	59,17
Total surestimés :	33	27,5
Total sous-estimés :	16	13,33

Tableau 4. Matrice de confusion pour les 4 sites A, B, C et D, croisés avec la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers lorrains au tassement

La lecture de ce tableau permet le constat suivant :
- La précision de l'ordre de 60% est ordinaire pour ce type de démarche et apparaît comme satisfaisante.
- Une tendance à une surestimation légère est détectée ; celle-ci est confirmée par l'avis des experts ou la comparaison visuelle avec la carte dérivée des stations forestières. Cette surestimation a conduit à la révision de la méthodologie sur quelques zones.

Parallèlement à ces relevés, il a été possible de récupérer des données ONF collectées dans diverses études :
- inventaire pédologique de forêts domaniales du Pays des Étangs en Moselle (Albestroff, Belle-Forêt, Fénétrange, Languimberg et Sarrebourg), soit 869 placettes. Il s'agit d'une étude réalisée dans le cadre de la révision des aménagements de ces forêts, liée à la problématique de sols réputés comme difficiles (sols limoneux à engorgement temporaire très marqué car mal drainés) et de dépérissement du chêne pédonculé ;
- données pédologiques de la forêt communale de Villacourt (54) associées au réseau de placettes dendrométriques de cette forêt, soit 182 placettes.

Les données provenant des 6 sites (A à D, Pays des Étangs et Villacourt) ont ainsi été utilisées pour estimer la qualité de l'interpolation.

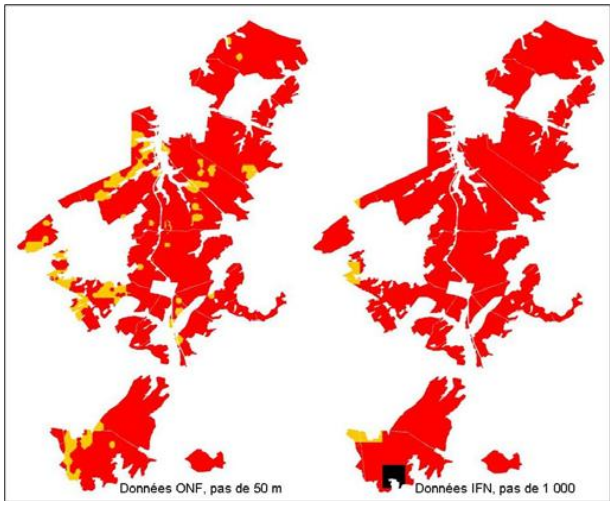


Figure 20. Le changement d'échelle sur un site instrumenté par l'ONF (domaniales du Pays des Etangs).

Il est à noter que les sites ONF n'ont pas été créés spécifiquement pour le projet, et qu'ils sont peu représentatifs de la diversité des situations au niveau régional. L'utilisation de ces données permet cependant de mettre en exergue les points suivants :

- Il y a une corrélation de tendance entre la carte de niveau régional et les analyses réalisées au niveau local,
- Toutefois la densité des points IFN est insuffisante pour couvrir la diversité locale des situations. Dans le cas présent, des zones de moindre sensibilité et de petite taille passent inaperçues sur la carte régionale. Dans la même logique, les experts s'accordent pour dire que les placages limoneux présents sur les côtes calcaires, de petite taille et particulièrement sensibles, ne peuvent pas être appréhendés convenablement par la carte régionale,
- Du fait de la surface représentée par un point IFN (130 ha), la carte régionale est assez sensible à un écart local par rapport à la réalité terrain (voir le carreau noir – classe 4 en base de la figure 20) ; cela peut découler d'un point non représentatif ou occasionnellement d'erreurs de mesure par l'opérateur, l'appréciation manuelle des textures du sol laissant une marge d'interprétation importante.

		Carte				
		1	2	3	4	Total
Terrain	1	19	13	18	0	50
	2	7	5	77	0	89
	3	8	12	1011	7	1038
	4	0	0	1	0	1
	Total	34	30	1107	7	1178

	Points	%
Total bien classés :	1035	87,86
Total surestimés :	115	9,76
Total sous-estimés :	28	2,38

Tableau 5. Matrice de confusion incluant les données des sites ONF de Villacourt (54) et du Pays des Etangs (57)

L'utilisation des sites supplémentaires ONF confirme la qualité de représentation de la carte (et améliore sensiblement la note donnée par la matrice de confusion) ; mais du fait de leur spécificité, leur interprétation doit être limitée à la classe 3 : sols très sensibles et impraticables une partie de l'année.

3.3.4.2) Validation à dire d'expert

Nous avons fait appel aux experts des sols lorrains afin que ceux-ci comparent la carte avec leur connaissance du terrain, l'idée étant de tirer parti de leurs connaissances. Une rencontre a ainsi été organisée à l'INRA Champenoux avec Philippe Durand (ONF), Yves Lefèvre (INRA) et Jacques Ranger (INRA). Il a été fait de même avec Bernard Jabiol (AgroParisTech-ENGREF), puis Dominique Messant (ONF). Pour ces rencontres, la carte avait été découpée selon le contour des régions IFN, et c'est région IFN après région IFN que la carte a été passée en revue.

• Argonne La cohérence de la carte avec la réalité est jugée bonne. L'Argonne comporte essentiellement des sols limoneux (correspondance avec la classe 3). La classe 1 est due à des zones en pente ou à forte charge en cailloux.	• Basses Vosges Gréseuses La carte est cohérente avec la réalité qui est connue comme étant peu sensible au tassement. En effet, cette zone est située sur du conglomérat ce qui explique le classement majoritaire en classe 1.
• Champagne humide La carte est cohérente avec la réalité. La sensibilité donnée par la carte correspond à la vision des experts, du fait des sols très limoneux.	• Hautes Vosges Gréseuses La carte reflète la réalité pour la classe 1. Cependant la dépression de Saint-Dié, apparaissant en rouge sur la carte, était plus vue comme étant en classe 2.
• Plateau Lorrain La carte est fidèle à la réalité, avec plus de 70 % de sols potentiellement très sensibles et impraticables une partie de l'année. La classe 1 correspond au grès rhétien qui localement rend les sols praticables toutes l'année avec peu de précautions.	• Plateaux Calcaires Les placages limoneux apparaissent, et sont de plus en plus fréquents lorsque l'on remonte vers le nord. Ils correspondent à la classe 3, qui est estimée à 18 % par la carte, ce qui peut être correct. Le reste est majoritairement en classe 2 ce qui correspond bien aux argiles de décarbonatation.
• La Vôge et Collines Sous Vosgiennes Le classement de près de 80 % des sols en classe 3 est jugé quelque peu excessif, la présence de grés hydromorphes ne pouvant pas expliquer un tel chiffre, d'autant que ces sols sont à priori sableux sur substrat gréseux. Ce point sera abordé dans la discussion.	• Vosges Cristallines De manière identique au cas précédent le fort taux de sols en classe 3 surprend. Les sols sont très humifères, mais ce paramètre n'a pas été pris en compte lors de la construction de la carte. Les sols seraient de type sablo-limoneux à limoneux sableux. Ce point sera également abordé dans la discussion.
• Warndt Cette région essentiellement sur conglomérat explique le classement de 66,3 % des sols en classe 1. Les sols les plus sensibles sont situés à la limite avec le Plateau Lorrain.	• Woëvre et Annexes La plaine de la Woëvre, en étant très limoneuse, est réputée comme très sensible au tassement. Ce fait est vérifié avec la carte.

Tableau 6. Résultats de la validation à dire d'expert par région forestière.

De manière générale, hormis deux régions IFN dont les classements en classe 3 sont discutables, la carte reflète la réalité connue des experts. Les régions les moins sensibles sont bien les régions attendues et il en est de même pour les régions les plus sensibles. Les points concernant la Vôge-Collines Sous Vosgiennes et les Vosges Cristallines sont abordés ci-après et ont conduit à une rectification dans la carte définitive.

3.3.4.3) Sensibilité des seuils PROSOL et du reclassement

La carte permet de pointer la sensibilité des seuils fixés par le guide PROSOL associés aux valeurs de reclassement pour la texture. Rappelons également que les critères de diagnostic PROSOL n'ont pas été créés dans un but cartographique mais avant tout comme une aide pour le gestionnaire. Cette sensibilité est relevée notamment dans le cas des points litigieux entre la validation à dire d'expert et la carte pour les sols en classe 3 dans les cas de la Vôge-Collines Sous Vosgiennes et des Vosges Cristallines. L'analyse des points IFN correspondant aux zones indiquées en classe 3 dans ces régions indique une texture sablo-limoneuse (SL). La table de reclassement alloue à cette texture un taux de sable de 67,5 %, ce qui est juste en dessous du seuil de 70 % pour le classement en classe 1. Le constat est identique pour l'Argonne.
Il paraît donc opportun de souligner que la sensibilité de la classe 3 de ces zones n'est pas comparable aux autres régions dont la classe 3 est majoritaire, avec des caractéristiques bien plus différentes. Ces autres régions présentent un faciès plus contrasté, avec notamment une texture franchement plus limoneuse et des conditions

d'hydromorphie bien plus présentes (Plateau Lorrain ou encore la Woëvre avec des limons sur argiles, qui se comportent comme une véritable couche imperméable à la filtration de l'eau).

Pour les 3 régions litigieuses, pour lesquelles la sensibilité était par ailleurs jugée surévaluée (cf. validation), la solution a été de revenir à un simple reclassement entre le type de sol donné par l'IFN et la classe Prosol. Cette solution augmente la sensibilité à une mauvaise interprétation de l'opérateur, mais corrige un biais global.

3.3.5) Carte définitive

La carte définitive est présentée à la figure 21. Il est à noter qu'elle tient compte des remarques formulées lors de la validation par expertise et a donc subi une modification sur les régions forestières Vosges Cristallines, La Vôge – Collines Sous-Vosgiennes et Argonne.

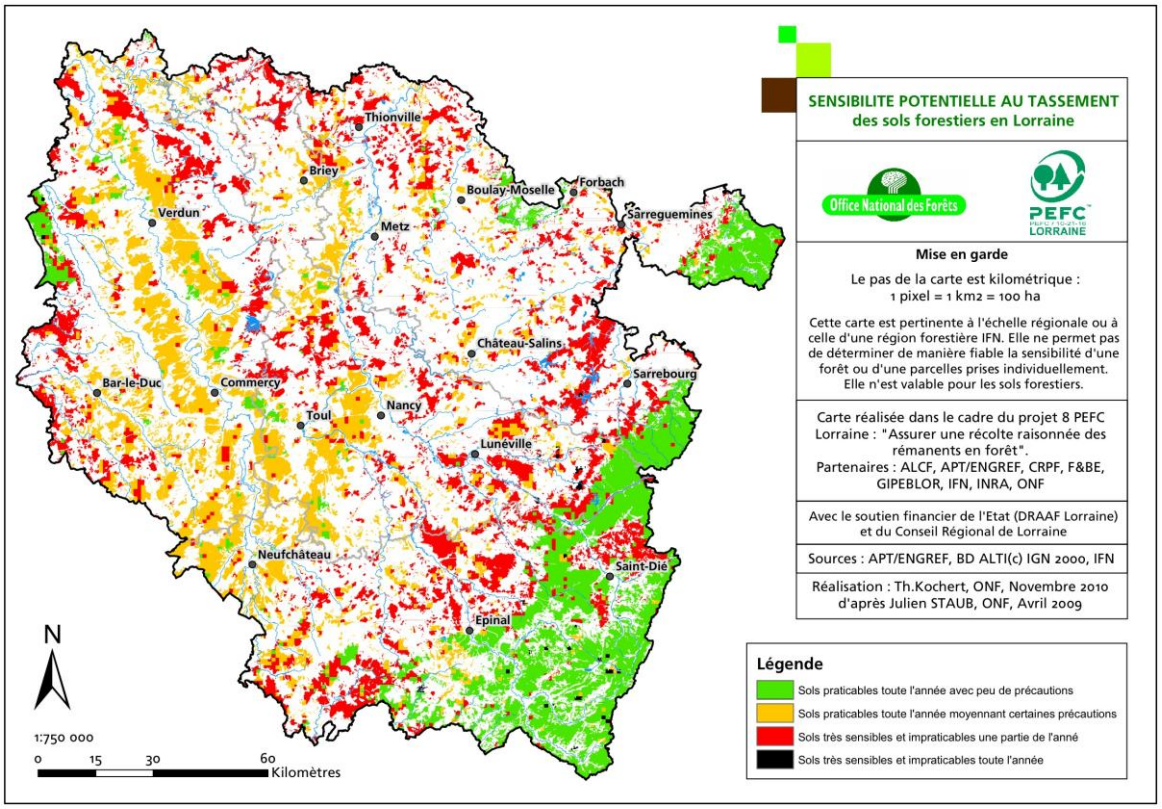


Figure 21. Carte de sensibilité potentielle au tassement des sols forestiers en Lorraine

3.3.6) Notice d'utilisation de la carte

Cette notice fait l'objet d'un document séparé fourni systématiquement avec la carte, mais est reprise ici dans son intégralité.

La notion de "sensibilité potentielle" recouvre ici la succession possible de périodes au cours de l'année où l'exploitant devra tenir compte de contraintes particulières liées au risque de tassement. Aucune prévision ni caractérisation de ces périodes n'est fournie, leur évaluation étant laissée à l'appréciation du gestionnaire.

3.3.6.1) Domaine d'utilisation

La carte permet d'estimer l'occurrence des différentes classes de sensibilité potentielle au tassement sur une zone correspondant à un ou plusieurs massifs forestiers représentant au minimum 1000 ha. Le domaine d'application idéal est celui de la région forestière IFN.

Elle ne permet pas de connaître la sensibilité exacte au droit d'un point particulier et ne peut notamment être utilisée pour évaluer la sensibilité d'une parcelle avant d'y effectuer des travaux. Lorsque ce but est recherché, la carte devra être complétée par des analyses plus détaillées :
- exploitation de la carte des stations forestières lorsque celle-ci existe, ou éventuellement d'une carte pédologique,
- prise de données simplifiée sur le terrain ; à titre préparatoire (données de texture, engorgement et charge en cailloux) ou le jour même pour connaître l'état hydrique,
- vérification régulière de la profondeur des ornières laissées par les engins en cours de chantier[1].

La carte concerne tous les sols et n'établit pas de distinction entre le cloisonnement d'exploitation et le reste de la parcelle. Le fait pour l'exploitant de circuler sur les cloisonnements ne l'exonère pas de prendre en compte les contraintes liées à la dégradation physique. En effet, un cloisonnement tassé présentera un certain nombre de désagréments :
- il deviendra rapidement impraticable, ce qui obligera les engins à parcourir une surface plus importante,
- son imperméabilité pourra conduire à un ruissellement accru, à des phénomènes d'érosion et/ou d'une dégradation des cours d'eau,
- l'impact visuel peut être localement gênant.

La carte couvre l'ensemble des sols forestiers de Lorraine, quel que soit le type de propriété. En revanche elle ne doit pas être utilisé en dehors des sols forestiers ; à cette fin les données correspondantes ont été masquées.

3.3.6.2) Précision planimétrique et sémantique

La carte de sensibilité au tassement des sols forestiers a été réalisée à partir de données correspondant en moyenne à un point pour 130 ha. L'utilisation de covariables pour l'interpolation a permis d'en améliorer légèrement la précision spatiale, toutefois celle-ci est considérée comme limitée au pas du kilomètre. Pour cette raison, les données ont été représentées sous formes de mailles carrées d'un côté d'1 km.

3.3.6.3) Qualité des données

Malgré les efforts réalisés pour sélectionner les données sources les plus fiables, des erreurs ou omissions restent possibles. L'utilisateur veillera à informer l'Office National des Forêts d'anomalies qu'il pourrait être amené à constater. En cas d'erreurs multiples, une révision pourra être envisagée, notamment en écartant du jeu de données d'origine des points considérés comme aberrants.

3.3.6.4) Imagette

La carte dans sa version de diffusion est une réduite et destinée à un but illustratif. Un agrandissement au-delà du format A3 est possible, mais ne devra pas conduire à une interprétation erronée.
En vue d'une exploitation sous Système d'Information Géographique, les données sont disponibles sur la plateforme GéoSylva Lorraine : http://geosylva.ifn.fr

3.3.6.5) Droits d'utilisation

Les reproductions de la carte sont permises sans limitation de nombre, mais doivent garantir l'intégrité du document, en particulier les mentions légales et les logos des partenaires. Il est recommandé de joindre la présente notice à toute copie.
L'utilisation des données d'origine pour la réalisation de tout produit dérivé est possible sous réserve de faire apparaître les mentions légales suivantes : (c) Office National des Forêts, 2010.

3.3.7) Variante : utilisation des cartes de stations

Nous avons également réalisé une carte de sensibilité à partir des stations forestières. L'intérêt de cet exercice était multiple :
- illustrer les limites d'utilisation de la carte dérivée des levés IFN,

[1] Une règle couramment admise est qu'une profondeur supérieure à 20 cm avertit l'exploitant d'un risque élevé et conduit à différer le chantier si possible.

- montrer l'intérêt d'utiliser les données stationnelles lorsqu'elles existent, et mettre en place une démarche simple pour la réalisation de cartes dérivées des stations,
- disposer d'un élément supplémentaire de comparaison et de validation.

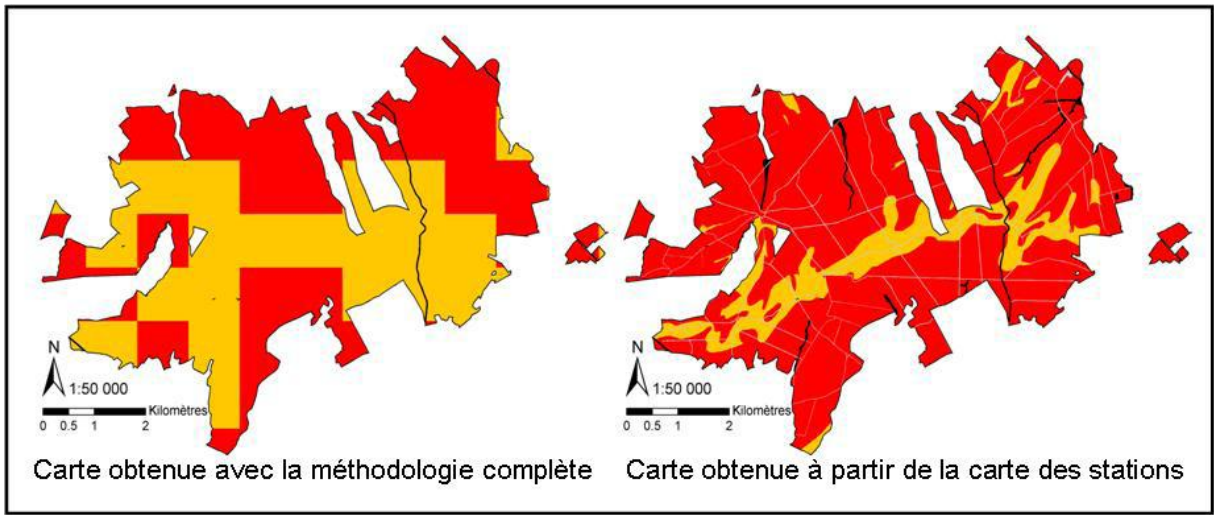


Figure 22. Le changement d'échelle. Illustration des limites de la carte régionale sur la forêt domaniale de Parroy : la carte régionale donne les tendances présentes localement, alors que la carte issue de stations permet de préciser la logique spatiale locale.

La carte dérivée des stations a été réalisée par reclassement à partir des principaux catalogues de stations forestières en Lorraine, suite à un travail d'expertise réalisé par F.Vernier (ONF). Un certain nombre de facteurs restreignent le domaine d'application de cette carte :
- elle est limitée aux forêts publiques (les forêts privées n'étant en général pas dotées de cartes stationnelles, ou ces données peuvent ne pas être disponibles pour des raisons de droit d'utilisation),
- ces forêts doivent avoir fait l'objet d'une description en stations,
- ces descriptions doivent être réalisées selon les typologies standard en vigueur à l'Office National des Forêts, ce qui exclut certaines descriptions anciennes ou réalisées sur des catalogues spécifiques (un exemple typique est celui de la FD de Haye en Meurthe-et-Moselle, pour lequel le tableau de croisement n'était pas disponible lors de la réalisation de la carte. Ce tableau a été ajouté depuis ; la carte sera modifiée ultérieurement).
- enfin les données doivent être disponibles sous une forme aisément exploitable, c'est à dire intégrée dans la Base de Données Patrimoniale de l'ONF (ou en passe de l'être). Nous avons ainsi exclu les reprises de documents papier ou la collecte de dossiers informatisés mais disparates.

De la sorte, aujourd'hui seules environ 50% des surfaces de forêts publiques, soit un tiers de la forêt lorraine, sont couvertes par des cartes de stations exploitables.
Cette surface couverte a vocation a s'étendre dans les mois et années à venir, avec la reprise de données supplémentaires (en particulier l'est mosellan) dans le cadre du déploiement généralisé de la Base de Données Patrimoniale, et du fait de la révision des aménagements forestiers suivant une méthodologie harmonisée. L'ajout ponctuel de tables de reclassement pour des catalogues anciens ou particuliers sera à envisager au cas par cas en fonction des enjeux.

Les tables de reclassement actuellement disponibles sont présentées au tableau 7.

Région IFN : Argonne

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Chênaie (Hêtraie) de plateau sur sable et sol très acide, parfois hydromorphe	C-ARG_1	+++
Chênaie-Hêtraie de plateau sur gaize acide à très acide	C-ARG_2	++
Chênaie-Hêtraie de plateau sur gaize et sol peu acide à assez acide	CARG_3	+++
Hêtraie-Chênaie (-Charmaie) de plateau sur limon et sol peu acide à assez acide	C-ARG_4	+++
Chênaie-Charmaie de plateau sur limon et sol neutre à peu acide	C-ARG_5	+++
Chênaie (-Charmaie) de plaine ou de plateau sur argile et sol acide	C-ARG_6	+++
Chênaie-Charmaie fraîche de plaine ou de plateau sur argile et sol peu acide à acide	C-ARG_7	+++
Chênaie-Charmaie de plateau sur argile et sol peu acide	C-ARG_8	+++
Chênaie-Frênaie-Charmaie de plateau sur argile et sol neutre à peu acide	C-ARG_9	+++
Chênaie-Hêtraie de versant ensoleillé sur gaize et sol très acide	C-ARG_10	+
Chênaie-Hêtraie de versant ombragé sur gaize et sol acide	C-ARG_11	+
Chênaie (-Hêtraie) de versant ombragé sur gaize et sol peu acide	C-ARG_12	+
Chênaie-Chaermaie de bas de versant à ente faible sur sol peu acide à acide	C-ARG_13	+
Chênaie-Frênaie de bas de versant à pente faible sur sol neutre à peu acide	C-ARG_14	++
Chênaie pédonculée-Charmaie de fond de vallon	C-ARG_15	+++
Chênaie pédonculée-Frênaie de fond de vallon	C-ARG_16	+++
Aulnaie-Frênaie	C-ARG_17	+++
Aulnaie marécageuse	C-ARG_18	++++

Région IFN : Champagne humide - Perthois

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Chênaie mixte très acidiphile à engorgement temporaire sur sable	C-CH_1	+++
Chênaie sessiliflore - hêtraie - acidiphile bien drainée sur sable	C-CH_3	++
Chênaie mixte acidiphile à engorgement temporaire sur limon ou sable	C-CH_4	+++
Chênaie sessiliflore - hêtraie - charmaie acidicline à mésoacidiphile assez bien drainée sur limon	C-CH_5	+++
Chênaie sessiliflore - hêtraie - charmaie acidicline à mésoacidiphile bien drainée sur sable	C-CH_6	++
Chênaie mixte - charmaie acidicline à engorgement temporaire sur limon	C-CH_7	+++
Chênaie mixte - charmaie mésoneutrophile à neutroacidicline bien drainée sur limon	C-CH_8	+++
Chênaie mixte - charmaie neutrophile bien drainée sur limon	C-CH_9	+++
Chênaie mixte - charmaie mésophile sur marne éventuellement décarbonatée en surface	C-CH_10	+++
Chênaie pédonculée - charmaie sur marne décarbonatée sur une profondeur moyenne	C-CH_11	+++
Chênaie pédonculée (frênaie) à engorgement temporaire sur marne décarbonatée	C-CH_12	+++
Chênaie pédonculée - frênaie sur marne éventuellement décarbonatée en surface	C-CH_13	+++
Chênaie pédonculée - frênaie sur alluvions anciennes carbonatées	C-CH_14	++
Chênaie pédonculée - frênaie neutrophile	C-CH_15	+++
Aulnaie - frênaie - ormaie	C-CH_16	+++
Aulnaie marécageuse neutrophile	C-CH_17	+++
Aulnaie acidiphile	C-CH_18	+++

Stations sur marnes sur Côtes de Meuse et Woëvre (Milarakis, 2002)

Groupe stationnel	Code ONF	sensibilté tassement
La hêtraie - chênaie mésoxérophile sur marne carbonatée	C-MIL2_1	+++
La hêtraie - chênaie mésophile sur marne décarbonatée entre 10 et 40 cm	C-MIL2_2	+++
La chênaie pédonculée - frênaie sur marne	C-MIL2_3A	+++
La chênaie pédonculée sur marne hydromorphe	C-MIL2_3B	+++
La frênaie - aulnaie sur marne	C-MIL2_4	+++

Région IFN : Woëvre

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Aulnaie à aulnaie - frênaie inondable	D-WO_I	+++
Chênaie - frênaie de bas de pente et de fond de vallon	D-WO_II	+++
Frênaie - aulnaie calcicole	D-WO_III	+++
Chênaie pédonculée - Charmaie sur marnes pures	D-WO_IV	+++
Hêtraie - chênaie - Charmaie sur alluvions anciennes calcaires	D-WO_V	++
Chênaie - Charmaie sur limons peu épais	D-WO_VI	++
Chênaie - Charmaie - Hêtraie sur limons moyennement épais	D-WO-VII	+++
Chênaie - Charmaie - Hêtraie sur limons épais	D-WO_VIII	+++

Région IFN : Plateau lorrain

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Aulnaie	D-PL_0	+++
Chênaie pédonculée - frênaie neutrophile de bas de pente et fond de vallon	D-PL_I	+++
Chênaie - Charmaie Sur argiles et limons - Peu épais - Variante mal drainé	D-PL_II.1	+++
Chênaie - Charmaie Sur argiles et limons - Peu épais - Variante moyen	D-PL_II.2	+++
Chênaie de dégradation sur alluvions engorgées	D-PL_III	+++
Chênaie sur limons ou sables mal drainés	D-PL_IV	+++
Hëtraie - chênaie - sessiliflore sur pentes argileures	D-PL_V	++
Hêtraie - chênaie sur limons ou sables drainés moyennement épais	D-PL_VI	+++
Hêtraie - chênaie sur limons ou sables drainés épais - Variante à limons riches	D-PL_VII.1	+++
Hêtraie - chênaie sur limons ou sables drainés épais - Variante à limons acides	D-PL_VII.2	+++
Hêtraie - chênaie - sessiliflore sur grès surperficiel	D-PL_VIII	+
Hêtraie - chênaie sur substrats sableux	D-PL_IX	++
Chênaie - hêtraie - Charmaie de plateau sur calcaire marneux	D-PL_X	++
Hêtraie - neutrocalcicole sur substrats calcaro-dolomitiques bien drainés	D-PL_XI	++

Régions IFN : Vôge - Collines sous-vosgiennes (partie Vosges)

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Chênaie sessiliflore - hêtraie sur grès coquiller et limons	D-CV_I	++
Hêtraie - chênaie à Luzule blanche	D-CV_II	+
Hêtraie - chênaie acidiphile variante à Canche flexueuse	D-CV_III.1	+
Hêtraie - chênaie acidiphile variante à Canche et Myrtille	D-CV_III.2	+
Hêtraie - chênaie acidiphile à Myrtille	D-CV_IV	+
Chênaie sessiliflore xéro-acidiphile de versant chaud	D-CV_V	+
Chênaie - hêtraie sur éboulis	D-CV_VI	++
Chênaie - hêtraie sur substrats mal drainés - variante type	D-CV_VII.1	+++
Chênaie - (hêtraie) sur Substrats mal drainés - variante hygroacidiphile à bouleau et molinie	D-CV_VII.2	+++
Chênaie - (hêtraie) sur Substrats mal drainés - variante hygroacidiphile à molinie et sphaignes	D-CV_VII.3	+++
Hêtraie submontagnarde à Sapin	D-CV_VIII	+
Chênaie mixte sur argiles et limons moyennement épais	D-CV_IX	+++
Chênaie - Charmaie sur argiles et limons peu épais	D-CV_X	++
Aulnaie	D-CV_XI	+++
Chênaie pédonculée de vallée	D-CV_XII	+++

Régions IFN : Vosges cristallines

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Tourbière forestière (*Tourbière boisée*)	C-VC_1	++++
Pessière - sapinière tourbeuse	C-VC_2	++++
Aulnaie - frênaie humide et aulnaie marécageuse	C-VC_3	+++
Pessière sur blocs	C-VC_4	+
Erablaie d'éboulis instables	C-VC_5	+
Hêtraie sommitale	C-VC_6	+
Hêtraie d'altitude sur sol peu acide	C-VC_7	+
Hêtraie d'altitude sur sol acide	C-VC_8	+
Hêtraie - sapinière humide à hautes herbes	C-VC_9	+
Hêtraie - sapinière sur sol riche	C-VC_10	++
Hêtraie - sapinière sur sol assez riche	C-VC_11	++
Hëtraie - sapinière sur sol peu acide	C-VC_12	++
Hêtraie - sapinière sur sol acide	C-VC_13	+
(Hêtraie) - sapinière sur sol très acide	C-VC_14	+
Pineraie sur sol superficiel très acide	C-VC_15	+
Chênaie pédonculée - frênaie de bas de versant ou bord de ruisseau	C-VC_16	+++
Chênaie sessiliflore - hêtraie à Erable sur sol peu acide	C-VC_17	++
Chênaie sessiliflore - hêtraie sur sol acide	C-VC_18	+
Chênaie sessiliflore sur sol superficiel et très acide	C-VC_19	+

Régions IFN : Vosges gréseuses, Pays de Dabo, collines sous vosgiennes : parties Meurthe-et-Moselle et sud Moselle (pays de Sarrebourg)

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Chênaie - pineraie sèche à Myrtille et Fougère aigle	C-VG_A	+
Hêtraie - chênaie à Canche flexueuse et Luzule blanchâtre sur sol acide	C-VG_B	+
Hêtraie - chênaie à Luzule blanchâtre sur sol peu acide	C-VG_C	++
Hêtraie - chênaie à Millet diffus sur sol riche	C-VG_D	+++
Aulnaie - frênaie ou aulnaie marécageuse	C-VG_E	+++
Sapinière - hêtraie sur sol acide d'altitude	C-VG_1	+
Pessière - sapinière sur éboulis de blocs	C-VG_2	+
Pessière - sapinière sur sol tourbeux	C-VG_3	++++
(Aulnaie) - sapinière sur sol humide de fond de vallée	C-VG_4	+++
Aulnaie - frênaie ou aulnaie marécageuse	C-VG_5	+++
Aulnaie - frênaie ou aulnaie marécageuse	C-VG_5	+++
Pineraie à Callune sur sol superficiel très acide	C-VG_6	+
Sapinière - pineraie à Callune et Leucobryum sur sol très acide	C-VG_7	+
Sapinière - (hêtraie) à Myrtille, Bazzanie et Sphaignes sur sol très acide	C-VG_8	+
Sapinière - hêtraie à Canche flexueuse et Myrtille sur sol très acide	C-VG_9	+
Sapinière - hêtraie à Luzule blanchâtre sur sol peu acide	C-VG_10	++
Sapinière - hêtraie à Fétuque sur sol peu acide	C-VG_11	++
Sapinière - hêtraie sur sol assez riche	C-VG_12	++

Région IFN : Vosges du Nord (Pays de Bitche et collines sous vosgiennes ouest, partie nord de la Moselle)

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Chênaie sessiliflore-hêtraie à pin sylvestre très acide sur sol pierreux	C-VDN_1	+
Chênaie sessiliflore-hêtraie à pin sylvestre très acide sur sol profond	C-VDN_2	++
Sapinière-hêtraie très acide des milieux confinés	C-VDN_3	+
Hêtraie-chênaie sessiliflore sur sol profond acide à peu acide	C-VDN_4	++
Hêtraie-chênaie sessiliflore peu acide à Luzule blanchâtre et Fétuque des bois	C-VDN_5	++
Hêtraie-sapinière acide à peu acide à Luzule blanchâtre et Fétuque des bois	C-VDN_6	++
Hêtraie-chênaie-Charmaie peu acide sur sol profond	C-VDN_8	+++
Hêtraie-chênaie-Charmaie peu acide à assez riche sur limons drainés	C-VDN_9	+++
Hêtraie-chênaie-Charmaie acide à peu acide sur limons temporairement engorgés	C-VDN_10	+++
Hêtraie-chênaie-Charmaie très riche	C-VDN_11	+++
Chênaie pédonculée peu acide à assez riche de vallée ou bas de versant	C-VDN_12	+++
Chênaie pédonculée-frênaie-Charmaie assez riche à riche sur argile peu profonde	C-VDN_13	++
Aulnaie-(frênaie) humide à très humide	C-VDN_14	+++
Aulnaie marécageuse acide à très acide à grandes laîches	C-VDN_15	+++
Pineraie sylvestre très acide et très humide	C-VDN_16	+++
Pineraie sylvestre très sèche et très acide à cladonies sur éperons rocheux	C-VDN_A	+
Chênaie séche et très acide sur sol superficiel	C-VDN_B	+
Pineraie sylvestre tourbeuse très acide et très humide à airelle des marais	C-VDN_G	++++

Région IFN : Warndt

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Hêtraie - chênaie sessiflore neutrophile	D-WA_I.1	++
Hêtraie - chênaie sessiflore neutroacidiphile	D-WA_I.2	++
Hêtraie - chênaie acidicline	D-WA_II.1	++
Hêtraie acidiphile	D-WA_II.2	+
Hêtraie - pineraie acidiphile	D-WA_II.3	+
Pineraie hygroacidiphile	D-WA_III	+++
Pineraie sylvestre sur grès superficiel	D-WA_IV	+
Station « tourbeuse »	D-WA_V	+++
Erablaie - frênaie de fond de vallon	D-WA_VI	+++

Région IFN : Plateaux calcaires

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Hêtraie-chênaie xérophile de plateau	C-PC_PX.	+
Hêtraie-chênaie mésoxérophile de plateau	C-PC_PMX	+
Hêraie-chênaie mésophile de plateau	C-PC_PM.	++
Hêtraie-chênaie neutrophile de plateau	C-PC_PN.	+++
Hêtraie-chênaie mésoacidiphile de plateau	C-PC_PMA	+++
Tillaie-érablaie à scolopendre	C-PC_VTE	++
Hêtraie de versant Nord à Erables et Tilleul	C-PC_VNE	++
Hêtraie de versant Est ou Ouest mésophile	C-PC_VM.	++
Hêtraie de versant Est ou Ouest mésoxérophile	C-PC_VMX	++
Hêtraie-chênaie de versant Sud	C-PC_VS.	+
Hêtraie-frênaie de bas de versant	C-PC_BV.	+++
Frênaie-érablaie de fond de vallon	C-PC_FEV	+++
Aulnaie-frênaie de bord de ruisseau	C-PC_AFR	+++
Chênaie pédonculée-frênaie de vallée	C-PC_CFV	+++

Forêt Domaniale de Haye (Becker, 1978)

Groupe stationnel	Code	sensibilté tassement
Hêtraie - Chênaie pubescente de versant Sud	HAYE_A	+
Hêtraie - Chênaie sessile xérocalcicole de versant Sud	HAYE_B	+
Hêtraie à tilleul de versand nord	HAYE_C	++
Hêtraie - Chênaie sessile calcicole de plateau	HAYE_D	+
Hetraie - Chênaie neutrocalcicole	HAYE_E	++
Frênaie - Erablaie de fonds de vallons (étroits)	HAYE_F	+++
Hêtraie - Chênaie neutrophile de plateau	HAYE_G	++
Hêtraie - Chênaie mésoneutrophile	HAYE_H	++
Hêtraie - Chênaie mésoacidiphile	HAYE_I	+++

Tableau 7. Sensibilité au tassement des principaux types de stations forestière en Lorraine (source : F.Vernier).

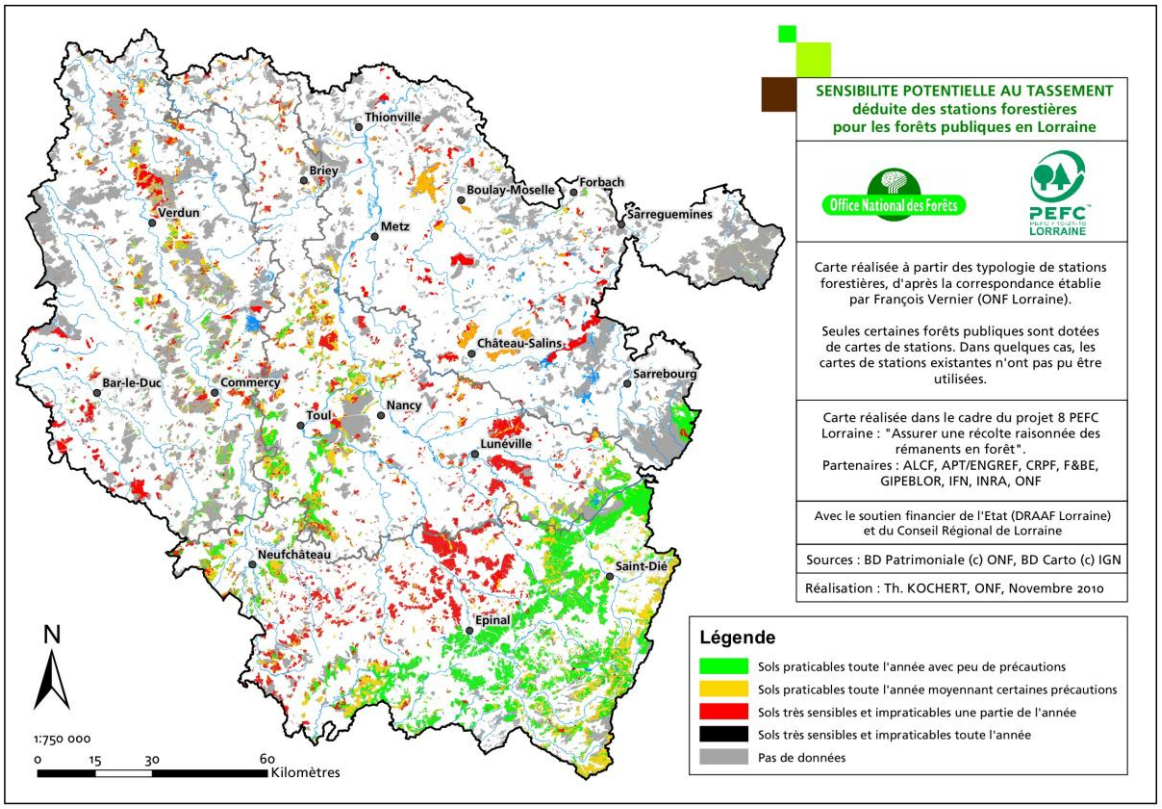


Figure 23. Carte de sensibilité potentielle dérivée des stations forestières.

Cette réalisation nous permet également de tirer quelques enseignements.

- Bien que les catalogues de stations n'aient pas été conçus initialement pour gérer le risque de tassement du sol, un certain nombre de types sont bien adaptés à cette problématique, en particulier lorsque la clé de détermination est basée sur la pédologie. Toutefois, il persiste quelques types indéterminés. Lors de révisions ultérieures des catalogues, il pourrait être utile de remédier à ces cas particuliers en scindant les types concernés.,
- Globalement, l'utilisation en prévention du tassement souligne l'intérêt de disposer de forêts dotées d'une carte des stations précise et conforme aux catalogues en vigueur utilisés par la profession. Il s'agit d'un investissement de départ conséquent mais d'une durée de vie importante, les stations n'évoluant pas significativement dans le temps,
- Enfin, les catalogues devraient mentionner directement la problématique tassement, à la fois dans les préconisations techniques et en regard de chaque type stationnel.

3.4) Valorisation de la carte de sensibilité au tassement

Il va sans dire que la valorisation de ce travail n'est pas limitée au domaine des rémanents, mais peut concerner l'ensemble de l'exploitation forestière. Nous avons identifié ci-après quelques cas d'utilisation, qui se veulent illustratifs mais non exhaustifs.

3.4.1) Valorisation par le décideur institutionnel

Les décideurs institutionnels (DRAAF, Conseil Régional, Conseils Généraux…) sont régulièrement sollicités pour des demandes de subventions. Ces financements peuvent occasionnellement concerner l'achat de matériel d'exploitation forestière, une participation financière à une exploitation faisant appel à un système d'exploitation innovant ou alternatif, ou encore la rédaction de guides pratiques.
En période d'argent public rare, la rationalisation des investissements est de mise.
La carte permettra d'orienter les financements de matériel d'exploitation auprès des ETF, en fonction de la localisation géographique du demandeur et du rayon d'action envisagé. Par exemple, plutôt que de

subventionner l'achat d'un porteur lourd par un ETF travaillant sur Plateau Lorrain, il serait plus judicieux d'orienter l'achat d'un matériel léger, plus respectueux des sols, avec un financement partiel.
D'un autre côté, la carte peut être utilisée par le forestier à l'attention du financeur. La carte a ainsi déjà servi à appuyer une demande de subvention auprès du CR de Lorraine, pour la rédaction d'un guide sur les systèmes d'exploitation combinés au débusquage par traction animale.

3.4.2) Valorisation par le décideur forestier

La carte est également un moyen d'aider le décideur forestier à planifier ses actions. Par exemple, pour l'agence travaux de l'ONF Lorraine la carte constitue un outil pour positionner les différentes équipes d'ouvriers en fonction des zones dans lesquels ils sont susceptibles d'intervenir au cours de l'année. C'est aussi un argument pour raisonner l'achat de matériel, comme par exemple l'achat d'un câble aérien.

D'un point de vue commercial, la carte peut permettre de redéfinir des zones de contrats d'approvisionnement afin de mettre en place des stratégies durables d'approvisionnement. La protection des sols doit être organisée à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement en diversifiant les moyens de protection (cloisonnements, méthodes alternatives, tracks, etc.) afin de maintenir un approvisionnement régulier des outils de transformation dans de bonnes conditions d'exploitation et sans pression excessive des acheteurs (Thiébaut, 2004).

De manière similaire, en identifiant les zones fortement sensibles et en recoupant cette information avec les prévisions de récolte, il sera possible de déterminer des zones dans lesquelles l'achat ou le subventionnement de matériel alternatif se justifiera pleinement. Cette justification pourra passer par le regroupement durant la même année d'unités de gestion prévues en coupe à des années différentes. C'est aussi l'occasion d'accompagner un ETF qui décidera d'investir dans une méthode alternative en lui assurant un travail régulier sur plusieurs années. Ce type d'accompagnement a été mis en place cette année entre l'Agence ONF de Sarrebourg et un ETF, et passe par la contractualisation de 6 000 m3/an sur 3 ans.

Enfin, dans le cadre strict de l'ONF, la carte de sensibilité des sols forestiers au tassement en Lorraine permet l'application locale de la note de service 09-T-297 (ONF, 2009) « Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols ».

3.4.3) Valorisation pour la conception des documents de gestion durable

Le rédacteur pourra utiliser la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement pour replacer la forêt dans son contexte et décider de la conduite ou non d'études spécifiques :
- s'il n'y a pas d'enjeu de sensibilité au tassement identifié, une prise en compte spécifique de la problématique tassement de sol n'est sans doute pas nécessaire, ce qui permet dans ce cas de retenir une version simplifiée du document de gestion,
- si un enjeu est clairement identifié et avéré, la forêt se situant en classe 3 par exemple, il peut en ce cas solliciter une étude plus fine (à un pas de l'ordre d'une centaine de mètres par exemple) de la sensibilité des sols au tassement. Le document de gestion pourra éventuellement préciser l'utilisation de méthodes d'exploitation alternatives si elles sont nécessaires.

3.4.4) Valorisation dans le cadre des études et plans d'approvisionnement

Avec le développement du bois énergie, les études de ressources dans ce domaine se multiplient. Les collectivités cherchent de plus en plus à s'équiper en unités de cogénération. En utilisant cette carte, les chargés d'étude pourront intégrer l'enjeu sol de manière macroscopique à leurs études, afin de :

- pondérer les disponibilités réelles de biomasse,
- définir la stratégie de la mobilisation du bois énergie en raisonnant par grandes zones.

Le chargé d'étude est invité au préalable à prendre connaissance des résultats présentés au chapitre 4 et de leur discussion.

3.5) Extrapolation

L'acquisition des données IFN à l'échelle nationale permettrait l'application de la méthodologie au niveau du territoire métropolitain. L'ONF dispose d'une licence MNT BD Alti® sur toute la France. L'exploitation de la macro « Position Topographique » du Lerfob rend possible la production d'une cartographie nationale de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement.
Nous recommandons dans ce cas une réalisation de niveau national et non région par région, afin de limiter les effets de bord. Les adaptations nécessaires seront toutefois les suivantes :

- calibrage de la macro « Position Topographique » au niveau national,
- adaptation du reclassement pour inclure les catégories de sol non retrouvés en Lorraine,
- mise en place d'une règle de décision permettant de basculer sur le type de sol plutôt que sur l'analyse texture / cailloux / hydromorphie région forestière par région.

Il faudra être également attentif à la densité des points IFN, qui est moindre dans certaines zones hors de la région Lorraine. En conséquence, la carte peut avoir une fiabilité moindre par endroits.

4) Evaluation des possibilités de récolte raisonnée des rémanents

4.1) Principe

Les deux cartes obtenues ont fait l'objet d'un croisement avec les limites des régions forestières IFN afin d'obtenir des données de synthèse par région forestière.
Il est à noter que les croisements sont faits en surface et sont limités aux surfaces forestières. Les valeurs ainsi obtenues sont représentatives des surfaces concernées par les différents enjeux, mais ne donnent qu'une idée approchée concernant les volumes effectivement mobilisables par type de produits. Ces volumes ne sont en effet pas rigoureusement proportionnels aux surfaces.
Une analyse complémentaire est en cours à l'ONF pour affiner ces résultats par type de peuplement et type de produit ; ces résultats devraient être disponibles courant 2011.

4.2) Déclinaison par région forestière des classes de sensibilité chimique

ID	REGION_IFN	Peu sensible	Sensible	Très sensible
105	CHAMPAGNE HUMIDE	89,5%	10,5%	0,0%
543	PLATEAUX CALCAIRES	99,1%	0,9%	0,0%
552	WOEVRE ET ANNEXES	98,2%	1,8%	0,0%
572	PLATEAU LORRAIN	86,6%	12,3%	1,1%
555	ARGONNE	53,7%	31,1%	15,2%
573	WARNDT	18,2%	49,1%	32,7%
886	VÔGE ET COLLINES SOUS-VOSGIENNES	14,9%	29,0%	56,0%
678	BASSES-VOSGES GRESEUSES	2,1%	14,1%	83,7%
887	HAUTES-VOSGES GRESEUSES	0,9%	11,9%	87,2%
888	VOSGES CRISTALLINES	0,9%	20,2%	78,9%
XXX	**REGION LORRAINE**	**63,7%**	**11,1%**	**25,2%**

Tableau 8. Classes de sensibilité aux exportations par région forestière IFN.

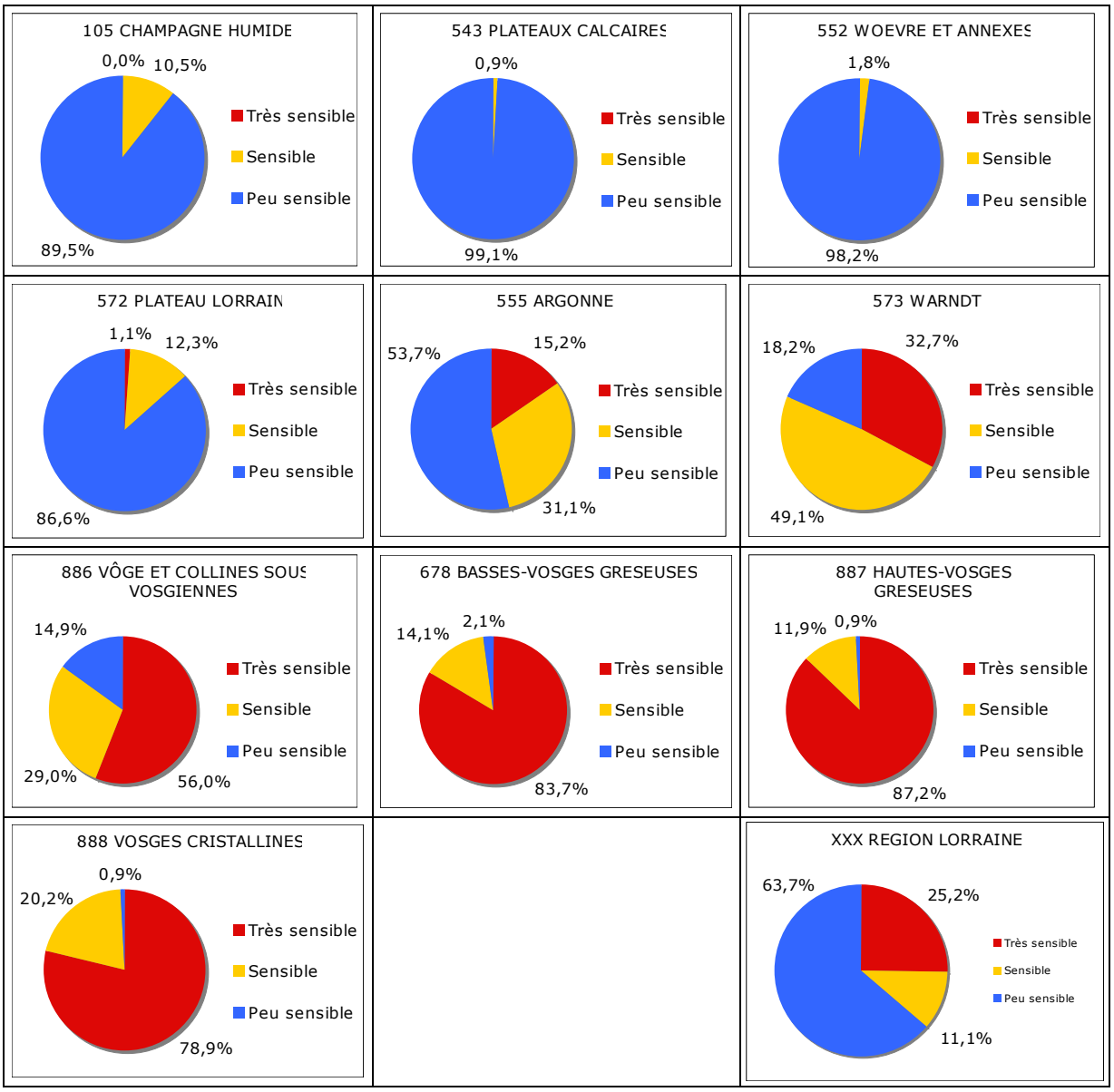


Figure 24. Représentation des classes de sensibilité aux exportations par région forestière

4.3) Déclinaison par région forestière des classes de sensibilité au tassement

ID	REGION_IFN	1	2	3	4
105	CHAMPAGNE HUMIDE	0,0%	7,5%	92,5%	0,0%
543	PLATEAUX CALCAIRES	4,7%	77,3%	18,1%	0,0%
552	WOEVRE ET ANNEXES	0,0%	25,8%	74,2%	0,0%
572	PLATEAU LORRAIN	1,3%	31,3%	67,2%	0,2%
555	ARGONNE	40,0%	20,5%	37,6%	1,9%
573	WARNDT	64,8%	3,4%	31,8%	0,0%
886	VÔGE ET COLLINES SOUS-VOSGIENNES	51,5%	10,4%	36,9%	1,2%
678	BASSES-VOSGES GRESEUSES	96,2%	0,4%	3,4%	0,0%
887	HAUTES-VOSGES GRESEUSES	75,3%	1,1%	23,5%	0,1%
888	VOSGES CRISTALLINES	94,6%	2,3%	1,4%	1,7%
XXX	**REGION LORRAINE**	**27,7%**	**36,8%**	**35,2%**	**0,4%**

Tableau 9. Sensibilité au tassement par région forestière IFN.

Figure 25. Représentation des classes de sensibilité au tassement par région forestière

4.4) Synthèse des enjeux de dégradation chimique et physique

ID	REGION_IFN	AUCUNE	UNE	DEUX
105	CHAMPAGNE HUMIDE	0,0%	88,3%	11,7%
543	PLATEAUX CALCAIRES	4,6%	94,8%	0,6%
552	WOEVRE ET ANNEXES	0,0%	99,3%	0,7%
572	PLATEAU LORRAIN	0,5%	85,9%	13,6%
555	ARGONNE	9,5%	77,6%	12,9%
573	WARNDT	2,3%	76,7%	20,9%
886	VÔGE ET COLLINES SOUS-VOSGIENNES	2,3%	58,8%	38,9%
678	BASSES-VOSGES GRESEUSES	0,8%	95,8%	3,4%
887	HAUTES-VOSGES GRESEUSES	0,1%	75,7%	24,1%
888	VOSGES CRISTALLINES	0,1%	94,4%	5,4%
XXX	**REGION LORRAINE**	**2,2%**	**86,6%**	**11,2%**

Tableau 10. Nombre de contraintes sol par région forestière IFN.

Figure 26. Représentation du nombre de contraintes sol par région forestière IFN.

4.5) Discussion

Il est possible de classer les régions forestières en deux groupes :
- régions de montagne (Massif Vosgien), pour lesquels la sensibilité chimique est très forte, en lien avec l'acidité naturelle des sols sans doute renforcée par des décennies de production résineuse intensive ainsi que d'autres facteurs. Dans ces zones, la collecte des rémanents doit être généralement exclue.
- régions de plaine et plateaux, pour lesquels la sensibilité chimique ne constitue pas un facteur limitant.

L'Argonne et le Warndt constituent des régions intermédiaires, pour lesquels le phénomène doit être apprécié forêt par forêt.

Vis-à-vis du tassement, la Lorraine présente un éventail de situations, allant de la plus critique (Champagne humide) à la plus favorable (Vosges Cristallines).
Il est intéressant de noter que les trois premières classes du guide Prosol sont particulièrement adaptées à la région Lorraine, aucune normalisation n'ayant été effectuée lors de la réalisation de la carte. A notre niveau, il n'apparaît donc pas nécessaire d'adapter ces classes pour la représentation.
La quatrième classe correspond par construction à des situations exceptionnelles (marais, tourbières, autres zones humides…).

Globalement, il y a une forme d'antagonisme entre sensibilité chimique et sensibilité physique. La situation typique est celle où une seule de ces contraintes est présente.

4.6) Conclusion

Les rémanents constituent un gisement recherché pour augmenter le prélèvement de biomasse en réponse aux objectifs formulés dans le cadre du Grenelle de l'Environnement.

Notre étude montre cependant que, si un gisement de matière existe dans les rémanents, la contrainte sol est omniprésente en Lorraine et conduit à relativiser par rapport aux données brutes de biomasse le gisement exploitable durablement, de manière fiable et à un coût acceptable.

En Lorraine :
36% des surfaces forestières présentent une sensibilité moyenne ou forte à l'appauvrissement chimique
72% des surfaces forestières présentent une sensibilité particulière au tassement (classe 2, 3 ou 4)
98% des surfaces présentent au moins l'une de ces deux contraintes.

L'enjeu de protection de la fertilité chimique des sols s'impose de manière impérative, dans la mesure où l'hypothèse d'un amendement reste écarté - c'est le choix qui est fait au niveau régional, sauf dans le cadre de quelques démarches expérimentales localisées.
La prise en compte de l'enjeu tassement est plus subtile mais non moins contraignante. Au niveau de la collecte des rémanents, cet enjeu a deux conséquences notables :

- en limitant la période de l'année durant laquelle les exploitations sont possibles, il peut conduire à rejeter les produits de faible valeur conduisant à retarder les chantiers,
- lorsque des précautions particulières de préservation des sols sont nécessaires (classe 2 en période humide ou classe 3 en période sèche), l'utilisation des rémanents pour préserver le parterre de la coupe et des cloisonnements exclut la valorisation de ces sous-produits.

Indirectement, il faut également noter que les modes d'exploitation alternatifs (câble, petite mécanisation, …) sont aujourd'hui majoritairement tournés vers l'exploitation des billes de pied, même si quelques expérimentations ont pu avoir lieu (ex. sortie d'arbres complets par câble).

De manière générale, le gestionnaire et l'exploitant devront en tout temps rester attentifs à ce que la collecte d'un produit actuellement de faible valeur ne conduise pas à des dégâts supplémentaires au sol ou aux peuplements.

En pratique, on retiendra que la collecte des rémanents ne peut donc être envisagée de manière systématique - c'est à dire toute l'année et avec deux passages dans la vie du peuplement - que dans des cas exceptionnels. Seule la région forestière Argonne permet d'identifier un gisement significatif de ce type, mais qui reste modeste (environ 10% en surface). Il pourrait être utile d'identifier les forêts concernées et de mentionner l'exploitation des rémanents dans leurs documents de gestion durable.

Dans d'autres cas, c'est une décision d'opportunité qui peut être prise localement, en particulier en fonction des conditions d'humidité au moment de la coupe. Il en découle que, pour les régions où le sol n'est pas acide, la collecte de rémanents reste possible sous réserve des contraintes économiques, mais ne peut pas être considérée comme certaine. La sagesse conduirait à exclure ces produits de contrats d'approvisionnement.

***

Les décideurs institutionnels, les gestionnaires et les exploitants disposent désormais, en complément des guides techniques, de cartes et données aussi objectives que possibles pour raisonner le choix de systèmes d'exploitation, en particulier dans le domaine de la récolte des rémanents. L'établissement de contrats, plans, études devra tenir compte de la composante sol afin d'assurer une gestion véritablement durable.
Il est bien sûr à souhaiter que cette prise en compte apparaisse clairement dans les documents de gestion durable ; ceci est de notre responsabilité et est à notre portée ; il reste à espérer par ailleurs qu'à long terme, le signal prix puisse également intégrer cette dimension.

Bibliographie

Benichou, P., Le Breton, O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. La Météorologie 7 eme série, n°19, 12.
Coudun, C., Gegout, J.C., Piedallu, C., Rameau, J.C., 2006. Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with Acer campestre (L.) in France. Journal of Biogeography 33, 1750-1763.
Drapier, J., Cluzeau, C., 2001. La base de données écologiques de l'IFN. The NFI's ecological data base. Revue Forestière Française 53, 365-371.
Dupouey, J.L., Thimonier, A., Lefevre, Y., Le Tacon, F., Bonneau, M., Dambrine, E., Poszwa, A., Landmann, G., 1998. Desaturation and nitrogen enrichment of forest soils in North Eastern France in the last few decades. Revue Forestière Francaise (Nancy) 50, 391-402.
Gegout, J.C., Coudun, C., Bailly, G., Jabiol, B., 2005. EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables. Journal of Vegetation Science 16, 257-260.
Gegout, J.C., Hervé, J.C., Houllier, F., Pierrat, J.C., 2003. Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. Journal of Vegetation Science 14, 55-62.
Gégout, J.C., Piedallu, C., Cornu, J.F., 2006. Cartographie prédictive des stations forestières du massif Vosgien. In: ECOFOR (Ed.), Forêt, vent et risque : des connaissances enrichies pour une meilleure gestion forestière.
Kalivas, D.P., Triantakonstantis, D.P., Kollias, V.J., 2002. Spatial prediction of two soil properties using topographic information. Global Nest: the Inst. J. 4, 41-49.
Lebourgeois, F., Piedallu, C., 2005. Comment appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. Revue forestière Française LVII, volume 4/2005, p331-356.
McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. geoderma 117, 3-52.
Piedallu, C., Gegout, J., 2008. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. Agricultural and Forest Meteorology 148, 1696-1706.
Piedallu, C., Gégout, J., Bruand, A., Seynave, I., 2010. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. Geoderma, doi:10.1016/j.geoderma.2010.10.004.
Piedallu, C., Gegout, J.C., 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. Ann. For. Sci. 64, 899-909.
Piedallu, C., Gégout, J.C., Cornu, J.F., Cluzeau, C., 2006. Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien, élaboration, validation et applications. Engref, p. 95.
Piedallu, C., Lebourgeois, F., Gégout, J.C., Seynave, I., Vepierre, R., Cluzeau, C., Nédeltcheva, T., Bruno, E., Badeau, V., 2007. Développement, spatialisation, et validation d'indices bioclimatiques. ENGREF-IFN-INRA, p. 85 p + annexes.
Riofrio-Dillon, G., 2010. Predictive mapping of pH at fine resolution at regional scale. Agroparistech-engref, p. 19p.
Staub, J., 2009, Sensibilité des sols forestiers au tassement en Lorraine - Cartographie et outils techniques de mise en œuvre. Agroparistech-engref, p. 106p
Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation et évaporation potentielle. Annales agronomiques 12, 13-49.