

Effets des techniques d'exploitation forestière sur l'état de surface du sol

Marc Deconchat*

* ENSAT, Équipe Biodiversité dans les Agroécosystèmes, BP 107, 31326 Castanet-Tolosan, France

(Reçu le 3 janvier 2000 ; accepté le 26 janvier 2001)

Résumé – L'utilisation d'une méthode standardisée de description de l'état de surface du sol dans des coupes du sud-ouest de la France permet de montrer que l'exploitation forestière laisse en moyenne 30 % de la surface du sol non perturbée, couvre 32 % par des rémanents, perturbe légèrement 29 % et affecte fortement 9 %. Les techniques traditionnelles d'exploitation laissent moins de rémanents, dont le volume apparent peut être estimé avec la méthode, l'utilisation de skidder provoque plus d'impact forts. L'étude montre d'une part la faisabilité d'une description standardisée des états de surface d'une coupe et d'autre part la variabilité qui existe entre les techniques d'exploitation. On peut supposer qu'elles auront donc des conséquences différentes sur la biodiversité. Des améliorations méthodologiques sont proposées afin de faciliter la comparaison des techniques d'exploitation forestière.

exploitation forestière / état de surface du sol

Abstract – **Effects of logging techniques on the soil surface.** A standardised method for the description of the ground surface in logged area in south-western France shows that 30% of the area remain without perturbation, 32% are covered by slash, 29% are slightly perturbed and 9% are heavily perturbed. Traditional logging techniques keep less slash (the volume could be estimated by the method), the use of skidder induces more heavy impacts. The study shows on one hand the feasibility of a standardised description of ground surface in logged areas, and on the other hand, the variability between logging techniques. They should have different effects on biodiversity. Methodological improvements are proposed to compare logging techniques.

logging / ground surface perturbation

1. INTRODUCTION

Une des conséquences des tempêtes catastrophiques qui ont affectées une partie des forêts en France en 1999 est une circulation accrue des engins forestiers dans les parcelles pour le débardage des arbres déracinés et les travaux de remise en état des peuplements. Ces travaux auront des conséquences mal connues sur les sols et les

caractéristiques du système écologique qui lui sont liées, comme la diversité végétale [3]. La maîtrise de ces effets, en situation de crise mais aussi dans les travaux normaux d'exploitation forestière, constitue une composante d'une meilleure gestion des écosystèmes forestiers.

L'exploitation forestière provoque des modifications visibles de la surface du sol sous forme d'ornières, de décapages et de dépôts de rémanents [10]. Ces

* Correspondance et tirés-à-part
Tél. 05 62 19 39 25 ; e-mail : deconchat@ensat.fr

modifications ont été peu étudiées jusqu'alors [14], ou alors uniquement sous l'aspect pédologique du tassement du sol [16]. Pourtant, elles peuvent avoir des conséquences sur les caractéristiques des sols, la circulation de l'eau, la régénération des arbres [12] et la biodiversité associée au sol [5], en particulier la flore [2, 7, 11]. En outre, les méthodes et techniques d'exploitation forestière ont fortement évolué durant les 2 dernières décennies, avec l'apparition d'engins spécifiques à la forêt de plus en plus lourds (jusqu'à 50 tonnes en charge) dont les effets sont mal connus [1]. La question qui se pose est de savoir si les différentes techniques d'exploitation ont des effets différents sur l'état de surface du sol des coupes [6] et, par voie de conséquences, des effets probablement différents sur les caractéristiques écologiques associées au sol [13, 15].

L'objectif de cet article est de comparer avec une méthode standardisée au niveau européen [20] les états de surface du sol résultants d'exploitations conduites avec des techniques différentes. Il s'agit de mettre en évidence d'une part l'intérêt d'une méthode standardisée de description de l'état de surface du sol et d'autre part les différences existantes entre les techniques d'exploitation.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. La zone d'étude

La zone d'étude se situe dans les coteaux au sud-ouest de Toulouse en France, sous une influence atlantique modérée. Ils sont formés de marnes, d'argiles et de roches détritiques d'origine calcaire provenant des Pyrénées,

surmontés par des argiles à galets ponto-pliocènes présentant des faciès variés, parfois remaniés en colluvions sur les pentes. Les principaux types de sols sont des sols bruns mésotrophes et oligotrophes avec un pH entre 4,5 et 6,5, sauf, plus rarement, lorsqu'ils se sont développés sur un substrat molassique donnant des sols bruns calciques et eutrophes [8]. Les matériaux argileux confèrent une certaine compacité et une stabilité structurale aux sols. Le boisement est fragmenté et occupe environ 20 % du territoire qui est dominé par l'agriculture. Les forêts sont gérées en taillis de chênes (*Quercus pubescens*, *robur* et *petraea*) et châtaigniers (*Castanea sativa*) exploités tous les 30 ans par coupe rase ou avec conservation d'arbres de réserves [2].

L'étude porte sur 5 parcelles exploitées d'octobre 1996 à mars 1997 (*tableau 1*). Le total des précipitations sur ces 6 mois était de 386 mm soit 95 % des valeurs normales, avec une répartition inégale puisque le mois de novembre avait été très excédentaire (166 mm) alors que tous les autres mois avaient été plus secs. L'exploitation des 5 parcelles s'était déroulé dans des conditions favorables sur un sol peu humide et portant. La texture des sols était argileuse ou argile limono-sableuse, avec une charge élevée en cailloux au delà de 30 cm de profondeur. Il n'y avait pas de grandes différences pédologiques entre les 5 parcelles. Quatre parcelles ont été exploitées avec des techniques modernes par des entreprises d'exploitation utilisant des porteurs (engin à 6 ou 8 roues équipé d'une grue et d'une remorque) et des skidders (tracteur équipé d'un treuil pour tirer les tas de bois), la dernière (C5) a été exploitée avec des méthodes traditionnelles (matériel agricole, équipe non professionnelle).

Tableau 1. Caractéristiques des 5 coupes utilisées pour mesurer les proportions des différents états de surface du sol causés par l'exploitation forestière.

	Parcelles				
	C1	C2	C3	C4	C5
Surface (ha)	4.9	8	1.5	5.5	1.2
Propriétaire	Commune	Privé	Privé	Commune	Commune
Pente	Régulière Faible	Irrégulière Moyenne	Régulière Faible	Irrégulière Forte	Régulière Moyenne
Exploitant	SEBSO	Coopérative	SEBSO	SEBSO	
Matériel	Porteur	Porteur	Porteur	Skidder	Agricole
Densité de réserve par hectare	207	349	352	105	274
Nb transect	3	3	3	4	3
Nb points	352	1137	250	822	190

2.2. Méthodes

Pour comparer les effets de différents modes d'exploitation forestière sur les paramètres écologiques, une méthodologie de description est nécessaire afin de faciliter les comparaisons statistiques de résultats issus de différents travaux. La méthode employée est une adaptation de la méthode développée par le Logging Industry Research Organization en Nouvelle Zélande [10]. Elle a été adoptée au niveau européen comme méthode de référence pour la description des chantiers d'exploitation forestière [20]. Elle s'applique à une unité d'exploitation, c'est-à-dire une surface continue exploitée dans des conditions uniformes (matériel et météorologie) et desservant un axe principal de vidange hors de la coupe, ou une aire de dépôt. Généralement, la détermination de cette unité ne pose pas de problème car les coupes concernées sont de faible surface ; pour de grandes parcelles, cette détermination peut-être plus délicate dans la mesure où plusieurs zones peuvent avoir été exploitées indépendamment.

Après une cartographie schématique de la parcelle, des transects ont été positionnés de la façon suivante. Le premier transect est placé à 10 m du point de sortie de l'unité d'exploitation, il est perpendiculaire à la direction principale de vidange. Les autres transects lui sont parallèles et sont espacés selon 3 classes de surface de la coupe : 20 m pour les unités de moins de 1 ha, 50 m entre 1 à 5 ha et 100 m au-delà de 5 ha. La localisation des transects et leur sens de progression sont reportés sur le schéma d'ensemble. Ils vont d'un bord à l'autre de la parcelle, leur longueur est par conséquent variable. L'état de surface du terrain est déterminé tous les mètres le long des transects matérialisés par un topofil™ et mesurés avec un double décimètre à ruban. Il faut compter environ 3 h de travail d'une personne seule pour une parcelle de 3 ha.

L'état de surface du terrain en tout point, matérialisé par un cercle d'environ 30 cm de diamètre, peut être déterminé à partir d'une liste d'états de référence (*tableau II*). Cette détermination doit être réalisée dans les mois qui suivent la fin des activités d'exploitation afin que toutes les traces soient encore visibles et non altérées par les conditions météorologiques, le développement de la végétation ou la chute des feuilles.

Les perturbations du sol se distinguent selon qu'elle affectent la litière des végétaux morts à la surface du sol, le sol organique formé par les horizons humifères et chargés de matière organique (10–15 cm de profondeur) et le sol minéral plus profond, peu chargé en matière orga-

nique. Une ornière correspond à la dépression dans le sol formée par le passage d'une roue, avec déplacement ou non de sol [1, 10].

Les rémanents sont considérés comme une modification de l'état de surface du sol. Par leur présence, ils modifient les caractéristiques du sol et ses échanges avec l'atmosphère, par exemple en réduisant l'évapotranspiration, en limitant l'arrivée de lumière et en apportant à long terme une grande quantité de matière organique. Lorsque les rémanents sont déposés sur un sol intact, ce qui est le cas le plus fréquent car les bûcherons déposent les rémanents au sol avant l'arrivée des engins, ou lorsque le sol n'est pas visible, l'état de surface est classé comme rémanent (R), avec un niveau variable selon l'épaisseur (*tableau II*). Dans le cas où les engins ont roulé sur les rémanents ou les ont déplacés, affectant ainsi le sol sous-jacent, un type particulier est noté indiquant cette combinaison (ex. : AR dans le *tableau II*).

2.3. Analyses

Les analyses visent d'une part à comparer les coupes entre elles et d'autre part à rechercher une structure dans la répartition spatiale des états de surface. Pour cela, les données sont considérées successivement au niveau de regroupements proposés par McMahon (1995) en 4 types principaux (N, R, P1, P2) (*tableau II*), au niveau des états de surface détaillés et selon une ordination des états de surface sur 3 axes que je propose. Pour cette ordination, j'ai considéré 3 types de modifications de l'état de surface du sol, à l'échelle des unités de mesure de 30 cm, avec plusieurs niveaux d'intensité : dépôt de bois au sol, perturbation sans poids, perturbation avec poids (donc potentiellement avec tassement). Le dépôt de bois correspond aux rémanents et au gros bois mort, ainsi qu'aux souches. Les perturbations sans poids concernent des décapages, des mélanges des horizons du sol et de la litière, des dépôts de sol, etc. qui ont été provoqués sans que la masse d'un engin ne soit appliquée au point de mesure. Au contraire, les perturbations avec poids correspondent aux effets directs des passages des engins au niveau des roues, avec application plus ou moins répétée de la masse de l'engin au point de mesure. Les états non perturbés (N, V ou X) sont considérés comme l'origine des évolutions possibles dans les 3 directions (axes) définies par les 3 types de perturbations. Les 3 axes sont gradués arbitrairement selon l'intensité des perturbations, de façon à positionner les types initiaux. Les combinaisons de types sont possibles et se situent dans l'espace séparant 2 axes. Le système de coordonnées permet de donner une valeur

Tableau II. Définition des états de surface du terrain et des codes correspondants utilisés dans l'article ; correspondance avec les codes de la méthode originelle du LIRO et avec les codes de la méthode du standard européen ; valeurs attribuées aux états de surface sur les 3 axes qualitatifs définis pour leur ordination.

Description des perturbations	Code	LIRO	Standard européen	Axe Bois	Axe Perturbation avec poids	Axe Perturbation sans poids
Non perturbé (N)						
Pas de perturbation du sol superficiel	N	1	1	0	0	0
Arbre vif	V	15	11	0	0	0
Rocher, fossé, etc.	X	15	11	0	0	0
Perturbations faibles (P1)						
Litière en place mais traces de passage	S	2		0	1	1
Idem avec rémanents	SR	13 + C		1	1	1
Litière déplacée, sol organique intact = décapage	D	3	2	0	0	1
Tassement, litière déplacée, trace de circulation	A	3 + C	2	0	2	1
Idem avec rémanents	AR	13 + C	2	1	2	1
Litière et sol organique mélangés	M	4	3	0	0	2
Sol déposé sur la litière	R	5	3	0	0	3
Perturbations sévères (P2)						
Sol organique déplacé, sol minéral exposé	P	6	4	0	3	1
Idem avec rémanents	PR	13 + M		1	3	1
Axe de circulation très tassé, aménagé	C	6	4	0	4	1
Idem avec rémanents	CR	13 + C		1	4	1
Mélange sol et litière	B	8	8	0	0	4
Ornière profondeur : 5–15 cm	O1	9	5	0	5	1
Ornière profondeur : 16–30 cm	O2	10	6	0	6	1
Ornière profondeur : > 30 cm	O3	11	7	0	7	1
Roche mère déposée sur le sol		12	8			
Sol minéral apparent au fond des ornières		9 + M				
Bois mort et rémanents (R)						
Epaisseur < 10 cm, couvrant 30 à 50 %	R1	13	9	1	0	0
Epaisseur 10–30 cm, couvrant > 50 %	R2	13	9	2	0	0
Epaisseur > 30 cm	R3	14	10	3	0	0
Gros bois mort (diamètre > 7 cm)	G	15	11	4	0	0
Souche	K	15	11	1	0	0
Idem avec rémanents	KR			2	0	0

numérique à chaque type et ainsi de calculer des distances entre types dans une unité arbitraire d'intensité de perturbation et des moyennes pour un échantillon de point de mesure.

La recherche des motifs spatiaux dans la répartition des états de surface porte sur les différences entre les transects d'une coupe, pour évaluer les effets de l'organisation générale du chantier qui doit occasionner plus de

Tableau III. Pourcentages des états du terrain et des 4 types principaux dans les 5 coupes.

Code	C1	C2	C3	C4	C5	Total
N	27	33	26	16	54	28
V	1	1	0	0	1	1
X	0	1	1	0	1	1
N	28	35	27	17	55	30
A	6	8	13	4	14	7
AR	2	1	6	0	1	1
D	1	4	1	14	4	6
M	1	2	4	2	2	2
R	1	4	2	1	1	2
S	15	11	12	1	7	9
SR	1	2	1	0	0	1
P1	27	32	39	22	28	29
B	0	1	1	7	0	3
C	0	0	0	2	0	0
O1	0	1	1	0	0	1
O2	0	1	0	0	0	1
O3	0	1	0	0	0	0
P	2	6	4	1	3	4
PR	1	0	0	0	0	0
P2	3	11	7	10	3	9
G	4	1	3	2	0	2
K	0	1	2	3	4	2
R1	18	8	12	15	8	12
R2	12	6	7	13	2	9
R3	7	5	4	17	0	9
R	41	22	27	51	14	33
Total	100	100	100	100	100	100

perturbations près de l'entrée de la coupe, et sur les répétitions le long des transects.

Les comparaisons des proportions des états de surface du sol sont basées sur le calcul du χ^2 de Pearson dans le cas général et sur le test exact de Fischer dans le cas des tables 2×2 . Le niveau de signification des différences entre les proportions prises deux à deux est indiqué par une répétition du signe d'ordination : < signifie une différence significative à 5 %, << idem à 1 % et <<< idem à 0.1 %, un tiret indiquant l'absence de différence significative. Les calculs statistiques ont été effectués avec le logiciel Systat 7 [18].

3. RÉSULTATS

3.1. Comparaison entre les coupes

3.1.1. Par types d'état de surface du sol

En considérant les états de surface regroupés en 4 types pour l'ensemble des parcelles, on constate que 30 % de la surface totale des parcelles analysées n'ont pas subi de modifications notables de leur état de surface (N), 32 % sont couverts par des rémanents (R), 29 % ont subi des perturbations superficielles (P1) et seulement 9 % ont subi des altérations fortes (P2) au niveau du sol (*tableau III*).

Les 5 coupes ont des proportions des 4 types très significativement différentes. Néanmoins, on observe que la variabilité entre les chantiers porte principalement sur N et R (38 % et 37 % d'amplitude respectivement). Le chantier exploité avec des méthodes traditionnelles (C5) présente une proportion de points non perturbés (N) très significativement supérieure à celles des autres chantiers, le chantier C4 ayant une proportion de N très significativement plus faible que celles des autres (C4 <<< C3-C1 < C2 <<< C5). La proportion de points avec du bois mort (R) est la plus élevée dans le chantier C4, ce qui explique sans doute que la proportion de N soit si faible. La proportion de rémanents dans C5 est la plus faible (C5 << C2-C3 <<< C1 << C4). P1 et P2 présentent des variations moins importantes (17 % et 8 % d'amplitude respectivement). Malgré une fréquence d'observation assez élevée, la proportion de P1 varie peu entre les chantiers (C4-C1-C5-C2 < C3 et C4 <<< C2). P2 est moins fréquent mais présente des variations plus importantes (C5-C1 < C3 < C4-C2 et C1 <<< C4).

3.1.2. Par états de surface du sol détaillés.

3.1.2.1. Non perturbés (N)

Les modalités X (rocher, fossé, etc.) et V (arbre vif) sont très peu représentées par rapport à la modalité N (*tableau III*). L'observation sur le terrain montre que cette modalité peut correspondre à des états de surface du terrain très différents les uns des autres, par exemple, une litière épaisse, un tapis de mousse ou une végétation dense. Ces différences pourraient être notées afin d'évaluer l'hétérogénéité du milieu avant l'exploitation.

3.1.2.2. Perturbations légères (P1)

Le traînage des piles de bois par le skidder dans le chantier C4 s'est traduit par une proportion de zone décapée (D) très significativement plus élevée que dans les autres chantiers (*tableau III*). L'utilisation de porteurs ou de tracteurs agricoles dans les autres chantiers s'est traduite par une forte proportion de passages superficiels (S) correspondant à la circulation des engins sur l'ensemble du parterre de la coupe. Le chantier traditionnel et le chantier C3 présentent une proportion plus élevée de passages où la litière (A) a été déplacée (C3 et C5 différents de C4, mais pas de différence significative avec C1 et C2), résultant probablement d'un matériel plus agressif (type de pneu, contrôle du patinage) ou de conditions moins favorables (pente, humidité).

3.1.2.3. Perturbations sévères (P2)

L'utilisation du skidder dans le chantier C4 se caractérise par une forte proportion des perturbations sévères avec un déplacement de sol mêlé à de la litière et des branches (B) (différence avec les autres chantiers $P < 0.001$), correspondant en particulier aux bourrelets de terre qui se forment devant les piles de bois lorsqu'elles sont tirées (*tableau III*). Les autres chantiers présentent surtout des zones avec une dégradation de l'horizon organique (P) causée par le passage répété d'engins dans des endroits privilégiés. Les autres modalités, comme les ornières, sont particulièrement peu représentées, sans doute du fait de conditions d'exploitation très favorables.

3.1.2.4. Rémanents et bois mort (groupe R)

Le chantier traditionnel C5 se distingue par l'absence de rémanents très épais (R3) et de gros bois mort (G) (*tableau III*). Elle résulte d'un démembrement plus complet des branchages avec un diamètre minimum des rondins prélevés plus petit que dans les coupes industrielles (5 cm contre 7 cm), et d'un prélèvement manuel systématique de tous les rondins, sans le souci de rentabilité des entreprises d'exploitation qui n'hésitent pas à abandonner des piles de bois trop éloignées. Le chantier réalisé avec un skidder (C4) présente au contraire une très forte proportion de rémanents épais (R3) qui correspondent aux andains formés nécessairement pour ne pas gêner le tirage des piles de bois dans la pente.

Les types de rémanents (R1, R2 et R3) étant définis par une épaisseur et un taux de recouvrement (*tableau III*), on peut calculer un volume d'encombrement par m^2 : $R1 = 0.05 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}^2 = 0.02 \text{ m}^3$, $R2 = 0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}^2 = 0.12 \text{ m}^3$ et $R3 = 0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}^2 = 0.5 \text{ m}^3$. Ces valeurs permettent d'exprimer l'importance globale des rémanents en terme d'encombrement apparent. Des données sur l'architecture des branchages, leur diamètre et leur densité, en incluant des mesures supplémentaires du volume représenté par le gros bois mort (G), permettraient de calculer le volume de bois laissé sur la coupe. En utilisant ces coefficients, on constate que les coupes C4 et C5 se distinguent nettement par leur valeur respectivement très forte ($1\,052 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) et très faible ($35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). La coupe C5 présente une différence particulièrement forte puisqu'elle est près de 10 fois plus faible que les valeurs des coupes immédiatement supérieures (C1 = $531 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, C2 = $342 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ et C3 = $296 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). On peut noter par ailleurs que le volume de rémanents semble décroître linéairement avec l'augmentation de la densité de réserve sur la coupe, à l'exception de C5 qui s'écarte de la droite liant les autres coupes. Cette relation est cohérente si l'on

considère qu'une forte densité de réserves indique un prélèvement plus faible et donc une production moindre de rémanents. La coupe traditionnelle (C5) semble avoir bénéficié d'un traitement différent des rémanents.

Les rémanents associés avec un autre type d'état de surface (SR, AR, PR, etc.) représentent une très faible part (moins de 10 %) par rapport à l'ensemble des points du type R. L'utilisation des rémanents comme protection du sol sur les voies de circulation est donc très peu utilisée. La bonne stabilité des sols de la région ne le nécessite pas autant que dans des régions limoneuses [13].

3.1.3. Avec ordination des états de surface du sol

Les 5 coupes se positionnent dans un espace à 3 dimensions où l'on évalue d'une part leur écart à la situation antérieure à l'exploitation, représentée par l'origine, et d'autre part leurs écarts réciproques indiquant leurs différences, interprétables selon la nature des axes (*figure 1*). Les valeurs moyennes sur les 3 axes sont peu élevées du fait du grand nombre de points d'échantillonnage classés comme intacts (N). La coupe 4 (C4) occupe la position la plus extrême sur l'axe lié au bois, notamment à causes des andains qui sont comptabilisés comme R3. Les coupes C2 et C3 ont la valeur la plus élevée sur l'axe des

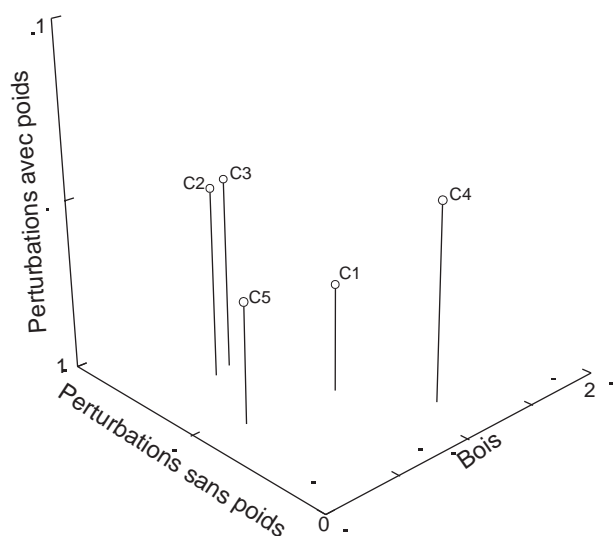


Figure 1. Position des coupes dans l'espace d'ordination des états de surface définis par l'axe « bois » indiquant l'intensité des dépôts de bois, l'axe « perturbation sans poids » indiquant l'intensité des perturbations du sol sans application de poids et l'axe « perturbation avec poids » indiquant l'intensité des perturbations du sol associées à l'application d'un poids au point de mesure, sous les roues des engins de débardage.

perturbations avec poids, indiquant une circulation généralisée des engins sur l'ensemble de la surface des parcelles. La coupe C5, de type traditionnel, se distingue par les valeurs les plus faibles sur les 3 axes, indiquant ainsi qu'elle a eu le moins de perturbation de ses états de surface.

3.2. Répartition spatiale des perturbations sur les chantiers et sur les transects

En comparant les transects selon leur distance à l'entrée du chantier et en comparant les segments de 20 m selon leur distance à l'axe des transects, il n'a pas été possible de mettre en évidence de différences dans les proportions des états de surface du sol. L'hypothèse d'une répartition non aléatoire des perturbations sur la coupe n'a pas été vérifiée avec les méthodes d'analyse employées.

La fréquence des couples de points contigus présentant le même type d'état de surface est très élevée (*tableau IV*). Cela se vérifie aussi pour les états de surface détaillés (tableau non présenté). Il y a donc une forte probabilité (61 % avec les 4 types en pondérant leur fréquence de succession identique par leur fréquence d'apparition) que deux points successifs présentent le même état de surface. Cela semble indiquer que le grain de répartition spatiale des états de surface du terrain est au moins égal à 2 m.

Tableau IV. Fréquences des associations d'état de surface. La valeur d'une case correspond au pourcentage des observations où un état de surface en colonne était inclus dans la succession d'état de surface en ligne quelle que soit sa position. La colonne total indique la fréquence d'observation des successions dans les transects.

	B	N	P1	P2	Total
BB	66 %				22 %
NB	16 %	19 %			11 %
NN		56 %			16 %
P1B	14 %		14 %		9 %
P1N		19 %	23 %		12 %
P1P1			58 %		16 %
P2B	1 %			6 %	1 %
P2N		2 %		5 %	1 %
P2P1			2 %	12 %	1 %
P2P2				75 %	6 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Un arbre de réserve (V) est associé à un carré non perturbé (N) dans 45 % des cas, ce qui illustre le soin pris par les débardeurs à ne pas circuler près des arbres de réserve afin de ne pas les blesser. Une ornière (O1 + O2 + O3) est adjacente à un point très perturbé (P) dans 70 % des cas. Les autres associations mixtes (2 états de surfaces adjacents et différents) présentent une fréquence d'apparition beaucoup plus faible et ne mettent pas en évidence des motifs de successions d'états de surface.

4. DISCUSSION

4.1. Méthode

La méthode employée pour évaluer les modifications des états de surface du sol causées par différentes techniques d'exploitation forestière présente les qualités de précision, fiabilité, facilité d'utilisation, utilité et validité statistique nécessaires pour ce type de mesure [19]. Néanmoins 2 aspects méritent une discussion particulière dans la perspective d'une amélioration de la méthode.

(1) La typologie des états de surface du sol proposée par MacMahon est parmi les plus détaillées qui aient été élaborées [19]. Cette précision s'avère à l'usage superflue dans l'étude puisque sur 22 états de surface recensés, seuls 7 ont une proportion dépassant 5 %, les autres sont très peu fréquents et ne peuvent se prêter à des analyses. En outre, cette typologie associe une évaluation qualitative de l'état de surface du sol, comme par exemple la distinction entre ornière et rémanents, et une évaluation semi-quantitative de certains d'entre eux, comme par exemple R1, R2 et R3 qui correspondent à différents niveaux de rémanents.

La proposition d'ordination des états de surface permet de quantifier les effets de l'exploitation sur le sol selon 3 axes, facilitant les comparaisons entre chantiers. Elle permet notamment de séparer la dimension qualitative des perturbations, définie par les axes, de leur intensité, définie par la position sur ces axes. Cependant, cette position est arbitraire et pourrait être revue en fonction de mesures physico-chimiques des modifications du sol ou selon une évaluation qualitative différente [2].

(2) Le second point de discussion de la méthode concerne le choix des unités d'échantillonnage. Telle qu'elle est proposée, la méthode est adaptée à une comparaison des parcelles entre elles. Or, les parcelles ne diffèrent pas uniquement par les techniques qui ont été

employées, elles ont en outre des surfaces, des sols, des pentes et des peuplements différents. Cette méthode n'est donc pas adaptée pour comparer des techniques entre elles. Nous pensons que dans cette perspective, il serait souhaitable de réaliser les observations sur des transects de longueur fixe qui pourraient être choisis et disposés afin de rendre compte de situations diverses mais contrôlées [2]. La largeur des bandes d'exploitation, qui constituent généralement le mode d'organisation des chantiers, ne dépasse pas 30 m en forêt tempérée [1], cette largeur pourrait être une longueur suffisante des transects pour quantifier les effets d'une technique d'exploitation forestière sur les états de surface du sol ; de tels transects pourraient constituer les unités d'échantillonnage d'un niveau plus élevé d'agrégation des effets des techniques d'exploitation.

4.2. Comparaisons entre chantiers d'exploitation forestière

Les effets de l'exploitation forestière sur la surface du terrain présentent des constantes et des variantes entre les techniques étudiées. On constate que la circulation des engins provoque une perturbation légère (P1) sur environ 30 % de la surface, quelle que soit la technique employée. Cette part de perturbation semble inhérente à toute activité d'exploitation. On peut supposer qu'elle est liée à la nécessité d'approcher les engins de débardage à une distance pratique de chargement qui est peu variable (5 à 10 m selon la portée de la grue pour les porteurs). Les impacts forts (P2), tels que les ornières, semblent accidentels et doivent être liés à des conditions particulières de travail, soit du fait de la micro-topographie, soit de la météorologie. Ainsi, les conditions favorables de l'année 1997, avec un hiver plutôt sec, peuvent expliquer en partie qu'il y ait peu de perturbations sévères, contrairement à ce qui s'observe parfois lors de fortes pluies. Ces perturbations peuvent par conséquent être réduites par la prévention, en évitant les zones trop humides et les virages avec un rayon trop petit par exemple, et par la surveillance en cessant les opérations dès que les conditions météorologiques deviennent défavorables.

Les comparaisons portent sur un nombre restreint de chantiers, elles doivent donc être considérées avec précaution. Une étude similaire conduite dans la région Limousin a montré aussi l'existence de fortes différences entre les techniques d'exploitation qui vont dans le même sens que les résultats présentés [4]. Il semble que l'utilisation du porteur, dès que les conditions de pente le permettent, est préférable à celle d'un skidder qui

occasionne le décapage de larges surfaces. Le mode de traitement des rémanents, et leur quantité, qui est fonction du prélèvement, influent fortement sur la proportion de surface qu'ils couvrent. Ainsi, l'exploitation traditionnelle laisse apparemment beaucoup moins de bois sur la coupe, et surtout peu de gros bois mort, que les coupes industrielles. De ce point de vue, l'exploitation traditionnelle apparaît comme plus intensive et moins favorable à la conservation des espèces saproxylophages de plus en plus rares [9, 17]. Dans le même temps, elle est celle qui est la moins éloignée de la situation avant coupe, donc la moins perturbée.

4.3. Conclusion

L'étude montre qu'il existe des différences très importantes entre les techniques d'exploitation quant à leurs effets sur la surface du sol. La biodiversité forestière associée au sol subit de ce fait l'influence de ces modifications de la surface du terrain. Ainsi, la végétation des coupes varie très fortement à une échelle fine selon l'état de surface du sol [2, 3]. Il semble donc utile d'approfondir l'étude des modifications des états de surface du sol causées par les différentes techniques d'exploitation afin d'évaluer leur variabilité et leurs effets sur la biodiversité et d'autres caractéristiques écologiques. Ces études permettront d'élaborer des conseils pour améliorer les engins travaillant en forêt, mais aussi les pratiques des opérateurs.

Remerciements : Cette étude a été co-financée par l'INRA, la SEBSO, le ministère de la Recherche et la Communauté européenne. M. Carbonnel a aidé à réaliser les mesures sur le terrain.

RÉFÉRENCES

- [1] Dalla-Pria E., Laurier J.-P., Morvan J., Rocher-Barrat B., Rotaru C., Manuel de l'exploitation forestière, ARMEF-CTBA-IDF, 1995, 442 p.
- [2] Deonchat M., Exploitation forestière et biodiversité : exemple dans les forêts fragmentées des coteaux de Gascogne. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Université Toulouse III, Toulouse, 1999, 191 p.
- [3] Deonchat M., Balent G., Effets de l'exploitation forestière sur la flore à une échelle fine, *Ann. For. Sci.* 58 (2001) 315–328.
- [4] Diaz S., Comparaison de modalités de débardage en terme d'impacts au sol, ENGREF, Nancy, France, 1999, 40 p.
- [5] Dobrovolskii G.V., The role of soils in preservation of biodiversity, *Eurasian Soil Sci.* 29 (1996) 626–629.
- [6] Grey D.C., Jacobs E.O., The impact of harvesting on forest site quality, *South Afric. Forest. J.* 140 (1987) 60–66.
- [7] Halpern C.B., Spies T.A., Plant species diversity in natural and managed forests of the Pacific Northwest, *Ecol. Appl.* 5 (1995) 913–934.
- [8] Hubert A., Les types de stations forestières du Lannemizan, Ger et Moyen Adour, CEMAGREF-DICOVA, Bordeaux, 1991, 436 p.
- [9] Kaila L., Martikainen P., Punttila P., Dead trees left in clear-cuts benefit saproxylic Coleoptera adapted to natural disturbances in boreal forest, *Biodiv. Conserv.* 6 (1997) 1–18.
- [10] McMahon S., A survey method for assessing site disturbance, LIRO, Rotorua, New Zealand, 1995, 16 p.
- [11] Mou P., Fahey T.J., Hughes J.W., Effects of soil disturbance on vegetation recovery and nutrient accumulation following whole-tree harvest of a northern hardwood ecosystem, *J. Appl. Ecol.* 30 (1993) 661–675.
- [12] Prevost M., Effects of scarification on seedbed coverage and natural regeneration after a group seed-tree cutting in a black spruce (*Picea mariana*) stand, *Forest Ecol. Manage.* 94 (1997) 219–231.
- [13] Ruffieux S., Tassement des sols forestiers : contribution à l'évaluation de la sensibilité et à la recherche de méthodes préventives, Office National des Forêts, Mémoire de fin d'étude ESITPA, 1997, 50 p.
- [14] Rydgren K., Hestmark G., Okland R.H., Revegetation following experimental disturbance in a boreal old-growth *Picea abies* forest, *J. Veg. Sci.* 9 (1998) 763–776.
- [15] Schmidt M.G., Macdonald S.E., Rothwell R.L., Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta, *Can. J. Soil Sci.* 76 (1996) 531–540.
- [16] Smith C.W., Johnston M.A., Lorentz S., The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils, *Geoderma* 78 (1997) 93–111.
- [17] Speight M.C.D., Les invertébrés saproxyliques et leur conservation, *Nat. Environ. Ser.* 42 (1989) 1–81.
- [18] SYSTAT, Systat (R) 6.0 for windows (R), SPSS: Chicago, USA, 1996, 751 p.
- [19] Thompson M.A., Mattson J.A., A method for visual assessment of soil disturbance following forest operations, in: Schiess P., Krogstad F. (Eds.), *Harvesting logistics: from wood to markets*, proceedings of the Council on Forest Engineering Conference, Portland, Oregon, 1998, pp. 1–5.
- [20] Visser R., Mesures des perturbations du sol liées aux opérations forestières. Essai du nouveau protocole européen, in: *Proceedings of the Management practices for forest harvesting considering environmental and economic constraints symposium*, CTBA, Saint Jean d'Arvey, Savoie, France, 1997, pp. 1–9.

