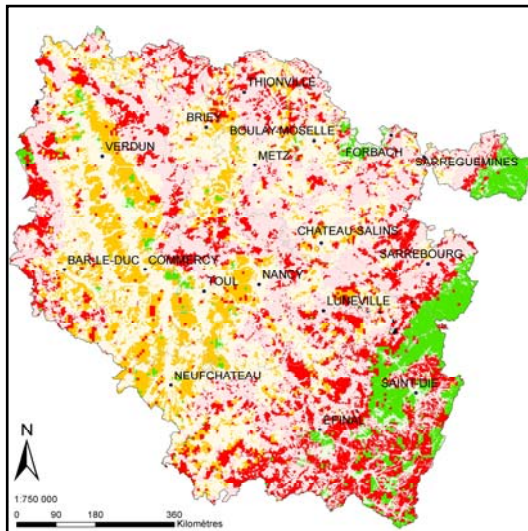
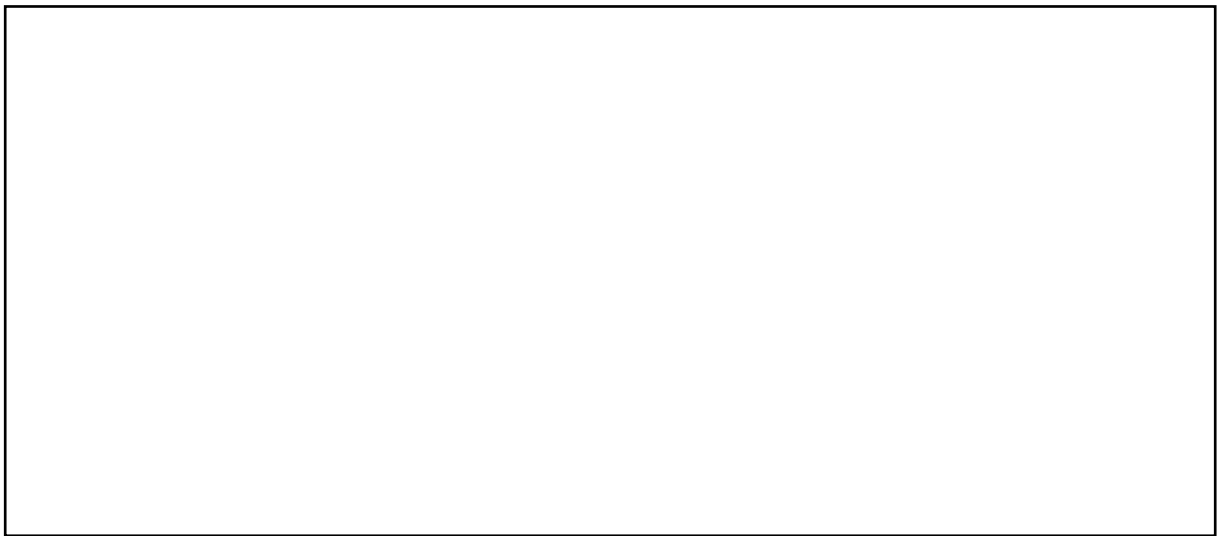


SENSIBILITÉ DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT EN LORRAINE

CARTOGRAPHIE ET OUTILS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES



A gauche : carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement en Lorraine.

Réalisation : Julien Staub

A droite : chenillard Raup Trac en phase de débusquage en forêt domaniale de Parroy.

Auteur : Julien Staub

SENSIBILITÉ DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT EN LORRAINE

CARTOGRAPHIE ET OUTILS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Sensibilité des sols forestiers en Lorraine Cartographie et outils techniques de mise en œuvre	Mots clés : ONF, PROSOL, sols forestiers, sensibilité potentielle au tassement, exploitation forestière, cartographie régionale, SIG, outil d'aide à la décision,
AUTEUR : Julien Staub	Promotion : 17 ^e 2006-2009
Caractéristiques : -1- volume ; 104 pages ; 34 figures ; 11 annexes dont 1 carte ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office national des forêts, Direction territoriale Lorraine, Direction forêt Nom du responsable : Thomas Kochert Fonction : Responsable SIG territorial		
Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : Max Bruciamacchie		
Tronc commun ☒ Option ☐ D. d'approfondissement ☐	Stage en entreprise ☐ Stage à l'étranger ☐ Stage fin d'études ☒ Date de remise : 26/07/2009	Autre ☐
Contrat avec Gref Services Nancy ☐ OUI ☒ NON		

SUITE À DONNER (réservé au service des études) ☐ Consultable et diffusable ☐ Confidentiel de façon permanente ☐ Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable
--

Résumé :

Le tassement des sols forestiers est un phénomène identifié depuis plus d'une vingtaine d'année en France. Sa prise en compte est cependant récente, notamment à l'issue des exploitations des bois « tempête » de 1999, du développement de la mécanisation, de la dynamisation de la sylviculture et la recherche de nouveaux produits comme les rémanents. A ces paramètres s'ajoute également la diminution des périodes de praticabilité liée aux changements climatiques.

La présente étude, inscrite dans le projet 8 PEFC « assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêts » propose une méthode de cartographie de la sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement à l'échelle de la région Lorraine. Cette méthode est basée sur les points d'inventaire de l'Inventaire forestier national ainsi que sur les critères de diagnostic du guide pratique PROSOL « pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt ». Cette carte de sensibilité potentielle reflète une image réaliste de la situation lorraine en confirmant notamment la part importante de sols forestiers lorrains très sensibles et impraticables une partie de l'année. Le présent document s'attache également à décrire les différentes modalités de valorisation de cette carte, du décideur au gestionnaire.

Summary:

Forest soil compaction has been identified as a phenomenon in France more than twenty years ago. However this has been taken into account recently especially after exploiting the “1999 storm wood”, developing mechanisation, boosting silviculture and finding out new products like slashes. The reduction of passable periods due to climatic changes must also be added to those parameters.

This study listed in the 8 PEFC project “how to insure a reasoned collecting of slashes in forests” submits a method of mapping ground sensitive to subsiding on a Lorraine area scale. This method is based on the inventory data from the National Forest Inventory as well as on the diagnostic criteria from the PROSOL practical guide book “for a forest exploitation respecting grounds and woods”. This potential sensibility map shows realistic features of the situation in Lorraine by confirming in particular that a large part of the forest grounds in Lorraine are really sensitive to subsiding and impassable for a part of the year. This document wants also to describe the different map valorisation procedures from the decision maker to the field manager.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes deux maîtres de stage, Thomas Kochert et Dominique Messant. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ces six mois de stage, pour leur suivi et leur disponibilité. Je tiens à assurer Thomas de ma reconnaissance pour son aide précieuse pour la partie SIG du stage.

Mes remerciements s'adressent aux membres des organismes partenaires du projet 8 PEFC qui m'ont accompagné et aiguillé lorsqu'il le fallait : Jacques Ranger, Yves Lefèvre, Bernard Jabiol et Jacques Drapier. Merci à eux pour leur savoir sans limite, leur pédagogie, et les éléments et connaissances qu'ils m'ont transmis. J'adresse également un profond remerciement à Stéphane Asaël, Damien Serrate et Romain Hodapp qui ont grandement contribué au stage en effectuant les relevés de terrain. Merci enfin à Christian Piedallu et Vincent Perez pour leurs apports.

Merci à Claude Bernardin et Jean-Philippe Maréchal qui m'ont accueilli à Lunéville et qui ont pris du temps pour m'emmener sur le terrain, qui ont répondu à mes questions et qui m'ont accompagné dans ma démarche pour les grilles d'aide au choix pour le système d'exploitation. Merci à Denis Stauffer pour son aide pour la valorisation de la carte. Merci à Guillaume Le Corvaisier pour son accueil lors du chantier câble zig-zag.

Je remercie également tous les personnels de l'ONF que j'ai rencontrés au cours de ces 6 mois de stage et qui ont contribué à sa réussite : Olivier Lanter, Philippe Durand, Yohan Guedon, François Vernier, Catherine Cluzeau, Éric Marquette, Claude Xémard, Daniel Michel, Marie Cécile Schmitt, Frédéric Bedel, Franck Jacquemin, Pierre Vionnet-Fuasset, Frédéric Lévy, Dominique Lorentz et Jean-Louis Kremer. J'adresse à Christian Apffel ma plus profonde sympathie et ma plus sincère reconnaissance pour le rôle qu'il a joué dans le choix de ce stage, en m'accueillant sur son triage en février 2008.

Ma reconnaissance s'adresse aux membres du comité de pilotage ONF pour le suivi des stages FIF sur le tassement des sols : Claudine Richter, Alain Brêtes, Manuel Nicolas et Didier Pischedda.

Merci à tous les autres stagiaires de l'ONF, aux relecteurs, et à tous ceux que j'ai oubliés et qui ont contribué de près ou de loin à ce stage.

Enfin je remercie Max Bruciamacchie qui a été mon correspondant ENGREF pour ces 6 mois, et qui a su m'aiguiller sur les bonnes pistes.

Table des matières et des annexes

REMERCIEMENTS	- 1 -
TABLE DES MATIÈRES ET DES ANNEXES	- 2 -
TABLES DES FIGURES ET DES TABLEAUX	- 4 -
INDEX ALPHABÉTIQUE DES SIGLES	- 5 -
I. INTRODUCTION	- 7 -
I.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	- 7 -
I.2. LE TASSEMENT DES SOLS FORESTIERS	- 8 -
I.3. PROBLÉMATIQUE ET PRÉSENTATION DU STAGE	- 11 -
II. OUTILS ET MÉTHODE	- 13 -
II.1. LES DONNÉES SOURCES	- 13 -
II.1.1. Les données hors IFN	- 13 -
II.1.2. Les données IFN	- 14 -
II.2. LES HYPOTHÈSES DE TRAVAIL	- 16 -
II.3. MÉTHODOLOGIE	- 18 -
II.3.1. Prise en compte de la charge en cailloux	- 18 -
II.3.2. Prise en compte de l'engorgement	- 19 -
II.3.3. Prise en compte de la profondeur d'hydromorphie	- 20 -
II.3.4. Prise en compte de la texture et de la profondeur associée	- 22 -
II.3.5. Calcul final	- 25 -
III. RÉSULTATS ET DOMAINE DE VALIDITÉ	- 27 -
III.1. RÉSULTATS	- 27 -
III.1.1. Carte	- 27 -
III.1.2. Précautions d'utilisation	- 27 -
III.1.3. Surfaces par région IFN	- 28 -
III.1.4. Méthodologie applicable à l'échelle nationale	- 29 -
III.2. VALIDATION DE LA CARTE	- 29 -
III.2.1. Qualité de l'interpolation	- 29 -
III.2.1.1. Données collectées	- 30 -
III.2.1.2. Résultats et analyse	- 30 -
III.2.2. Cohérence de la carte	- 32 -
III.3. DISCUSSION	- 34 -
IV. VALORISATION	- 39 -
IV.1. OUTIL POUR LES DÉCIDEURS	- 39 -
IV.1.1. Décideur institutionnel	- 39 -
IV.1.2. Décideur forestier	- 39 -
IV.2. OUTIL POUR L'AMÉNAGISTE OU LE RÉDACTEUR DU PSG	- 40 -
IV.3. OUTIL POUR LE BUREAU D'ÉTUDE	- 40 -
IV.4. OUTILS POUR LE GESTIONNAIRE	- 41 -
IV.4.1. Protocole de diagnostic	- 41 -
IV.4.1.1. Méthodologie	- 41 -
IV.4.1.2. Mise en œuvre	- 42 -
IV.4.2. Aide au choix du système d'exploitation	- 45 -
IV.4.2.1. Méthodologie	- 45 -
IV.4.2.2. Mise en œuvre	- 48 -
IV.4.2.3. Autres éléments à prendre en compte	- 61 -
V. CONCLUSION	- 63 -
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	- 67 -
LISTE DES CONTACTS	- 73 -

ANNEXES	- 77 -
ANNEXE 1 : TABLES DE RECLASSEMENT	- 79 -
ANNEXE 2 : DÉTAIL DU CALCUL DE LA TABLE DE RECLASSEMENT RECLASS_POSITOP02	- 81 -
ANNEXE 3 : TRANSFORMATION DU DIAGRAMME DES TEXTURES DE JAMAGNE	- 83 -
ANNEXE 4 : ESTIMATION DES SURFACES DES CLASSES DE SENSIBILITÉ PAR RÉGION IFN	- 85 -
ANNEXE 5 : CARTES D'IDENTITÉ PAR RÉGION IFN	- 87 -
ANNEXE 6 : PROTOCOLE DE DIAGNOSTIC DE LA SENSIBILITÉ D'UN SOL AU TASSEMENT	- 91 -
ANNEXE 7 : FICHE DE RELEVÉ	- 93 -
ANNEXE 8 : PRISE EN COMPTE DU TYPE DE SOL : ESTIMATION DES SURFACES DES CLASSES DE SENSIBILITÉ PAR RÉGION IFN	- 95 -
ANNEXE 9 : ESTIMATION CROISÉE DE LA TEXTURE ET DE L'ÉTAT D'HUMIDITÉ (SOURCE : PROSOL)	- 97 -
ANNEXE 10 : SYNTHÈSE DES GRILLES D'AIDE AU CHOIX DU SYSTÈME D'EXPLOITATION	- 99 -
ANNEXE 11 : CARTE DE SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT EN LORRAINE	- 101 -

Tables des figures et des tableaux

FIGURE 1 : EFFET DU TASSEMENT SUR LA MACRO ET MICROPOROSITÉ DU SOL	- 9 -
SOURCE : PROSOL, D'APRÈS DE PAUL ET BAILLY/ FORÊT WALLONE	- 9 -
TABLEAU 1 : CLASSE DE SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS ET CRITÈRES DE DIAGNOSTIC ASSOCIÉS.	- 10 -
SOURCE : PROSOL.....	- 10 -
TABLEAU 2 : LISTE DES DONNÉES SOURCES.....	- 13 -
TABLEAU 3 : SIGNIFICATION DES POSITIONS TOPOGRAPHIQUES.....	- 14 -
SOURCE : AGROPARISTECH-ENGREF	- 14 -
FIGURE 2 : CAS DES PROFONDEURS ASSOCIÉES AUX TEXTURES RENCONTRÉS DANS LES DONNÉES IFN.....	- 16 -
FIGURE 3 : PRINCIPE DE L'INTERPOLATION.....	- 18 -
FIGURE 4 : PRISE EN COMPTE DE LA CHARGE EN CAILLOUX	- 19 -
FIGURE 5 : PRISE EN COMPTE DE L'ENGORGEMENT.....	- 19 -
FIGURE 6 : PRISE EN COMPTE DE L'HYDROMORPHIE.....	- 21 -
TABLEAU 4 : CORRESPONDANCE ENTRE LES CLASSES DE TEXTURE IFN ET LE DIAGRAMME DES TEXTURES DE JAMAGNE. SOURCE : IFN	- 22 -
FIGURE 7 : DÉTERMINATION DU BARYCENTRE, CAS SIMPLE	- 23 -
FIGURE 8 : DÉTERMINATION DU BARYCENTRE, CAS COMPLEXE	- 23 -
FIGURE 9 : PRISE EN COMPTE DE LA TEXTURE ET DE LA PROFONDEUR ASSOCIÉE.....	- 24 -
TABLEAU 5 : RÈGLE DE DÉCISION DANS LE CAS D'UN PROFIL DE SOL HÉTÉROGÈNE.....	- 24 -
FIGURE 10 : CALCUL FINAL DE LA CARTE	- 25 -
TABLEAU 6 : CRITÈRES DE DIAGNOSTIC POUR LA SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT.....	- 25 -
FIGURE 11 : CARTE DE SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT À L'ÉCHELLE DE LA LORRAINE.....	- 27 -
FIGURE 12 : ESTIMATION DES SURFACES DES CLASSES DE SENSIBILITÉ PAR RÉGION IFN	- 28 -
FIGURE 13 : PRINCIPE D'UNE MATRICE DE CONFUSION	- 31 -
TABLEAU 7 : MATRICE DE CONFUSION POUR LES 6 SITES CROISÉS AVEC LA CARTE DE SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS LORRAINS AU TASSEMENT.....	- 31 -
TABLEAU 8 : 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.....	- 32 -
FIGURE 14 : COMPARAISON VISUELLE, CAS DU PAYS DES ETANGS	- 35 -
FIGURE 15 : COMPARAISON AVEC LE TYPE DE SOL	- 35 -
FIGURE 16 : PRISE EN COMPTE DES CARTES DE STATIONS, EXEMPLE SUR LA FORÊT DOMANIALE DE PARROY (54)	- 36 -
FIGURE 17 : PRISE EN COMPTE DE LA GÉOLOGIE AU 1/50 000 COMME VARIABLE EXPLICATIVE	- 37 -
(ATTENTION : RÉSULTAT INTERMÉDIAIRE).....	- 37 -
FIGURE 18 : EXTRAIT DE LA FICHE DE RELEVÉ PÉDOLOGIQUE	- 42 -
FIGURE 19 : DIAGRAMME DES TEXTURES, MODIFIÉ SELON PROSOL	- 43 -
SOURCE : PROSOL.....	- 43 -
FIGURE 20 : CLÉ DE DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ D'UN SOL SELON PROSOL.....	- 44 -
FIGURE 21 : EXEMPLES À SUIVRE ET À NE PAS SUIVRE.....	- 49 -
SOURCE : PROSOL, D'APRÈS DE PAUL ET BAILLY/FORÊT WALLONE	- 49 -
FIGURE 22 : SYSTÈMES DE PROTECTION DES ARBRES EN BORDURE DE CLOISONNEMENT	- 50 -
SOURCE : PROSOL D'APRÈS DERUELLES/ONF	- 50 -
TABLEAU 9 : GRILLE D'AIDE AU CHOIX DU SYSTÈME D'EXPLOITATION POUR LES SOLS PRATICABLES TOUTE L'ANNÉE AVEC PEU DE PRÉCAUTIONS - 52 -	
TABLEAU 10 : GRILLE D'AIDE AU CHOIX DU SYSTÈME D'EXPLOITATION POUR LES SOLS PRATICABLES TOUTE L'ANNÉE MOYENNANT CERTAINES PRÉCAUTIONS	- 54 -
TABLEAU 11 : GRILLE D'AIDE AU CHOIX DU SYSTÈME D'EXPLOITATION POUR LES SOLS TRÈS SENSIBLES ET IMPRATICABLES UNE PARTIE DE L'ANNÉE	- 56 -
TABLEAU 12 : GRILLE D'AIDE AU CHOIX DU SYSTÈME D'EXPLOITATION POUR LES SOLS TRÈS SENSIBLES ET IMPRATICABLES TOUTE L'ANNÉE ..	- 58 -

Index alphabétique des sigles

ADEME	: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFOCEL	: Association forêt cellulose
ANR	: Agence nationale de la recherche
APT	: AgroParisTech
BD	: base de données (dans le cadre de l'IGN)
BM	: bois moyen
BRGM	: Bureau de recherches géologiques et minières
CRPF	: centre régional de la propriété forestière
CR	: conseil régional
DRAAF	: direction régionale de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt
DT	: direction territoriale
EG	: éléments grossiers
ENGREF	: École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
ETF	: entrepreneurs de travaux forestiers
F&BE	: Forêts et Bois de l'Est
FCBA	: Institut technique forêt cellulose bois construction ameublement
GB	: gros bois
IDW	: inverse distance weighted
IFN	: Inventaire forestier national
IGN	: Institut géographique national
INRA	: Institut national de la recherche agronomique
IPC	: indice de prélèvement câble
LERFOB	: laboratoire d'études des ressources forêt-bois
MNT	: modèle numérique de terrain
NPdC	: Nord Pas de Calais
ONF	: Office national des forêts
PB	: petit bois
PEFC	: Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes
PEHD	: polyéthylène haute densité
PSG	: plan simple de gestion
SIG	: système d'information géographique

« Essayez de laisser ce monde un peu meilleur qu'il ne l'était quand vous y êtes venu. »

Lord Baden-Powell

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte de l'étude

- A l'échelle nationale

Le Grenelle de l'environnement et les Assises de la forêt ont confirmé comme objectifs conjoints de la gestion durable de la forêt, la préservation renforcée de la biodiversité forestière et la production accrue de bois en tant qu'éco-matériau et source d'énergie renouvelable. Ces objectifs ont fait l'objet d'un consensus qui avait caractérisé l'approche du secteur forestier lors de la première phase du Grenelle : « produire plus tout en préservant mieux la biodiversité ; une démarche territoriale concertée dans le respect de la gestion multifonctionnelle des forêts ».

Par ailleurs, cette problématique accrue de mobilisation des bois se met en place dans un contexte d'évolution des modes de travail. Pour des raisons économiques et sociales, on assiste ainsi au développement de la mécanisation, tant en exploitation qu'en sylviculture (Laurier, 2004). De plus, les travaux des Assises de la forêt ont permis d'identifier une offre en forêt potentiellement mobilisable dans des conditions compatibles avec la gestion durable. Cette offre, qui serait de 12 Mm³ en 2012 et de plus de 20 Mm³ en 2020, permettrait de fournir le bois matériau et énergie nécessaire à l'atteinte des objectifs du Grenelle.

Cette mobilisation accrue de la ressource bois constitue un axe d'action forestier prioritaire, qui doit faire face à la double problématique des changements climatiques et des besoins énergétiques. Mobiliser plus de bois va s'accompagner d'une intensification des opérations d'exploitation forestière, avec une augmentation des risques d'appauvrissement chimique mais aussi de dégradation physique des sols. Les dégâts ainsi provoqués sont plus ou moins notables suivant les propriétés des sols, leur état d'humidité, le système d'exploitation, ou encore l'organisation du chantier. Dans ce contexte, la protection du capital que constitue le sol, dont dépend en partie le fonctionnement général de l'écosystème forestier, est un enjeu important.

- A l'échelle Lorraine

L'Association lorraine de certification forestière (ALCF) est à l'origine du projet 8 PEFC intitulé « Assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêt ». Ce projet s'inscrit dans le cadre de la politique de qualité PEFC Lorraine, en cours pour la période 2007-2012. Il a pour objectif principal de présenter aux gestionnaires, propriétaires et industriels un zonage de la Lorraine vis-à-vis des possibilités raisonnées de récolte des rémanents en vue de leur valorisation énergétique. Par pratiques raisonnées sont entendues les pratiques compatibles avec une gestion durable des sols forestiers. En effet, l'exploitation des rémanents à des fins énergétiques nécessite de trouver un juste équilibre entre les besoins économiques et la pérennité des qualités physico-chimiques des sols. Les rémanents sont un gisement actuellement peu, voire non exploité dont il convient cependant de raisonner l'utilisation en fonction des caractéristiques des sols. L'exportation de rémanents ne doit en effet pas entraîner des conséquences défavorables pour les sols, tant au niveau de leur fertilité chimique que de leur propriété physique (Cacot *et al.*, 2004 ; ONF Lorraine 2008).

Les organismes responsables de la mise en œuvre de ce projet sont :

- l'Office national des forêts à travers sa Direction territoriale Lorraine (ONF, DT Lorraine) ;
- la coopérative Forêts et bois de l'Est (F&BE)
- l'Institut des sciences et industrie du vivant et de l'environnement (AgroParisTech-ENGREF) à travers le laboratoire d'études des ressources forêt-bois (LERFOB) ;
- le centre régional de la propriété forestière de Lorraine-Alsace (CRPF) ;
- l'Inventaire forestier national (IFN) ;
- l'Institut national de la recherche agronomique (INRA).

Le projet s'est concentré en 2008/2009 sur la sensibilité des sols à l'appauvrissement chimique par l'élaboration d'une carte régionale de pH des sols forestiers, en se basant notamment sur le guide de l'ADEME (Cacot *et al.*, 2006). Cette carte a été réalisée par l'ENGREF, en partenariat avec l'IFN (AgroParisTech-ENGREF et IFN, 2008a et 2008b). L'année 2009 voit la réalisation de la carte régionale de sensibilité des sols au tassement. La réalisation de cette carte fait l'objet de mon stage de fin d'études de la Formation des Ingénieurs Forestiers (FIF), encadré par la DT Lorraine de l'ONF.

Ces cartes de sensibilité des sols seront complétées par une carte des risques d'érosion (actuellement au stade de projet). Elles serviront comme outils d'aide à la décision pour les politiques et les gestionnaires pour faire évoluer et adapter les pratiques selon les niveaux d'enjeux identifiés. Un croisement avec les couches IFN des types et âges de peuplements devrait fournir une évaluation très fine des disponibilités en bois. Un croisement supplémentaire avec le schéma de desserte et les courbes de niveaux permettra d'estimer les possibilités de mobilisation.

I.2. Le tassement des sols forestiers

- Éléments sur le tassement des sols forestiers

Le tassement des sols forestiers est un phénomène identifié depuis plus d'une vingtaine d'année en France (Rotaru, 1983), 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 (ONF, 2006a, 2006b, 2008). 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 (Jabiol *et al.*, 2000).

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. À 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 (Abeels, 1995).

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 1). Les effets du tassement sont plus ou moins visibles, d'ornières spectaculaires au compactage en profondeur des horizons profonds du sol (Richter, 1999 ; De Paul et Bailly, 2005a, Pischedda *et al.*, 2009). 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 (McNabb *et al.*, 2001 *in* Ranger *et al.*, 2005).

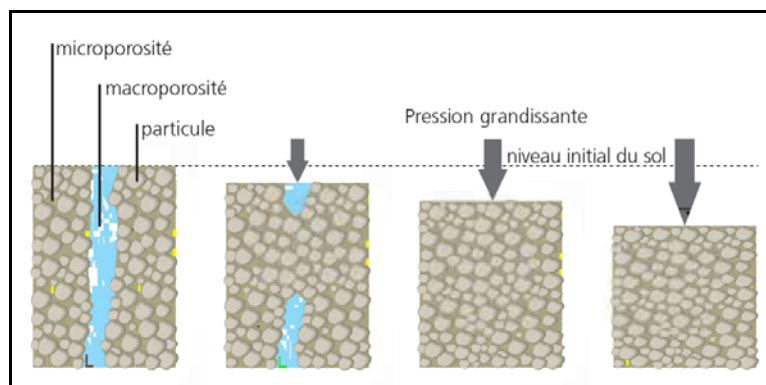


FIGURE 1 : effet du tassement sur la macro et microporosité du sol.
Source : PROSOL, d'après De Paul et Bailly/ Forêt Wallone

Rotaru (1983, 1985) propose une classification des déformations de la structure du sol selon trois catégories principales :

- le scalpage : décapage de la couche superficielle du sol, due à une contrainte appliquée de manière tangentielle à la surface du sol (patinage, glissement latéral ou dérapage). Il est également appelé cisaillement.
- l'ornièrage : creusement de la surface. Ce creusement peut s'accompagner de bourrelets latéraux par déplacement latéral des matériaux. Cette déformation est provoquée par une contrainte à la fois tangentielle et perpendiculaire à la surface du sol qui peut provoquer en même temps un tassement du sol en fond de l'ornière.
- le compactage : réduction du volume du sol par un tassement excessif de celui-ci du fait d'une contrainte perpendiculaire à la surface du sol.

Ces dégâts peuvent entraîner une stagnation de l'eau du fait de la compaction des horizons sous-jacents. Même si les dégâts sont apparemment peu impressionnants, la manifestation la plus visible est l'inversion de flore (envahissement du jonc par exemple) (Richter, 1999).

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 (Lamandé *et al.*, 2005). 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 (Moreau, 1993 ; Herbauts *et al.*, 1998 ; De Paul et Bailly, 2005b ; Loya, 2005 ; Von Wilpert et Schäffer, 2005). 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 remédiations artificielles qui restent incertaines (Ranger *et al.*, 2005 ; Brêthes et Ranger 2008).

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 (Rufieux, 1997) même si des techniques ont tenté de l'appréhender comme le logiciel Profor (Matthies *et al.*, 2006). 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 (Jabiol *et al.*, 2000 ; Pischedda *et al.*, 2009).

- 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 (Cacot, 2001 ; Cacot, 2006) pour déterminer les bonnes pratiques de ces dernières. Ces bonnes pratiques sont notamment permises par l'organisation du chantier (Cacot, 2008b). 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 (De Paul, 2005 ; De Paul et Bailly 2005c ; Bartoli *et al.*, 2006 ; Felder, 2007 ; Pischedda, 2008).

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 (Durand et Richter *et al.*, 2003 ; Lamandé *et al.*, 2005). 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 1).

TABLEAU 1 : classe de sensibilité potentielle des sols forestiers et critères de diagnostic associés.
Source : PROSOL

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 sablo-limoneuse 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.

I.3. Problématique et présentation du stage

- DT Lorraine

La présente étude s'inscrit dans le projet 8 PEFC. Elle a pour but la réalisation de la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement à l'échelle de la région Lorraine et l'apport de recommandations en termes d'organisation des exploitations et de choix de systèmes d'exploitation.

La cartographie est réalisée avec les données d'inventaires de l'IFN acquises auprès de cet organisme. Il s'agit là d'une méthode innovante, puisque aucune carte de sensibilité des sols forestiers n'a été réalisée en France, à cette échelle de travail. Un précédent existe cependant en Belgique, où une carte de praticabilité des sols forestiers belges a été établie à partir de cartes de sols (Delecour, 1987).

La démarche suivie tout au long du stage se place plus du point de vue du gestionnaire que du point de vue du scientifique. Le but est d'aboutir à une méthode cartographique robuste et transposable par la suite à l'échelle du territoire national. Pour aboutir à cette cartographie, le choix a été fait de se baser sur les critères de diagnostic du guide PROSOL. Ceux-ci n'ont pas été définis dans un but cartographique, mais avant tout comme une aide pour le gestionnaire. Néanmoins, le fait que ces critères permettent de caractériser la sensibilité potentielle d'un sol forestier au tassement, rend possible leur application aux données pédologiques de l'IFN disponibles pour la région Lorraine. Ces critères ne prennent pas en compte les aspects dynamiques du tassement ce qui explique l'emploi du terme « potentielle » associé à sensibilité.

Ce rapport présentera la démarche cartographique ayant conduit à la réalisation de la carte. Seront ensuite abordés les résultats obtenus à savoir la carte en elle-même et les surfaces concernées par chacune des classes de sensibilité à l'échelle de la Lorraine et des régions IFN. Ces éléments, après avoir été validés, seront discutés. Enfin le rapport s'achèvera sur les différentes possibilités de valorisation de la carte, du décideur au gestionnaire. Pour le gestionnaire seront développées en particulier les recommandations préconisées pour l'organisation des exploitations ainsi qu'une aide au choix du système d'exploitation.

- Département recherche de l'ONF

L'année 2009 correspond à la sortie du guide PROSOL. De manière parallèle à la sortie de ce guide, deux autres stages de fin d'études de la FIF ont été réalisés à l'ONF, en plus de celui qui fait l'objet du présent rapport, sur la thématique du tassement des sols forestiers :

- un stage au niveau de l'agence Haute Marne : cartographie de la sensibilité des sols selon les cartes de stations et étude prospective à l'échelle de l'agence, afin de cibler, parmi les possibilités actuelles, des systèmes d'exploitation adaptés aux peuplements feuillus, alliant efficacité économique et préservation des sols (ONF 52, 2008a).
- un stage mené conjointement au niveau de l'agence Picardie et de la DT Île de France Nord Ouest : cartographie de la sensibilité des sols à partir de cartes pédologiques au 1/10 000 et optimisation de l'exploitabilité des coupes en prenant en compte la sensibilité des sols au tassement.

Un comité de suivi de stage a été mis en place au niveau national par l'ONF (département recherche) afin de pouvoir mutualiser les objectifs des différents stages.

Dans le cadre du stage Lorraine, l'attente du comité de suivi est la suivante : pouvoir proposer une méthodologie de cartographie des sols sensibles applicable à l'échelle nationale.

II. OUTILS ET MÉTHODE

La première partie du stage a été consacrée à la réalisation de la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement à l'échelle de la Lorraine. La réalisation de cette carte se base sur les critères de diagnostic du guide PROSOL pour caractériser la sensibilité potentielle d'un sol forestier au tassement appliqués aux données pédologiques de l'IFN (voir tableau 1).

Cette partie présente ainsi la méthodologie suivie pour cette étape : les données utilisées, la formulation d'hypothèses de travail et la démarche employée.

II.1. Les données sources

La construction de la carte s'est faite essentiellement à partir des données pédologiques issues des relevés de l'IFN. D'autres données ont également été utilisées : des données de l'IGN ou encore des données du LERFOB. Le tableau 2 les présente de manière exhaustive. Elles seront décrites par la suite.

TABLEAU 2 : liste des données sources

			Observations
Données hors IFN	Données IGN	MNT BD Alti®	Licence d'utilisation IGN-ONF
		Contour administratif de la Lorraine	
	Données AgroParisTech ENGREF	Macro positopo2	Échange dans le cadre de PEFC 8
Données IFN	Données sources	data_pedo_lorraine.xls	Acquises par l'ONF
		xy_lorraine.xls	
		Masque forestier de la Lorraine	
	Données transformées	reclass_charge	
		reclass_tsol	
		reclass_ppseudo	
		reclass_positopo	
		reclass_positopo2	
		reclass_text_result	
		reclass_text	
		reclass_prof	
		reclass_PROSOL	

II.1.1. Les données hors IFN

Les données de l'IGN utilisées sous licence sont :

- le MNT issu de la BD Alti® au pas de 50 m à l'échelle de la région Lorraine ;
- le contour administratif de la région Lorraine issu de la BD Carto® de l'IGN.

La macro Positopo2 du LERFOB (AgroParisTech ENGREF) n'est pas une donnée en soi, mais elle a permis de réaliser une couverture raster contenant les positions topographiques à partir du MNT régional au pas de 50 m (Piedallu, 2004). Elle permet d'identifier automatiquement les grandes catégories de positions topographiques (voir tableau 3), vues sous l'angle du ruissellement. L'application en écologie se fait en terme hydrique (caractérisation des zones de départ et d'arrivée en eau) et trophiques (enrichissement des sols). La position topographique est ainsi utilisée comme variable explicative de l'hydromorphie.

TABLEAU 3 : signification des positions topographiques.

Source : AgroParisTech-ENGREF

Classe	Position topographique
1	Crête
2	Haut de versant
3	Milieu de versant
4	Bas de versant
5	Vallée
6	Plaine
7	Replat de versant
8	Rebord de plateau
9	Versant court
10	Dépression
11	Talweg

II.1.2. Les données IFN

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 disposent de l'information pédologique nécessaire à la réalisation de la carte. Ce nombre de points est supérieur à la moyenne de par un sur-échantillonnage dans les Vosges du fait des problèmes d'acidification, (Cluzeau, 2009, communication personnelle).

On distinguera ainsi les données brutes utilisées telles quelles, des données transformées issues de ces données brutes.

- Données brutes

- o Table attributaire "data_pedo_lorraine.txt"

Ce fichier regroupe les données d'inventaire complétées ou non des 7 404 points répertoriés pour la Lorraine. Il comprend les différentes variables à prendre en compte, qui seront décrites dans la partie II.3., à savoir :

- la texture et la profondeur ;
- la charge en cailloux ;
- la profondeur d'apparition du pseudogley qui caractérise la profondeur d'hydromorphie à prendre en compte ;
- le type de sol.

- o Fichier "xy_lorraine.txt"

Ce fichier contient les coordonnées géographiques en Lambert II étendu des 7 342 points géoréférencés. Ce fichier transformé en couche vecteur sous SIG prend le nom de Point.

- o Masque forestier

Il s'agit du contour des forêts publiques et privées. Cette information est cependant moins précise que les limites de forêts gérées par l'ONF ou que celles des PSG, mais elle est suffisante à l'échelle d'utilisation envisagée pour la carte.

- Données transformées

Ces données sont issues de la table attributaire "data_pedo_lorraine.txt". Les données IFN étant codées sous forme de classe, il a fallu les reclasser, c'est-à-dire les transformer en variables continues afin de rendre possible leur interpolation sous SIG. Pour cela il a fallu créer des tables de reclassement, ce qui a été effectué à l'aide des notices de Cluzeau (2001) et de l'IFN (1994). Seules les tables de reclassement nécessaires à la réalisation de la carte sont présentées ici. Les tables complètes figurent en annexe 1.

o reclass_charge

À chacune des classes IFN de charge en cailloux est associé le pourcentage moyen estimé de la classe.

o reclass_tsol

À chacune des classes IFN de types de sol sont associées une probabilité d'engorgement permanent, une probabilité d'engorgement temporaire et une probabilité de non engorgement. Ce type de reclassification utilisant des probabilités (0 ou 1) permet d'associer une valeur à chaque classe et de réaliser ainsi des interpolations probabilisées. Cette technique est fréquemment utilisée par Kochert (2009, communication personnelle). Ce reclassement a été effectué à partir des indications de Lefèvre, validées par Jabiol. Seuls les sols à engorgement permanent sont pris en compte dans le calcul final car correspondant à la 4^e classe de sensibilité du guide PROSOL (voir II.3.2.). Le reclassement ne concerne que les sols forestiers lorrains.

o reclass_ppseudo

À chacune des classes IFN de profondeur d'apparition du pseudogley est associée la valeur de la profondeur moyenne estimée de la classe en centimètres. Pour la classe 9, l'hypothèse a été faite que la valeur supérieure de la borne serait 100. De manière identique, à la classe "Null" (qui correspond à une absence d'information) a été associée la valeur 100 de manière arbitraire afin que l'absence d'information ne soit pas traduite par une profondeur 0 (hydromorphie dès la surface), mais comme une profondeur largement supérieure au seuil des 50 centimètres fixé par PROSOL (voir annexe 1). Ce reclassement arbitraire pour ces deux classes n'a que peu d'influence sur le traitement des données.

o reclass_positopo

A chaque point IFN est associé le code de la position topographique issu de la macro Positopo2 du LERFOB. L'utilisation de la topographie est utilisée comme variable explicative de l'hydromorphie (voir II.3.3.). Cette table de reclassement n'est pas représentée en annexe car trop volumineuse (7 405 lignes !).

o reclass_positopo2

A chaque position topographique est associée la profondeur estimée du pseudogley. Dans un fichier Excel "positopo+p_pseudo.xls" (2 feuilles : sources + résultat) figure le détail du calcul pour cette table de reclassement : il indique la profondeur moyenne d'apparition du pseudogley dans la classe ainsi que l'effectif pour chaque position topographique (voir annexe 2).

o reclass_text

À chacune des classes IFN de texture IFN est associé un taux de sable, argile et limon. Ces pourcentages correspondent à la valeur du barycentre (centre de gravité) de chaque classe (voir II.3.4.).

o reclass_text_result

Cette table de reclassement représente la règle de décision pour la texture dans le cas d'un sol complexe ou hétérogène, c'est-à-dire lorsqu'on a deux textures l'une au-dessus de l'autre. En colonne figure TEXT1 et en colonne TEXT2. On obtient ainsi une texture, avec deux options :

- texture définie par son numéro de classe IFN, qui correspond à la texture la plus sensible ;
- moyenne des textures (les 2 textures appartiennent à la même classe de sensibilité PROSOL).

Cette règle de décision sera présentée plus en détail ultérieurement (voir II.3.4.)

o reclass_prof

À chacune des classes IFN de profondeur associée aux textures (il s'agit de la profondeur la plus basse de l'horizon) est associée la valeur de la profondeur moyenne estimée de la classe en centimètres. Cette profondeur est uniquement prise en compte dans le cas des sols hétérogènes (à deux textures), et seulement dans les 50 premiers centimètres de sol (voir figure 2 ci-dessous, cas 2 et 3).

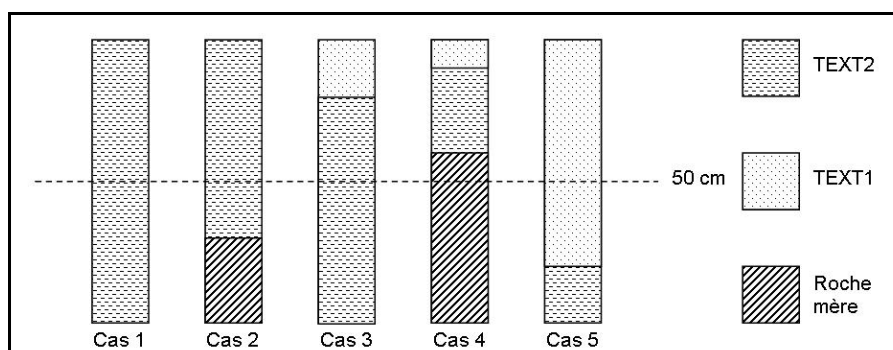


FIGURE 2 : cas des profondeurs associées aux textures rencontrés dans les données IFN

o reclass_PROSOL

À chaque classe IFN de type de sol sont associées les probabilités d'appartenir aux classes de sensibilité 1, 2, 3 ou 4 de PROSOL. C'est de cette donnée, issue de Lefèvre et de Jabiol que dérive RECLASS_TSOL. La méthode de reclassement utilisée est donc la même (utilisation de probabilité 0/1). Cette table de reclassement sera uniquement utilisée à titre comparatif (voir III.3.).

II.2. Les hypothèses de travail

La démarche ayant conduit à la réalisation de la carte est basée sur un certain nombre d'hypothèses de travail.

- Hypothèse 1 : uniformité de la répartition des valeurs de texture sur toute la classe de texture au sein de l'échantillon

Les points IFN sont répartis de manière uniforme au sein de chaque classe de texture IFN. Cette répartition uniforme permet d'assimiler le centre de gravité de ces points au barycentre de la classe de texture. Ainsi, à chaque classe de texture il est possible d'associer les coordonnées du barycentre qui correspondent aux pourcentages de sable, argile et limon.

- Hypothèse 2 : fiabilité des données IFN

Les données IFN sont fiables, à savoir :

- l'estimation de la texture au toucher est correcte : les échantillons tombent effectivement dans la classe considérée ;
 - la détermination du type de sol, de la charge en cailloux et de la profondeur d'apparition du pseudogley est également correcte ;
- Hypothèse 3 : validité statistique des estimations de profondeur d'apparition du pseudogley par classe de position topographique.

Il existe un effet statistique de la topographie sur la profondeur d'apparition du pseudogley.

- Hypothèse 4 : les interpolations reflètent la réalité

Les interpolations correspondent à la réalité physique à l'échelle du travail (= pas de la carte).

Cette hypothèse souligne tout l'intérêt de la validation : estimer la variabilité entre deux points IFN afin d'appréhender le changement d'échelle. Pour cela un réseau de points plus fin a été utilisé (voir III.2.1.) sur quelques sites. Cependant cette démarche n'est pas généralisable à l'échelle de la région entière.

L'interpolation a été utilisée car il est supposé un continuum entre les variables de l'IFN, notamment pour la texture, la charge en cailloux et le type de sol. Celles-ci sont supposées être fortement liées à la géologie. Or on sait en Lorraine que les couches géologiques représentent des ensembles qui vont bien au-delà de la distance entre deux points IFN, et que ces couches ne varient pas brutalement de manière très localisée sans une rupture de l'information. A l'inverse, l'hydromorphie est soumise à des phénomènes micro-topographiques que l'interpolation ne peut appréhender. C'est ce qui justifie l'utilisation d'une variable explicative pour modéliser la profondeur d'apparition du pseudogley.

- Hypothèse 5 : les simplifications de la règle de décision sont correctes

La règle de décision dans le cas de deux horizons différents inclut quelques simplifications basées sur la proximité ou la corrélation supposée entre la texture des deux horizons. Cette hypothèse est liée au mécanisme physique de formation des sols.

Ces hypothèses correspondent à une construction intellectuelle, avec des éléments facilement vérifiables et d'autres qui le sont moins. La méthodologie de validation propose d'estimer le biais et/ou l'erreur de l'interpolation : est-ce-que la prise en compte de ce phénomène est correcte ou non ? Mais la validation ne permet pas de valider les autres hypothèses, notamment celles basées sur la méthode, ni la pertinence de la classification PROSOL.

Pour progresser, il faudrait :

- valider à partir d'occurrences de dégâts dans des conditions tamponnées, qui sont très difficiles à obtenir ou réaliser des mesures physiques de tassement ;
- valider à partir de cartes de station, mais avec des problèmes de validité similaire quant à la méthode et à la classification ;
- disposer de mesures réalisées en laboratoire, d'analyses granulométriques, l'idée étant d'avoir un échantillon qui corresponde à 10 % du nombre global.

II.3. Méthodologie

Le traitement des données a été réalisé sous Excel.

La carte a été réalisée sous SIG grâce au logiciel ArcGis 9.2 d'ESRI et à l'extension Spatial Analyst. La méthode d'interpolation retenue est celle de l'interpolation par l'inverse des distances ou IDW. Une interpolation permet de déterminer la valeur d'une cellule en fonction de la valeur des points du voisinage (voir figure 3). Dans le cas de l'IDW la valeur de la cellule est calculée à partir de la moyenne pondérée des valeurs des points du voisinage. La pondération est inversement proportionnelle à la distance séparant le centre de la cellule des points du voisinage.

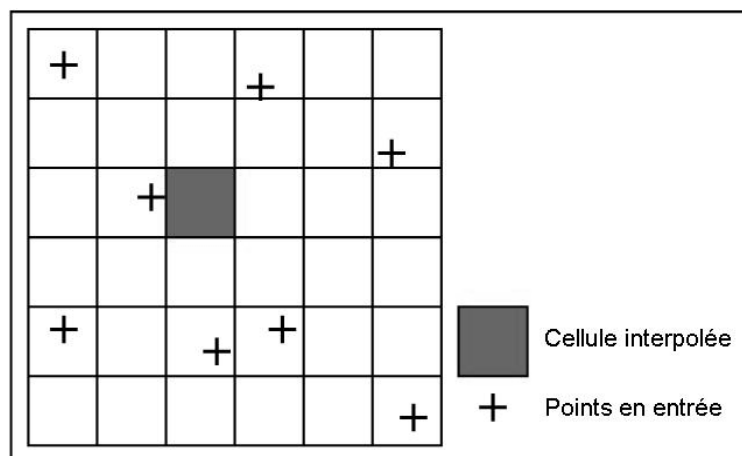


FIGURE 3 : principe de l'interpolation

L'interpolation par IDW est utilisée parce que :

- les points IFN sont répartis de manière homogène sur la Lorraine ;
- il s'agit d'une technique simple d'interpolation, qui permet de s'affranchir de contraintes sur les données car ne nécessitant pas de valider un certain nombre d'hypothèses pas toujours évidentes à valider (cas du Krigeage, autre technique d'interpolation, beaucoup plus complexe nécessitant d'avoir différents niveaux d'échelles observés afin d'explorer la variabilité des données à ces différentes échelles).

II.3.1. Prise en compte de la charge en cailloux

La charge en cailloux, appelée CAILLOUX, est représentée sous forme de classes dans les données IFN. L'utilisation de la table de reclassement `reclass_charge` permet d'associer à chaque point IFN le pourcentage moyen estimé de la classe.

On obtient une nouvelle donnée `C_CAILLOUX` qui, interpolée sous SIG, permet d'obtenir une grille au pas du kilomètre donnant une information sur la charge en cailloux en tous points de la Lorraine et intitulée `idw_caill1000`. La démarche est représentée dans la figure 4.

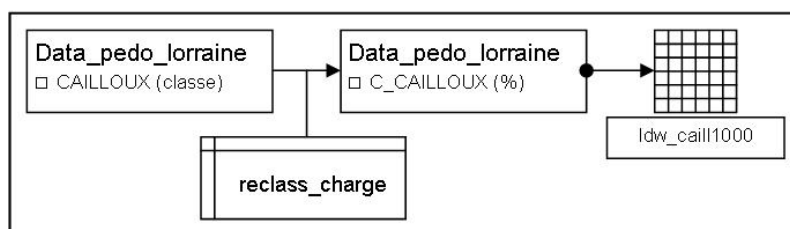


FIGURE 4 : prise en compte de la charge en cailloux

II.3.2. Prise en compte de l'engorgement

L'engorgement est pris en compte grâce au type de sol. Yves Lefèvre m'a aidé à associer, à chaque type de sol, la classe de sensibilité PROSOL correspondante. Par la suite les classes 1 et 2 ont été regroupées en une catégorie de sols non engorgés, la classe 3 formant la catégorie des sols à engorgement temporaire, et la classe 4 la catégorie des sols à engorgement permanent. La table de reclassement *reclass_tsol* associe ainsi à chaque type de sol la probabilité d'appartenir à l'une des 3 catégories évoquées précédemment, en codant 1 pour oui et 0 pour non. Cette méthode des interpolations probabilisées permet de choisir quelle option apparaît comme la plus probable.

Comme illustrée par la figure 5, cette table de reclassement associe à chaque point IFN la probabilité d'appartenir aux sols à engorgement permanent (*P_PERMANENT*), la probabilité d'appartenir aux sols à engorgement temporaire (*P_TEMPORAIRE*), ou la probabilité d'appartenir aux sols non engorgés (*P_NON_ENGOR*). Ces trois variables sont interpolées sous SIG séparément. Les grilles résultantes sont croisées à l'aide d'un outil statistique de croisement qui donne une grille Maximum. Cette grille affiche pour chaque point la valeur maximum issue des trois couches. La Calculatrice Raster permet de croiser les 3 couches d'engorgement avec la couche maximum et permet d'associer aux valeurs maximum le type d'engorgement correspondant, c'est-à-dire de sélectionner la valeur des 3 couches qui est la plus probable. On arrive à la production de la grille Engorgement.

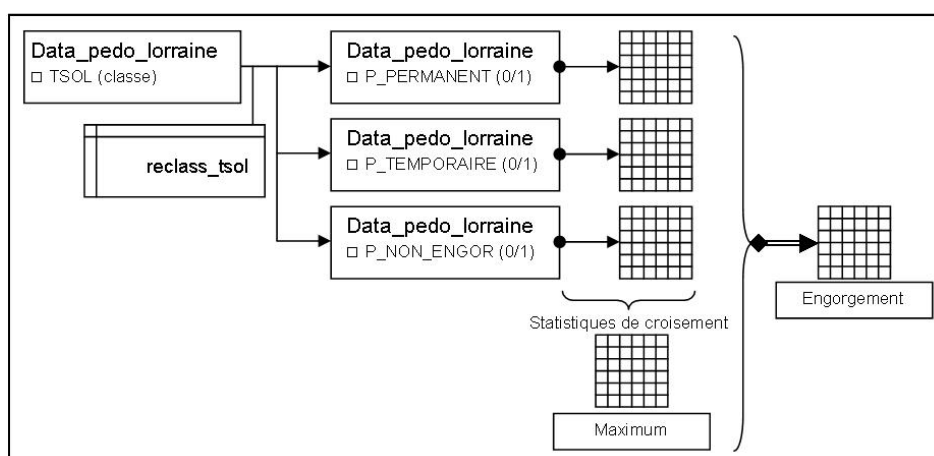


FIGURE 5 : prise en compte de l'engorgement

II.3.3. Prise en compte de la profondeur d'hydromorphie

L'hydromorphie est obtenue à partir de la donnée PPSEUDO qui est la profondeur d'apparition du pseudogley. Cette donnée est préférée à la profondeur d'apparition des taches d'oxydation (POX), car jugée plus fiable par les experts (LEFEVRE, communication personnelle, 2009 et DRAPIER, communication personnelle, 2009).

La prise en compte de cette variable s'est faite avec la topographie comme variable explicative, en deux étapes :

- modélisation de PPSEUDO en fonction de la variable explicative POSITOP (position topographique). La position topographique permet d'expliquer une partie de la variabilité observée.
- interpolation des résidus. Les résidus représentent la variabilité qui n'est pas expliquée par le modèle.

La démarche est représentée par la figure 6.

L'algorithme positopo2 d'AgroParisTech ENGREF permet de calculer en tout point du MNT BD Alti® une position topographique. Le MNT ainsi transformé est appelé positopo. On associe ensuite à chaque point IFN la valeur de la position topographique sur laquelle il se trouve en faisant une extraction. La combinaison du code du point IFN et de la position topographique permet l'élaboration de la table de reclassement reclass_positopo, pour pouvoir associer dans la table principale la valeur de la position topographique à chaque point IFN (variable POSITOP).

En parallèle à cette première manipulation, à l'aide de la table de reclassement reclass_ppseudo, la variable PPSEUDO est reclassée en une nouvelle variable P_PSEUDOGLEY, qui correspond à la profondeur moyenne estimée de la classe. P_PSEUDOGLEY est croisée avec POSITOP et permet l'obtention de la table de reclassement positopo2. La table de reclassement positopo2 permet de reclasser la couche raster positopo en une nouvelle couche Ptopo_reclass : le code des positions topographiques a été remplacé par la profondeur estimée d'apparition du pseudogley. Cette table de reclassement permet également de reclasser P_PSEUDO en une nouvelle variable P_PSEUDO_ESTIME.

La variable P_PSEUDO_ESTIME soustraite à la variable P_PSEUDO permet de calculer la variable résiduelle P_PSEUDO_RESIDU. Cette variable est interpolée sous SIG au pas du MNT, c'est-à-dire 50 m, et permet d'obtenir la couche Idw_p_residu. Cette couche est additionnée via la Calculatrice Raster à la couche Ptopo_reclass. On obtient ainsi en tout point de la Lorraine, au pas de 50 m, la valeur de la profondeur d'apparition de l'hydromorphie grâce à la couche Ppseudo_50.

Cette couche est ensuite ré-échantillonnée au pas de 1 000 m (Ppseudo_1000). Ce ré-échantillonnage possède une limite : en passant d'un pas de 50 m à un pas de 1 000 m, on a une perte considérable d'informations (l'opérateur effectue une moyenne des différentes valeurs de profondeur du pseudogley présentes dans la cellule qui a une taille de 1 000 m sur 1 000 m).

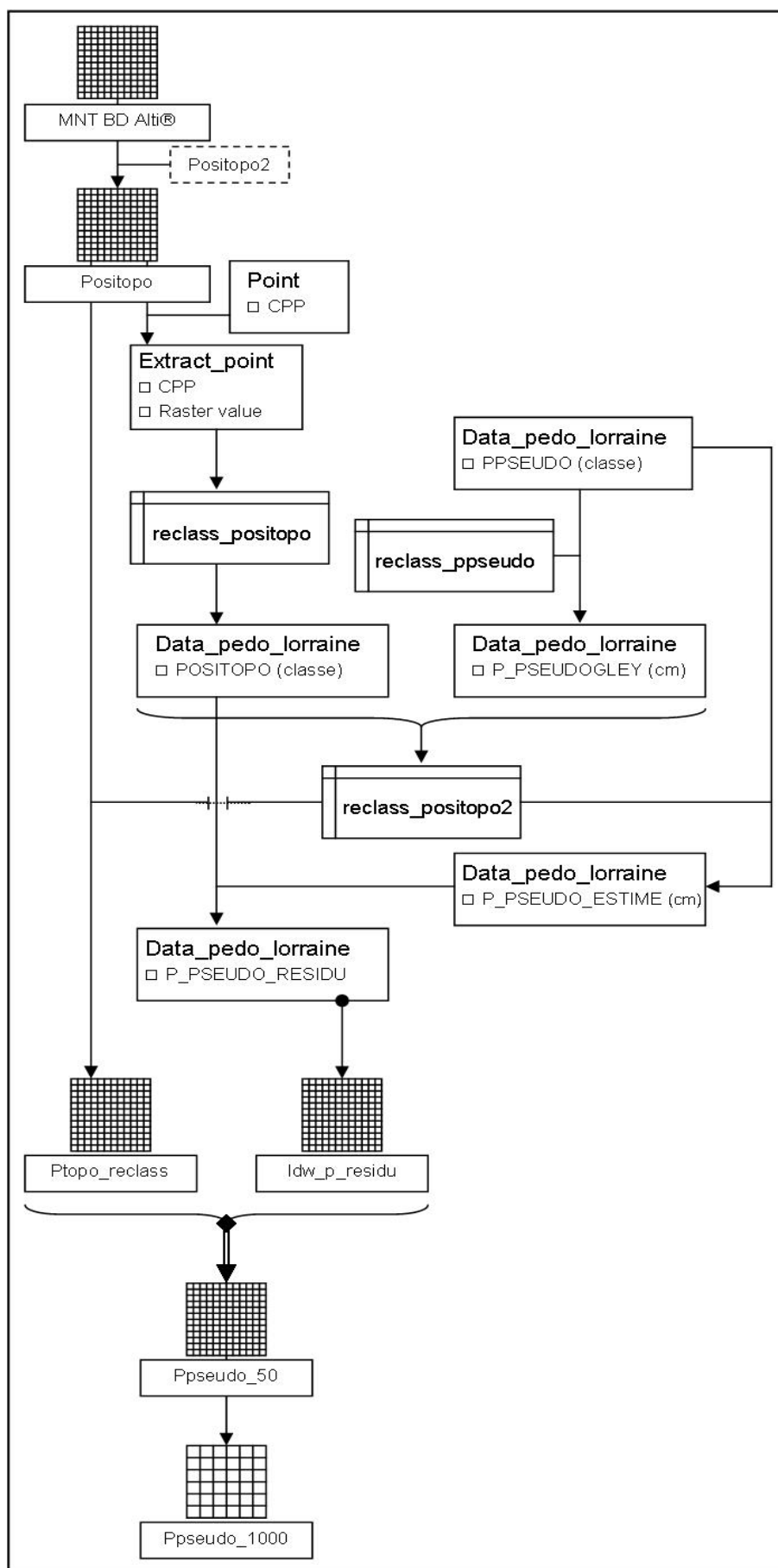


FIGURE 6 : prise en compte de l'hydromorphie

II.3.4. Prise en compte de la texture et de la profondeur associée

L'IFN décrit un profil de sol de manière très simple (voir figure 2) :

- dans le cas d'un profil homogène, l'IFN considère qu'il n'y a qu'une seule texture le long du profil. Un seul champ textural est alors renseigné dans les données : TEXT2. À cette texture est associée une profondeur, PROF2, qui correspond à la profondeur la plus basse de cet horizon.
- dans le cas d'un sol hétérogène ou complexe (typiquement limon sur argile), l'IFN va distinguer deux textures. TEXT1 et TEXT2 sont alors renseignées, TEXT1 correspondant à la texture la plus en surface, avec leurs profondeurs respectives associées : PROF1 et PROF2.

L'IFN distingue 9 classes de texture. Celles-ci sont issues du diagramme des textures de Jamagne. Il est possible d'établir une correspondance entre les deux, établie par l'IFN (voir tableau 4).

TABLEAU 4 : correspondance entre les classes de texture IFN et le diagramme des textures de Jamagne.

Source : IFN

Classes de textures IFN	Diagramme des textures de Jamagne
Sable (1)	Sable (S)
Sable limoneux (2)	Sable limoneux (SL)
Sable argileux (3)	Sable argileux (SA)
Limon sableux (4)	Limon sableux (LS)
	Limon sablo-argileux (LSA)
	Limon moyen sableux (LmS)
	Limon léger sableux (LIS)
Limon argileux (5)	Limon argileux (LA)
	Limon argilo-sableux LAS)
Limon (6)	Limon moyen (Lm)
	Limon léger (LI)
Argile limoneuse (7)	Argile limoneuse (AL)
Argile sablo-limoneuse (8)	Argile sableuse (AS)
	Argile limono-sableuse (ALS)
Argile (9)	Argile lourde (Alo)

Les classes de textures IFN correspondent à des variables discrètes, difficiles à interpoler en l'état. Pour permettre l'interpolation de cette donnée, ces variables discrètes sont transformées en variables continues.

La méthode retenue est basée sur l'hypothèse de la répartition uniforme des points IFN au sein des classes IFN. Cette hypothèse permet d'associer le centre de gravité de la classe à son barycentre. La classe de texture étant définie par des pourcentages de sable, argile et limon, les coordonnées du barycentre correspondent donc à un pourcentage de sable, d'argile et de limon (voir annexe 1).

La détermination des coordonnées des barycentres de chaque classe de texture se fait de manière numérique. Pour plus de facilité, le diagramme des textures a été reporté dans un repère orthogonal avec en abscisse, le pourcentage de sable et en ordonnée le pourcentage d'argile (le pourcentage de limon s'obtient en soustrayant à 100 les deux pourcentages précédents). On obtient ainsi des figures géométriques simples, de type triangle-rectangle et rectangle, ou des polygones, constitués de triangle(s)-rectangle(s) et de rectangle(s) (voir annexe 3).

Dans le cas simple d'un triangle ou d'un rectangle (voir figure 7), le barycentre G a pour coordonnées :

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad y_G = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad z_G = 100 - (x_G + y_G)$$

Ici, "x" correspond au pourcentage de sable, "y" au pourcentage d'argile et "z" au pourcentage de limon.

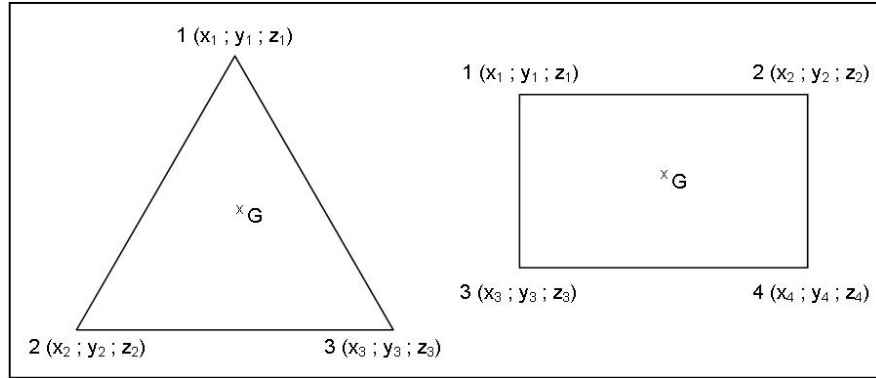


FIGURE 7 : détermination du barycentre, cas simple

Dans le cas plus complexe d'un polygone (voir figure 8), ce dernier est découpé en n triangle(s)-rectangle(s) et/ou en rectangles de centres de gravité $G_1\{x_1 ; y_1\}$, $G_2\{x_2 ; y_2\}$, ..., $G_n\{x_n ; y_n\}$. Le polygone aura pour centre de gravité le barycentre des points $G_1, G_2, \dots, G_n$ pondérés par les surfaces a des n triangle(s) rectangle(s) et/ou rectangle(s). Les coordonnées sont donc obtenues grâce aux formules suivantes :

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \times x_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad y_G = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \times y_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad z_G = 100 - (x_G + y_G)$$

"x" correspond au pourcentage de sable, "y" au pourcentage d'argile, "z" au pourcentage de limon et a à la surface.

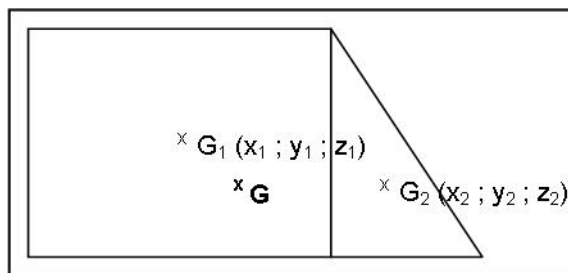


FIGURE 8 : détermination du barycentre, cas complexe

Ainsi, pour chaque point IFN il est possible d'associer un pourcentage de sable, d'argile et de limon. Ces pourcentages permettent la construction de la table de reclassement `reclass_text`.

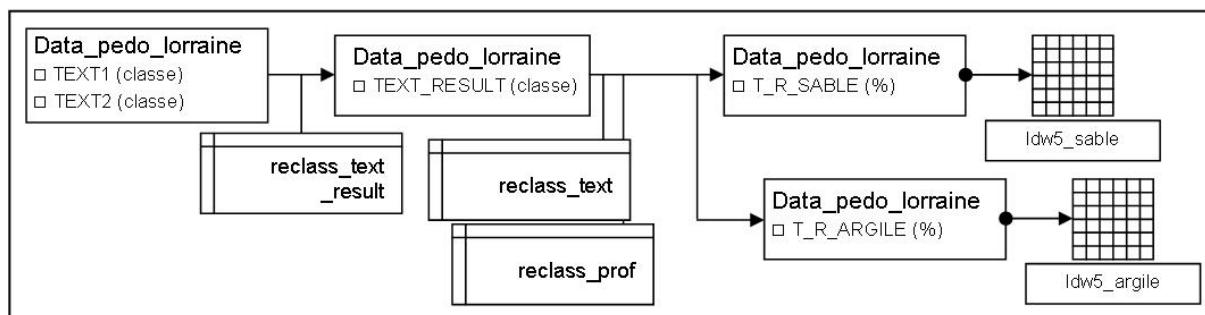


FIGURE 9 : prise en compte de la texture et de la profondeur associée

La figure 9 présente la démarche suivie pour la prise en compte de la texture. Les variables TEXT1 et TEXT2 sont reclassées selon la table de reclassement reclass_text_result. Cette table de reclassement représente la règle de décision qui s'applique dans le cas d'un profil hétérogène dans les 50 premiers centimètres de sol (voir tableau 5). On obtient ainsi une texture, avec deux options :

- texture définie par son numéro de classe IFN, qui correspond à la texture la plus sensible ;
- moyenne des textures (les 2 textures appartiennent à la même classe de sensibilité PROSOL), pondérée par leurs épaisseurs respectives.

L'approche de cette règle de décision est pessimiste : la texture la plus sensible est toujours celle qui est prise en compte, quelle que soit son épaisseur, comme le préconise PROSOL. Cette table de reclassement a été validée par Jabiol.

Cette règle de décision est incluse dans une formule Excel qui permet également :

- d'isoler les points aberrants (sol perturbé ou absent, sol hétérogène sur la placette, décharge/remblais ou dépôt artificiel) et les points dépourvus de renseignements pédologiques tels que précisés par l'IFN ;
- d'associer aux points des profils homogènes leur numéro de classe de texture d'origine ;
- d'associer aux points des profils hétérogènes dont la texture de surface va au-delà de 50 centimètres, le numéro de la classe IFN correspondant à cette texture.

TABLEAU 5 : règle de décision dans le cas d'un profil de sol hétérogène

		TEXT2								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
TEXT1	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	7									
	8									
	9									

Moyenne des textures pondérée par leurs épaisseurs respectives

Prise en compte de TEXT2 car plus sensible que TEXT1

Prise en compte de TEXT1 car plus sensible que TEXT2

La table de reclassement reclass_text_result permet d'obtenir la nouvelle variable TEXT_RESULT organisée sous forme de classe. Les tables de reclassement reclass_text et reclass_prof permettent de reclasser la variable TEXT_RESULT en trois variables : P_TR_SABLE, P_TR_ARGILE et P_TR_LIMON.

II.3.5. Calcul final

Les 5 grilles produites précédemment sont croisées via la Calculatrice Raster (voir figure 9). La formule entrée dans la Calculatrice Raster permet une reclassification de ces couches selon la transcription du guide PROSOL à l'échelle de la Lorraine (voir tableau 6) :

- sols praticables toute l'année avec peu de précautions (classe 1) : sols très caillouteux (charge en cailloux ≥ 50 %) et absence d'hydromorphie dans les 50 premiers centimètres ou sols très sableux (taux de sable ≥ 50 %) et absence d'hydromorphie dans les 5 premiers centimètres ;
- sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (classe 2) : sols à dominante argileuse et absence d'hydromorphie dans les 50 premiers centimètres ;
- sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (classe 3) : sols à dominante limoneuse ou tous les sols présentant de l'hydromorphie dans les 50 premiers centimètres ;
- sols très sensibles et impraticables toute l'année (classe 4) : sols à engorgement permanent et présentant de l'hydromorphie dans les 50 premiers centimètres.

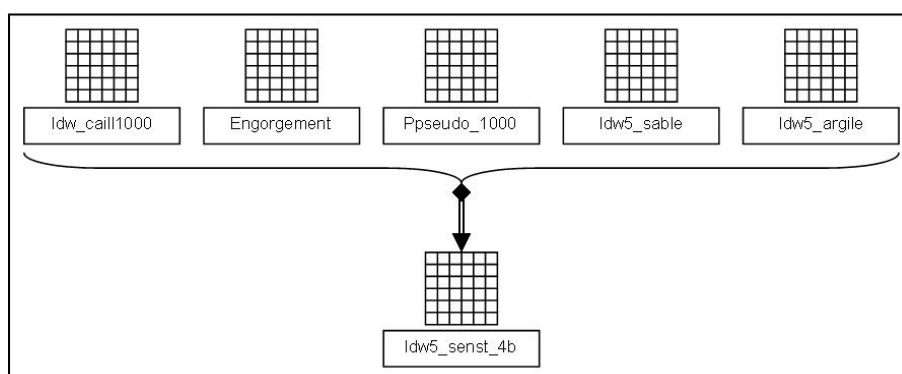


FIGURE 10 : calcul final de la carte

TABLEAU 6 : critères de diagnostic pour la sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement

Classes de sensibilité PROSOL	Symbologie Lorraine	Critères de diagnostic PROSOL et repris dans le cadre de la Lorraine	Critères en plus, hors PROSOL
Sols praticables toute l'année avec peu de précautions	Couleur verte / classe 1	Aucune trace d'hydromorphie dans les 50 premiers cm (<i>hydromorphie</i> > 50 cm) ET Sols très caillouteux (charge en cailloux ≥ 50 %) Sols très sableux (sable ≥ 70 % : S, SL _{pp} ¹ , SA _{pp})	/
Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions	Couleur orange / classe 2	Aucune trace d'hydromorphie dans les 50 premiers cm (<i>hydromorphie</i> > 50 cm) ET Sols à texture argileuse dominante (Alo, AL, ALS, AS _{pp} , SA _{pp})	/
Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (engorgement temporaire)	Couleur rouge / classe 3	Traces d'hydromorphie dans les 50 premiers cm (<i>hydromorphie</i> ≤ 50 cm) OU Sols à texture dominante limoneuse ou sablo-limoneuse (LI, Lm, LA, LAS, LmS, LIS, LS, LSA, SA _{pp} , SL _{pp})	Sol brun hydromorphe, sol complexe à deux couches, sol lessivé hydromorphe, sol podzolique hydromorphe, pseudogley, pseudogley podzolique
Sols très sensibles et impraticables toute l'année (engorgement permanent et/ou tourbières)	Couleur noire / classe 4	/	Sol alluvial, gley, tourbe, stanogley

¹_{pp} : pour partie

III. Résultats et domaine de validité

La méthodologie développée dans la partie précédente a permis la réalisation d'une carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement en Lorraine au pas du kilomètre. La présente partie présentera les résultats liés à cette carte, la validation de celle-ci, et la discussion de ces résultats.

III.1. Résultats

La production de la carte est accompagnée de précautions d'utilisation ainsi que d'une estimation des surfaces de chaque classe de sensibilité potentielle par région IFN.

III.1.1. Carte

La carte dans sa version de diffusion figure en annexe 11. La carte qui suit est une version réduite à simple but illustratif (voir figure 11).

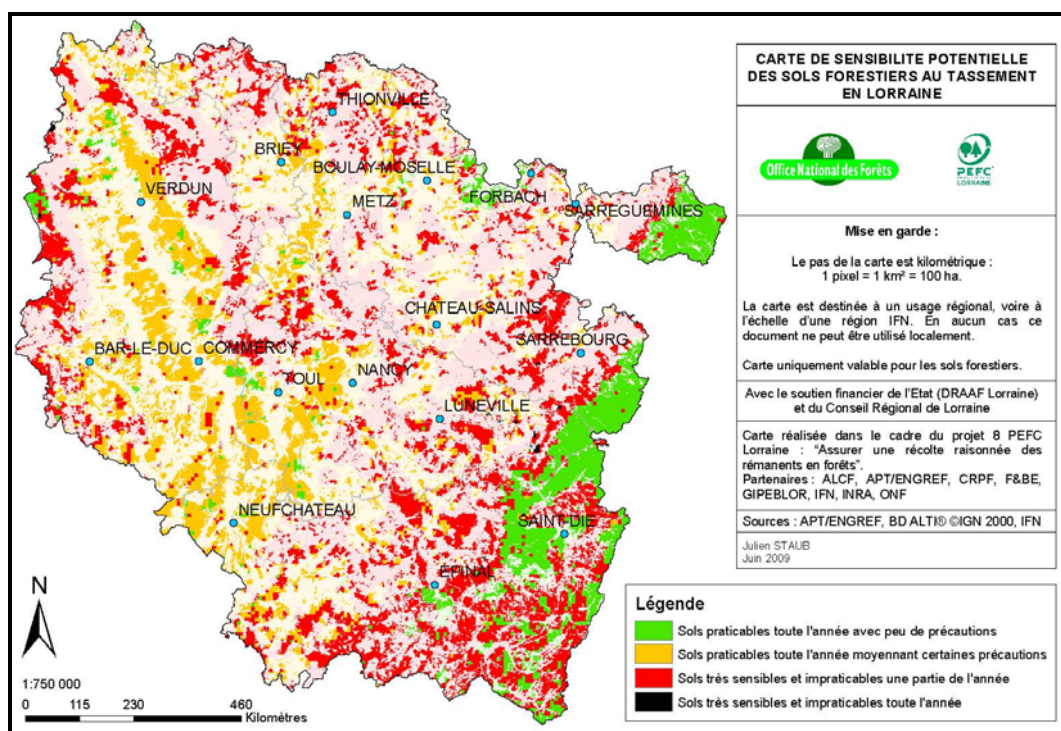


FIGURE 11 : carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement à l'échelle de la Lorraine

III.1.2. Précautions d'utilisation

La carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement en Lorraine est au pas du kilomètre, c'est-à-dire qu'un pixel de la carte équivaut à 1 km², soit 100 ha. Cette résolution implique les éléments suivants :

- l'utilisation de la carte ne peut être faite qu'à l'échelle régionale. Il est cependant possible de la décliner à l'échelle d'un département administratif ou d'une région IFN. En aucun cas elle ne peut être utilisée localement, à l'échelle d'un massif ou d'une forêt.
- la carte est uniquement valable pour les sols forestiers. Les points IFN ayant conduit à sa construction sont des points d'inventaire forestier.
- la carte est utilisable en forêt publique et privée.

III.1.3. Surfaces par région IFN

Un croisement de la carte sous SIG avec la couche des régions forestières a permis d'obtenir une estimation de la surface de chaque classe de sensibilité potentielle par région IFN (voir figure 12). Les régions IFN étudiées sont celles figurant dans les DRA – SRA Lorraine (ONF, 2006a et 2006b). Les valeurs trouvées sont rassemblées dans un tableau en annexe 4. De plus, il est possible d'établir une carte d'identité pour chaque région IFN, en fonction des classes de sensibilité (cf. annexe 5).

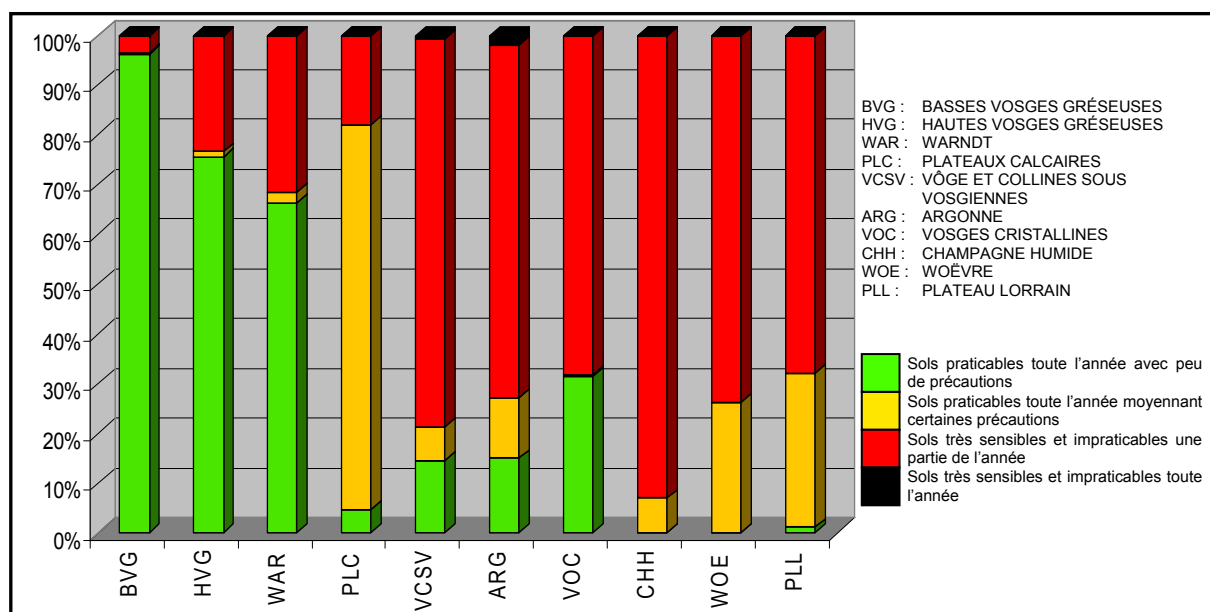


FIGURE 12 : estimation des surfaces des classes de sensibilité par région IFN

Les régions IFN apparaissant comme les moins sensibles sont les Basses Vosges Gréseuses, les Hautes Vosges Gréseuses et le Warndt, avec respectivement 96,2 %, 75,5 % et 66,3 % de sols estimés comme étant potentiellement praticables toute l'année avec peu de précautions. Les Basses Vosges Gréseuses apparaissent également comme une région ayant le moins de sols très sensibles et impraticables une partie de l'année.

A l'inverse, les régions possédant le plus fort taux de sols potentiellement très sensibles et impraticables une partie de l'année sont la Champagne humide avec 93 %, la Vôge et Collines Sous Vosgiennes avec 77,9 %, suivies par la Woèvre et Annexes (73,8 %), l'Argonne (70,9 %), les Vosges Cristallines (68,1 %) et le Plateau Lorrain (67,6 %).

La région des Plateaux Calcaires est la seule présentant un taux important de sols potentiellement praticables toute l'année : 77,3 %

La proportion de sols potentiellement très sensibles et impraticables toute l'année est très faible, et atteint au maximum 1,8 % pour l'Argonne.

Les trois plus grosses régions forestières sont les Plateaux Calcaires avec 286 000 ha de forêt, le Plateau Lorrain avec 210 200 ha, et les Hautes Vosges Gréseuses avec 90 700 ha. Chacune de ces trois régions se situe majoritairement dans une des trois premières classes de sensibilité potentielle au tassement.

Au niveau de la région lorraine, les sols potentiellement très sensibles et impraticables une partie de l'année sont majoritaires (46,2 %). Puis viennent les sols potentiellement praticables toute l'année moyennant certaines précautions avec 35,9 %, et les sols potentiellement praticables toutes l'année avec peu de précautions (17,7 %). La part de sols potentiellement très sensibles et impraticables une partie de l'année est très faible avec 0,2 % de la surface forestière lorraine. Comme vu précédemment, les sols potentiellement praticables toute l'année avec peu de précautions sont, à l'exception du Warndt, situés majoritairement dans les Vosges. Ces régions sont généralement prises sous la neige en période hivernale ce qui peut rendre difficile l'exploitation des forêts situées dans ces montagnes. Il s'agit également de zones à risque d'érosion et soumises à l'acidification.

Ces résultats sont donc l'occasion de réfléchir à la mise en place de systèmes d'exploitation, qu'ils soient alternatifs ou non, permettant d'exploiter et de débarder du bois toute l'année.

III.1.4. Méthodologie applicable à l'échelle nationale

L'acquisition des données IFN à l'échelle nationale permettrait l'application de cette méthodologie au niveau du territoire métropolitain. La validation de la carte montrera que celle-ci retranscrit correctement la réalité. L'ONF dispose du MNT BD Alti® sur toute la France. L'exploitation de la macro positopo2 d'AgroParisTech ENGREF rend possible la production d'une cartographie nationale de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement. Cependant le modèle de prise en compte de la position topographique est calibré sur la région Lorraine :

- l'utilisation de positopo2 région par région pourrait entraîner des effets de bord entre les régions ;
- la mise en œuvre de positopo2 au niveau national éliminerait l'effet de bord. Cependant à cette échelle, le maillage des points IFN n'est ni le même ni aussi homogène qu'en Lorraine. De plus l'hydromorphie n'est sans doute pas caractérisée de la même façon en France, notamment entre le Sud et le Nord du pays.

Pour appliquer cette méthode à l'échelle nationale, il sera également nécessaire d'étendre le reclassement du type de sol aux sols non retrouvés en Lorraine et non pris en compte dans cette démarche.

III.2. Validation de la carte

L'étape logique qui suit la réalisation de la carte est la validation de cette dernière. Cette validation a 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.

III.2.1. Qualité de l'interpolation

Cette étape n'intéresse que la qualité de l'interpolation et le changement d'échelle. Pour ce faire, 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 et le changement d'échelle.

III.2.1.1. Données collectées

Le projet PEFC 8 prévoyait la mise en place d'une campagne terrain pour collecter des échantillons de sol qui auraient ensuite été analysés en laboratoire (analyse granulométrique et analyse de la charge en EG notamment). Cependant les délais et coûts d'analyse, qui sont de 6 à 13 semaines et d'une trentaine d'euros par échantillon, ont forcé à réorienter cette phase du projet.

La solution retenue a été la réalisation d'un plan d'échantillonnage, dont le protocole complet est présenté en annexe 6. 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 EG 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 et d'Yves Lefèvre qui ont aidé au choix du maillage, et des variables à relever pour la partie pédologique, et de François Vernier pour les espèces végétales de la partie floristique.

Le CRPF ainsi que F&BE, en tant que partenaires du projet 8 PEFC, ont assuré les relevés de terrain, ainsi que leur saisie informatique. Ces relevés se sont échelonnés de mi-mai à début juin.

Parallèlement à ces relevés, il m'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.

III.2.1.2. Résultats et analyse

Les données ont été traitées sous Excel. Pour chaque placette il a été possible d'établir son pourcentage estimé de sable, argile et limon, ainsi que la charge en cailloux, la profondeur d'hydromorphie et l'engorgement permanent. Ces éléments ont ainsi permis de calculer la classe de sensibilité potentielle associée à chaque placette.

La règle de décision qui permet le classement dans les différentes classes de sensibilité potentielle est la même que celle du guide PROSOL qui a été utilisé pour la réalisation de la carte.

- Matrice de confusion

La matrice de confusion est employée en SIG pour estimer la précision sémantique (qualité) d'une couche par rapport au terrain. On croise ainsi la donnée issue des relevés de terrain avec la donnée de la carte (dans notre cas les classes de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement). Les pourcentages de points bien classés, surestimés et sous estimés sont ainsi déterminés (voir figure 13). Cette estimation n'a de sens que pour les sites de validation, mais elle permet néanmoins d'avoir une indication grossière pour l'ensemble de la carte.

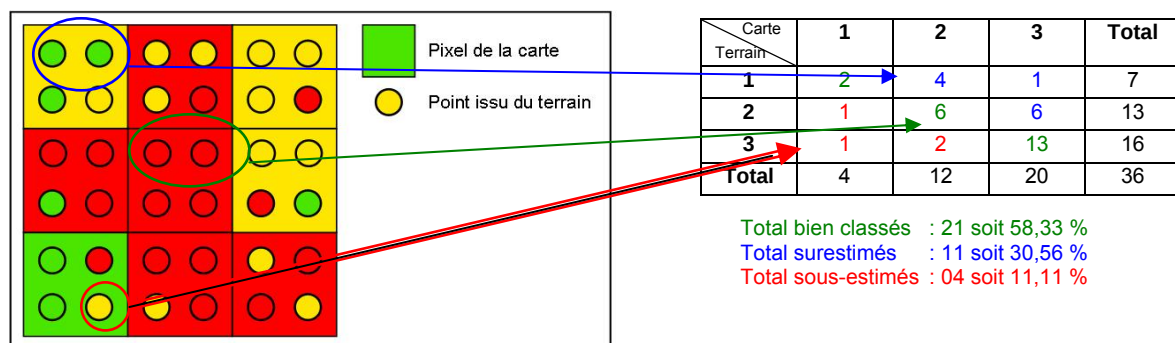


FIGURE 13 : principe d'une matrice de confusion

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 que fournit la carte. Les matrices de confusion qui en résultent sont présentées dans les tableaux 7 et 8, selon que les données du Pays des Étangs et de Villacourt ont été prises en compte ou non.

TABEAU 7 : matrice de confusion pour les 6 sites croisés avec la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers lorrains au tassement

Carte \ Terrain	1	2	3	4	Total
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

La cohérence entre la carte et le terrain est de 87,86 % lorsque tous les sites sont pris en compte. On remarquera la prédominance des classes 3 qui est due aux données du Pays des Étangs et de Villacourt, qui correspondent essentiellement à des sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (sites étudiés par l'ONF notamment pour leurs caractéristiques pédologiques).

TABLEAU 8 : 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

Carte Terrain	1	2	3	4	Total
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

La cohérence entre la carte et le terrain est de l'ordre de 59,17 % lorsqu'on se limite uniquement aux 4 sites A, B, C, et D. La sélection de ces sites a été faite en variant le plus possible ces derniers. Cependant ce choix a été fait avec une version non définitive et erronée de la carte qui a conduit involontairement à une sélection non optimale des points. D'autre part, il est fortement probable qu'un effet de la charge en cailloux se soit fait ressentir pour la classe 2 (13 points sous estimés de la classe 2 vers la classe 1).

Néanmoins, l'utilisation de ces données permet d'appréhender le changement d'échelle qui sera abordé dans la partie III.3. 2^e point.

III.2.2. Cohérence de la carte

La carte obtenue décrivant une large zone, il a été décidé de faire appel aux experts des sols lorrains afin que ceux-ci comparent la carte avec leur connaissance du terrain, l'idée étant de tirer partie 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, à l'aide également du tableau 7.

- Argonne

La cohérence de la carte avec la réalité est jugée comme 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.

- Vôge et Collines Sous Vosgiennes

Le classement de près de 80 % des sols en classe 3 est jugé quelque peu excessif, la présence de grès 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.

De manière générale, hormis deux régions IFN dont les classements en classe 3 sont quelque peu 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.

III.3. Discussion

Cette partie aborde les questions soulevées par les résultats de la carte ainsi que les éléments abordés lors du stage pour affiner localement la carte.

- Validation des hypothèses de travail

La démarche ayant conduit à la réalisation de la carte est basée sur un certain nombre d'hypothèses (voir II.2.). Celles-ci pourraient être validées afin d'asseoir la fiabilité de la carte :

- hypothèse 1 : validation par des résultats d'analyses granulométriques réalisées en laboratoire ;
- hypothèse 2 : validation par un calibrage des opérateurs ;
- hypothèse 3 : validation par le test statistique du Khi 2 ;
- hypothèse 5 : validation par des résultats d'analyses granulométriques réalisées en laboratoire.

Il est à noter que l'hypothèse 4 est vérifiée par la validation de la carte. De plus, l'hypothèse 5 a été jugée comme cohérente avec la réalité par Bernard Jabiol et les membres du comité de suivi du stage.

- 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 `reclass_text` (voir annexe 1) 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).

Ces régions sont à laisser en l'état pour le moment afin de ne pas remettre en cause totalement la classification PROSOL. De plus on retrouve au niveau des Vosges Cristallines des zones humifères d'altitude qui correspondent à des humus épais et très humides (donc potentiellement sensibles). Une idée serait de trouver une symbologie différente de la classe 2, qui marquerait l'intermédiaire entre les classes de sensibilité 1 et 3 et qui ne serait valable que pour les cas identifiés ici (Vôge-Collines Sous Vosgiennes, Vosges Cristallines et Argonne). De manière plus générale, il paraît opportun d'engager une réflexion sur une éventuelle évolution des critères de diagnostic de PROSOL.

- Appréhender le changement d'échelle

Les matrices de confusion issues de la validation terrain mettent en avant l'importance du changement d'échelle. En disposant de données d'inventaires plus précises, il est alors possible de mieux appréhender la réalité du terrain, en permettant l'obtention d'une donnée à un pas plus précis. La comparaison visuelle permet d'appréhender cet effet, comme illustré par la figure 14.

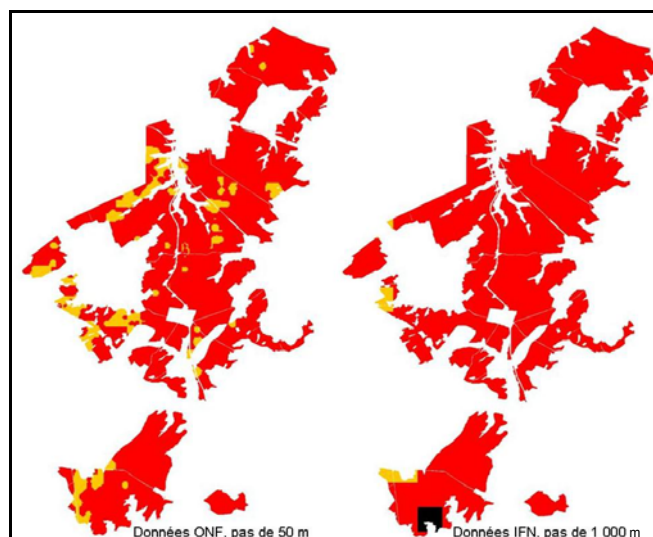


FIGURE 14 : comparaison visuelle, cas du Pays des Etangs

A gauche figure la donnée obtenue au pas de 50 m, grâce aux relevés pédologiques ONF, à droite figurant la donnée issue des points IFN au pas du kilomètre. L'information est beaucoup plus fine et détaillée dans le cas de gauche que dans celui de droite.

- Prise en compte du type de sol

Les types de sols de l'IFN ont été reclassés selon PROSOL avec l'aide d'Yves Lefèvre et de Bernard Jabiol. Un traitement par interpolation probabilisée a été effectué pour obtenir un rendu visuel, ainsi qu'une estimation des surfaces de chaque classe par région IFN (voir annexe 8). Cette manipulation a été effectuée uniquement dans un but comparatif. La donnée type de sol est trop peu précise pour se substituer à la démarche ayant conduit à la réalisation de la carte. Néanmoins le résultat est assez intéressant comme le montre la figure 15.

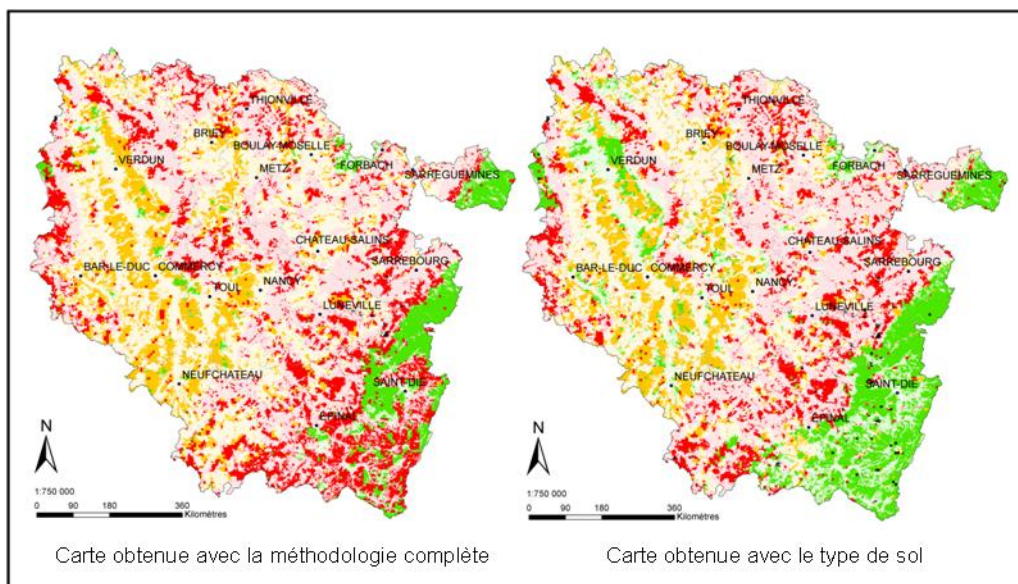


FIGURE 15 : comparaison avec le type de sol

L'utilisation du type de sol diminue fortement la part de sols en classe 3 dans les régions litigieuses, avec un basculement vers la classe 1 (de 70,9 % à 37,3 % pour l'Argonne, 77,9 % à 35,5 % pour la Vôge-Collines Sous Vosgiennes et 68,1 % à 1,4 % pour les Vosges Cristallines) (voir annexe 8). Ce résultat, qui est à prendre avec beaucoup de prudence, nous incite cependant à penser que pour ces régions la classe 3 affichée par la carte classique n'est pas comparable à la même classe sur Plateau Lorrain par exemple.

- Autres pistes de validation abordées pendant le stage

Des éléments permettant d'affiner localement la carte ont été envisagés ou abordés pendant le stage.

Ainsi un autre stagiaire a procédé à l'harmonisation des couches de stations disponibles sur toute la DT Lorraine. L'idée est de pouvoir reclasser les différents groupes stationnels en fonction du guide PROSOL ce qui permettrait d'avoir une information plus précise pour les forêts dotées d'une telle carte. Cependant cette option n'a pu être approfondie, les données n'étant pas disponibles au moment de la rédaction de ce rapport. Néanmoins un essai a été réalisé pour la forêt domaniale de Parroy (54), comme illustré par la figure 16.

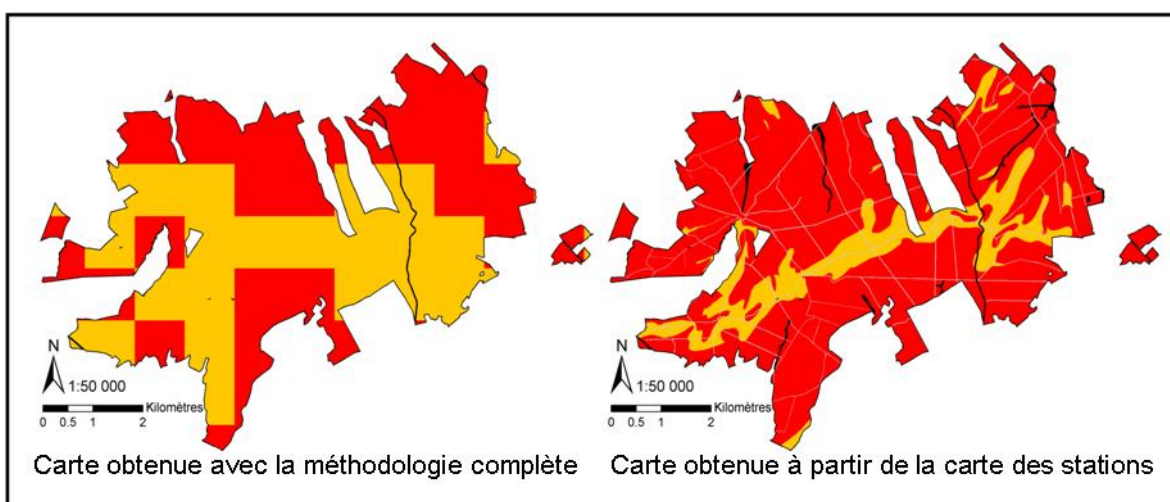


FIGURE 16 : prise en compte des cartes de stations, exemple sur la forêt domaniale de Parroy (54)

Ce type de reclassement implique de faire correspondre au mieux les différents types de stations forestières avec les critères de diagnostic de PROSOL.

Une information pédologique plus précise existe en Lorraine sous la forme de cartes pédologiques : carte de Saint-Dié au 1/250 000, référentiel pédologique lorrain au 1/250 000 (recouvrant le sillon lorrain entre Metz et Nancy) et carte de Metz au 1/100 000. Ces cartes existent sous forme informatique et disposent a priori d'informations qui rendent leur exploitation possible sous SIG, telles que des analyses de textures. De manière identique, un reclassement de ces informations en fonction des critères de diagnostic de PROSOL pourrait permettre d'affiner à l'échelle de la Lorraine la carte générale de sensibilité des sols forestiers au tassement. Cependant, dans ce cas, les démarches entreprises pour récupérer ces données, n'ont pu aboutir à temps pour la rédaction du rapport.

D'autre part, l'ENGREF a procédé à l'harmonisation des cartes géologiques au 1/50 000 de la Lorraine (donnée BRGM), dans le cadre d'un stage visant à affiner la carte du pH à un pas de 50 m sur la Lorraine (stage également inscrit dans le projet PEFC 8). Une tentative d'utilisation de cette donnée a été faite, en utilisant la géologie comme variable explicative de la texture et de la charge en cailloux, sur la même base que la prise en compte du pseudogley, avec interpolation des résidus. L'utilisation de cette donnée n'est pas terminée et se poursuivra après le stage. Néanmoins, un premier résultat a pu être obtenu (voir figure 17).

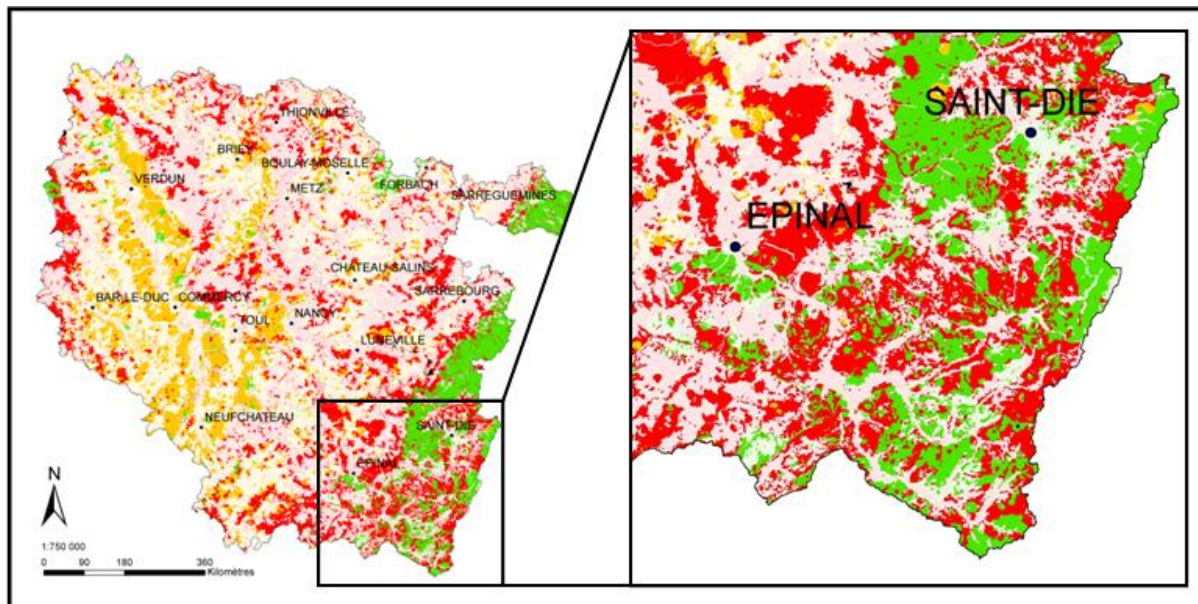


FIGURE 17 : prise en compte de la géologie au 1/50 000 comme variable explicative
(attention : résultat intermédiaire)

La figure 17 montre bien tout l'intérêt d'utiliser la géologie comme variable explicative de la texture et de la charge en cailloux, puisqu'elle permet d'améliorer la résolution de la carte en passant d'un pas de 1 000 m à un pas de 50 m.

Enfin, l'ENGREF a été approchée pour bénéficier de données EcoPlant comme jeu indépendant pour la validation de la carte. A ce jour la démarche n'a toujours pas abouti.

IV. VALORISATION

La dernière partie du stage a été consacrée à la valorisation de la carte. En effet, celle-ci va servir d'outil à tout un panel de personnes, du décideur en passant par l'aménagiste, le chef de projet d'un bureau d'étude ou encore le gestionnaire. Cette dernière partie présente donc les applications envisageables et l'exploitation possible pouvant être faite de la carte de sensibilité des sols forestiers au tassement. Ces préconisations sont applicables autant en forêt privée qu'en forêt publique.

IV.1. Outil pour les décideurs

Deux types de décideurs peuvent être identifiés comme étant susceptibles d'utiliser la carte de manière concrète à des fins décisionnelles. On retrouve d'une part le décideur institutionnel, chargé de financer ou de subventionner certaines activités en forêt. D'autre part on a le décideur forestier, qui se trouve à un échelon organisationnel, comme une DT par exemple.

IV.1.1. Décideur institutionnel

Le décideur institutionnel typique du monde forestier est la DRAAF. De manière similaire on retrouve le conseil régional ou encore les conseils généraux. Ces organismes peuvent être sollicités pour la demande de subventions. Ces financements peuvent 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.

La DRAAF de Lorraine s'est ainsi montrée très intéressée par la carte. En effet, elle permet l'identification de zones plus ou moins sensibles, ce qui servira à la DRAAF à orienter ses 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, la carte permettra d'orienter l'achat d'un matériel alternatif 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 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.

IV.1.2. Décideur forestier

Comme vu précédemment, la carte peut être un argument fort pour le forestier dans la recherche de subventions. L'utilisation de la carte comme argument de négociation peut aussi concerner le forestier chercheur en quête de financement pour un programme de recherche.

Elle est également un moyen d'aider le décideur forestier à planifier ses actions. Par exemple, pour l'agence travaux de la DT Lorraine la carte devient alors un excellent outil pour planifier les actions des différentes équipes d'ouvriers, en rationalisant leurs actions selon la sensibilité potentielle des zones où ils doivent intervenir. C'est aussi un argument pour l'achat de matériel puisque cette agence envisage l'achat d'un câble aérien, avec un gain en termes de communication puisque cela permettra de renforcer l'image environnementale de l'ONF. D'un point de vue commercial, que ce soit à l'ONF ou dans les coopératives, 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 (Thiébaud, 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 entre parfaitement dans le cadre de la note de service 09-T-297 (ONF, 2009) « Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols ». En effet, cette note de service préconise la définition d'un plan d'action territorial pour la mise en œuvre des dispositions de cette note. La carte permet l'identification des forêts à forts enjeux de sensibilité qui devront faire l'objet d'une cartographie plus précise de sensibilité potentielle des sols au tassement.

IV.2. Outil pour l'aménagiste ou le rédacteur du PSG

La carte de sensibilité des sols forestiers au tassement est utilisée comme une carte des enjeux potentiels, de la même manière qu'une carte des enjeux paysagers. L'aménagiste ou la personne en charge de la rédaction du PSG, dans le cadre de la forêt privée, a ainsi la possibilité de recouper sa forêt avec la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement et la carte d'identité de la région IFN. En fonction de cela, il est en mesure d'estimer l'enjeu de sensibilité potentielle des sols au tassement sur la zone considérée :

- 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 alors pas nécessaire ;
- si un enjeu est clairement identifié et avéré, la forêt se situant en classe 3 par exemple, il peut en ce cas commander une étude beaucoup 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 alternatives. Dans le strict cadre de l'ONF, cela rejoint le point sur l'application territoriale de la note de service évoquée précédemment.

IV.3. Outil pour le bureau d'étude

Avec le développement du bois énergie, les études de ressources dans ce domaine ont le vent en poupe. Les collectivités cherchent de plus en plus à s'équiper en unités de cogénération. En utilisant cette carte, les bureaux d'études chargés d'étudier la ressource disponible introduiront un enjeu écologique à leurs études. Elles pourront déterminer l'enjeu tassement lié aux zones potentielles d'approvisionnement et définir la stratégie de la mobilisation du bois, cette stratégie pouvant aller jusqu'à la mise en œuvre de méthodes alternatives, voire à considérer certaines zones comme non mobilisables.

IV.4. Outils pour le gestionnaire

La carte permet d'identifier des zones à enjeux potentiels, mais sa construction au pas du kilomètre rend son utilisation incompatible avec la gestion quotidienne. De plus il s'agit d'une carte de sensibilité potentielle. Afin que le gestionnaire puisse appréhender au mieux cette sensibilité, il lui faut un protocole très simple qui lui permette de diagnostiquer au mieux la sensibilité de l'unité de gestion dont il a la charge, de la même manière que l'aménagiste. Le gestionnaire doit aussi pouvoir s'appuyer sur des recommandations quant au choix d'un système d'exploitation en fonction des différentes classes de sensibilité potentielles des sols au tassement. Ces recommandations trouvent également toute leur utilité dans la rédaction d'un document de gestion, en particulier pour l'établissement de règles précises.

Il m'a été permis d'élaborer ces deux outils qui, en étant complémentaires à la carte, sont destinés préférentiellement à l'aménagiste et au gestionnaire.

IV.4.1. Protocole de diagnostic

Il s'agit d'un protocole simplifié qui vise à caractériser la sensibilité d'un sol au tassement sur la base des critères de diagnostic issus du guide PROSOL (Pischedda *et al.* 2009). L'idée de ce protocole est de pouvoir apporter un appui au gestionnaire dans divers cadres, de la révision d'un aménagement ou la rédaction d'un PSG à une étude de station.

IV.4.1.1. Méthodologie

Le protocole de diagnostic de sensibilité d'un sol est constitué d'une fiche de relevé et d'une clé de détermination. Cette fiche de relevé, présentée en annexe 7, comporte une partie pédologique et une partie floristique.

Le protocole de diagnostic a été élaboré à partir du protocole IFN pour la prise des données pédologiques (texture, charge en cailloux et profondeur d'apparition de l'hydromorphie), notamment en se basant sur le manuel du chef d'équipe (IFN, 1994) complété par le dictionnaire de données d'EcoPlant (Gégout *et al.*, 2005) pour d'autres variables complémentaires. Cette dualité permet la saisie des renseignements strictement nécessaires au diagnostic, renseignements qui peuvent être complétés par d'autres variables en vue d'une éventuelle autre exploitation. Elle offre aussi la possibilité à l'opérateur de saisir les données en fonction de ses compétences. Celui-ci peut alors soit renseigner complètement la fiche de relevés, soit procéder directement et plus rapidement au diagnostic de sensibilité. Son fonctionnement est expliqué dans la partie suivante. La fiche de relevés est issue du modèle ENGREF 1992 présenté dans le guide pour la description des sols (Baize et Jabiol, 1995)

Le relevé floristique a été construit à partir de la liste des espèces végétales des milieux humides en Lorraine (Vernier, 2009), en recoupant les espèces considérées comme communes à assez communes avec les groupes d'espèces indicatrices hygrophiles et mésohygrophiles de la flore forestière française des plaines et collines (Rameau *et al.*, 1989). Ce relevé permet la détermination par bio-indication du type d'engorgement.

La clé de détermination a été construite à partir des critères de diagnostic du guide PROSOL. Elle a fait l'objet d'une validation de la part d'Alain Brêthes, l'un des co-auteurs.

Ce protocole a été créé dans le cadre des relevés de terrain pour la validation terrain. Il a ainsi pu être testé par les opérateurs du CRPF et de F&BE, et cela sans difficulté. Cependant la partie relevé floristique n'a pu être éprouvée, aucun point n'étant situé sur un sol à engorgement permanent.

IV.4.1.2. Mise en œuvre

Ce protocole vise à récolter de la manière la plus simple possible les informations qui caractérisent la sensibilité potentielle d'un sol selon le guide PROSOL, à savoir :

- la texture ;
- la profondeur d'hydromorphie
- la charge en cailloux ;
- le type d'engorgement du sol.

Afin de rendre l'information la plus précise possible, il est souhaitable que la collecte de ces variables se fasse à travers un échantillonnage systématique de la zone à étudier. Le choix du maillage est laissé à la discrétion du commanditaire ou du prestataire de l'étude. Les données collectées dans le cadre de la validation de la carte étaient échelonnées tous les 400 m, et celles collectées par l'ONF dans le Pays des Étangs l'étaient tous les 200 m environ. On peut cependant retenir l'idée que les données doivent être collectées à un pas inférieur au kilomètre. La connaissance du terrain par l'opérateur est un plus, qui peut éventuellement permettre d'orienter l'échantillonnage.

L'opérateur peut soit renseigner complètement la fiche de relevé pédologique et floristique, soit compléter uniquement la partie diagnostic PROSOL. On ne s'intéressera ici qu'à la partie diagnostic (voir figure 18).

DIAGNOSTIC PROSOL			
Pourcentage estimé des EG sur le profil ou dans les 50 premiers cm	< 50 %	≥ 50 %	
		%	
Hydromorphie dans les 50 1 ^{ers} cm de sol (tâches > 25 %)	OUI (indiquer la prof.)	NON	
Groupe de texture le plus sensible dans les 50 1 ^{ers} cm			
Engorgement permanent du sol	OUI	NON	
Sensibilité potentielle du sol au tassement			
1	2	3	4

FIGURE 18 : extrait de la fiche de relevé pédologique.

La méthodologie s'inspirant de celle de l'IFN, la prise de mesure se fait à l'aide d'un sondage à la tarière pédologique, qui peut être complété éventuellement par une fosse pédologique dans les situations très caillouteuses. Il est important que l'opérateur effectue les relevés sur l'ensemble des 50 premiers centimètres de sol. Il relèvera ainsi pour chaque placette, la texture la plus sensible, la profondeur d'apparition de l'hydromorphie et la charge en cailloux. L'estimation de la texture se fait au toucher dans les 50 premiers centimètres de sol, en retenant la texture la plus sensible (voir figure 19). La profondeur d'hydromorphie retenue sera celle qui présente des taches ocre ou des traces de décoloration supérieures à 25 % (Jabiol et Lefèvre 2009, communication personnelle). La charge en cailloux est estimée sur l'ensemble du profil ou dans les 50 premiers centimètres. L'engorgement est estimé visuellement en fonction de ce qui est observé.

La partie diagnostic se complète de la manière suivante :

- pour la partie charge en cailloux, entourer le cas rencontré (< 50 % ou ≥ 50 %) et renseigner l'estimation précise qui en aura été faite ;
- pour l'hydromorphie, entourer le cas rencontré, en veillant à noter la profondeur d'apparition du phénomène dans le cas où il serait présent dans les 50 premiers centimètres de sol ;
- pour la texture, renseigner la texture ou le groupe de texture le plus sensible
- pour l'engorgement cocher le cas correspondant.

Bien que le diagnostic de sensibilité soit fait sur le terrain, il est nécessaire de conserver les données brutes pour la réalisation des cartes de sensibilité potentielle au tassement. Le renseignement de la fiche de relevés dans son ensemble permet un traitement des données de manière beaucoup plus complète. Cette option sera donc à privilégier au maximum. Ces cartes locales de sensibilité au tassement viendront alors compléter la carte régionale.

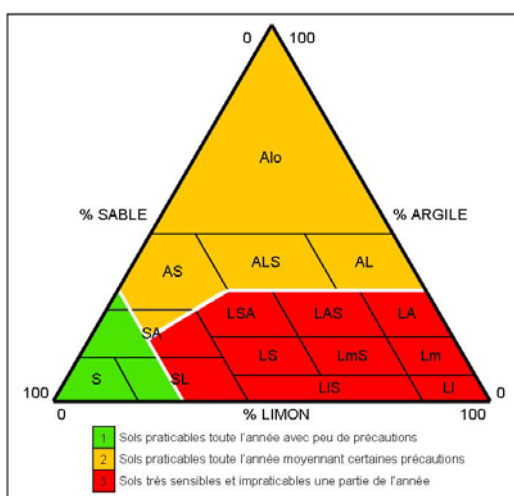


FIGURE 19 : diagramme des textures, modifié selon PROSOL.

Source : PROSOL

Le diagnostic de la sensibilité se fera à l'aide de la clé de détermination, présentée en figure 20, qui accompagne ce diagnostic.

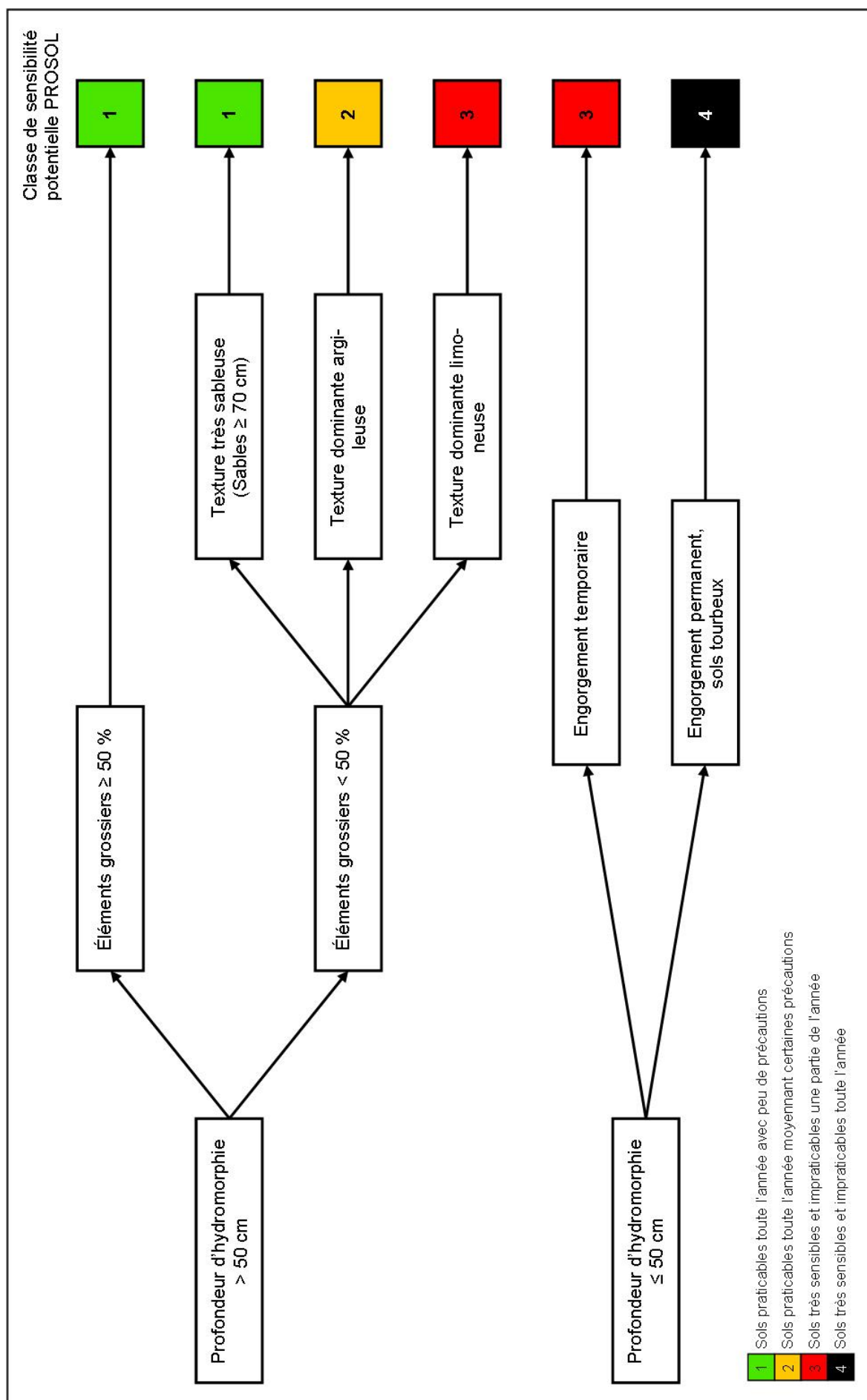


FIGURE 20 : clé de détermination de la sensibilité d'un sol selon PROSOL

IV.4.2. Aide au choix du système d'exploitation

En Lorraine, près de la moitié des sols forestiers sont classés en sols très sensibles et impraticables une partie de l'année. Il s'agit là d'un fait avéré, corroboré par les experts. Il est à mettre en relation avec les périodes de praticabilité des sols. Les sols correspondant à la classe de sensibilité évoquée ci-dessus sont impraticables du 15 novembre au 15 avril (Lefèvre, communication personnelle, 2009). Les périodes de gel, qui permettaient autrefois d'accéder aux peuplements situés sur ces sols en toute sérénité, tendent à se raréfier de part les changements climatiques. Or cette période correspond à la saison d'exploitation de la majorité des feuillus. Il convient alors de raisonner l'exploitation des bois en forêt afin d'assurer un approvisionnement constant de la filière bois. Interdire purement et simplement l'accès aux parcelles lorsque les sols sont impraticables n'est pas une solution envisageable. L'aide au choix du système d'exploitation, en fonction de la classe de sensibilité et de l'état d'humidité du sol, se veut être une des solutions qui permet une exploitation normale des bois. Cette solution est à coupler avec la mise en place systématique de cloisonnements.

IV.4.2.1. Méthodologie

Cette aide au choix du système d'exploitation a été élaborée avec l'appui de Claude Bernardin, Jean-Philippe Maréchal et Denis Stauffer de l'Agence ONF de Meurthe-et-Moselle, et celle de Dominique Messant. Elle a ainsi été construite avec les connaissances et l'expérience de chacun, en la croisant avec la bibliographie portant sur le sujet. La connaissance des personnels de l'Agence ONF de Meurthe-et-Moselle s'est avérée précieuse à plusieurs égards :

- le territoire de l'agence recoupe un certain nombre de régions IFN, notamment des régions aux sols réputés comme sensibles telles que le Plateau Lorrain, la Woëvre ou les Collines Sous Vosgiennes. A l'inverse, on y retrouve des zones peu sensibles comme les Plateaux Calcaires ou les Hautes Vosges Gréseuses.
- Claude Bernardin et Jean-Philippe Maréchal sont précurseurs dans la mise en place de systèmes alternatifs sur sols sensibles. Il m'a donc paru tout naturel d'aller les rencontrer afin de tirer partie de leur savoir-faire.

Cette aide se présente sous la forme de tableaux. Chaque classe de sensibilité est ainsi déclinée sous cette forme, en fonction de l'état d'humidité du sol, à savoir sol sec ou gelé, sol frais et sol humide. La description et la caractérisation de l'état d'humidité d'un sol n'est pas une chose aisée. PROSOL propose une estimation croisée de la texture et de l'état d'humidité (voir annexe 9). Il est facile de se représenter un sol sec ou gelé ainsi qu'un sol humide (= sol détrempé). Un sol frais se situe donc entre les deux, mais correspondrait surtout à un sol correctement ressuyé mais non sec.

Chaque tableau croise l'abattage/façonnage – débardage avec le débusquage. L'intersection d'une ligne et d'une colonne permet ainsi d'obtenir un système d'exploitation forestière qui indique quel type de produit est envisageable (PB, BM, GB). Un effort de synthèse a été effectué afin de faire apparaître dans un même tableau, et pour une même classe de sensibilité, les différents cas possibles en fonction de l'état d'humidité du sol.

Un système d'exploitation forestière comprend selon Pischedda *et al.* (2009) :

- le degré de transformation du produit ou méthode (arbres entiers, bois longs, bois courts, plaquettes) ;
- l'équipement de base (abatteuse, chenillard, porteur, etc.)
- les procédés nécessaires pour réaliser un processus de mobilisation dans une situation déterminée de travail.

Dans un souci de lisibilité, et afin de ne pas la surcharger, la grille a été construite notamment pour les bois courts, bois longs et éventuellement les arbres entiers, et selon les hypothèses qui suivent. La récolte du bois énergie sera évoquée ultérieurement.

- Abattage/façonnage et débusquage

L'abattage/façonnage ne concerne que l'abattage/façonnage manuel et mécanisé. Le mode mixte bûcheron associé à une abatteuse n'est pas pris en compte. Les modes de débusquage retenus sont la traction animale (aujourd'hui le cheval), et la petite mécanisation à travers les chenillards inférieurs à 1 t (type cheval de fer) ou compris entre 1 et 2 t (type Raup Trac).

Un bûcheron est capable d'abattre tous les types de produits. Une abatteuse en est également capable. Cependant, le fait d'abattre des GB ou des bois supérieurs à 1 m³ entraîne une contrainte sur le bras articulé de l'abatteuse qui dirige alors difficilement l'arbre abattu. Or, un arbre mal dirigé est susceptible de provoquer des dégâts au peuplement. Cette méthode n'est en fait pratiquée qu'en situation de coupe rase, puisqu'elle permet un pré-ébranchage des arbres suivants à abattre. Une tête d'abattage/façonnage montée sur pelle araignée n'est pas prise en compte. Cette piste serait à creuser, notamment dans le cas des sols sensibles (Durand et Richter *et al.*, 2003).

La traction animale permet de débusquer des PB et des BM. Il est également possible de sortir des GB, mais c'est une situation qui doit rester occasionnelle, à réserver aux forêts à forts enjeux patrimoniaux (dans le cadre d'une réserve) ou d'accueil du public, ce qui a été le cas en forêt communale de Strasbourg. Un cheval de fer débusque uniquement des PB, même s'il a la capacité de sortir des arbres d'environ 1 m³ (Pischedda *et al.*, 2008 ; Pischedda, 2009). Un Raup Trac débusque tout type de produits. Cependant le débusquage de GB, en se servant de son treuil et en étant arrimé, est techniquement possible mais n'est pas à généraliser. Il doit être limité à quelques exceptions dans une coupe, sous peine d'alourdir le bilan économique de l'opération.

Le débusquage des GB s'effectuera préférentiellement à l'aide d'un câble (débusqueur ou câble pêcheur du câble mât), ou d'un grappin si celui-ci est à la portée du bras d'un porteur ou d'un débusqueur à grue.

- Débardage

Les modes de débardage sont : la traction animale, la petite mécanisation avec une gamme de chenillards inférieurs à 1 t jusqu'à plus de 2 t (Galotrax, TSI), le câble, les porteurs, et les débusqueurs. On a ainsi des modes de débusquage qui peuvent aussi servir au débardage.

Un chenillard inférieur à 1 t débarde du PB. Un chenillard compris entre 1 et 2 t permet le débardage des PB et BM, tout comme la traction animale. Hormis le câble lasso qui n'est adapté que pour du PB, et les 3 cas cités précédemment, les autres méthodes de débardage permettent la sortie de toutes les catégories de produits..

Le câble lasso ou zig-zag était une pratique courante en France jusque dans les années 1980 (Bartoli *et al.*, 2006a) . Des expérimentations sont actuellement en cours en forêt domaniale de Parroy. Ce système serait très intéressant dans le débardage des PB.

Le câble mât comporte les petits câbles mâts montés sur tracteurs agricoles (plutôt orientés PB, BM) jusqu'aux câbles montés sur plateforme (plutôt orientés GB). Y sont inclus également le câble long ainsi que les chariots autotractés. Le choix de tel ou tel matériel se fait en fonction de la coupe (type de produit, accessibilité, place de dépôt, etc.). Sans pour autant répéter ce qui a déjà été écrit sur le câble, on retiendra

que le débardage par câble permet le débusquage jusqu'à 50 m de part et d'autre de la ligne de câble, grâce à son câble pêcheur. De la même manière, pour que celui-ci soit rentable il faut que l'IPC (rapport du prélèvement réalisé sous la ligne de câble ramené à la longueur de cette dernière, exprimé en m^3/ml^2) soit au moins de 0,5 m^3 (De Paul, 2005 ; Bartoli *et al.*, 2006b ; Pischedda *et al.*, 2009 ;). Le coût de revient de l'opération peut s'avérer de prime abord plus important que dans le cadre de méthodes plus traditionnelles (porteurs, débusqueurs). Des chantiers d'observation ont d'ailleurs été menés à ce sujet (Durand et Richter *et al.*, 2003 ; De Paul, 2005). Cependant ce coût est à mettre en parallèle avec le respect des sols (De Paul et Bailly, 2006 ; Bruciamacchie *et al.*, 2008), et peut être acceptable selon les volumes et les essences débardées. Typiquement des GB de chêne de qualité A ou B peuvent largement rentabiliser le câble. Le câbliste a également son avis à donner : en fonction du peuplement il est en mesure de juger de la possibilité ou non de son installation. Il désigne les lignes de câble qui permettront d'orienter le martelage et de garder ainsi les arbres relais pour la ligne.

Les porteurs ont été distingués en 4 catégories, selon qu'ils sont équipés ou non de tracks, et selon leur masse avec comme borne 10 t (Cuchet, 2006, Bernardin, communication personnelle, 2009). Cependant, les petits porteurs (≤ 10 t) ont tendance à se raréfier dans le parc matériel des ETF, la course à la productivité poussant à investir dans des engins toujours plus gros. La distinction n'a pas été faite parmi les porteurs : on retrouve ainsi les semi-porteurs³ et les porteurs. A priori, un semi-porteur exercerait moins de pression au sol puisqu'une partie de la charge repose au sol (attention au scalpage !).

Les débusqueurs à câble sont eux aussi divisés en deux catégories selon leur masse avec comme borne 5 t (Bernardin, communication personnelle, 2009). On peut ainsi inclure dans les petits débardeurs les tracteurs agricoles équipés pour le débardage. Le débusqueur à pince a été considéré comme ayant une masse dans tous les cas supérieure à 5 t. Celui-ci est non autorisé dans les opérations de débardage derrière un bûcheron ou une abatteuse. En effet, ce type d'engin est configuré pour que l'opérateur se rende directement au pied de la grume abattue et attrape celle-ci avec sa pince, et ce même s'il est équipé d'un treuil. Pour cela il est obligé de quitter le cloisonnement et de pénétrer dans la parcelle ce qui est strictement interdit (cf. partie IV.4.2.2.). Par contre ce type d'engin peut exprimer toute sa puissance dans des opérations de débardage strict, en débardant, dans des conditions climatiques le permettant, des bois mis en javelle au bord des cloisonnements par une technique de débusquage. Le débusqueur équipé d'une grue au bras télescopique et d'un treuil se situe dans un cas un peu particulier. Il peut être assimilé à un tracteur à câble s'il se sert de son treuil ou de son bras en ne quittant jamais le cloisonnement et offre ainsi l'avantage d'une position ergonomique pour son opérateur, à condition que les bois soient abattus en direction du cloisonnement (Pischedda, 2008).

L'hélicoptère est une méthode de débardage utilisée en montagne, notamment dans les Alpes. Il a été volontairement écarté car ne se justifiant pas dans le contexte lorrain.

- Niveaux d'autorisation

3 niveaux d'autorisation d'utilisation des différents matériels et systèmes ont été définis : autorisé, autorisé sous certaines conditions et non autorisé. Ces niveaux ont été établis dans chaque situation afin d'éviter, dans la mesure du possible, le moindre risque de dégâts au sol. L'objectif de ces tableaux est le "0 dégât", en prenant le parti du maximum de précautions.

² ml : mètre linéaire.

³ Semi-porteurs : porteurs équipés sur leur berceau d'une pince montée à la place des ranchers et s'ouvrant vers le haut. Les bois en grandes longueurs sont chargés dans la pince à l'aide de la grue du porteur : une fois la pince fermée par des vérins, les bois sont semi-portés et leur extrémité traîne au sol.

IV.4.2.2. Mise en œuvre

Le choix du système d'exploitation forestier se fait en prenant en compte les différents paramètres qui suivent. En effet, ceux-ci vont avoir une grande influence sur la mise en œuvre des opérations :

- la disposition et les caractéristiques de la zone à exploiter : sensibilité potentielle, zones humides, zones à éviter, type de sol, stations, etc.
- le cloisonnement en place et la desserte (accès à la parcelle, présence d'une place de dépôt, etc.) ;
- la ou les essences à exploiter ainsi que la dimension des arbres à exploiter et les types de produits à façonner ;
- le volume à exploiter ;
- le mode de transport envisagé pour sortir le bois de la forêt ;
- la disponibilité en machine et main d'œuvre ;
- le mode de vente ainsi que la date de celle-ci ;
- la situation économique du moment.

Cependant il est primordial que si problème il y a, la solution doit être identifiée au plus tard lors du martelage de telle sorte que ce dernier tienne compte des impératifs liés à l'exploitation, au débardage et pourquoi pas à la vente. Certaines orientations, notamment dans le cas du câble mât, devront être analysées lors de la rédaction du document de gestion.

Sur les sols sensibles, 80 à 90 % du tassement des horizons de surface sont enregistrés entre le premier et le troisième passage. Ce constat implique qu'une circulation sur toute la parcelle, loin de diluer les dégâts, les aggrave (Cacot, 2001). Ainsi, dans le cadre de la mécanisation des exploitations et des travaux en forêt, les cloisonnements sont la réponse adaptée à la préservation des sols. Ils font l'objet du paragraphe qui suit et qui précède la présentation des tableaux pour l'aide au choix des systèmes d'exploitation.

- Les cloisonnements

L'utilité des cloisonnements afin de réduire la surface circulée des engins en forêt n'est plus à démontrer (Richter, 1999 ; Cacot, 2001 ; Horn, 2004 ; Wehner *et al.*, 2007, Cacot, 2008). De ce fait, la circulation des engins en forêt doit se faire exclusivement sur les cloisonnements. Leur installation doit se faire de manière systématique. En faisant partie intégrante des systèmes d'exploitation forestiers, l'installation de cloisonnements dans les peuplements qui en sont encore dépourvus est à ce titre à raisonner de la même manière que la mise en œuvre des méthodes d'abattage/façonnage, de débusquage et de débardage.

Les cloisonnements permettent également une optimisation de l'exploitation. En abattant systématiquement les arbres vers les cloisonnements, les opérations de débusquage et de débardage s'en trouveront largement facilitées. Et cette optimisation de l'abattage permettra de fait une minimisation de la surface circulée par les engins.

L'organisation et l'utilisation d'un cloisonnement doivent se faire en se posant les questions suivantes, et de manière chronologique :

- quel(s) sens ?
- quelle largeur ?
- quel pas ?
- quelle protection pour les zones humides et les cours d'eau, les sols, les peuplements, et les paysages ?
- quelle praticabilité du cloisonnement avant et pendant l'exploitation ?

La bibliographie permet de répondre correctement à chacune de ces questions. Sans pour autant réécrire ce qui a déjà été dit, certains points importants sont à souligner, notamment dans le cas des sols sensibles.

Les cloisonnements sont à installer en direction du réseau de desserte existant, en évitant de les faire aboutir perpendiculairement aux pistes ou routes forestières : un angle de 30 à 45° par rapport à la piste est recommandé (= en arête de poisson) afin d'atténuer leur perception. Leur installation est à faire dans le sens d'écoulement des eaux afin que les cloisonnements ne deviennent pas un obstacle à l'écoulement de surface. A partir de 10 % de pente, l'installation des cloisonnements se fait dans le sens de la plus grande pente, afin d'éviter le renversement des engins et les dégâts aux arbres. Cette installation peut entraîner des risques d'érosion. Ce risque peut être réduit en laissant des rémanents sur les cloisonnements ou en pratiquant des passages d'eau régulièrement (Richter et Durand, 2005 ; Pischedda, 2009).

Les cloisonnements sylvicoles et d'exploitation sont installés de manière parallèle. Pour un cloisonnement sylvicole une largeur de 2 m à 2,5 m est suffisante. Pour un cloisonnement d'exploitation, une largeur de 4 m est nécessaire et suffisante (ONF, 2009 ; Pischedda, 2009).

Le pas du cloisonnement est très variable selon le système d'exploitation en place et la sensibilité du sol. Les systèmes d'exploitation pour bois courts font appel à des abatteuses et à des porteurs, qui vont conditionner l'entraxe du cloisonnement en fonction de la portée de leur bras. Celui-ci sera donc réduit, aux alentours d'une vingtaine de mètres. Par contre, les systèmes bois longs font appel à des débusqueurs et à de l'abattage dirigé qui permettent un entraxe plus large. L'effet du tassement sur un cloisonnement n'est pas uniquement que vertical, mais aussi latéral (Lefèvre, communication personnelle 2009). Ce constat implique que sur sols sensibles, l'entraxe des cloisonnements d'exploitation doit être le plus large possible (40 m) afin de limiter au maximum les effets néfastes sur les peuplements. Ces conseils s'adressant aux gestionnaires de la forêt privée et publique, il est difficile d'imposer à l'un ce que préconise l'autre. Le choix est donc laissé aux gestionnaires, en faisant appel notamment au bon sens.

Les cloisonnements doivent être les plus rectilignes possible pour éviter les blessures aux arbres de part et d'autre. Cependant ils peuvent être légèrement sinueux afin d'éviter les zones sensibles : zones humides, sites archéologiques, arbres remarquables. Le tracé des cloisonnements anticipe ces obstacles afin de les contourner largement et permet ainsi d'éviter les virages trop serrés. De manière similaire les cloisonnements ne coupent jamais un cours d'eau : soit ils sont placés de manière parallèle à celui-ci tout en étant éloignés d'une dizaine de mètres, soit ils s'en approchent à la manière des arêtes d'un poisson sans pour autant l'atteindre (voir figure 21). A noter qu'il existe des kits pour le franchissement des cours d'eau, de type tuyaux en PEHD ou passerelle métallique.

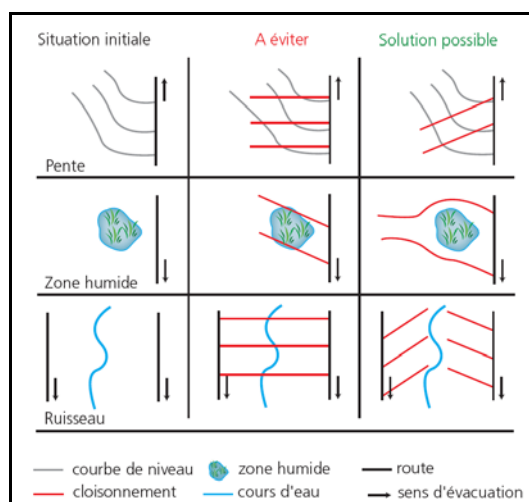


FIGURE 21 : exemples à suivre et à ne pas suivre.

Source : PROSOL, d'après De Paul et Bailly/Forêt Wallone

Les sols des cloisonnements sont sensibles au même titre que ceux de la parcelle. Même s'ils s'usent du fait de la circulation des engins, ils doivent être le plus possible pérennes afin d'éviter l'ouverture de nouvelles voies de vidange. De ce fait, la circulation des engins sur ces derniers ne doit se faire que lorsqu'ils sont praticables. Ce qui veut dire qu'en cas d'impraticabilité, la pénétration d'engins en forêt est interdite. Des moyens existent pour assurer leur protection, notamment par le biais de la pose d'une couche de rémanents (de 30 à 70 centimètres d'épaisseur selon les auteurs). Cette pose des rémanents implique un abattage directionnel des houppiers vers les cloisonnements. Par ailleurs, si les rémanents sont fins dans le cas des résineux, le risque de poinçonnement du sol est élevé avec des rémanents de feuillus : le diamètre de ces derniers ne doit pas dépasser 8 centimètres. Ce genre de pratique est surtout possible dans les premières éclaircies feuillues, mais peut être développé avec la mécanisation dans ces types de peuplements (Diaz, 1999 ; Richter et Durand, 2005 ; Pischedda *et al.*, 2009).

Les arbres bordant les cloisonnements sont à protéger des manœuvres de débardage. Des solutions existent : butées de renvoi, manchons de protection ou encore souches hautes permettent de protéger les arbres particulièrement exposés (Christian Apffel, communication personnelle, 2008), notamment en sortie de cloisonnement (voir figure 22). L'utilisation d'un sabot de débardage permet de limiter la casse au niveau des souches d'arbres et des racines apparentes (Bartoli, 2005 ; Pischedda *et al.*, 2009).

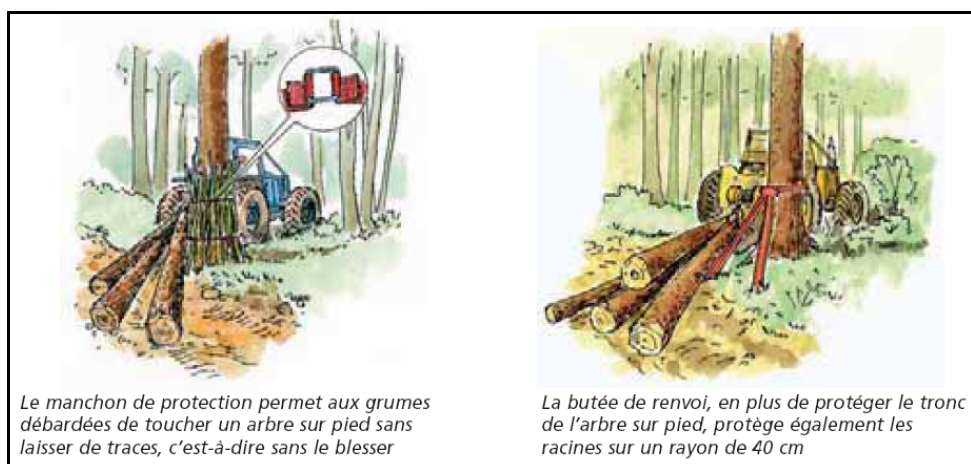


FIGURE 22 : systèmes de protection des arbres en bordure de cloisonnement.

Source : PROSOL d'après Deruelles/ONF

La prise en compte des paysages se fait de manière à limiter l'impact visuel des cloisonnements. Les entrées de cloisonnement peuvent ainsi être courbes (cf. arêtes de poissons) ou être masquées par un rideau d'arbre. Les cloisonnements peuvent être décalés, de manière à supprimer les effets de créneaux (Pischedda *et al.*, 2009).

Comme évoqué précédemment, les cloisonnements doivent être praticables pour que les engins forestiers puissent circuler. Tout travail faisant appel à la mécanisation ne peut débuter que lorsque les sols sont secs ou correctement ressuyés. C'est au gestionnaire de donner son accord à l'exploitant ou au débardeur. En cours de chantier, l'Agence ONF Haute Marne (2008b) propose deux seuils visuels pour la déformation maximale acceptable sur les cloisonnements. Le dépassement de ces seuils entraîne l'interruption du chantier :

- pour les sols les plus sensibles, ce seuil correspond à la marque du cran de la roue ou de la tuile d'une chenille sans que soit visible le reste du pneu ou de la chenille. Si ce repère est dépassé, le chantier est arrêté.

- pour les autres types de sol, ce seuil correspond à un enfoncement maximal du sol sur 10 centimètres en référence du niveau de sol non perturbé. Au-delà de ce seuil, le chantier est arrêté.

Pour finir, les cloisonnements sont des installations pérennes. Il faut donc bien raisonner leur implantation et leur matérialisation pour les futurs utilisateurs.

- Choix du système d'exploitation

Selon Venet (1956), l'organisation des chantiers d'exploitation est « le problème le plus difficile » de l'exploitation forestière. Plus de 40 ans après, ce problème reste toujours d'actualité. Dans le cadre de la sensibilité des sols forestiers au tassement, Lewin *et al.* (2004) démontrent l'importance de l'organisation du chantier pour optimiser les déplacements des engins et réduire ainsi les impacts au sol. Cacot (2008) démontre l'efficacité de la rencontre préalable entre les différents intervenants, en terme de d'organisation des opérations et du savoir faire des différents opérateurs. Richter (1999) souligne le fait que la préservation des sols et la prévention des dégâts passe par l'organisation du chantier et l'adaptation du matériel d'exploitation. Des outils existent d'ailleurs pour permettre au gestionnaire d'organiser au mieux le chantier, notamment le guide de gestion environnementale des chantiers forestiers « Laissez une bonne impression » (Cacot, 2003).

Il est important de souligner que les machines forestières peuvent être équipées d'accessoires qui permettent d'augmenter l'adhérence des machines et diminuer leur pression au sol. Ainsi l'utilisation de pneus larges ou de tracks pour les porteurs permet de diminuer fortement la pression exercée au sol à condition de ne pas surcharger ces engins (Bygden *et al.*, 2003 ; De Paul et Bailly, 2005c ; Pischedda, 2008, Pischedda *et al.*, 2009). A noter qu'il existe des tracks spécialement conçus pour limiter la pression et travailler ainsi sur sols humides. Il est également possible d'équiper les pneus des débardeurs de chaînes, afin d'accroître leur adhérence (Pischedda *et al.*, 2009), notamment en terrain argileux. Cependant, les chaînes peuvent provoquer des blessures sur les racines ou les souches des arbres, ou encore des dégâts sur les pistes et routes forestières. Les abatteuses sont quant à elles équipées généralement de pneus au profil beaucoup moins agressif ou de chenilles, puisque l'effort à fournir n'est pas le même (De Paul et Bailly, 2005c). Les câbles des débusqueurs, traditionnellement métalliques, peuvent être remplacés par des câbles synthétiques. L'utilisation d'un câble synthétique, par rapport à un câble métallique, permet pour l'opérateur une plus grande facilité de manipulation (allègement du poids) ainsi qu'une diminution du risque de blessure (présence de barbes métalliques ou coup de fouet en cas de cassure).

Ces tableaux d'aide au choix des systèmes d'exploitation font également appel aux systèmes combinés (voir tableaux 9 à 12). En situation de sols sensibles, l'utilisation de systèmes combinés est une autre solution qui permet la préservation des sols forestiers et la pérennisation des cloisonnements d'exploitation (Pischedda 2008). Ces systèmes font appel à des méthodes d'abattage/façonnage, de débusquage et de débardage complémentaire. Typiquement on peut retrouver :

- abattage manuel, débusquage par traction animale, avec reprise par porteur des bois disposés en bordure des cloisonnements (cas de réalisation en 2009 en forêt domaniale de Moyeuve) ;
- abattage manuel et débusquage au Raup Trac, puis reprise par porteur (cas de réalisation en 2009 en forêt domaniale de Grammont).

Il est ainsi possible d'exploiter une parcelle sensible en situation défavorable et de débusquer les bois en simultané. L'opération de débardage se produit lorsque les sols sont correctement ressuyés, secs ou gelés.

Une synthèse de ces 4 tableaux d'aide figure en annexe 10.

o Sols praticables toute l'année avec peu de précautions

TABEAU 9 : grille d'aide au choix du système d'exploitation pour les sols praticables toute l'année avec peu de précautions

		Abattage et débus-quage	Abattage / façonnage manuel	Abattage / façonnage mécanisé	Traction animale	Chenillards	
		Débardage				< 1 tonne	1-2 tonnes
Chenillards	Traction animale		○○○				
	< 1 tonne		○				
	1-2 tonnes		 	 			
	> 2 tonnes		  	 	 		   *
Câbles	Lasso (zig-zag)		○	○	○	○	
	Mât		○○○	○○○	○○○	○	○○○*
Porteurs	≤ 10 tonnes + tracks		  	 	 		   *
	> 10 tonnes + tracks		  	 	 		   *
	≤ 10 tonnes		○○○	○○○	○○○	○	○○○*
	> 10 tonnes		  	 	 		   *
Débusqueurs	Câble ≤ 5 tonnes		○○○	○○○	○○○	○	○○○*
	Câble > 5 tonnes		  	 	 		   *
	Pince ou grue > 5 tonnes		  	 	○○○	○	○○○*
Légende :		Techniquement possible, mais doit être occasionnel (perte de rentabilité). *	PB / BM / GB ○○○	Autorisé Autorisé sous certaines conditions Non autorisé		Sol sec ou gelé Sol frais Sol humide	

Points importants à prendre en compte :

- 1) : *Attention en situation de pente* : risques d'érosion. De par leur configuration, les engins équipés de chenilles ou de tracks circulent dans le sens de la pente. Les chenilles peuvent potentiellement scalper le sol, entraînant alors un phénomène d'érosion en cas d'intempéries.
Pas de contre indication sur terrain plat.
- 2) : *Sur sols humides* : attention à la charge du porteur. Il faut limiter celle-ci en la réduisant de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
L'utilisation de pneus larges pour augmenter la portance et limiter ainsi la pression au sol peut être envisagée, à condition de ne pas augmenter la charge de l'engin.
- 3) : *Sur sols humides* : attention à la charge, risque de dégâts si trop humide.

Exemple de lecture : la traction animale pour le débusquage, combinée avec un porteur > à 6 t, est autorisée pour les PB et les BM, sauf en situation de sols humides où certaines précautions doivent être prises (utilisation de pneus larges et diminution de la charge de l'engin).

Pour les sols praticables toute l'année (voir tableau 10), tous les systèmes d'exploitation du tableau sont autorisés, avec la mise en œuvre de dispositifs spéciaux pour certains d'entre eux. En effet, ce type de sols est présent dans les Vosges, où se rajoutent les contraintes de la pente associées aux risques d'érosion. À noter par ailleurs que dans ce département est soumis à la problématique de la neige qui bloque une partie des exploitations en hiver.

On notera que si le débardage par câble est possible pour les différents états d'humidité du sol, l'utilisation de celui-ci ne pourrait se justifier que dans des situations vraiment particulières. Une exploitation par câble peut ainsi s'envisager pour une coupe de GB ayant lieu dans un périmètre rapproché de captage d'eau où l'on cherche à minimiser toutes formes de pollutions (cas de l'exploitation à Masevaux en Alsace, suite à un micro chablis dans une zone de captage d'eau alimentant le village). En situation normale, on lui préférera des méthodes plus traditionnelles.

o Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions

TABEAU 10 : grille d'aide au choix du système d'exploitation pour les sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions

		Abattage et débuis-quage	Abattage / façonnage manuel	Abattage / façonnage mécanisé	Traction animale	Chenillard	
		Débardage				< 1 tonne	1-2 tonnes
Chenillards	Traction animale		○ ○				
	< 1 tonne		○				
	1-2 tonnes		○ ○	● ●			
	> 2 tonnes		○ ○ ● *	● ●	○ ○	○	○ ○ ● *
Câbles	Lasso (zig-zag)		○	●	○	○	○
	Mât		○ ○ ○	○ ○	○ ○	○	○ ○ ● *
Porteurs	≤ 10 tonnes + tracks		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *
	> 10 tonnes + tracks		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *
	≤ 10 tonnes		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *
	> 10 tonnes		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *
Débusqueurs	Câble ≤ 5 tonnes		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *
	Câble > 5 tonnes		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *
	Pince ou grue > 5 tonnes		● ● ●	● ●	● ●	●	● ● ● *

7)

Légende :	* Techniquement possible, mais doit être occasionnel (perte de rentabilité).	PB / BM / GB ○ ○ ○		Autorisé	Sol sec ou gelé  Sol frais Sol humide
				Autorisé sous certaines conditions	
				Non autorisé	

Points importants à prendre en compte :

- 1) : *Sur sols frais* : attention à la charge du porteur. Il faut limiter celle-ci, en la réduisant de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
L'utilisation de pneus larges pour augmenter la portance et limiter ainsi la pression au sol peut être envisagée, à condition de ne pas augmenter la charge de l'engin.
- 2) : *Sur sols frais* : attention, un petit débusqueur peut patiner s'il tracte une charge trop lourde (GB) pouvant ainsi provoquer des dégâts. Ne pas hésiter à équiper les pneus de chaînes afin de renforcer l'adhérence, tout en prenant garde aux dégâts qui peuvent être causés sur les racines, les pieds d'arbres, les pistes et les routes.
- 3) : *Sur sols frais* : attention à la répétition des passages. Protéger par des rémanents les zones les plus circulées (bas de pente, approche de fossés, sortie de parcelle, arrivée à la place de dépôt, ...).
- 4) : *Sur sols humides* : attention, risque de patinage en débardant des GB.
- 5) : *Sur sols humides* : attention, risque de patinage pour le débusquage des GB.
- 6) : *Sur sols humides* : attention à la charge du porteur. Réduire celle-ci de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
Attention à la répétition des passages. Protéger les zones les plus circulées par des rémanents (bas de pente, approche de fossés, sortie de parcelle, arrivée à la place de dépôt, ...).
- 7) : *Sur sols humides* : pas d'abattage mécanisé puisque la circulation n'est pas permise pour les porteurs.

Exemple de lecture : un débusqueur à câble supérieur à 5 tonnes peut débarder sans problème en situation de sol sec ou gelé derrière du bûcheronnage manuel (il utilise son câble pour le débusquage). En situation de sols frais, l'opération est toujours possible à condition de bien rationaliser les déplacements et de protéger les zones de fortement circulée (sortie de parcelle par exemple). En situation de sol humide, l'utilisation du débusqueur n'est plus autorisée.

Pour les sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (voir tableau 11), tous les systèmes d'exploitation sont possibles sur sols secs ou gelés. Un sol humide oblige à la prise de précautions particulière : limitation des charges et des passages, équipement des pneus des débusqueurs par des chaînes. Les chenillards et les petits porteurs équipés de tracks sont les seules méthodes de débardages autorisées sur sols humides.

Il est possible d'envisager une segmentation des opérations en réalisant le débusquage dans un premier temps avec des méthodes alternatives, et un débardage ultérieur lorsque les conditions seront plus favorables à la circulation d'engins.

De manière similaire aux sols praticables toute l'année avec peu de précautions, l'utilisation du câble ne se fera que dans les situations où il n'y a pas d'autre alternative possible.

o Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année

TABEAU 11 : grille d'aide au choix du système d'exploitation pour les sols très sensibles et impraticables une partie de l'année

		Abattage et débus-quage	Abattage / façonnage manuel	Abattage / façonnage mécanisé	Traction animale	Chenillard	
		Débardage				< 1 tonne	1-2 tonnes
Chenillards	Traction animale		○ ○				
	< 1 tonne		○				
	1-2 tonnes		○ ○	■ ■			
	> 2 tonnes		■ ■ ■ *	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
Câbles	Lasso (zig-zag)		○	■	○	○	○
	Mât		○ ○ ○	■ ■	○ ○	○	○ ○ ■ *
Porteurs	≤ 10 tonnes + tracks		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
	> 10 tonnes + tracks		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
	≤ 10 tonnes		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
	> 10 tonnes		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
Débusqueurs	Câble ≤ 5 tonnes		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
	Câble > 5 tonnes		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *
	Pince ou grue > 5 tonnes		■ ■ ■	■ ■	■ ■	■	■ ■ ■ *

3)

Légende :	* Techniquement possible, mais doit être occasionnel (perte de rentabilité).	PB / BM / GB ○ ○ ○	 Autorisé	Sol sec ou gelé Sol frais Sol humide
			 Autorisé sous certaines conditions	
			 Non autorisé	

4)

1)

2)

Points importants à prendre en compte :

- 1) : *Sur sol sec ou gelé* : Attention à la charge du porteur. Il faut limiter celle-ci en la réduisant de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération). Attention à la répétition des passages. Protéger les zones les plus circulées par des rémanents (bas de pente, approche de fossés, sortie de parcelle, arrivée à la place de dépôt, ...).
- 2) : *Sur sols frais* : attention à la charge. Limiter le débardage de GB à des coupes de faible volume ou des petits chablis.
- 3) : *Sur sol frais* : pas d'abattage mécanisé puisque la circulation n'est pas permise pour les porteurs.
- 4) : *Sur sol humide* : l'utilisation d'un chenillard supérieur à 2 tonnes peut s'avérer limite en situation trop humide.

Exemple de lecture : un petit porteur (≤ 6 t) équipé de tracks peut débarder des bois débusqués par un chenillard de type Raup Trac (1-2 t) lorsque le sol est sec ou gelé, et frais. Cette opération est impossible en situation de sol humide.

Pour les sols très sensibles et impraticables toute l'année (voir tableau 12), les opérations de débardage sont possibles en situation de sols secs ou gelés, et sous certaines conditions : limitation de la charge des porteurs non équipés de tracks. En situation de sols frais, seuls les petits engins traditionnels (porteur équipé de tracks ≤ 6 t, débusqueur à câble ≤ 5 t) sont autorisés, en complément des méthodes alternatives (câble et chenillards). Ce sont sur ce type de sols que les méthodes alternatives trouvent toute leur justification puisqu'elles permettent un débusquage et un débardage des bois dans toutes les situations d'état d'humidité du sol (en prenant garde cependant aux chenillards supérieurs à 2 tonnes qui peuvent s'avérer limites en situation vraiment trop humide) (Durand et Richter *et al.*, 2003, Bartoli, 2006 ; Felder, 2007 ; Pischedda *et al.*, 2008).

o Sols très sensibles et impraticables toute l'année

TABEAU 12 : grille d'aide au choix du système d'exploitation pour les sols très sensibles et impraticables toute l'année

		Abattage et débus-quage	Abattage / façonnage manuel	Abattage / façonnage mécanisé	Traction animale	Chenillard	
		Débardage				< 1 tonne	1-2 tonnes
Chenillards	Traction animale						
	< 1 tonne						
	1-2 tonnes						
Câbles	> 2 tonnes						
	Lasso (zig-zag)						
	Mât						*
Porteurs	≤ 10 tonnes + tracks						
	> 10 tonnes + tracks						
	≤ 10 tonnes						
	> 10 tonnes						
Débusqueurs	Câble ≤ 5 tonnes						
	Câble > 5 tonnes						
	Pince ou grue > 5 tonnes						

Légende :	* Techniquement possible, mais doit être occasionnel (perte de rentabilité).	PB / BM / GB 		Autorisé
				Autorisé sous certaines conditions
				Non autorisé

Point important à prendre en compte :

* : L'utilisation de chenillards < à 2 tonnes peut s'avérer limite en situation vraiment engorgée.

Exemple de lecture : un chenillard inférieur à 2 tonnes peut débarder et débusquer des bois abattus par des bûcherons, en prenant garde aux zones vraiment engorgées.

Pour les sols très sensibles et impraticables toute l'année, le câble mât est la solution permettant le débardage des bois. Les petits chenillards peuvent s'avérer limites en situation vraiment engorgée. La traction animale n'est pas recommandée car dans ce genre de situation elle entraînerait une trop grande pénibilité pour l'animal. Les risques de blessures sont également fort probables.

Ces milieux peuvent présenter des faciès très différents. Il convient alors de raisonner le choix du système d'exploitation au cas par cas.

o Discussion

Ces 4 tableaux ne sont pas figés. Leur construction est basée sur les connaissances actuelles. Ces tableaux mettent en avant l'importance des systèmes alternatifs. En effet ces systèmes permettent une exploitation forestière respectueuse des sols forestiers, quelles que soient les conditions d'humidité de ces derniers. Cependant, ces systèmes sont encore trop peu nombreux et trop développés, la majorité des ETF travaillant avec des engins classiques de type débusqueur ou porteur, y compris sur sols sensibles. Un parallèle peut être effectué avec l'étude de l'AFOCEL datant de 2006 sur le parc de machines forestières en Lorraine (Cuchet *et al.*, 2006) qui donne les chiffres suivants :

- 50 machines de bûcheronnage ;
- 97 porteurs ;
- 141 débusqueurs.

Le poids des engins n'est pas précisé, mais on remarque que le nombre d'engins est assez important en regard du pourcentage de sols potentiellement très sensibles et impraticables une partie de l'année.

De plus, il serait utopique de vouloir "révolutionner" les pratiques sur sols sensibles par la mise au rebut du parc de matériel classique et l'investissement dans les systèmes alternatifs. Il est donc important de pouvoir continuer à travailler avec les systèmes classiques actuels, notamment sur sols sensibles qui correspondent bien souvent à des zones à fort enjeu de production. Travailler avec ces systèmes classiques est possible sur sols sensibles à condition d'organiser au mieux les chantiers :

- redévelopper le débusquage des grumes à l'aide du câble des débusqueurs, en utilisant des câbles synthétiques. Cette technique, qui n'est plus pratiquée qu'en montagne, a disparu en plaine faute d'acteurs (Pischedda, communication personnelle 2009) ;
- apprendre à travailler ensemble afin de combiner plusieurs systèmes et être souple du point de vue de l'organisation du matériel. Ceci implique une organisation rigoureuse et réfléchie du chantier ;
- circuler uniquement sur cloisonnements et lorsque ceux-ci sont praticables, en veillant bien à ne pas multiplier les passages sur une même zone ;
- gérer les coupes en fonction de la météo et disposer de bases de replis sur des zones moins sensibles. Procéder au débusquage / débardage des coupes lorsque les conditions météorologiques le permettent.

L'étude de l'AFOCEL va dans ce sens en précisant que les porteurs sont de plus en plus équipés pour les sols sensibles (recours au tracks, augmentation du nombre d'essieux). Il est également intéressant de souligner le développement du débusqueur à grue plus grappin, qui permet un débusquage depuis les cloisonnements lorsque l'abattage est réalisé de manière directionnelle (pratique courante en Allemagne selon les mêmes auteurs, où la circulation hors des cloisonnements est interdite).

Il serait intéressant que la prochaine étude (prévue en 2011) puisse prendre en compte l'apparition des méthodes alternatives.

Ces tableaux indiquent des niveaux d'autorisation établis pour un minimum de dégâts. Là également les tableaux ne sont pas figés et n'ont qu'un but informatif. C'est au gestionnaire de se poser la question du niveau de dégâts qu'il est prêt à accepter et de suivre ou non les recommandations des tableaux.

Une piste d'amélioration de ces tableaux serait la prise en compte des considérations économiques : prix d'achat, rendement, coût horaires, volumes débusquables ou débardables, etc. Ces aspects seraient à croiser en fonction des types de matériels afin d'affiner le choix du gestionnaire. Ce qui implique une étude sur les caractéristiques techniques de chaque type de matériel. Des articles existent sur la question : Cuchet *et al.* (2006), Mederski (2006), Bruciamacchie *et al.* (2008). Ces aspects n'ont pas été traités car ne faisant pas partie des objectifs du stage.

Une autre piste d'amélioration est la prise en compte des aspects dynamiques tel que le ressuyage des sols. Un essai de prise en compte de ce phénomène a déjà été pratiqué en forêt domaniale de la Reine (Rouyer, 2007), mais n'a pu être appliqué au stage. Il serait intéressant d'avoir une probabilité de l'état hydrique des sols pour chaque classe de sensibilité, l'idéal étant de pouvoir le décliner par région IFN, afin que le gestionnaire puisse disposer de fenêtres de praticabilité.

IV.4.2.3. Autres éléments à prendre en compte

D'autres opérations en forêt font également appel à la mécanisation ou à la pénétration d'engins en forêt, telles que la mobilisation du bois énergie, les travaux sylvicoles ou encore le bois de chauffage. Ces opérations ne figurent pas dans les tableaux d'aide au choix du système d'exploitation. Il s'agit d'un choix délibéré dû à la volonté de se concentrer avant tout sur l'exploitation des bois d'œuvre et d'industrie. Cependant ces éléments ont été abordés lors de diverses discussions. Voici donc quelques pistes de réflexion pour accompagner la prise en compte de ces opérations en forêt.

- Récolte du bois énergie

La récolte du bois énergie peut faire appel à des machines intervenant directement en forêt afin de transformer directement le bois en plaquettes forestières (ONF Lorraine, 2008 et CRPF NPdC-Picardie, 2007). Ces machines doivent être soumises à la même règle de circulation que les autres engins forestiers en forêt, c'est-à-dire la limitation aux seuls cloisonnements lorsqu'ils sont praticables. Le bois énergie peut nécessiter un séchage préalable des rémanents d'exploitation, ce qui implique qu'ils peuvent être récupérés lorsque les conditions sont les plus favorables du point de vue des sols : fin du printemps, fin de l'été.

- Travaux sylvicoles

La circulation des engins pratiquant les travaux sylvicoles de manière mécanisée se fait sur les cloisonnements du même nom. De manière identique aux cloisonnements d'exploitation ces cloisonnements sylvicoles doivent être préservés à tout prix pour prévenir l'apparition de dégâts qui compromettraient leur utilisation. De plus dans la vie d'un peuplement, un cloisonnement sylvicole peut devenir un cloisonnement d'exploitation, ce qui renforce encore une fois l'intérêt de sa préservation.

- Travail en régie dans le cadre de l'ONF

Les opérations menées en régie doivent faire l'objet de la même attention que celles pratiquées par des prestataires privés.

- Le bois de chauffage

La pratique du bois de chauffage est une coutume ancestrale en France. Le développement de la mécanisation aidant, cette pratique amène de plus en plus ses pratiquants à pénétrer dans les parcelles avec des engins. Il est devenu en effet beaucoup plus pratique de fendre son bois directement en forêt et à l'aide d'une fendeuse montée derrière le tracteur. Toutes les catégories de tracteurs se retrouvent en forêt, certains étant beaucoup plus lourds que d'autres. Ces pratiques produisent un effet négatif sur les sols, surtout sensibles et dans des conditions climatiques défavorables. Or ces opérations ont généralement lieu l'hiver, ce qui peut poser un certain nombre de problèmes quant à l'état hydrique du sol et de sa sensibilité. De manière identique aux travaux sylvicoles, la circulation sur ceux-ci doit donc se faire lorsque les sols sont parfaitement ressuyés et portants.

V. CONCLUSION

Le tassement des sols forestiers est un sujet à la fois vaste et complexe. Cette complexité est liée à sa formation ainsi qu'au milieu qu'il supporte. De nombreux paramètres interviennent et sont à prendre en compte : les caractéristiques intrinsèques des sols forestiers, les conditions climatiques difficilement appréhendables en l'état, l'impact de l'Homme et de la mécanisation des exploitations et travaux en forêt. Dégrader les sols forestiers revient à impacter l'écosystème forestier dans sa globalité.

- Principaux résultats du stage

Le stage a permis l'élaboration d'une carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement à l'échelle de la région Lorraine, selon une méthode innovante qui applique les critères de diagnostic de la sensibilité potentielle d'un sol forestier au tassement, issus du guide PROSOL, aux données pédologiques de l'IFN. Il s'agit de la première réalisation de ce type et à cette échelle en France. Le pas de celle-ci est kilométrique, ce qui implique son utilisation de manière globale à l'échelle de la région administrative ou des régions IFN. Elle ne peut aucunement être utilisée localement. Cette carte est utilisable tant en forêt privée qu'en forêt publique. La méthodologie ayant permis sa construction est généralisable à l'échelle de la France entière, sous réserve d'acquisition des données IFN et d'une utilisation raisonnée de la macro position de l'ENGREF. Il est également nécessaire d'étendre aux autres types de sol, non présents dans le cas lorrain, la classification PROSOL qui permet d'appréhender le type d'engorgement.

La carte permet d'obtenir une estimation des surfaces représentées par chaque classe de sensibilité au sein de chaque région IFN. Cette information permet l'identification à une échelle macro de zones plus sensibles que d'autres. Il est important de souligner que les zones qui sont apparemment les moins sensibles du point de vue du tassement (classe 1 dans les Vosges) le sont à d'autres phénomènes tels que l'érosion liée à la pente, la neige en hiver ou encore l'acidification.

La carte a été validée dans son ensemble par les experts lorrains des sols forestiers : à cette échelle, elle est considérée comme représentative de la réalité. Cependant, cette validation a également été l'occasion de mettre en avant certaines incohérences avec la réalité connue. Ces incohérences ont été soulignées. Elles sont essentiellement le fruit d'une sensibilité des seuils utilisés pour la classification. L'utilisation de variables explicatives telle que la géologie sera l'occasion de les préciser.

Il en résulte un outil d'aide à la décision déclinable pour plusieurs utilisateurs. Les décideurs trouveront là un outil politique leur permettant d'orienter leurs actions. L'aménagiste ou le rédacteur de PSG possédera une information quant à la sensibilité potentielle de la forêt à aménager. Cette sensibilité pourra faire l'objet d'une étude approfondie ou non selon l'enjeu de sensibilité identifié. Les bureaux d'études auront un allié indispensable dans le cadre des études portant sur la mobilisation du bois en général, et du bois énergie en particulier. Cette carte sera un appui essentiel dans la définition des stratégies de mobilisation et d'approvisionnement de la ressource. Enfin le gestionnaire y trouvera en complément un protocole pour le diagnostic de la sensibilité de la forêt dont il a la charge. Il est important de rappeler l'importance de la prise de donnée brute, dans le cadre de ce diagnostic, qui permet un traitement plus complet de l'information, notamment sous SIG. Ce diagnostic est complété par une aide au choix du système d'exploitation, en fonction de la sensibilité potentielle identifiée et de l'état d'humidité du sol. On soulignera ainsi l'importance des cloisonnements qui sont la première réponse à la problématique du tassement des sols forestiers. Il est important que la circulation des engins en forêt ne se fasse que sur ceux-ci et uniquement lorsqu'ils sont praticables. Les systèmes alternatifs trouvent toute leur justification dans les cas de sols les plus sensibles. Sont également rassemblés les différents conseils à mettre en œuvre afin de s'assurer un déroulement des chantiers d'exploitation et des travaux sylvicoles de la manière la plus respectueuse des sols possible.

- Perspectives

Il est possible de pouvoir améliorer localement la carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement. La piste de la géologie en tant que variable explicative est à approfondir et permettrait ainsi d'abaisser la résolution de la carte au pas de 50 m dans le cas la Lorraine. D'autres données sont également disponibles, telles que les cartes de stations ou les cartes pédologiques à des échelles variées. Cependant leur utilisation ne permettra pas d'améliorer la carte dans son ensemble. Ne couvrant pas la totalité de la surface d'étude, elles ne permettront que de préciser très localement la carte (carte des stations) ou de l'améliorer sur de plus larges échelles (cas des cartes pédologiques).

L'utilisation de ces informations peut se faire en se rapprochant des stages Haute Marne et Picardie où des cartes respectivement de stations et pédologiques ont été utilisées pour cartographier la sensibilité des sols forestiers des forêts haute-marnaises ou des massifs emblématiques picards.

Ces informations complémentaires seront aussi l'occasion de pouvoir affiner et éclaircir les zones limites qui ont été révélées par la validation de la carte. Une évolution de la classification pourrait être également être envisagée. Là encore, il est possible de se rapprocher des résultats du stage en Picardie, où la classe de sensibilité 3 a été subdivisée selon différents critères afin de caractériser la sensibilité des sols de la manière la plus proche possible du terrain. Il est important de souligner que la classification de PROSOL n'a pas été établie par ses auteurs dans une optique cartographique. Une évolution des critères de diagnostic PROSOL peut être envisagée dans cette optique afin de caractériser au mieux la sensibilité potentielle d'un sol (distinction entre argiles marneuses et les argiles de décarbonatation, distinction plus fine de la classe 3).

Ces améliorations ne peuvent être étendues à l'ensemble de la France, faute de données de ce type disponibles sur l'ensemble du territoire national. Néanmoins, si des données permettant d'affiner la carte sont disponibles il sera judicieux de procéder à leur exploitation.

Des recherches sont en cours pour étudier l'impact du tassement sur l'écosystème forestier, comme dans le cadre de GESSOL mené conjointement par l'INRA et l'ONF (Brethes *et al.* 2008). De plus, la présente étude a fait ressentir le besoin de la prise en compte du ressuyage des sols forestiers. Le développement d'un modèle de ressuyage permettra d'appréhender les variations d'humidité au cours de l'année, sur une base théorique (données climatiques), ou à plus long terme dans une logique de prévision comme c'est déjà le cas en agronomie. Ce point fait l'objet d'un programme déposé par l'INRA auprès de l'ANR (SYSTERRA).

La prise en compte des aspects dynamiques sera aussi l'occasion de compléter et d'affiner les aides au choix du système d'exploitation. Cette amélioration passe également par un croisement avec des données économiques et techniques. Cette aide pourra également être plus approfondie pour les systèmes de récolte du bois énergie.

Dans le cadre du projet 8 PEFC, l'élaboration d'une carte des risques à l'érosion, qui sera croisée avec les cartes de sensibilités physique et chimique permettra :

- une évaluation des disponibilités de la ressource et des possibilités de mobilisation dans le cadre d'une gestion respectueuse des sols (croisement avec les couches IFN des types et âges de peuplement pour la disponibilité brute, et avec le schéma de desserte et les courbes de niveaux pour la mobilisation) ;
- une priorisation des zones sur lesquelles une intensification de la collecte des rémanents est possible.

La démarche du projet sera poursuivie par la rédaction d'un guide accompagnant les cartes et qui abordera :

- les règles d'utilisation de ces dernières ;
- les méthodes de travail tant au niveau de la programmation que de la gestion quotidienne ;
- les protocoles terrain ;
- les éventuels outils adaptés à chaque situation.

Il a également été évoqué l'idée d'inclure le protocole de diagnostic de la sensibilité des sols au tassement dans le futur guide de station du Plateau Lorrain, dont la pré-étude est assurée en ce moment par le CRPF Lorraine-Alsace.

La symbolique couleur utilisée pour la carte présentée dans le rapport (voir Annexe 11) devra être amenée à évoluer de manière à être visuellement plus neutre, et ce, d'un simple point de vue communication. Il pourrait être intéressant de se rapprocher de la symbolique utilisée par le guide PROSOL pour la version de la carte qui sera diffusée dans le cadre du projet 8 PEFC.

Des actions sont également à développer et à en mettre en œuvre du point de vue de la formation et de la sensibilisation des personnes. Il est important que les usagers forestiers (gestionnaires, mais aussi exploitants ou membre des industries de transformation) se sentent concernés et soit impliqués dans la prise en compte de cette problématique du tassement des sols forestiers

Des actions sont certes à mener en forêt, mais également au niveau du reste de la filière bois. La reconstitution de stock de bois dans l'industrie de transformation, ce qui évite de travailler en flux tendus, permettra de ne pas avoir à exploiter la forêt par tout temps.

Références bibliographiques

ABEELS (J.). 1995 – Les engins en forêt – *La Forêt Wallonne*, n° 23, pp. 9-12.

AGROPARITECH ENGREF (UMR LERFOB) et INSTITUT FORESTIER NATIONAL. 2008a – *Carte du pH de surface des sols forestiers français*. – 1 p.

AGROPARITECH ENGREF (UMR LERFOB) et INSTITUT FORESTIER NATIONAL. 2008b – *Guide d'utilisation de la carte des pH des sols forestiers français*. – 25 p.

BAIZE (Denis) et JABIOL (Bernard). 1995 – *Guide pour la description des sols*. Paris : INRA. – 376 p.

BARTOLI (Michel). 2005 – Quelques techniques de protection des arbres lors des exploitations – *RenDez-Vous techniques*, n° 9, pp. 70-72.

BARTOLI (Michel), VUILLERMOZ (Morgan) et LAURENT (Valérie). 2006a – Le câble Zigzag : un outil de transport forestier original, simple et efficace. De la Suisse à la côte ouest des USA. – *RenDez-Vous techniques*, n° 12, pp. 5-8.

BARTOLI (Michel). 2006 – Le câble en France : évolution de la récolte par câble téléphérique (1998-2005). – *RenDez-Vous techniques*, n° 12, p. 9.

BARTOLI (Michel) et PISCHEDDA (Didier), CHAGNON (Jean-Luc). 2006 – *Pour une exploitation respectueuse des sols. Chantiers de démonstration*. – Rapport final DGFAR, 75 p.

BRETHES (Alain) (coord.) et RANGER (Jacques) (coord.). 2008 – *Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques*. – Projet GESSOL, volet forestier, 37 p.

BRUCIAMACCHIE (Max), COSTA (Sandrine) et IBANEZ (Lisette). 2008 – Analyse économique des coûts d'exploitation d'un chantier. – *RenDez-Vous techniques*, n° 19, pp. 43-49.

BYGDEN (Gunnar), ELIASSON (Lars) et WÄSTERLUND (Iwan). 2003 – Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. – *Journal of Terramechanics*, vol. 40, n° 4, pp.179-190.

CACOT (Emmanuel). 2001. – Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? – *Fiche Information Forêt*, n° 637, 6p.

CACOT (Emmanuel). 2003. – *Laissez une bonne impression ! Guide de gestion environnementale des chantiers forestiers*. AFOCEL, MAAPAR, CTBA, ONF, Entrepreneurs des Territoires, FNCOFOR, FNB, 7p.

CACOT (Emmanuel), CHARNET (François), RANGER (Jacques) et VIEBAN (Stéphane). 2004 – Impact du prélèvement des rémanents en forêt. – *Fiche Information Forêt*, n° 686, 6p.

CACOT (Emmanuel), PISCHEDDA (Didier). 2005 – Récolte des bois et respect du sol : un dialogue à développer entre les acteurs. – *RenDez-Vous techniques*, n° 8, pp. 36-43.

CACOT (Emmanuel) (Coord.), 2006 – *Observatoire des bonnes pratiques environnementales en exploitation forestière*. Convention DGFAR/AFOCEL no 61.54.80.41/04. Rapport final, AFOCEL, 48 p. + annexes.

CACOT (Emmanuel), CHARNET (François), EISNER (Nicolas), LEON (Pascal), RANTIEN (Caroline) et RANGER (Jacques). 2006 – *La récolte raisonnée des rémanents en forêt*. Angers : ADEME, 36 p.

CACOT (Emmanuel) et PEUCH (David). 2006 – Observatoire des impacts de l'exploitation forestière. – *Fiche Information Forêt*, n° 733, 6p.

CACOT (Emmanuel). 2008a – Observatoire des impacts de l'exploitation forestière. – *RenDez-Vous techniques*, n° 19, pp. 26-29.

CACOT (Emmanuel). 2008b – Organisation des chantiers d'exploitation forestière « traditionnels ». – *RenDez-Vous techniques*, 2008, n° 19, pp. 30-33.

CENTRE RÉGIONAL DE LA PROPRIÉTÉ FORESTIÈRE NORD-PAS-DE-CALAIS–PICARDIE. 2007 – *Bois énergie, un gisement durable*. Amiens : CRPF Nord Pas-de-Calais Picardie, 20 p.

CLUZEAU (Catherine). 2001 - *Aide à l'utilisation des données dendro-écologiques de l'Inventaire Forestier National*. Nancy : Échelon Interrégional de l'IFN, 22p.

CUCHET (Emmanuel). 2006 – *Évolution de la mécanisation en France et en Lorraine*. Journée d'échange du 10 mars 2006.

CUCHET (Emmanuel), MENDOW (Nancy) et PEUCH (David). 2006 – Parc de machines forestières du Limousin et de la Lorraine. – *Fiche Information Forêt*, n° 739, 6 p.

CUCHET (Emmanuel), LOPPIN (Julien), MENDOW (Nancy), BANET (Christian) et HELIOT (Pascale). 2006 – *Exploitation forestière et débardage : préservation des sols et rentabilité économique des chantiers*. Conventions AFOCEL C-05297 et C-04169 ou Arrêté du 15 décembre 2005, DPR n° 4083-2004. Rapport, AFOCEL, 23 p. + annexes.

DELECOUR (François). 1987 – Carte des sols et praticabilité des terrains forestiers en Belgique. – *Pédologie*, vol. 37, n° 3, pp. 299-320.

DE PAUL (Marie-Amélie). 2005 – Quand le téléphérage s'installe en plaine. – *La Forêt Wallonne*, n° 76, pp. 16-22.

DE PAUL (Marie-Amélie) et BAILLY (Michel). 2005a – La compaction des sols forestiers : définition et principes du phénomène. – *La Forêt Wallonne*, n° 76, pp. 39-47.

DE PAUL (Marie-Amélie) et BAILLY (Michel). 2005b – Effets de la compaction des sols forestiers. – *La Forêt Wallonne*, n° 76, pp. 48-57.

DE PAUL (Marie-Amélie) et BAILLY (Michel). 2005c – À propos de la pression exercée par les pneus, chenilles et sabots. *La Forêt Wallonne*, n° 78, pp. 21-33.

DE PAUL (Marie-Amélie) et BAILLY (Michel). 2006 – Le débardage par téléphérage est-il vraiment trop coûteux ? *La Forêt Wallonne*, n° 84, pp. 16-29.

DIAZ (Sébastien). 1999 – *Comparaison de modalités de débardage en termes d'impacts au sol* - Nancy : ENGREF. – 40 p. (Rapport de stage).

DURAND (Philippe) (coord.), RICHTER (Claudine) (coord.), BARTOLI (Michel), LAMANDE (Mathieu), et LEFEVRE (Yves). 2003 – *L'effet de l'exploitation forestière sur les sols. Compte rendu des journées techniques des 22 et 23 mai 2003*. ONF, Direction Territoriale Lorraine, Service Patrimonial. – 14p.

FELDER (Christophe). 2007 – *L'utilisation de la petite mécanisation forestière dans le cadre d'une gestion durable des sols forestiers*. – Nancy : AgroParisTech ENGREF, DA filière bois. – 31 p. (Rapport de stage en entreprise).

GÉGOUT (Jean-Claude), BAILLY (Gilles) et JABIOL (Bernard). 2002 – *Banque de données phytoécologiques EcoPlant*. Dictionnaire des données, Version 5. Nancy : ENGREF, 35 p.

HERBAUTS (J.), EL BAYAD (J.) et GRUBER (W.). 1998 – L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation des sols : le cas des sols limoneux acides de la forêt de Soignes (Belgique). – *Revue Forestière Française*, vol. 50, n° 2, pp. 124-137.

HORN (R.), VOSSBRINK (J.) et BECKER (S.). 2004 – Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. – *Soil and Tillage Research*, n° 79, pp. 207-219.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. 1994 – *La forêt à la carte. Manuel du chef d'équipe*. IFN, 177 p. + annexes.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. 2007 – *Documentation relative aux données brutes « points-forêt »*. Campagne 2006. IFN, 38 p.

JABIOL (Bernard), RANGER (Jacques), RICHTER (Claudine). 2000 – Sol sensible ou résistant ? Éléments simples de diagnostic de la sensibilité à la dégradation chimique ou physique. – *La forêt privée*, n° 253, pp.30-46.

LAMANDE (Mathieu), RANGER (Jacques), LEFEVRE (Yves). 2005 – *Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols. Les dossiers forestiers n° 15*. Paris : ONF, 131 p.

LAURIER (Jean-Pierre). 2004 – L'évolution du bûcheronnage mécanisé en France. – *Fiche Information Forêt*, n° 700, 6p.

LEWIN (François), PEUCH (David). 2004 – Qualifier le cheminement des porteurs pour réduire les impacts sur l'environnement grâce à la technologie GPS. – *Fiche Information Forêt*, n° 697, 6 p.

LOYEN (Stéphane). 2005 – Régénération naturelle du hêtre en forêt de Soignes : impact de la compaction des sols – *RenDez-Vous techniques*, n° 8, pp. 44-47.

MATTHIES (Dietmar), ZIESAK (Martin) et KREMER (Johann). 2006 – Le logiciel Profor® : un outil de prévention pour juger de la praticabilité des sols lors de l'exploitation forestière. – *RenDez-Vous techniques*, n° 14, pp. 3-8.

MEDERSKI (Piotr S.). 2006 – A comparison of harvesting productivity and costs in thinning operations with and without midfield. – *Forest Ecology and Management*, n° 224, pp. 286-296.

MOREAU (Claire). 1993 – *L'impact de l'exploitation forestière sur les sols : analyse bibliographique*. Fontainebleau : ARMEF – AFOCEL, 32 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS. 2006a – *Directive Régionale d'Aménagement-Lorraine*. Paris : ONF, 187 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS. 2006b – *Schéma Régional d'Aménagement-Lorraine*. Paris : ONF, 187 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS. 2008 – *Règlement national d'exploitation forestière*. Paris : ONF, 52 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS. 2009 – *Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols*. Note de service, NdS-09-T-297, 6 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS HAUTE-MARNE. 2008a – *Plan d'action « gestion durable des sols » pour l'agence de la Haute-Marne*. 4 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS HAUTE-MARNE. 2008b – *Chantier d'exploitation : les pratiques à mettre en œuvre pour exploiter en respectant les sols. Guide technique*. 4 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS LORRAINE. 2006 – *En forêt des Hauts Bois (54) un débardage par câble téléphérique pour une exploitation forestière respectueuse des sols et des cours d'eau*. Communiqué de presse. ONF Lorraine, 4 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS LORRAINE. 2007 – *La politique en matière d'exportation des rémanents*. Directive d'application territoriale, 4p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS LORRAINE. 2008 – *Que faire des rémanents ?* ONF Lorraine, 2 p.

PIEDALLU (Christian). 2004 – *Description de la macro « Positopo 2 »*. 2 p.

PISCHEDDA (Didier), BARTOLI (Michel) et CHAGNON (Jean-Luc). 2008 – Pour une exploitation respectueuse des sols, des systèmes complémentaires existent. *RenDez-Vous techniques*, n° 19, pp. 34-42.

PISCHEDDA (Didier). 2008 – Évolution des systèmes de mobilisation et protection du sol : quelles sont les perspectives ? *RenDez-Vous techniques*, n° 19, pp. 50-54.

PISCHEDDA (Didier) (coord.), BARTOLI (Michel), BRETHES (Alain), CACOT (Emmanuel), CHAGNON (Jean-Luc), GAUQUELIN (Xavier), NICOLAS (Manuel) et RICHTER (Claudine). 2009 – *Guide pratique pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL »*. – Paris : ONF, 98 p.

RANGER (Jacques), LAMANDÉ (Mathieu) et LEFEVRE (Yves). 2005 – Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquence pour l'écosystème. *RenDez-Vous techniques*, n° 8, pp. 27-35.

RICHTER (Claudine). 1999 – Mieux respecter les sols forestiers lors des opérations mécanisées : un enjeu de gestion durable ! *La Forêt Privée*, n° 249, pp. 51-58.

RICHTER (Claudine), DURAND (Philippe). 2005 – Les cloisonnements d'exploitation : pourquoi et comment les protéger ? *RenDez-Vous techniques*, n° 8, pp. 48-49.

ROTARU (Cicéron). 1985 – Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. *Revue Forestière Française*, vol. 37, n° 5, pp. 359-370.

ROTARU (Cicéron). 1983 – Tassement du sol forestier et récolte mécanisée des bois. *Courriers de l'exploitant et du scieur*, n° 48/1, 12 p.

ROUYER (Emmanuel). 2007 – *Évaluation de la sensibilité des sols aux tassements lors des exploitations en forêt dite humide : cas particulier du massif de la Reine (54)*. 36 p. + annexes. (Rapport de stage de BTS gestion forestière).

RUFFIEUX (Stéphane). 1997 – *Tassement des sols forestiers : contribution à l'évaluation de la sensibilité et à la recherche de méthodes préventives*. Velaine en Haye : ONF, Département des Recherches et Techniques, STIR Nord-Est, 50 p. + annexes. (Mémoire de fin d'études de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs et de Techniciens pour l'Agriculture).

THIEBAUT (Christian). 2004 – Cloisonnements d'exploitation dans le cadre d'une gestion durable des forêts. Le cas de la FD de la Trappe (Orne). – *RenDez-Vous techniques*, n° 3, p. 61.

VENET (J). 1956 – La mécanisation des exploitations forestières : difficultés solutions. – *Revue Forestière Française*, vol. 8, n° 6, pp. 388-399.

VERNIER (François). 2009 – *Plantes lieux humides*. Tableur Excel.

Von WILPERT (Klaus) et SCHÄEFFER (Jürgen). 2005 – Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. – *Eur J Forest Res*, n° 125, pp. 129-138.

WEHNER (Thomas), CUCHET (Emmanuel), MENDOW (Nancy) et LOPIN (Julien). 2007 – Des cloisonnements d'exploitation pour réduire l'impact au sol. *Fiche Information Forêt*, n° 744, 6 p.

Liste des contacts

- Encadrement du stage :

BRUCIAMACCHIE Max (correspondant ENGREF) – AgroParisTech ENGREF

Enseignant chercheur / Professeur d'aménagement

max.bruciamacchie@agroparistech.fr

03 83 39 68 51

KOCHERT Thomas (maître de stage) – ONF

Responsable territorial SIG, DT Lorraine

thomas.kochert@onf.fr

03 83 17 74 46

MESSANT Dominique (maître de stage) – ONF

Directeur Forêt territoriale, DT Lorraine

dominique.messant@onf.fr

03 83 17 74 51 / 06 24 31 77 94

- Partenaires du projet 8 PEFC

ASAËL STÉPHANE – CRPF

Ingénieur forestier

stephane.asael@crpf.fr

03 88 19 55 47 / 06 71 57 65 53

DRAPIER Jacques – IFN

Pédologue

jacques.drapier@ifn.fr

03 83 30 99 27 / 06 72 96 12 97

HODAPP Romain – CRPF

Ingénieur forestier

romain.hodapp@crpf.fr

JABIOL Bernard – AgroParisTech ENGREF

Enseignant chercheur / Maître de conférence en pédologie forestière

bernard.jabiol@agroparistech.fr

03 83 39 68 82

LECOCQ Marie – IFN

Chef de l'échelon interrégional de Nancy

marie.lecocq@ifn.fr

03 83 30 99 30

LEFEVRE Yves – INRA

Ingénieur d'étude, équipe phytoécologie forestière

lefevre@nancy.inra.fr

03 83 39 40 83

MADESCLAIRE Anne – CRPF
Ingénieur forestier
anne.madesclaire@crpf.fr
03 87 31 18 42

PIEDALLU Christian – AgroParisTech ENGREF
Ingénieur en écologie forestière spécialiste en géomatique
christian.piedallu@agroparistech.fr
03 83 39 68 77

PEREZ Vincent – AgroParisTech ENGREF
Technicien géomatique
vincent.perez@agroparistech.fr
03 83 39 68 49

RANGER Jacques – INRA
Directeur de recherche, INRA Nancy
ranger@nancy.inra.fr
03 83 39 40 68

SERRATE Damien – F&BE
Ingénieur forestier
damien.serrate@foretsetboisdelest.com

- Comité de pilotage ONF pour les stages FIF

BRÊTHES ALAIN
Pédologue/chargé de recherche, DT Centre Ouest
alain.brethes@onf.fr
02 38 65 02 97

NICOLAS Manuel
Chargé de recherche et développement, département recherche
manuel.nicolas@onf.fr
06 19 56 52 95

PISCHEDDA Didier
Expert national en exploitation forestière et logistique, département commercial bois
didier.pischedda@onf.fr
01 40 19 59 11

RICHTER Claudine
Responsable de la mission biométrie-expérimentations, département recherche
claudine.richter@onf.fr
01 60 74 92 27

- Contacts ONF

APFFEL Christian

Agent patrimonial, UT Warndt
christian.apffel@onf.fr

BERNARDIN Claude

Technico-commercial bois, agence Meurthe-et-Moselle
claud.bernardin@onf.fr
06 16 30 74 39

CLUZEAU Catherine

Responsable environnement et santé des forêts, DT Lorraine
catherine.cluzeau@onf.fr
03 83 17 74 16

DURAND Philippe

philippe-eric.durand@onf.fr
06 15 30 20 24

GUEYDON Yohan

Technicien géomatique, agence Meurthe-et-Moselle, DT Lorraine
yohan.gueydon@onf.fr
03 83 39 05 25

JACQUEMIN Franck

Responsable du service patrimonial, agence Meurthe-et-Moselle
franck.jacquemin@onf.fr
03 83 76 42 31 / 06 16 30 75 35

KREMER Jean-Louis

Agent patrimonial, UT Warndt
06 16 30 72 94

LANTER Olivier

Responsable du pôle sylviculture, développement territorial, Direction Forêt, DT Lorraine
olivier.lanter@onf.fr
03 83 23 45 04 / 06 16 30 74 38

LEVY Frédéric

Responsable du service commercial bois, agence de Sarrebourg
frederic.levy@onf.fr
03 87 25 72 22 – 06 18 93 61 22

LORENTZ Dominique

Responsable de l'UT Sarrebourg Plaine
dominique.lorentz@onf.fr
06 16 30 69 31

MARECHAL Jean-Philippe
Responsable service bois, agence Meurthe & Moselle
jean-philippe.marechal@onf.fr
03 83 76 42 44 / 06 16 42 69 05

MARQUETTE Éric
Directeur Bois territorial, DT Lorraine
eric.marquette@onf.fr
03 83 17 74 11 / 06 24 49 15 29

MICHEL Daniel
Directeur adjoint de l'Agence Travaux Lorraine, responsable technique de production interne
daniel.michel@onf.fr
03 83 17 81 48 / 06 24 36 70 38

STAUFFER Denis
Commercial bois, agence Meurthe-et-Moselle
denis.stauffer@onf.fr
03 83 17 74 57

VERNIER François
Responsable du pôle aménagement, DT Lorraine
francois.vernier@onf.fr
03 83 17 74 55

VIONNET-FUASSET Pierre
Responsable de l'unité spécialisée aménagement – études de l'agence de Sarrebourg
pierre.vionnet-fuasset@onf.fr
03 87 25 72 23

- Autres contacts :

CACOT Emmanuel – FCBA
emmanuel.cacot@fcba.fr

BOUR Laurent – DRAAF Lorraine
Responsable pôle forêt
laurent.bour@agriculture.gouv.fr
03 87 56 40 38

LE CORVAISIER Guillaume – scierie Machet Énergies Nouvelles
06 75 96 57 88

SERVENTON Christophe – DRAAF Lorraine
Technicien pôle forêt
christophe.serventon@agriculture.gouv.fr
03 87 56 40 39

Annexes

ANNEXE 1 : TABLES DE RECLASSEMENT	- 79 -
ANNEXE 2 : DÉTAIL DU CALCUL DE LA TABLE DE RECLASSEMENT RECLASS_POSITOP02	- 81 -
ANNEXE 3 : TRANSFORMATION DU DIAGRAMME DES TEXTURES DE JAMAGNE	- 83 -
ANNEXE 4 : ESTIMATION DES SURFACES DES CLASSES DE SENSIBILITÉ PAR RÉGION IFN	- 85 -
ANNEXE 5 : CARTES D'IDENTITÉ PAR RÉGION IFN	- 87 -
ANNEXE 6 : PROTOCOLE DE DIAGNOSTIC DE LA SENSIBILITÉ D'UN SOL AU TASSEMENT	- 91 -
ANNEXE 7 : FICHE DE RELEVÉ	- 93 -
ANNEXE 8 : PRISE EN COMPTE DU TYPE DE SOL : ESTIMATION DES SURFACES DES CLASSES DE SENSIBILITÉ PAR RÉGION IFN	- 95 -
ANNEXE 9 : ESTIMATION CROISÉE DE LA TEXTURE ET DE L'ÉTAT D'HUMIDITÉ (SOURCE : PROSOL)	- 97 -
ANNEXE 10 : SYNTHÈSE DES GRILLES D'AIDE AU CHOIX DU SYSTÈME D'EXPLOITATION	- 99 -
ANNEXE 11 : CARTE DE SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT EN LORRAINE	- 101 -

Annexe 1 : tables de reclassement

CAILLOUX (CLASSE)	C_CAILLOUX (%)
Null	Null
0	2,5
1	9,5
2	19,5
3	29,5
4	39,5
5	49,5
6	59,5
7	69,5
8	79,5
9	92,5

reclass_charge

PPSEUDO (CLASSE)	P_PSEUDOGLEY (cm)
0	2,5
1	9,5
2	19,5
3	29,5
4	39,5
5	49,5
6	59,5
7	69,5
8	79,5
9	92,5
Null	100

reclass_ppseudo

POSITOPO (CLASSE)	P_PSEUDO ESTIME (cm)
-9999	84,50
0	89,75
1	97,19
2	96,74
3	94,70
4	96,39
5	87,03
6	67,82
7	97,71
8	84,75
9	98,21
10	62,57
11	85,10

reclass_positopo2

PROF (CLASSE)	R_PROF (cm)
0	2,5
1	9,5
2	19,5
3	29,5
4	39,5
5	49,5
6	59,5
7	69,5
8	79,5
9	100

reclass_prof

1	M	M	4	5	6	7	8	9
M	2	M	4	5	6	2	2	2
M	M	3	4	5	6	3	3	3
4	4	4	4	M	M	4	4	4
5	5	5	M	5	M	5	5	5
6	6	6	M	M	6	6	6	6
7	2	3	4	5	6	7	M	M
8	2	3	4	5	6	M	8	M
9	2	3	4	5	6	M	M	9

reclass_text_result

TEXT (CLASSE)	P_SABLE (%)	P_ARGILE (%)	P_LIMON (%)
1	87,35	5,3	7,35
2	67,5	6,25	26,25
3	68,37	18,25	13,38
4	37,25	12,27	50,48
5	17,5	23,75	58,75
6	7,5	8,75	83,75
7	10	37,5	52,5
8	44,42	35,64	19,94
9	18,33	63,34	18,33

reclass_text

TSOL (CLASS)	P_PERMA NENT (0/1)	P_TEMPO RAIRE (0/1)	P_NON_EN GORGE (0/1)
1	0	0	1
2	0	0	1
3	0	0	1
11	1	0	0
12	0	0	1
13	0	0	1
14	0	0	1
15	0	0	1
16	0	0	1
17	0	0	1
18	0	0	1
19	0	0	1
21	0	0	1
22	0	0	1
23	0	0	1
24	0	0	1
25	0	0	1
26	0	0	1
27	0	0	1
28	0	0	1
29	0	0	1
31	0	0	1
32	0	0	1
33	0	0	1
34	0	0	1
35	0	0	1
38	0	1	0
39	0	0	1
42	0	1	0
48	0	1	0
51	0	0	1
52	0	0	1
53	0	0	1
58	0	1	0
59	0	0	1
61	0	0	1
62	0	0	1
63	0	0	1
81	0	1	0
82	1	0	0
83	1	0	0
85	1	0	0
87	0	1	0
88	0	0	1
89	1	0	0

reclass_tsol

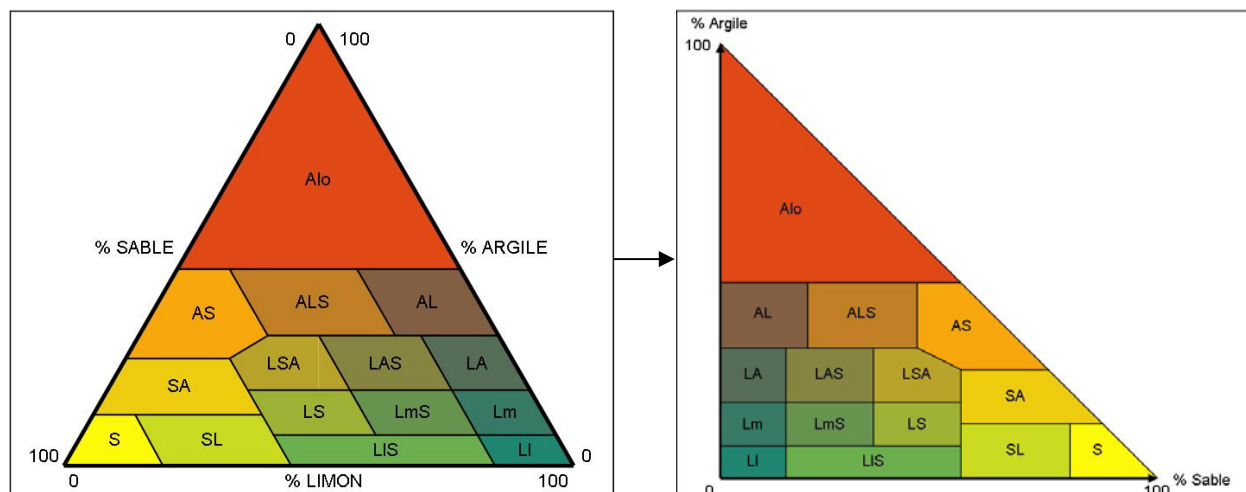
TSOL (CLASS)	PROSOL_1 (0/1)	PROSOL_2 (0/1)	PROSOL_3 (0/1)	PROSOL_4 (0/1)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
11	0	0	0	1
12	1	0	0	0
13	1	0	0	0
14	0	0	0	0
15	1	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	1	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	1	0	0	0
24	0	0	0	0
25	1	0	0	0
26	1	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	1	0	0
29	1	0	0	0
31	1	0	0	0
32	0	1	0	0
33	0	1	0	0
34	1	0	0	0
35	1	0	0	0
38	0	0	1	0
39	0	1	0	0
42	0	0	1	0
48	0	0	1	0
51	1	0	0	0
52	1	0	0	0
53	1	0	0	0
58	0	0	1	0
59	0	0	0	0
61	0	0	0	0
62	0	0	0	0
63	0	0	0	0
81	0	0	1	0
82	0	0	0	1
83	0	0	0	1
85	0	0	0	1
87	0	0	1	0
88	0	1	0	0
89	0	0	0	1

reclass_prosol

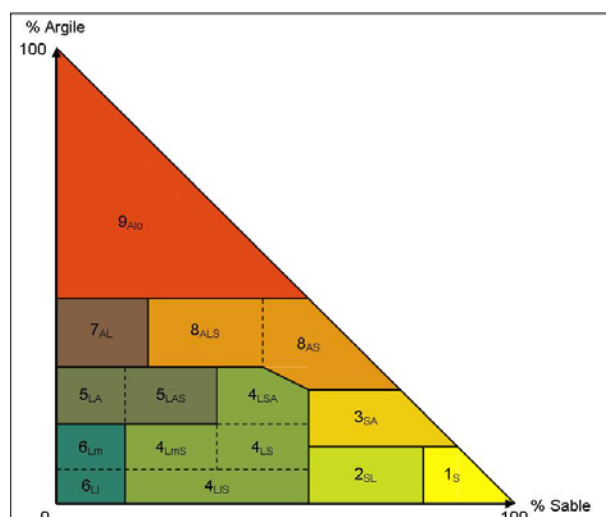
Annexe 2 : détail du calcul de la table de reclassement reclass_positopo2

POSITOPO	Données	Total
-9999	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	84,5 13
0	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	89,75 2
1	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	97,18773234 269
2	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	96,7383279 921
3	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	94,69711163 1281
4	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	96,38535912 362
5	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	87,03212851 996
6	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	67,82233308 1303
7	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	97,70967742 31
8	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	84,75487559 1487
9	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	98,21047431 506
10	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	62,57142857 7
11	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	85,09567901 162
#N/A	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	100 64
(vide)	Moyenne de P_PSEUDOGLEY Nombre de POSITOPO	
Total Moyenne de P_PSEUDOGLEY		87,40545651
Total Nombre de POSITOPO		#N/A

Annexe 3 : transformation du diagramme des textures de Jamagne



1^{ère} étape : projection du diagramme des textures de Jamagne (modifié selon Jabiol) dans un repère orthogonal.

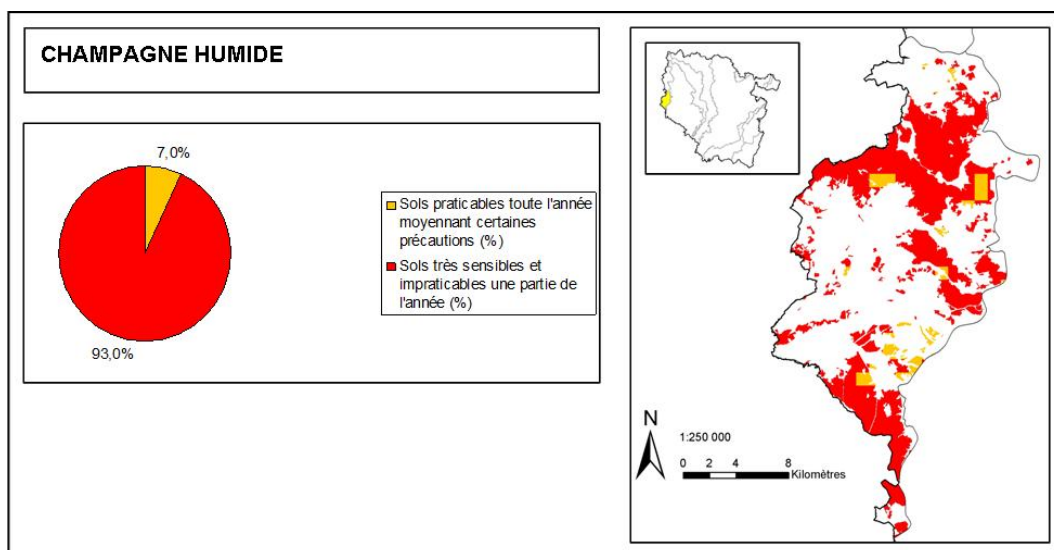
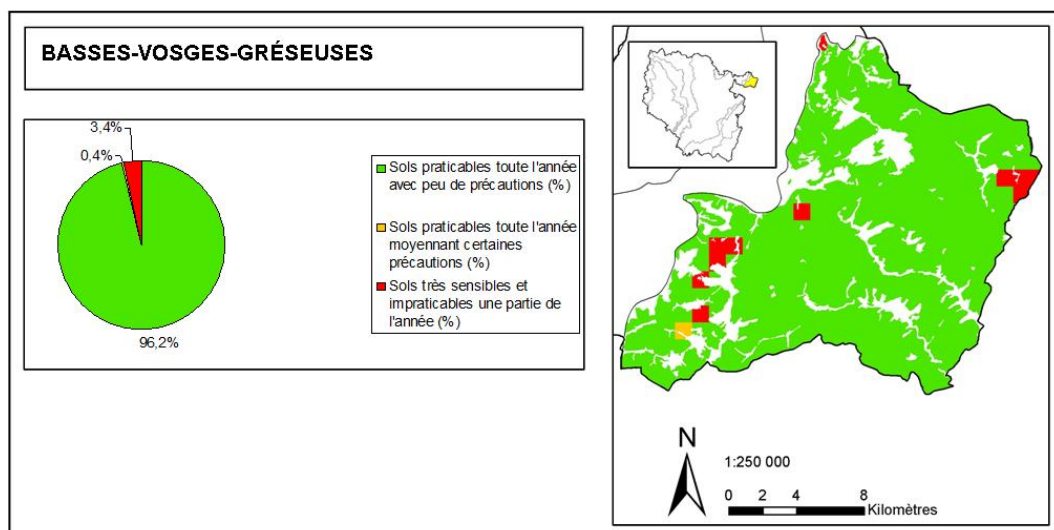
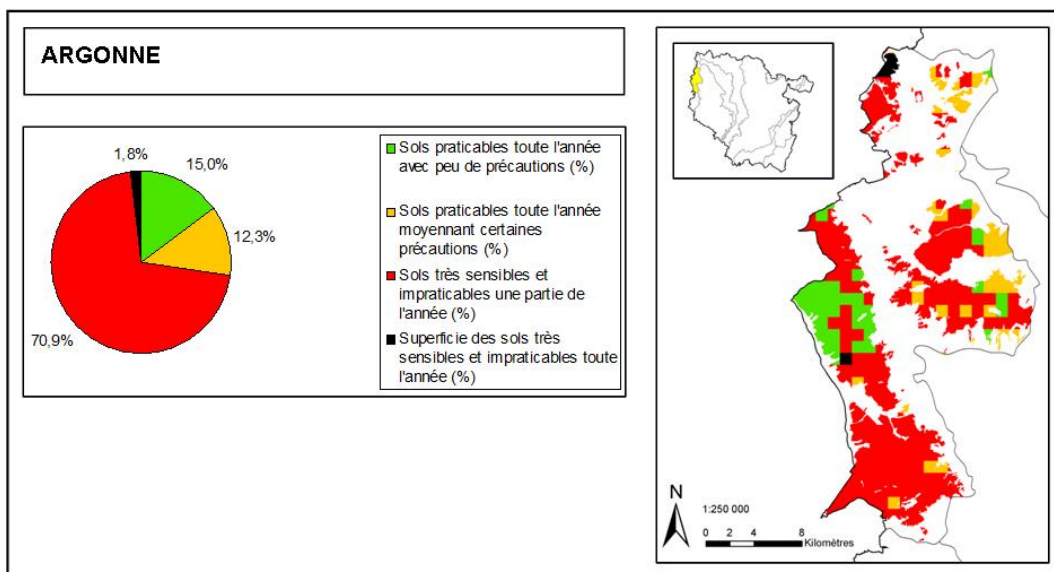


2^e étape : regroupement des classes de textures de Jamagne selon les classes IFN, puis calcul de la valeur des barycentres.

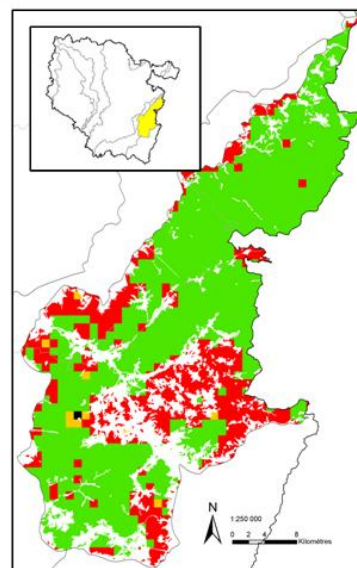
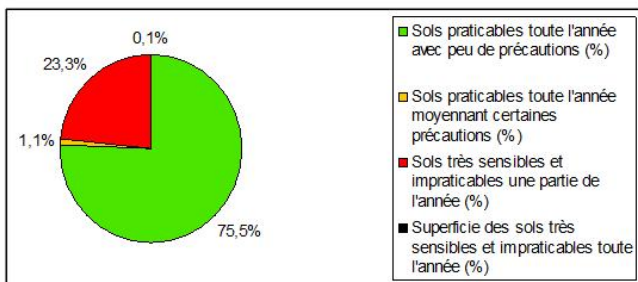
Annexe 4 : estimation des surfaces des classes de sensibilité par région IFN

Région IFN	Hors forêt (ha)	Surface forestière (ha)	Sols praticables toute l'année avec peu de précautions (%)	Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (%)	Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (%)	Superficie des sols très sensibles et impraticables toute l'année (%)
ARGONNE	24700	22000	15,0 %	12,3 %	70,9 %	1,8 %
BASSES-VOSGES GRESEUSES	3600	23400	96,2 %	0,4 %	3,4 %	0,0 %
CHAMPAGNE HUMIDE	21700	12800	0,0 %	7,0 %	93,0 %	0,0 %
HAUTES-VOSGES GRESEUSES	25800	90700	75,5 %	1,1 %	23,3 %	0,1 %
PLATEAU LORRAIN	696600	210200	1,2 %	31,0 %	67,6 %	0,2 %
PLATEAUX CALCAIRES	440600	286000	4,7 %	77,3 %	18,0 %	0,0 %
VÔGE ET COLLINES SOUS VOSGIENNES	85300	85100	14,6 %	6,8 %	77,9 %	0,7 %
VOSGES CRISTALLINES	44500	76800	31,5 %	0,4 %	68,1 %	0,0 %
WARNDT	12000	8600	66,3 %	2,3 %	31,4 %	0,0 %
WOEVRE ET ANNEXES	138600	45800	0,0 %	26,2 %	73,8 %	0,0 %
TOTAL	1493400	861400	17,7 %	35,9 %	46,2 %	0,2 %

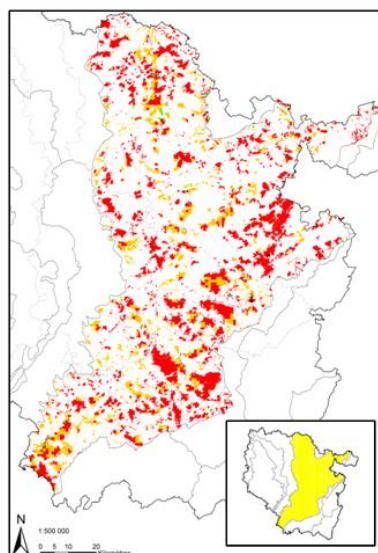
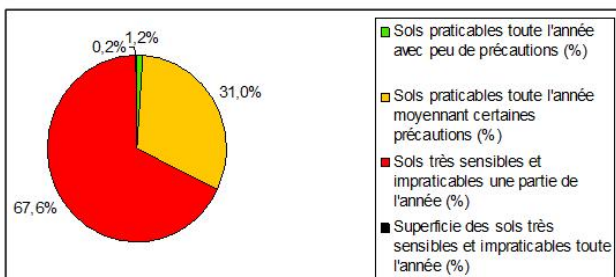
Annexe 5 : cartes d'identité par région IFN



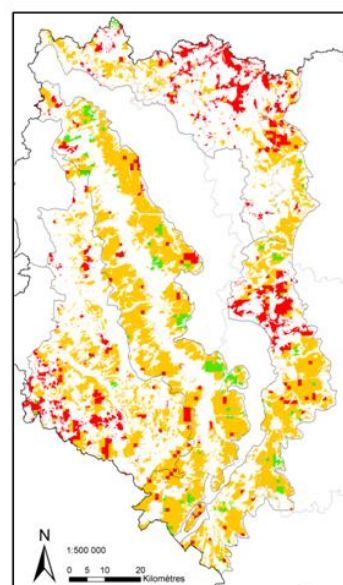
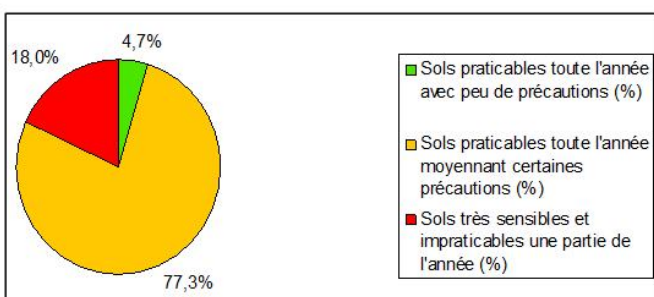
HAUTES-VOSGES-GRÉSEUSES



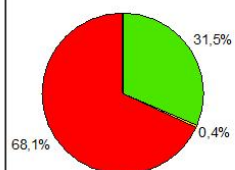
PLATEAU LORRAIN



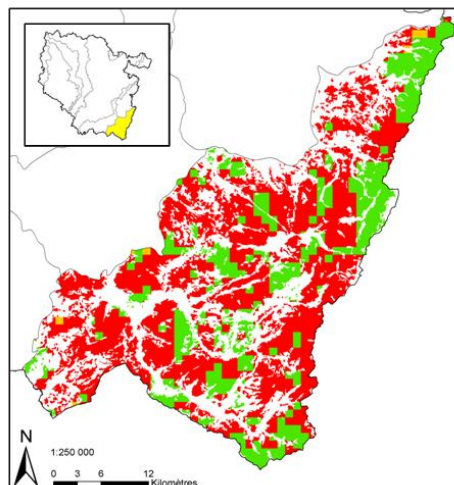
PLATEAUX CALCAIRES



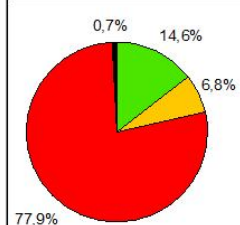
VOSGES CRISTALLINES



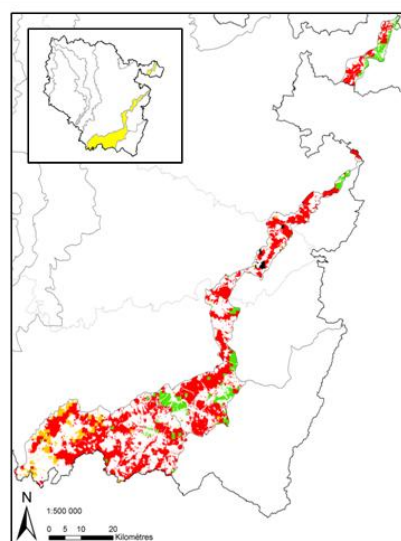
- Sols praticables toute l'année avec peu de précautions (%)
- Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (%)
- Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (%)



VÔGE ET COLLINES-SOUS-VOSGIENNES



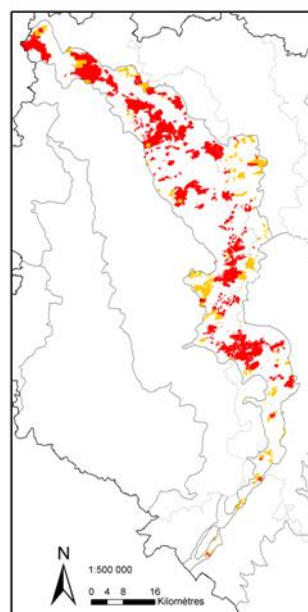
- Sols praticables toute l'année avec peu de précautions (%)
- Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (%)
- Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (%)
- Superficie des sols très sensibles et impraticables toute l'année (%)



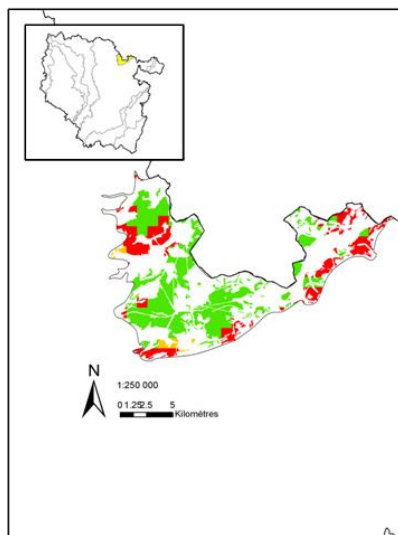
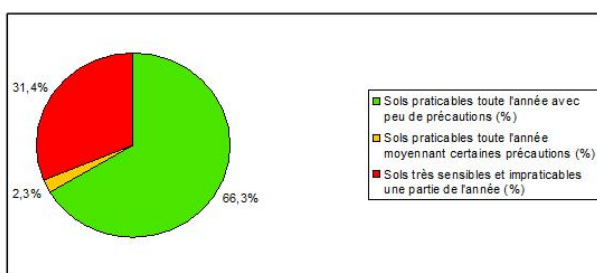
WOËVRE ET ANNEXES



- Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (%)
- Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (%)



WARNDT



Annexe 6 : protocole de diagnostic de la sensibilité d'un sol au tassement

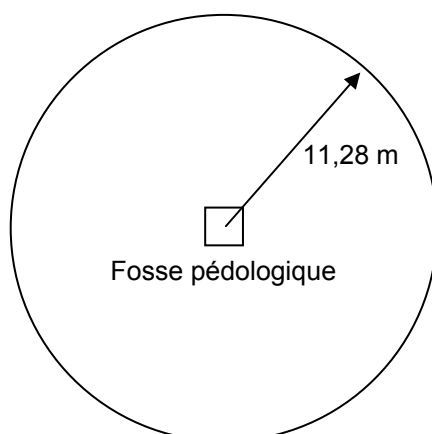


Figure : schéma d'une placette

- Relevés floristiques

Les relevés seront effectués à partir d'une liste d'espèces végétales communément retrouvées en Lorraine, au sein de la placette circulaire de 400 m².

La liste a été établie à partir de la liste des espèces de milieux humides en Lorraine, réalisée par François Vernier (ONF Lorraine), recoupée avec la flore forestière française de JC Rameau. Les espèces sélectionnées font parties des groupes d'espèces indicatrices mésohygrophiles et hygrophiles.

Il est ainsi possible de déterminer le type d'engorgement de la placette à travers l'abondance / dominance d'espèces indicatrices de milieux humides, en utilisant l'échelle proposée par Braun-Blanquet :

- + : abondance faible à très faible (recouvrement très faible) ;
- 1 : abondance assez importante mais surface couverte faible ;
- 2 : abondance importante ou surface couverte comprise entre 5 et 25 %
- 3 : surface couverte comprise entre 25 et 50 %, abondance quelconque ;
- 4 : surface couverte comprise entre 50 et 75 %, abondance quelconque ;
- 5 : plus de 75 % de surface couverte, abondance quelconque.

(Possibilité d'extrapoler le résultat par la suite en terme de présence / absence.)

- Relevés pédologiques

Les relevés s'effectuent à partir d'un sondage à la tarière pédologique jusqu'à 1 m de profondeur maximum. Ces sondages seront complétés pour les sites C et D par une fosse pédologique de 50 cm de profondeur située au centre de la placette.

Si le sondage à la tarière pédologique est arrêté avant la profondeur souhaité, 3 autres essais sont possibles dans un rayon d'1 m autour du premier trou de sondage.

Afin de procéder au diagnostic de la sensibilité du sol, il est impératif de relever les 3 éléments suivants :

- texture : description horizon par horizon en classe de texture Jamagne, avec les épaisseurs associées en cm ;
- % EG : pourcentage estimé des éléments grossiers en abondance sur le profil ;
- profondeur d'apparition de l'hydromorphie moyenne en cm (tâches de rouille et de décoloration > 25 %).

Ces 3 éléments couplés avec le type d'engorgement donné par le relevé floristique permet de déterminer la sensibilité potentielle du sol au tassement.

Par ailleurs, d'autres éléments sont relevés (notamment par rapport à au fait d'inclure les données dans la base de donnée Ecoplant) :

- méthode d'observation du profil ;
- drainage et position topographique ;
- profondeur d'apparition de la nappe après équilibre
- géologie ;
- formation végétale ;
- litière et humus ;
- nature et taille des EG ;
- compacité ;
- description plus fine de l'hydromorphie (de surface, faible et moyenne) ;
- profondeur et cause de l'arrêt du sondage.

Des champs sont laissés pour les commentaires libres :

- observations (perturbation éventuelle de la placette, situation particulière, ...) ;
- dégâts d'exploitation au sol (description visuelle : ornières, profondeur, longueur, ...) ;
- contrainte ou caractère principal de la placette.

- Diagnostic Prosol

Le diagnostic Prosol sera réalisé directement sur le terrain à partir des éléments collectés et de la clé de détermination accompagnée par un diagramme des textures Prosol.

Annexe 7 : fiche de relevé

DATE	ID placette	N° de relevé	Auteur									
LOCALISATION	Commune : Forêt de :	Situation juridique : Parcelle : 										
PROFIL	Drainage 	Topographie 	cm									
GEOLOGIE	Substrat observé et prof. Roche mère observée	Nature Formation carte géol.	Description Formation végétale =									
LITIÈRE	Feuille de 	Aiguille de 	Autre 									
SCHEMA	Horizon O	Oln	Olv	OF	OH	FORME DHUMUS						
	Prof (cm)	N° horiz	Eléments grossiers		Texture	Compacité	Hydromorphie (1)					
			%	Nature	Taille (cm)		Surface	Moyenne				
	0											
	25											
	50											
	75											
	100											
ARRET	Profondeur	Cause arrêt	Volontaire	Forcé par	OBSERVATIONS							
DEGATS D'EXPLOITATION												
CONTRAINTES OU CARACTERE PRINCIPAL												

(1) Hydromorphie :
de surface = traces d'hydromorphie dues au tassement. Noter l'épaisseur
Faible = 1^{ère} traces, tâches de rouille et tâches de décoloration < 25 %
Moyenne = tâches de rouille et tâches de décoloration > 25 %

(2) remobiliser l'une ou l'autre des modalités

ID placette		Date		Auteur
		AbDo		
		A	a	h
<i>Alnus glutinosa</i>	Aulne glutineux			
<i>Populus alba</i>	Peuplier blanc			
<i>Populus tremula</i>	Tremble			
<i>Prunus padus</i>	Cerisier à grappes			
<i>Ulmus laevis</i>	Orme lisse			
<i>Humulus lupulus</i>	Houblon			
<i>Rubus caesius</i>	Ronce bleuâtre			
<i>Salix alba</i>	Saule blanc			
<i>Salix aurita</i> *	Saule à oreillettes			
<i>Salix cinerea</i> *	Saule cendré			
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre			
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines			
<i>Salix viminalis</i>	Saule des vanniers			
<i>Solanum dulcamara</i>	Douce amère			
		AbDo		
<i>Agrostis stolonifera</i>	Agrostide stolonifère			
<i>Caltha palustris</i> *	Populage des marais			
<i>Calystegia sepium</i>	Liseron des haies			
<i>Carex acutiformis</i> *	Laïche des marais			
<i>Carex paniculata</i> *	Laïche paniculée			
<i>Carex pendula</i>	Laïche pendante			
<i>Carex riparia</i> *	Laïche des rives			
<i>Carex remota</i>	Laïche espacée			
<i>Carex rostrata</i> *	Laïche à ampôles			
<i>Cirsium oleraceum</i>	Cirse maraîcher			
<i>Cirsium palustre</i>	Cirse des marais			
<i>Dryopteris dilatata</i> *	Polystic dilaté			
<i>Elymus caninus</i>	Chiendent des chiens			
<i>Epilobium hirsutum</i> *	Epilobe hérissé			
<i>Equisetum telmateia</i>	Prêle très élevée			
<i>Eupatorium cannabinum</i>	Eupatoire chanvrine			
<i>Filipendula ulmaria</i>	Reine des prés			
<i>Galium palustre</i> *	Gaillet des marais			
<i>Hypericum humifusum</i>	Millepertuis couché			
<i>Iris pseudacorus</i> *	Iris faux-acore			
<i>Lychnis flos-cuculi</i>	Lychnide fleur de coucou			
<i>Lycopus europaeus</i> *	Lycopée d'Europe			
<i>Lysimachia nummularia</i>	Lysimachie nummulaire			
<i>Lysimachia vulgaris</i> *	Lysimachie vulgaris			
<i>Lythrum salicaria</i>	Salicaire commune			
<i>Mentha aquatica</i> *	Menthe aquatique			
<i>Mentha arvensis</i>	Menthe des champs			
<i>Myosoton aquaticum</i>	Myosoton aquatique			
<i>Phalaris arundinacea</i>	Baldingère			
<i>Phragmites australis</i>	Phragmite commun			
<i>Pulicaria dysenterica</i> *	Pulicaire dysentérique			
<i>Ranunculus flammula</i>	Renoncule flammette			
<i>Ranunculus repens</i>	Renoncule rampante			
<i>Scirpus sylvaticus</i>	Scirpe des bois			
<i>Scrophularia auriculata</i> *	Scrophulaire auriculée			
<i>Scutellaria galericulata</i> *	Scutellaire casquée			
<i>Symphytum officinale</i>	Consoude officinale			
<i>Valeriana dioica</i> *	Valériane dioïque			
<i>Valeriana repens</i>	Valériane officinale rampante			

* Espèces hygrophiles

Annexe 8 : prise en compte du type de sol : estimation des surfaces des classes de sensibilité par région IFN

Région IFN	Hors forêt (ha)	Surface forestière (ha)	Sols praticables toute l'année avec peu de précautions (%)	Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions (%)	Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année (%)	Superficie des sols très sensibles et impraticables toute l'année (%)
ARGONNE	24700	22000	41,4 %	19,1 %	37,3 %	2,3 %
BASSES-VOSGES GRESEUSES	3600	23400	94,9 %	2,6 %	2,1 %	0,4 %
CHAMPAGNE HUMIDE	21700	12800	0,8 %	3,9 %	95,3 %	0,0 %
HAUTES-VOSGES GRESEUSES	25800	90700	93,4 %	2,2 %	3,0 %	1,4 %
PLATEAU LORRAIN	696600	210200	2,9 %	20,1 %	76,5 %	0,5 %
PLATEAUX CALCAIRES	440600	286000	15,7 %	72,9 %	11,4 %	0,0 %
VÔGE ET COLLINES SOUS VOSGIENNES	85300	85100	52,9 %	10,6 %	35,5 %	1,1 %
VOSGES CRISTALLINES	44500	76800	94,7 %	2,3 %	1,4 %	1,6 %
WARNDT	12000	8600	80,2 %	9,3 %	10,5 %	0,0 %
WOEVRE ET ANNEXES	138600	45800	4,8 %	32,8 %	62,4 %	0,0 %
TOTAL	1493400	861400	34,1 %	33,1 %	32,2 %	0,6 %

Annexe 9 : estimation croisée de la texture et de l'état d'humidité (source : Prosol)

Texture dominante	Echantillon sec $pF > 3,5$	Echantillon frais $2,5 < pF \leq 3,5$	Echantillon humide $0 < pF \leq 2,5$	Observations
Sable	Peu de différence selon l'état d'humidité de l'échantillon. Un échantillon sec ne tient pas dans la tarière, alors qu'un échantillon humide peut éventuellement se mouler (tel un château de sable)			- Les sables grossiers ($> 0,2 \text{ mm}$) "gratitent" les doigts et sont nettement sensibles au toucher. - Les sables les plus fins ($< 0,1 \text{ mm}$) sont difficilement sensibles au toucher mais ils restent perceptibles par crissement à l'oreille.
Sable limoneux et sable argileux	La présence de sable est dominante mais l'échantillon laisse une poudre sur les doigts (sable limoneux)	Il se tient un petit peu quand on essaie de le modeler. Il s'effrite facilement (sable limoneux) ou colle légèrement (sable argileux)	Il se disperse très facilement comme le limon, mais "gratte" nettement. Une faible quantité d'argile rend l'échantillon collant à l'état humide, mais il ne se tient pas.	
Limon sableux	L'échantillon a un comportement équivalent aux limons mais il "gratte" quelque peu.			
Limon (limon léger, limon léger sableux, limon moyen sableux, limon moyen)	Il est poussiéreux, pulvérulent, dessèche les doigts ; les petites mottes soumises à la pression éclatent complètement (pulvérisation). L'échantillon ne se modèle pas.	Il est doux au toucher et peu collant (aspect de talc). Il se modèle bien (boudin) mais à la pression entre le pouce et l'index, il s'effrite facilement et forme, au mieux, des écailles sur le pouce.	Il a un aspect savonneux. Il s'écrase totalement entre les doigts et se disperse totalement dans l'eau (perte de consistance, aspect de boue).	
Limon argileux (limon argileux, limon argilo-sableux, limon sablo-argileux)	L'échantillon s'écrase facilement. Sa pulvérisation n'est pas totale (différence avec le limon).	Il est doux au toucher, s'écrase facilement (il ne reste qu'une fine lamelle écaillée entre le pouce et l'index), colle peu, se modèle très bien avec une très bonne tenue du boudin (consistance de pâte à modeler).	Sa tenue est très faible, il se disperse facilement dans l'eau (meilleure tenue pour l'argile limoneuse, proche des argiles).	De même consistance que le limon mais se tenant un peu mieux. Il résiste plus à la pression. On fait difficilement une lamelle entre le pouce et l'index. Alors que cela est plus facile pour l'argile limoneuse.
Argile (argile limoneuse, argile lourde, argile, argile sableuse)	Elle forme des petits blocs très durs et fortement cohérents (ils peuvent parfois être confondus avec des sables grossiers). On peut briser ces blocs en morceaux plus petits mais non le réduire en poudre à la main.	L'échantillon résiste à la pression, il se modèle (consistance de pâte à modeler collante) il est ainsi possible d'en faire un boudin assez fin, il colle fortement aux doigts. Par pression entre le pouce et l'index, on peut former une lamelle d'autant plus fine que l'échantillon est plus argileux.	Il reste plastique, très collant et résiste toujours à la pression. Se déforme mais ne se délite pas (ne se fragmente pas, ne se désagrège pas)	
Attention toutefois aux échantillons très argileux, frais à humide, la confection d'une lamelle n'est pas toujours possible ; l'argile forme un "masque" lisse sur la peau (absence d' "écailles")				

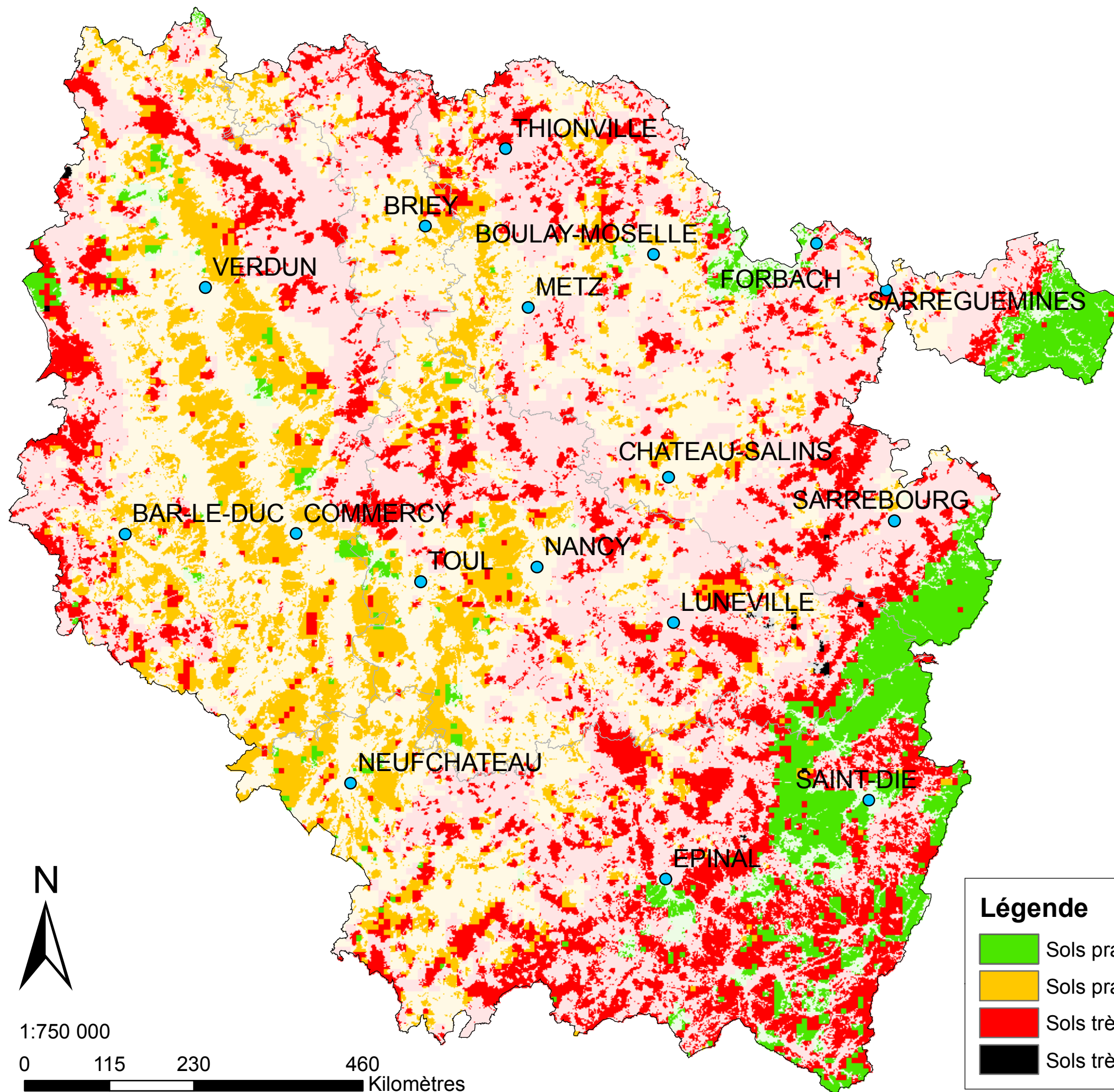
Annexe 10 : synthèse des grilles d'aide au choix du système d'exploitation

	Débusquage						Débardage						
	Traction animale	Chenillards			Câbles		Porteurs				Débusqueurs		
		< 1 tonne	1-2 tonnes	> 2 tonnes	Lasso (zig-zag)	Mât	≤ 10 tonnes + tracks	> 10 tonnes + tracks	≤ 10 tonnes	> 10 tonnes	Câble ≤ 5 tonnes	Câble > 5 tonnes	Pinces ou grue > 5 tonnes
Sols praticables toute l'année avec peu de précautions													
Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions													
Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année													
Sols très sensibles et impraticables toute l'année													

Légende :	PB / BM / GB		Autorisé	Sol sec ou gelé	
		Autorisé sous certaines conditions		Sol frais	Sol humide

- 1a) : *Attention en situation de pente* : risques d'érosion. De par leur configuration, les engins équipés de chenilles ou de tracks circulent dans le sens de la pente. Les chenilles peuvent potentiellement scalper le sol, entraînant alors un phénomène d'érosion en cas d'intempéries.
Pas de contre indication sur terrain plat.
- 1b) : *Sur sols humides* : attention à la charge du porteur. Il faut limiter celle-ci en la réduisant de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
L'utilisation de pneus larges pour augmenter la portance et limiter ainsi la pression au sol peut être envisagée, à condition de ne pas augmenter la charge de l'engin.
- 1c) : *Sur sols humides* : attention à la charge, risque de dégâts si trop humide.
- 2a) : *Sur sols humides* : attention, risque de patinage en débardant des GB.
- 2b) : *Sur sols humides* : attention à la charge du porteur. Réduire celle-ci de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
Attention à la répétition des passages. Protéger les zones les plus circulées par des rémanents (bas de pente, approche de fossés, sortie de parcelle, arrivée à la place de dépôt, ...).
- 2c) : *Sur sols frais* : attention à la charge du porteur. Il faut limiter celle-ci, en la réduisant de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
L'utilisation de pneus larges pour augmenter la portance et limiter ainsi la pression au sol peut être envisagée, à condition de ne pas augmenter la charge de l'engin.
- 2d) : *Sur sols frais* : attention à la répétition des passages. Protéger par des rémanents les zones les plus circulées (bas de pente, approche de fossés, sortie de parcelle, arrivée à la place de dépôt, ...).
- 2e) : *Sur sols frais* : attention, un petit débusqueur peut patiner s'il tracte une charge trop lourde (GB) pouvant ainsi provoquer des dégâts. Ne pas hésiter à équiper les pneus de chaînes afin de renforcer l'adhérence, tout en prenant garde aux dégâts qui peuvent être causés sur les racines, les pieds d'arbres, les pistes et les routes.
- 3a) : *Sur sol humide* : l'utilisation d'un chenillard supérieur à 2 tonnes peut s'avérer limite en situation trop humide.
- 3b) : *Sur sol sec ou gelé* : Attention à la charge du porteur. Il faut limiter celle-ci en la réduisant de moitié par exemple (ce qui entraîne cependant un accroissement du coût de l'opération).
Attention à la répétition des passages. Protéger les zones les plus circulées par des rémanents (bas de pente, approche de fossés, sortie de parcelle, arrivée à la place de dépôt, ...).
- 3c) : *Sur sols frais* : attention à la charge. Limiter le débardage de GB à des coupes de faible volume ou des petits chablis.

Annexe 11 : carte de sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement en Lorraine



CARTE DE SENSIBILITE POTENTIELLE DES SOLS FORESTIERS AU TASSEMENT EN LORRAINE



Mise en garde :

Le pas de la carte est kilométrique :
1 pixel = 1 km² = 100 ha.

La carte est destinée à un usage régional, voire à l'échelle d'une région IFN. En aucun cas ce document ne peut être utilisé localement.

Carte uniquement valable pour les sols forestiers.

Avec le soutien financier de l'Etat (DRAAF Lorraine)
et du Conseil Régional de Lorraine

Carte réalisée dans le cadre du projet 8 PEFC
Lorraine : "Assurer une récolte raisonnée des
rémanents en forêts".

Partenaires : ALCF, APT/ENGREF, CRPF, F&BE,
GPEBLOR, IFN, INRA, ONF

Sources : APT/ENGREF, BD ALTI® ©IGN 2000, IFN

Julien STAUB
Juin 2009

Légende

- Sols praticables toute l'année avec peu de précautions
- Sols praticables toute l'année moyennant certaines précautions
- Sols très sensibles et impraticables une partie de l'année
- Sols très sensibles et impraticables toute l'année

Résumé :

Le tassement des sols forestiers est un phénomène identifié depuis plus d'une vingtaine d'année en France. Sa prise en compte est cependant récente, notamment à l'issue des exploitations des bois « tempête » de 1999, du développement de la mécanisation, de la dynamisation de la sylviculture et la recherche de nouveaux produits comme les rémanents. A ces paramètres s'ajoute également la diminution des périodes de praticabilité liée aux changements climatiques.

La présente étude, inscrite dans le projet 8 PEFC « assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêts » propose une méthode de cartographie de la sensibilité potentielle des sols forestiers au tassement à l'échelle de la région Lorraine. Cette méthode est basée sur les points d'inventaire de l'Inventaire forestier national ainsi que sur les critères de diagnostic du guide pratique PROSOL « pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt ». Cette carte de sensibilité potentielle reflète une image réaliste de la situation lorraine en confirmant notamment la part importante de sols forestiers lorrains très sensibles et impraticables une partie de l'année. Le présent document s'attache également à décrire les différentes modalités de valorisation de cette carte, du décideur au gestionnaire.

Summary:

Forest soil compaction has been identified as a phenomenon in France more than twenty years ago. However this has been taken into account recently especially after exploiting the “1999 storm wood”, developing mechanisation, boosting silviculture and finding out new products like slashes. The reduction of passable periods due to climatic changes must also be added to those parameters.

This study listed in the 8 PEFC project “how to insure a reasoned collecting of slashes in forests” submits a method of mapping ground sensitive to subsiding on a Lorraine area scale. This method is based on the inventory data from the National Forest Inventory as well as on the diagnostic criteria from the PROSOL practical guide book “for a forest exploitation respecting grounds and woods”. This potential sensibility map shows realistic features of the situation in Lorraine by confirming in particular that a large part of the forest grounds in Lorraine are really sensitive to subsiding and impassable for a part of the year. This document wants also to describe the different map valorisation procedures from the decision maker to the field manager.