

CAHIERS
SCIENTIFIQUES
n° 13 - 2021

*

LES COUPES À BLANC EN FORÊT

*

UNE PROBLÉMATIQUE D'ACTUALITÉ DU MASSIF DU MORVAN

*





*

LES COUPES À BLANC EN FORÊT

*

UNE PROBLÉMATIQUE
D'ACTUALITÉ
DU MASSIF DU MORVAN

*



Le Parc naturel régional du Morvan



Îlot granitique au cœur de la Bourgogne, le Morvan est classé « Parc naturel régional » depuis 50 ans. La charte 2020-2035 intègre dans le respect des valeurs fondatrices des Parcs naturels régionaux, non seulement les préoccupations des élus mais surtout celles des habitants du Morvan. Grâce à

un travail participatif, le projet est décliné en 4 axes et 8 orientations. Les paysages constituent le « fil rouge » du projet de territoire.

Axe 1 : Consolider le contrat social autour d'un bien commun : le Morvan

Orientation 1 : S'approprier et partager les atouts et les enjeux du Morvan.

Orientation 2 : S'engager et co-construire un territoire vivant, ouvert et solidaire.

Axe 2 : Conforter le Morvan, territoire à haute valeur patrimoniale, entre nature et culture

Orientation 3 : Préserver les ressources naturelles et reconquérir la biodiversité.

Orientation 4 : Conjuguer passé, présent et futur : les cultures du Morvan en mouvement.

Axe 3 : Affirmer ses différences, une chance pour le Morvan !

Orientation 5 : Affirmer l'identité de moyenne montagne.

Orientation 6 : Renforcer la destination touristique.

Axe 4 : Conduire la transition écologique du Morvan

Orientation 7 : Agir face au changement climatique.

Orientation 8 : Renouveler les modèles économiques.

Le périmètre actuel du Parc s'étend sur 137 communes et 3 villes partenaires, soit 67 900 habitants pour 3 220 km² et, qui constituent un ensemble cohérent engagé solidairement pour 15 ans.

Pour en savoir plus : www.parc dumorvan.org
www.patrimoinedumorvan.org

Président : Sylvain MATHIEU
Directeur : Olivier GEORGES

Le Conseil scientifique

La mise en place d'un Conseil scientifique est un atout important pour la grande majorité des Parcs naturels régionaux (PNR) qui en ont créé pour stimuler et accompagner leurs missions, tout particulièrement celle relative à l'expérimentation et à la recherche et aussi à la prospective. Organe consultatif du Parc, il est là pour l'aider à progresser. Il est appelé à répondre à des sollicitations et saisines du Parc. Force de proposition et lanceur d'alerte, il peut également s'autosaisir.

Le Conseil scientifique est un des éléments constitutifs d'un PNR avec l'équipe des chargés de mission, le comité syndical, les commissions, le conseil associatif et citoyen. Il favorise la mise en réseau des PNR de la Région (PNR Haut-Jura et PNR Ballon des Vosges) ainsi qu'avec ceux du Massif central. Pluridisciplinaire et constitué d'une vingtaine de membres, le Conseil scientifique du PNRM dirige les éditions des Cahiers scientifiques du Parc, la lettre du Conseil scientifique et co-organise avec Bibracte les Entretiens de Bibracte-Morvan.

Co-Présidents : Corinne BECK et Jean VIGREUX

Les Cahiers scientifiques du Parc naturel régional du Morvan

Directeurs de la publication : Corinne BECK & Jean VIGREUX

Rédacteur en chef : Daniel SIRUGUE

Comité de rédaction : le Conseil scientifique 2021-2026

Environnement / Nature :

Sophie MONTURE (biodiversité - écologie - évolution),
Patrice NOTTEGHEM (écologie), Jacques RANGER (sols - écosystèmes forestiers), Isabelle JOUFFROY-BAPICOT (paléo-écologie),
Stanislas SIZARET (géologie), Olivier MATHIEU (géochimie),
Thierry CASTEL (climatologie).

Aménagement du territoire :

Catherine FRUCHART (géomatique), Nicolas JACOB-ROUSSEAU (géographie - hydromorphologie), Alain DELAVEAU (agriculture - alimentation et santé), Vincent GODREAU (écologie forestière),
Roger GOUDIARD (agroéconomie).

Histoire / Patrimoine culturel

Corinne BECK (archéologie - histoire médiévale), Jean VIGREUX (histoire contemporaine), Pierre LÉGER (patrimoine oral), Sylvie GRANGE (médiation scientifique), Elisabeth REMY (sociologie), Nicolas RENAHY (sociologie rurale), Agnès ROUSSEAU (musée - archéologie).

Secrétariat de rédaction :

Daniel SIRUGUE - Maison du Parc naturel régional du Morvan
58230 SAINT-BRISSON - Tél. 03 86 78 79 23
daniel.sirugue@parcdumorvan.org

Ont collaboré à ce numéro :

Philippe AMIOTTE-SUCHET, Soraya BENNAR, Théo DAMASIO,
Céline DAVOT, Marie-Cécile DECONNINCK, Alain DELAVEAU,
Christine DELEUZE, Vincent GODREAU, Marion GOSSELIN,
Damien MARAGE, Sylvain MATHIEU, Pierre PACCARD, Laurent PARIS,
Jacques RANGER, Daniel SIRUGUE.

Photographies :

Christine DODELIN, Jean-Baptiste DRAIN, Clément GARINEAUD,
Véronique LEBOURGEOIS, Arnaud LEGOUT, Yvon LETRANGE,
Alain MILLOT, Dominique MORIEUX, Jacques RANGER,
Stéphane G. ROUÉ, Daniel SIRUGUE.

En couverture : Hêtraie à houx du Morvan, photographie de Daniel SIRUGUE.

Citation de l'ouvrage :

BECK C., VIGREUX J & SIRUGUE D. (dir.) 2021. Les coupes à blanc - Une problématique d'actualité du massif du Morvan. *Cahiers scientifiques du Parc naturel régional du Morvan* 13, 112 p.

Editeur : Parc naturel régional du Morvan

Mise en page : Bat Combo

Impression : Imprimerie CHIRAT

Tirage : 400 exemplaires

Dépôt légal : Mai 2021

ISSN : 1285-5561

ISBN : 978-2-918060-18-5

SOMMAIRE

ÉDITORIAL

Sylvain MATHIEU 5

PRÉAMBULE

Corinne BECK & Jean VIGREUX..... 6

SAISINE

SAISINE SUR LES COUPES RASES EN FORÊT

Conseil scientifique du Parc naturel régional du Morvan .. 8

RAPPORT

LES COUPES À BLANC EN FORÊT ASPECTS GÉNÉRAUX ET APPLICATION AU PARC NATUREL RÉGIONAL DU MORVAN

Jacques RANGER, Vincent GODREAU & Alain DELAVEAU 15

RÉSUMÉ 15

ABSTRACT 19

A. LES COUPES À BLANC 22

- A1. Définition, contexte origine, justification
- A2. Le contexte du Morvan

B. EFFETS DES COUPES À BLANC : ASPECTS BIOPHYSIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX 33

- B1. L'impact des récoltes sur le statut carboné et minéral du sol : la fertilité du sol
- B2. La préparation du sol pour la génération suivante
- B3. Les paramètres majeurs modifiés par la coupe à blanc impactant le fonctionnement du sol, de l'écosystème forêt et celui des écosystèmes dépendants (eaux de surface) ; rôle du contexte
- B4. Conséquences des coupes à blanc et de la préparation des terrains pour les générations suivantes sur les caractéristiques biophysiques des écosystèmes

C. EFFETS DES COUPES A BLANC : ASPECTS BIOLOGIQUES 53

- C1. L'écosystème pris dans sa globalité, tel qu'il apparaît après la coupe
- C2. Impact des coupes rases sur la biodiversité du compartiment épigé
- C3. Impact des coupes rases sur la biodiversité du compartiment sol

C4. Impact des coupes rases sur l'hydrobiologie des cours d'eau

C5. Aspects moins connus à ne pas négliger

D. LA SIMPLIFICATION DES ÉCOSYSTÈMES 67

E. LES SOLS DANS TOUTES LEURS COMPOSANTES SONT UNE RESSOURCE NON RENOUVELABLE À PROTÉGER 69

- E1. Les alternatives à la coupe à blanc dans un système productif
- E2. La protection des sols à l'inter-génération

F. FORÊTS ET PAYSAGES 72

- F1. La forêt et la déprise agricole
- F2. La forêt et la récolte de bois
- F3. Les pratiques respectueuses des paysages

G. CONCLUSION 77

- G1. Impact des coupes à blanc : le diagnostic
- G2. Adaptation de la gestion durable des forêts aux caractéristiques du Morvan

H. PERSPECTIVES 88

- H1. Disposer d'écosystèmes de référence pour identifier les dérives et la durée des impacts
- H2. Changer de paradigme dans un système longévif, lourd en inertie : vers une multifonctionnalité active
- H3. Faire du Morvan une zone d'expérimentation dans le domaine de la gestion multifonctionnelle et durable de versants boisés, où la propriété est privée et de faible dimension

ANNEXES 106

La contemplation désabusée d'un morvandiau, devant le
paysage chaotique post-coupe rase.

Y. LETRANGE



ÉDITORIAL

Sylvain MATHIEU, Président du Parc naturel régional du Morvan

Je suis né dans le Morvan en 1975 et toute ma vie j'ai entendu les gens se plaindre des coupes à blanc ; d'abord parce qu'elles abîmaient des paysages qui semblaient être là depuis des temps immémoriaux, ensuite parce que ces coupes s'accompagnaient souvent de chemins abîmés par le débardage d'un important volume de bois.

Très tôt on m'a expliqué que la forêt morvandelle était autrefois exploitée sans coupes à blanc, par la technique du taillis fureté, et que les coupes à blanc étaient une pratique relativement récente liée à l'enrésinement de la forêt morvandelle.

Comme bon nombre de Morvandiaux et Morvandelles, cette pratique m'a toujours choqué par sa brutalité : il est surprenant de vouloir gérer une forêt en la détruisant. Car raser tous les arbres d'une forêt en quelques jours est une méthode radicale, qui consiste quoi qu'on en dise, en une destruction d'un écosystème existant. Certes la coupe à blanc est généralement suivie d'une plantation, donc d'une reconstruction, mais elle fait bien passer l'écosystème forestier par une phase de disparition, temporaire dans le cas d'une plantation à l'identique, ou définitive dans le cas d'un changement d'essence, notamment dans le cas de l'enrésinement.

Je me suis toujours dit qu'il devait bien y avoir une autre façon de faire, une sylviculture sans coupes à blanc, qui s'appuie sur la régénération naturelle. Lorsque j'ai appris le métier de forestier, j'ai découvert qu'une telle sylviculture existait bel et bien : la futaie irrégulière, ou la futaie régulière par régénération naturelle progressive.

Je pense que dans un territoire classé « parc naturel régional », qui plus est situé en zone de montagne, c'est ce type de sylviculture qui devrait prévaloir.

Mais on en est encore loin, et le débat entre ceux qui vivent de la production de bois et les autres est vif ! De plus en plus de forestiers sont convaincus pour de multiples raisons de l'intérêt d'une sylviculture sans coupes rases, mais un certain nombre considère que le droit de raser sa forêt fait partie du sacro-saint droit de propriété...

Depuis que je suis né j'entends ceci : « *Mais que fait le Parc ? À quoi cela sert d'avoir un parc naturel régional si celui-ci n'est pas capable d'empêcher qu'on rase des forêts ?* ». Et la réponse est simple : il n'en a absolument pas le pouvoir !

Plus que jamais, la population presse les élus d'agir. C'est pour cela que le Parc a décidé de s'engager pour mieux réguler ces coupes et parvenir à renverser la situation actuelle : la coupe rase ne devrait plus être la règle mais l'exception.

Mais un tel projet a besoin de bases scientifiques et techniques solides. Aussi afin d'objectiver ce débat, j'ai souhaité saisir notre conseil scientifique. Le résultat est remarquable, je remercie vivement toutes celles et tous ceux qui y ont contribué ; on voit ici tout l'intérêt pour les parcs de disposer d'un conseil scientifique. Je vous souhaite une bonne et instructive lecture !

PRÉAMBULE

Corinne BECK & Jean VIGREUX, Co-présidents du Conseil scientifique

Les paysages morvandiaux, comme ailleurs, ont beaucoup évolué au cours du temps en fonction des pratiques agricoles, pastorales et forestières, en fonction également de la démographie, de l'organisation sociale et foncière des communes et hameaux. La forêt a contribué pendant de longs siècles au système de la communauté villageoise (bois de chauffage, aussi bien local que dans le cadre du flottage pour Paris ; bois de travail, mais aussi cueillette et pâturage des animaux, sans oublier la chasse). Les enjeux fonciers, la redistribution des patrimoines et l'exploitation inscrite dans un modèle productiviste ont changé la donne.

Après une érosion plus ou moins continue jusqu'au XIX^e siècle, les surfaces forestières ont de nouveau doublé en un peu plus d'un siècle et demi. Ces forêts qui font aujourd'hui partie de nos paysages sont, pour la plupart d'entre elles, issues de reboisements aidés par le Fonds Forestier National. Les collines cultivées (« les chaumes »), les pâturages (moutons), sont (re)devenues des forêts. Plusieurs expositions et publications ont été réalisées par le Parc Naturel Régional du Morvan pour sensibiliser l'opinion sur la place de la forêt morvandelle dans le paysage et l'activité socio-économique¹.

Dans le Morvan, et depuis 50 ans, le Douglas constitue la première essence

de reboisement. Depuis sa création en 1970 et à travers trois Chartes Forestières de Territoires successives, le Parc a mené de multiples actions pour conseiller propriétaires, gestionnaires, exploitants forestiers afin d'intégrer les enjeux paysagers et environnementaux. Aujourd'hui la qualité paysagère du Morvan, dont la préservation et la valorisation constituent le « fil rouge » de la nouvelle Charte du Parc 2020-2035, est mise en péril par la déprise agricole et par l'industrialisation sans cesse accrue de l'exploitation forestière. Ces peuplements de résineux sont parvenus à un stade d'évolution conduisant à leur récolte.

Les coupes rases et l'enrésinement posent question depuis au moins la création du Parc Naturel Régional. Cette question avait été soulevée en son temps par l'élus du Morvan, François Mitterrand, qui mythifiait sans doute la forêt de feuillus dans une expression enracinée au sein du roman national lié aux représentations celtes : « J'ai vu disparaître en trente ans la forêt celte du Morvan. Je représente ce pays. Je n'ai rien pu faire pour le défendre. Que faire contre la coalition de la loi, de l'administration et de l'indifférence ? Pour éveiller l'opinion, j'ai multiplié les débats, les colloques, pris part aux rares groupes et comités qui tentaient l'impossible... Paris n'a jamais répondu que par des bordées d'axiomes. Économie, économie d'abord ! À quoi bon ces chênes qui exigent un siècle pour la maturité, ces hêtres dont la fibre refuse de s'intégrer aux techniques rentables de la cellulose, ces frênes, ces charmes, ces trembles, ces bouleaux ? Chaque semaine, par centaines d'hectares, la forêt de lumière tombe sous l'assaut des

1. Citons entre autres l'exposition de 1981 accompagnée de la publication « Les Forêts morvandelles », *Courrier du Parc naturel régional du Morvan*, n° 25, 1981 ; *La forêt morvandelle, Cahiers scientifiques du Parc* n° 5, 2007 ; *La forêt en Morvan, Cahiers scientifiques du Parc* n° 10, 2011.



La coupe rase restructure brutalement le paysage en zone montagnarde, par la mise à nu d'un versant, par les peuplements qu'elle maintient, et par la préparation du site pour la nouvelle plantation : le surnom de paysage iroquois n'est pas usurpé.

scrapers. Place aux résineux. Que dire aux petits propriétaires du cru ? De 1946 à 1973, le Fonds Forestier a réservé ses primes et ses prêts aux plants qui poussent vite. Vite, vite, la terre et la sève et le bois doivent plier le cycle des mûrissements au rythme de l'homme pressé. Les grandes compagnies achètent nos collines, rasant nos horizons² ».

Si cette prise de conscience a ralenti un temps les coupes rases, ces dernières années ont vu une accélération du processus.

En novembre 2018, à la demande du Président du Parc, le Conseil scientifique s'est engagé dans un travail de réflexions et d'analyses afin d'objectiver au mieux le sujet : il s'agissait de faire le point sur les connaissances existantes concernant les coupes rases et leurs impacts, sans préjuger de la nature de la forêt avant

coupe rase (feuillus, résineux, résineux issus de plantation...), ainsi que sur les alternatives possibles.

La matière est très abondante. Un important travail a été mené, fondé sur une approche analytique approfondie des ressources bibliographiques nationales et internationales, couplé à la grande expérience en la matière des trois auteurs de ce document. Celui-ci détaille les aspects biotechniques, socio-économiques, juridiques et leur complexité, explicite les enjeux dans un contexte de changements climatiques et d'incertitudes ouvert par la crise du Covid.

Ainsi, répondant aux missions qu'assigne la Fédération des Parcs aux conseils scientifiques, ce document a pour ambition de livrer un ensemble de **réflexions et analyses scientifiques** pour éclairer les débats du moment.

2. François MITTERRAND, *L'abeille et l'architecte*, Paris, Flammarion, 1978, 294 p.

SAISINE SUR LES COUPES RASES EN FORÊT

Conseil scientifique du Parc naturel régional du Morvan
Réunion du 14 décembre 2020 - Saint-Brisson (58)

LES COUPES À BLANC : DÉFINITION ET CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE

La coupe à blanc est une pratique sylvicole qui consiste à extraire en une seule fois un peuplement. La régénération se réalise soit par plantations, soit de façon naturelle à partir des semenciers du site ou des peuplements adjacents.

La problématique actuelle autour de cette pratique sylvicole résulte d'une conception d'après-guerre, valable pour la forêt, mais aussi pour l'agriculture à savoir redynamiser des filières exsangues pour « nourrir » la France. L'intensification des pratiques est alors privilégiée, avec pour conséquences une forte simplification des écosystèmes et des itinéraires techniques privilégiant l'apport d'intrants chimiques, l'introduction de la mécanisation quand c'est possible et surtout le recours, en général, aux essences productives à croissance rapide.

Depuis la Seconde Guerre mondiale, on a eu des reboisements monospécifiques d'essences à croissance rapide, largement favorisés par le Fonds Forestier National ; ce sont ainsi 2,3 millions d'hectares de plantations qui ont ainsi été subventionnés, dont plus de 50 % sur des surfaces inférieures à 2 hectares.

La longévité de ces peuplements intervient sur ces décisions d'aménagement pour un temps long, surtout par rapport à l'espérance de vie de l'homme.

Dans le même temps, les prises en compte des problématiques environnementales de la société sont apparues dans les années 1970.

Ainsi donc les peuplements arrivant aujourd'hui à maturité et abattus fournissent des produits appréciés, mais les méthodes pour les obtenir sont, à ce jour, en décalage avec les aspirations de la société.

Il faut, enfin, mentionner le contexte socio-économique de la filière sylvicole et citer les justifications de la coupe à blanc :

- La rentabilité des produits forestiers et la durée longue pour le retour sur investissement expliquent, pour partie, le non-investissement dans ces filières ;
- La déprise agricole, autre réalité socio-économique, traduite par le reboisement de petites parcelles dont le propriétaire, en général non rural, n'est également pas forestier ;
- Un déficit notable de main-d'œuvre pour ce travail très accidentogène, d'où le recours à la mécanisation des opérations d'abattage et de débardage ;
- Les justifications finales de la coupe à blanc sont au moins de trois ordres :
 - Techniques : récolte efficace enlevant un maximum de produits rapidement ;
 - Économiques : valorisation y compris des faibles volumes ;
 - Sociales : la mécanisation limite la pénibilité du travail et les interventions en forêt sont alors beaucoup moins accidentogènes.

Nous mentionnerons dans ce texte l'incidence des coupes à blanc sur la fertilité et la structure du sol, les conséquences de ces pratiques sur la biodiversité et enfin leurs impacts sur l'environnement paysager.



Un paysage caractéristique du Morvan : au premier plan une plantation de sapins de Noël, puis une coupe rase partielle en mikado d'un peuplement à dominante feuillue, et au troisième plan une plantation résineuse.

Des propositions adaptées au contexte du Morvan sont avancées dans la conclusion où les coupes à blanc représentent en moyenne 900 ha chaque année.

EFFETS DES COUPES À BLANC SUR LE MILIEU : CONSÉQUENCES SUR LA FERTILITÉ DU SOL

La récolte de la biomasse forestière conduit à l'exportation de tout ou partie du carbone et des éléments nutritifs qu'elle contient. Toutefois, la relation entre les quantités récoltées et les exportations minérales, n'est pas linéaire. Les éléments nutritifs sont beaucoup plus concentrés dans les branches, les feuilles, et les aiguilles que dans le bois qui s'est en quelque sorte « vidé » de ces éléments, dans un processus connu appelé « translocation » ou transfert interne des tissus âgés vers les organes en croissance dans la plante !

En conséquence :

- Le prélèvement au sol, ne prenant pas en compte les translocations d'éléments nutritifs, est plus faible que les besoins totaux ;
- Les litières restituent l'essentiel du prélèvement au sol (de 40 à 80 %) ;
- Finalement, la fixation quasi définitive d'éléments dans la biomasse est limitée et ne représente que 10 à 15 % du prélèvement au sol ;
- Toutefois, par exemple pour le Douglas, si on exporte les branches, en plus du bois fort, on « gagne » 13 % de biomasse en doublant les exportations d'éléments et si on exporte l'ensemble de la biomasse, on triple les exportations pour « n'en gagner » que 20 % de plus !!

En conclusion :

Les exportations d'arbres entiers et des rémanents (par brûlage ou andainage) conduisent à des pertes substantielles pour l'écosystème et l'extraction des

racines est, sauf cas exceptionnel, une hérésie ! Ces éléments absorbés sont biodisponibles et leur retrait diminue donc la fertilité du sol.

Par ailleurs, pour les sols pauvres, la capacité de renouvellement de ces éléments est faible et ces pratiques acidifiantes sont donc à proscrire.

Conséquences des coupes à blanc sur la structure du sol (mode d'assemblage et organisation des constituants solides) :

L'organisation du sol en horizons et la structure interne de ces horizons, c'est-à-dire l'organisation des particules en agrégats, vont favoriser la porosité et par là même, la circulation des fluides (eau et air), la prospection racinaire et l'activité biologique. Mais les interventions des abatteuses, puis des engins pour le débardage scalpent le sol, c'est-à-dire élimine la litière en mettant le sol minéral à nu, provoquent orniérage, tassement, puis souvent érosion mécanique !

Le mélange des horizons peut, de plus, avoir des répercussions importantes et durables sur l'activité biologique, elle-même liée à la structure et à la stabilité du sol.

Le débardage des produits et la préparation des sites pour la génération suivante, sont ainsi potentiellement très perturbants pour l'écosystème, mais varient toutefois fortement avec les méthodes employées.

- Le brûlage entraîne la perte d'éléments par volatilisation du carbone et plus particulièrement de l'azote et du phosphore, mais entraîne aussi la dégradation de la microflore ! Les risques d'érosion physique et chimique sont accrus, notamment si le sol est maintenu à nu.
- L'andainage élimine physiquement une source de carbone et de nutriments de la zone où les plants vont être installés, pour les déplacer vers l'andain.

Cette élimination est d'autant plus importante que l'opération transfère dans les andains, les litières, voire une partie du sol minéral superficiel.

Par ailleurs, la mise à nu de surfaces importantes, le tassement de la zone de plantation et la réalisation de l'andain perpendiculairement aux courbes de niveau, augmentent notablement le risque d'érosion physique et chimique du sol. Les particules les plus fines sont alors entraînées plus facilement vers le bas de pente et les ruisseaux !

De plus, les peuplements futurs seront d'autant plus affectés que le sol est pauvre. Il s'agit donc là, d'une perturbation majeure d'autant plus forte que le sol est pentu.

Des solutions du sol aux eaux de surface :

Le rôle de la forêt est majeur dans le cycle hydrologique terrestre et l'eau est un facteur majeur de développement du couvert forestier.

La forêt régule les écoulements via l'interception des pluies et l'effet mulch des horizons holorganiques de surface. Éliminer le couvert forestier, voire les couches holorganiques, entraîne des perturbations importantes du cycle hydrologique et donc du bilan hydrique. Les solutions du sol sont par ailleurs d'excellents indicateurs du fonctionnement courant de celui-ci notamment par la présence d'anions libres présents, produits de la dégradation de la matière organique et en particulier de l'ion nitrate (NO_3^-) issu principalement de la biodégradation de l'azote organique du sol.

Tous ces éléments chimiques sont produits et consommés ; ce n'est que le déséquilibre entre production et consommation, qui explique leur présence dans les eaux de drainage ainsi que celle des cations associés (calcium, aluminium...)

IMPACT DES COUPES À BLANC SUR LA BIODIVERSITÉ

Tous les compartiments de l'écosystème sont concernés. La biodiversité est majeure pour le fonctionnement du sol ; citons entre autres, le rôle fondamental des mycorhizes¹ et du microbiome² associé dans l'alimentation en eau et la nutrition minérale des plants forestiers ; la dégradation de la matière organique, qui est une fonction essentielle pour le recyclage du carbone et d'autres éléments minéraux. Les entrées d'azote atmosphérique par la fixation symbiotique ou non, l'altération des minéraux du sol indispensable pour la libération d'éléments biodisponibles. Mais la biodiversité n'est pas équi-distribuée dans le sol et c'est dans les horizons de surface qu'elle se concentre. Ainsi donc toutes les pratiques contraignantes, pour la partie superficielle organique du sol, présentent le risque d'altérer cette biodiversité.

Dans le Morvan, toute exportation de matière sèche réduit la capacité du sol à neutraliser l'acidification ; le pH ne doit jamais être inférieur à 4,5 pour ne pas altérer la vie biologique.

Dans les sols compactés, à pH supérieur à 5, une restauration de la porosité est possible grâce aux vers de terre. En revanche, en sol plus acide, ces vers disparaissent et la restauration est plus lente. Une végétation spontanée invasive peut se développer (jonc, glycérie) imposant alors une forte concurrence aux plants forestiers.

1. Il s'agit d'associations à bénéfices réciproques entre le mycélium des champignons et les racines des plantes et des arbres. Cette relation permet ainsi une augmentation par dix, voire par cent, du pouvoir d'absorption des végétaux.

2. Ensemble des microorganismes présents à la surface et autour des racines et radicelles des végétaux. C'est une aire de vie correspondant à une niche écologique, également nommée rhizosphère.

Le morcellement de l'espace, résultant d'une coupe à blanc, empêche une ou plusieurs espèces de se déplacer comme elles le devraient, ou le pourraient, en l'absence de facteur de fragmentation.

Les individus, les populations et les espèces sont différemment affectés par la fragmentation de leur habitat. Des variations s'observent selon leurs capacités adaptatives, leurs degrés de spécialisations, leurs dépendances aux structures éco-paysagères. C'est ainsi, par exemple, que les oiseaux forestiers qui volent peuvent exploiter des espaces différents. En revanche, on observe un impact important sur la prédation des espèces d'oiseaux nichant à terre !

Concernant la microfaune, suite aux interventions en forêt, on observe des séquences de recolonisation de l'espace, ce qui est notable pour les carabes. À l'inverse, les communautés d'arthropodes décomposeurs du sol sont toujours affectées 10 ans après !

On note également un impact négatif de ces travaux en forêts sur les petits serpents. D'autres observations montrent l'importance des rémanents maintenus au sein de la coupe rase, en tant que refuge pour les petits mammifères (souris, campagnols, musaraignes) et terrain de chasse privilégié pour la martre !

La coupe rase peut conduire à un risque d'extinction de certaines espèces, même si le plus souvent on assiste à des séquences de recolonisation. Toutefois elle altère toujours la connectivité écologique, même si certaines espèces présentent une résilience notable (cas des oiseaux nicheurs, par exemple).

Signalons enfin que la relation entre fragmentation et régression de la biodiversité est de type « non linéaire » et les effets de seuil sont encore à rechercher parmi les espèces animales et végétales.

Enfin concernant l'impact des coupes rases sur les cours d'eau, on observe d'abord que l'érosion physique peut augmenter la turbidité des eaux de surface et combler des frayères par ensablement.

On note surtout les conséquences de l'acidification progressive des sols forestiers conduisant à la présence d'aluminium toxique des eaux de surface expliquant alors la chute de la biodiversité. De telles situations ont été décrites dans les Vosges, avec une disparition totale des salmonidés, quand le taux d'aluminium dépasse 0,1 mg/litre.

L'impact des pratiques sylvicoles sur les cours d'eau a conduit le PNRM à participer à un programme Life dont les conclusions proposent la conversion des peuplements allochtones résineux substitués aux feuillus, la mise en place de ripisylves, la proposition d'ouvrages temporaires de franchissement des cours d'eau et des techniques de débardages alternatives.

COUPES RASES ET PAYSAGES

Il ne s'agit pas dans cette partie de développer une problématique autour du paysage.

Rappelons toutefois, que le Parlement a adopté en 2016 la Loi « Reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages » largement inspirée de la Convention Européenne du Paysage.

Nous examinerons donc, dans cette saisine, uniquement les pratiques pouvant impacter plus ou moins durablement notre environnement paysager.

Forêt et déprise agricole :

La forêt est très souvent la résultante de l'évolution du monde rural ; plus elle occupe une large partie du territoire, plus l'abandon de terres initialement destinées à l'agriculture est important.

La forêt française a pratiquement doublé de surface en deux siècles et sa superficie s'est ainsi accrue de 2 millions d'ha en 20 ans, soit 100 000 ha par an !

Pour le Morvan, on note une forte diminution des surfaces cultivées et surtout des surfaces en herbe, depuis les années 50. Depuis 30 ans, la surface forestière augmente peu, 400 ha par an. Compte tenu du taux de boisement supérieur à la moyenne nationale, du gain régulier en surface et du vieillissement des plantations, les paysages se ferment.

Ainsi donc, les coupes peuvent contribuer à une ouverture du paysage et à des projets de réaménagement.

La forêt et la récolte du bois :

Une des fonctions importantes de la forêt est la production. Plus la sylviculture est intensive, plus elle tendra vers une homogénéisation des milieux, plus la coupe à blanc ouvrira les paysages. La perception variera alors avec la taille des parcelles concernées. En Morvan, les parcelles sont de petites dimensions et les modifications du paysage vont dépendre des coupes réalisées au même moment sur un versant. Une donnée, de plus, est à prendre en compte ; sur les 150 000 ha de surfaces boisées 88 % appartiennent à plus de 17 300 propriétaires ! c'est dire le morcellement de la propriété forestière sur ce territoire. C'est donc une gestion à l'échelle du versant qu'il faudrait parvenir à mettre en œuvre pour une valorisation économique optimale, limitant alors les infrastructures nécessaires à la récolte du bois et permettant ainsi de limiter l'érosion mécanique et donc de mieux protéger les eaux de surface.

Il faudrait, pour répondre à cette situation, aider à la création de groupements de propriétaires consentant à définir des règles strictes, en mettant l'aspect environnemental comme priorité. Des aides

publiques pourraient largement infléchir les pratiques actuelles.

Toutefois, les crises sanitaires actuelles et notamment les attaques des peuplements résineux, par les scolytes par exemple, nécessitent des interventions d'urgence. L'impact des modifications climatiques sur la forêt limitera certainement des projets d'aménagement pour l'exploitation du bois en Morvan.

Les pratiques respectueuses des paysages :

Rappelons que les coupes rases peuvent contribuer à l'ouverture du paysage. Il faut également considérer le cas marginal des coupes rases, dont l'objectif est la mise en culture d'anciennes parcelles agricoles. On peut toutefois limiter l'impact paysager de ces pratiques ; un travail sur ce point a été réalisé par l'ONF, le CRPF et le Parc du Morvan ; nous reprendrons ici les principales conclusions de ces études.

- Pour une coupe sur versant, on adaptera la taille de la coupe en fonction de la distance de perception et la forme de cette même coupe aux lignes principales du paysage et aux zones les plus exposées au regard. Ce qui entraîne pour l'exploitant de maintenir des plages de peuplement pour atténuer la perception de l'étendue de la coupe.
- Les récoltes par bande en plaine passent inaperçues, si l'on prend la précaution qu'elles n'atteignent pas les voies de desserte. En montagne elles confèrent, au paysage, une structure souvent régulière.
- Les récoltes, par bouquets, ou parquets dans les futaies régularisées maintiennent un paysage plutôt fermé, puisque les récoltes par pieds ou par petits bouquets n'ouvrent pas le peuplement sur de grandes surfaces.
- L'hétérogénéité des forêts en essence et en classe d'âge limite le problème des ouvertures brutales des paysages sur de larges surfaces.

- La pratique de l'andainage devrait être corrigée en privilégiant les petits andains rapprochés et éviter leur confection, dans le sens des pentes des surfaces !

CONCLUSION

On peut rappeler les pratiques limitant les impacts négatifs des coupes à blanc :

- Les opérations sylvicoles progressives sont à privilégier de façon à ce que les arbres maintenus puissent s'adapter à leur nouvel environnement ;
- Les coupes à blanc ne doivent pas dépasser une surface de l'ordre d'un hectare et demi ;
- Les coupes à blanc, sur des surfaces plus importantes, doivent être liées à des aménagements raisonnés à l'échelle des versants afin d'assurer un continuum des niches écologiques et la protection des eaux de surface ;
- Ne jamais maintenir le sol à nu, afin d'éviter une sur minéralisation des matières organiques et prévenir les risques d'érosion chimique et physique ;
- Limiter la récolte d'arbres jeunes (moins de 35 ans) exportant beaucoup d'éléments, qui entament alors grandement la durabilité des écosystèmes ;
- Préférer la récolte du seul bois fort, afin de préserver au mieux la fertilité minérale du sol ;
- L'andainage qui transfère la partie la plus riche du sol et conduit en plus à des atterrissements en bas des versants est à proscrire. On peut procéder au broyage localisé, si nécessaire ;
- Le brûlage des rémanents, qui élimine directement des éléments volatils (azote en particulier) est également une pratique à écarter ;
- Il est enfin impératif de contrôler l'utilisation des engins mécaniques de façon à éviter des dégâts difficilement

réversibles, compactage en premier entraînant hypoxie et hydromorphie ;

- Les Plans Simples de Gestion (PSG) et les Codes de Bonnes Pratiques Sylvicoles (CBPS) contrôlés par des experts doivent être généralisés.

Il faut par ailleurs promouvoir et développer des systèmes alternatifs de débardage des grumes, par câbles en particulier, installés sur un versant.

Il est également impératif de préciser où exclure les coupes à blanc :

- Dans les zones pentues où le risque d'érosion est très élevé, avec apport souvent des particules fines, vers les ruisseaux entre autres.
- Dans les zones plates à tendance hydromorphe où l'équilibre fragile peut être rapidement détruit.
- Dans les couloirs à vent, où l'élimination d'un peuplement peut conduire à des chablis dans les peuplements voisins.
- Dans les zones à haute valeur ajoutée au plan de la biodiversité.
- Dans les zones à haute valeur historique.

Le contexte actuel nécessite de remettre à plat certaines pratiques pour l'aménagement forestier, mais la forêt est longévive et les changements brutaux ne sont pas souhaitables.

Il faut par conséquent changer de paradigme et mettre en avant la multifonctionnalité de la forêt à l'échelle d'un territoire, même si la récolte du bois restera un service important de l'écosystème forestier.

À ce titre, le Morvan pourrait être une zone d'expérimentation sur des versants boisés, où la propriété privée est de faible dimension, afin de mettre ainsi en œuvre une gestion multipropriétaire

et multifonctionnelle, prenant en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux.

MEMBRES DU CONSEIL SCIENTIFIQUE AYANT RÉALISÉ CETTE CONTRIBUTION :

Jacques **RANGER**, Directeur de Recherches honoraire à l'INRAE, Membre de l'Académie d'Agriculture de France,

Vincent **GODREAU**, Ingénieur Forestier, Agence Études et Travaux Bourgogne-Franche-Comté, Responsable UP Études Bourgogne-Franche-Comté,

Alain **DELAVEAU**, Professeur d'Agronomie à l'Université

Et la participation de :

Corinne **BECK** (Archéologie - histoire médiévale)

Caroline **DARROUX** (Ethnologie)

Christian **DORET** (Aménagement du territoire)

Roger **GOUDIARD** (Agroéconomie)

Vincent **GUICHARD** (Archéologie)

Sylvie **GRANGE** (Médiation scientifique)

Isabelle **JOUFFROY-BAPICOT** (Paléoécologie)

Pierre **LEGER** (Patrimoine oral)

Sophie **MONTUIRE** (Biodiversité Écologie Évolution)

Patrice **NOTTEGHEM** (Écologie)

Daniel **SIRUGUE** (Conseiller scientifique au PNRM)

Stanislas **SIZARET** (Géologie)

Élisabeth **REMY** (Sociologie)

Jean **VIGREUX** (Histoire contemporaine)

Extrait de RANGER J., GODREAU V. & DELAVEAU A. 2021. Les coupes à blanc en forêt. Aspects généraux et application au Parc naturel régional du Morvan. Cahiers scientifiques du Parc naturel régional du Morvan 13: 13-109.

LES COUPES À BLANC EN FORÊT ASPECTS GÉNÉRAUX ET APPLICATION AU PARC NATUREL RÉGIONAL DU MORVAN

Jacques RANGER, Vincent GODREAU & Alain DELAVEAU

RÉSUMÉ

La coupe à blanc est une pratique sylvicole qui consiste à extraire en une seule fois un peuplement. La régénération se réalise soit par plantation, soit par régénération naturelle à partir des semenciers du site ou des peuplements adjacents.

Si cette pratique est une opération simple et efficace pour la production, elle présente des inconvénients connus pour les autres fonctions de l'écosystème ; biodiversité,

qualité des sols et des eaux de surface, durabilité pour les générations futures.

En particulier, la récolte et la préparation des sites pour la régénération du peuplement, opérations de plus en plus souvent mécanisées, représentent de fortes contraintes pour le milieu.

Ce texte résume les principales conclusions quant aux effets de ces pratiques sur la fertilité et la structure du sol, la biodiversité et enfin, leurs impacts sur l'environnement paysager. Des propositions adaptées au contexte du Morvan sont avancées dans la conclusion, où les coupes à blanc représentent en moyenne 800 à 900 ha chaque année !



Jacques RANGER

Directeur de Recherches honoraire à l'INRA, Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Membre du Conseil scientifique du PNR Morvan.

jacques.ranger@inrae.fr



Vincent GODREAU

Ingénieur Forestier à l'ONF, Agence Etudes et Travaux Bourgogne-Franche-Comté, Responsable UP Etudes Bourgogne-Franche-Comté, Membre du Conseil scientifique du PNR Morvan.

vincent.godreau@onf.fr



Alain DELAVEAU

Professeur d'Agronomie à l'Université, Membre du Conseil scientifique du PNR Morvan.

alaindelaveau@orange.fr

CONSÉQUENCES SUR LA FERTILITÉ DU SOL

La récolte de la biomasse forestière conduit à l'exportation de tout ou partie du carbone et des éléments nutritifs qu'elle contient. Toutefois, la relation entre les quantités récoltées et les exportations minérales, ne sont pas linéaires. Les branches, les feuilles ou les aiguilles sont beaucoup plus concentrées que le bois âgé qui s'est en quelque sorte « vidé » de ses éléments dans un processus connu appelé *transfert interne* des tissus âgés vers les organes en croissance dans la plante.

Les exportations d'arbres entiers et des rémanents hors de la parcelle, mais également le brûlage ou l'andainage,

conduisent à des pertes substantielles pour l'écosystème. L'extraction des racines est, par ailleurs, une hérésie. Les éléments absorbés étaient biodisponibles, leur retrait diminue alors la fertilité actuelle du sol. Dans les sols pauvres, la capacité de renouvellement de ces éléments est faible et ce flux est capital. Ces pratiques acidifiantes sont donc à proscrire compte tenu des conséquences pour toutes les fonctions de l'écosystème.

Le débardage des produits et la préparation des sites pour la génération suivante, sont potentiellement très déstabilisants pour l'écosystème, notamment quand la mécanisation est conduite de manière inappropriée, en particulier quand le sol est humide, et/ou sans respect des zones sensibles et des ruisseaux. Il s'agit là d'une perturbation majeure d'autant plus forte, que la surface concernée est conséquente et que le sol est en pente.

IMPACT SUR LA BIODIVERSITÉ

Tous les compartiments de l'écosystème sont concernés. La biodiversité est majeure pour le fonctionnement du sol. Citons entre autres, le rôle fondamental des mycorhizes et du microbiome associé dans l'alimentation en eau et la nutrition minérale des plants forestiers, la dégradation de la matière organique, qui est une fonction essentielle pour le recyclage du carbone et des éléments minéraux, les entrées d'azote atmosphérique par la fixation symbiotique ou non, et l'altération des minéraux du sol, indispensable pour la libération d'éléments biodisponibles.

Mais la biodiversité n'est pas équi-distribuée dans le sol et c'est dans les horizons de surface qu'elle se concentre. Ainsi toutes les pratiques contraignantes pour la partie superficielle du sol présentent le risque d'altérer cette biodiversité.

Dans le Morvan, toute exportation de matière sèche réduit la capacité du sol à neutraliser l'acidification, le pH ne doit donc jamais être inférieur à 4,5 afin de ne pas altérer la vie biologique.

Le morcellement de l'espace, résultant d'une coupe à blanc, peut constituer un obstacle au déplacement d'une ou plusieurs espèces animales ou végétales, mais l'inverse existe également. Au total, les individus, les populations et les espèces sont très différemment affectés par la fragmentation de leur habitat. Des variations s'observent selon leurs capacités adaptatives, leurs degrés de spécialisation, et leurs dépendances aux structures éco-paysagères.

Il demeure alors impératif de maintenir une diversité d'essences et de structures de peuplements : l'hétérogénéité est une voie indirecte pour réduire l'impact des coupes à blanc.

Concernant l'impact des coupes rases sur les cours d'eau, deux conséquences sont observées, le transfert de matières en suspension modifiant les habitats, et les effets de l'acidification progressive des sols forestiers qui entraîne oligotrophie et toxicité progressive par l'aluminium, expliquant alors la chute de la biodiversité des eaux de surface. De telles situations ont été décrites dans les Vosges, avec une disparition totale des salmonidés, quand le taux d'aluminium dépasse 0,1 mg/litre. Les zones tampons bordant les ruisseaux sont impérativement à respecter.



Figure 1. Aux alentours du site de Bibracte, la forêt feuillue prend ses couleurs d'automne.

IMPACT SUR LE PAYSAGE

LA RÉCOLTE DU BOIS :

En Morvan, les parcelles sont en moyenne de petite dimension et les modifications du paysage vont dépendre des coupes réalisées simultanément sur un versant : plus l'hétérogénéité des essences et des structures sera importante et moins l'impact des coupes le sera sur le paysage. C'est donc une gestion à cette échelle qu'il faudrait parvenir à mettre en œuvre pour une valorisation économique optimale, limitant alors les infrastructures nécessaires à la récolte du bois, minimisant l'érosion mécanique, et assurant une meilleure protection des sols et des eaux de surface. Il faudrait, pour répondre à cette situation, aider à la création de groupements de propriétaires consentant à définir des règles strictes, en mettant l'aspect environnemental comme priorité. Des aides publiques pourraient largement infléchir les pratiques actuelles.

Mais une donnée structurante est à prendre en compte : sur les 135 000 ha de surface boisée, 88 % appartiennent à plus de 20 000 propriétaires, le morcellement étant ainsi une caractéristique majeure sur ce territoire !

LES PRATIQUES RESPECTUEUSES DES PAYSAGES :

Rappelons que les coupes rases peuvent contribuer à l'ouverture du paysage, parfois nécessaire, pour des raisons écologiques, mais également sociétale (vie rurale, tourisme). Il faut également considérer le cas marginal des coupes rases, dont l'objectif est la mise en culture d'anciennes parcelles agricoles.

On peut toutefois limiter l'impact paysager de ces pratiques ; un travail sur ce point a été réalisé par l'ONF, le CRPF et le Parc du Morvan.

CONCLUSION : **LES PRATIQUES LIMITANT LES IMPACTS** **NÉGATIFS DES COUPES À BLANC**

- Privilégier les peuplements mixtes, et les structures hétérogènes est le premier pas pour limiter les coupes rases.
- Les opérations sylvicoles progressives sont à privilégier de façon à ce que les arbres maintenus puissent s'adapter à leur nouvel environnement ;
- Les coupes à blanc ne doivent pas dépasser une surface unitaire de l'ordre d'un hectare et demi ;
- Les coupes à blanc sur des surfaces plus importantes, résultant du cumul sur les versants, doivent être liées à des aménagements raisonnés à cette échelle ;
- Le sol ne sera jamais maintenu à nu, afin d'éviter une sur minéralisation des matières organiques et de prévenir les risques d'érosion physique, chimique et biologique ;
- La récolte d'arbres jeunes (moins de 35 ans) exportant beaucoup d'éléments, et entamant alors grandement la durabilité des écosystèmes, sera évitée ;
- La récolte du seul bois fort sera privilégiée, afin de préserver au mieux la fertilité minérale du sol pour les générations futures ;
- L'andainage qui transfère la partie la plus riche du sol et conduit en plus à des atterrissements en bas des versants est à proscrire. Plutôt que le travail en plein, et si nécessaire, un broyage localisé des rémanents sera réalisé afin d'enrichir le peuplement par plantation ;
- Le brûlage des rémanents, qui élimine directement des éléments volatils (azote en particulier) est également une pratique à écarter ;
- L'utilisation des engins mécaniques sera impérativement contrôlée de

façon à éviter des dégâts difficilement réversibles, compactage en premier, entraînant hypoxie et hydromorphie ; les cloisonnements sont indispensables mais parfois insuffisants ;

- Les Plans Simples de Gestion (PSG) et les Codes de Bonnes Pratiques Sylvicoles (CBPS), contrôlés par des experts doivent être généralisés.

II EST ENFIN NÉCESSAIRE DE PRÉCISER **OÙ EXCLURE LES COUPES À BLANC :**

- Dans les zones pentues où le risque d'érosion est très élevé, avec apport de particules fines dans les ruisseaux,
- Dans les zones plates à tendance hydromorphe où l'équilibre fragile peut être rapidement détruit.
- Dans les couloirs à vent, où l'élimination d'un peuplement peut conduire à des chablis dans les peuplements voisins.
- Dans les zones à haute valeur ajoutée au plan de la biodiversité.
- Dans les zones à haute valeur historique.

PERSPECTIVES

Il faut par ailleurs promouvoir et développer des systèmes alternatifs de débardage des grumes, par câbles en particulier, installés sur un versant, qui permettent de récolter du bois en respectant l'environnement.

Le contexte actuel nécessite de remettre à plat certaines pratiques pour l'aménagement forestier, mais la forêt est longévive et les changements brutaux ne sont pas souhaitables.

Il faut par conséquent changer de paradigme et mettre en avant la multifonctionnalité active de la forêt, même si la récolte du bois demeure une priorité.

À ce titre, le Morvan pourrait être une zone d'expérimentation / démonstration sur des versants boisés, où la propriété privée est de faible dimension, afin de mettre ainsi en œuvre une gestion multipropriétaire et multifonctionnelle, prenant en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux. Le rôle du PNR est important à cet égard.

MOTS-CLÉS :

forêt, coupe à blanc, biodiversité, sols, eaux de surface, paysages, Morvan.

FOREST CLEAR-CUTTING: A CURRENT PROBLEM FOR THE MORVAN REGION

ABSTRACT

Clear-cutting is a forestry practice that consists of harvesting a stand's entire biomass at the same time. The stand then regenerates by planting or natural regeneration from seeds of local or adjacent trees. While clear-cutting is a simple practice for production purposes, it can severely damage several other functions of ecosystems (e.g. harbouring biodiversity, soil and surface water qualities) and the resilience of the entire system. Mechanised harvesting and site preparation for the next generation of trees can have major negative effects on the soil.

This text describes the main conclusions drawn from a literature review of the effects of clear-cutting and stand regeneration on soil fertility, biodiversity, surface water and landscapes. Specific proposals

adapted to the context of the Morvan region are suggested that consider the environment and the organization of local land ownership. Each year, 800-900 ha of the Morvan's forest area of 135,000 ha are clear-cut.

CONSEQUENCES OF CLEAR-CUTTING ON SOILS

Depending on its intensity, harvesting forest biomass exports some or all of its carbon and nutrient contents; however, the relation between biomass harvested and nutrient export is not linear. The small compartments of biomass (*i.e.* leaves or needles, twigs, branches and bark) have much higher nutrient concentrations than heartwood. Because nutrients are translocated internally to young active organs as compartments age, harvesting entire trees (especially young ones), removing slash and windthrowing are far more damaging to soil nutrient maintenance than stem-only harvesting. Extracting tree roots must generally avoided to maintain soil fertility.

In poor soils, the natural capacity of nutrient renewal is limited, and soil nutrient availability depends more on fluxes than on stocks. Exporting small biomass compartments, which removes most of this essential nutrient flux, is an acidifying process that influences all soil and ecosystem functions.

Mechanisation of tree harvesting and site preparation for new plantations can damage the ecosystem. Damage occurs when inappropriate methods are applied, especially when wet soils are driven over or sensitive areas (*e.g.* wetlands, stream banks) are not excluded. The risk of soil degradation increases as slope or the size of the clear-cut area increase.

IMPACTS ON BIODIVERSITY

Impacts on biodiversity occur in all compartments of the ecosystem. Biodiversity is of paramount interest for soil functioning. Through mycorrhizae and its associated microbiome, biodiversity plays a fundamental role in water and nutrient absorption by trees. Microbes have many other effects on bioavailability (*e.g.* biodegradation of organic matter, non-symbiotic or symbiotic fixation of atmospheric N, weathering of soil minerals). Because soil biodiversity is concentrated in the upper soil layers, which are oxygenated and rich in organic matter, all practices that influence these layers negatively are likely to alter it. In the poor soils of the Morvan, whole-tree harvesting, removing slash and windthrowing, which decrease the acid-neutralising capacity of soil, and thus lead to soil pH lower than 4.5, must be avoided.

Landscape fragmentation and the decrease in connectivity after clear-cutting are obstacles for animal and plant species, but they can also promote dispersals. In general, landscape fragmentation influences individuals, populations and species differently depending on their adaptive capacity, degree of specialisation and dependence on eco-landscape structures. Consequently, the diversity of tree species and stand structures must be maintained: heterogeneity is an initial step to reduce impacts of clear-cutting.

Clear-cutting can influence stream water by degrading physical and/or chemical soil properties. Particle transfer influences habitats directly by decreasing water transparency and increasing sediment deposits. Degradation of chemical properties leads to either eutrophy or oligotrophy of surface water. In particular, oligotrophy strongly influences biodiversity; for example, salmonids in the Vosges

Mountains went locally extinct when the aluminium concentration in the water exceeded 0.1 mg.L^{-1} . Buffer areas along streams must be protected.

IMPACTS ON LANDSCAPES

The species and structures of forest stands, as well as timber harvesting methods, influence the landscape depending on how land ownership is organised. In the Morvan, where the 135,000 ha of forest belong to approximately 20,000 owners (88% of the forest area is private), the harvesting of small plots influences the landscape, mainly through simultaneous clear-cuts on hillslopes. Hillslope is thus the relevant scale at which to derive economic value from forests, limit infrastructure and ensure protection of soil and surface water. Therefore, it seems necessary to promote creation of groups of owners with specific management rules that highlight the environmental aspects of forest management. Public subsidies could help modify current practices.

Clear-cuts on small areas are needed to maintain the open landscapes necessary for ecological and sociological purposes (*e.g.* rural life, tourism). Landscape impacts of clear-cutting can be reduced if ONF, CRPF and PNR recommendations are followed.

RECOMMENDATIONS FOR DEVELOPING PRACTICES THAT DECREASE NEGATIVE IMPACTS OF FOREST CLEAR-CUTS

- Promoting heterogeneity in tree species and stand structures is an initial step in limiting the extent of clear-cut areas.
- Progressive interventions help the remaining trees adapt to their new environment.

- Clear-cuts must never exceed 1.5 ha.
- Clear-cutting of larger areas, or of multiple smaller areas on a single hillslope, must be performed after reasoned management at this scale.
- Soil must never be left bare in order to avoid over-mineralisation of humus and prevent degradation of its physical, chemical and biological properties.
- Stem-only harvesting helps preserve soil fertility for future forest generations.
- Windthrowing that transfers richer soil components downslope must be prohibited; localised chipping of slash in areas where planting is planned must be encouraged.
- Burning slash, which causes the loss of volatile nutrients such as nitrogen, must be prohibited.
- Mechanisation of forest operations must be strictly controlled to avoid irreversible soil degradation, especially compaction, which leads to hypoxia, anoxia and hydromorphy. Harvesting trails are necessary but sometimes not sufficient to prevent soil degradation.
- Forestry expertise must become widespread to develop and monitor appropriate management plans.

AREAS WHERE CLEAR-CUTTING MUST BE AVOIDED

- Slopes, which have high erosion risk
- Flat hydromorphic areas, where fragile soil balances can be changed easily
- Wind corridors, where clear-cutting of stands could cause trees to be blown into neighbouring stands
- Areas recognised for their high biodiversity value
- Areas recognised for their high historical value

OUTLOOK

A general recommendation for the Morvan region is to promote alternative systems for skidding logs. Animal traction, light skidders (e.g. iron horses for small logs) and cables installed on hillslopes are able to collect logs efficiently without damaging the environment greatly.

The current context makes it necessary to reconsider several forest management practices, since forests are long living, and sudden changes are undesirable. Now is the right time to change the paradigm and promote the concept of active multifunctional management of forests, since the production function remains a priority.

As such, the Morvan region could host an experimental/demonstration area on some wooded catchments dominated by small forest stands owned by several people, in order to experiment with multi-owner and multifunctional management that considers social, economic and environmental aspects. The Morvan Regional Natural Park can play a relevant role in this approach.

KEYWORDS:

forest, clear-cut, biodiversity, soils, surface water, landscapes, Morvan.

A. LES COUPES À BLANC

A1. DÉFINITION, CONTEXTE ORIGINE, JUSTIFICATION

La « coupe à blanc » est une pratique sylvicole qui consiste à extraire en une seule fois un peuplement, qui sera régénéré artificiellement par semis ou plantation, ou naturellement à partir des semenciers du site lui-même, ou des peuplements adjacents (SMITH, 1986). Certains auteurs font la distinction entre la coupe biologique (qui extrait la totalité de la végétation) et la coupe commerciale (qui extrait la totalité des produits de valeur, laissant les arbres morts ou de trop petite taille) (FRANKLIN & DEBELL, 1973). Dans leur définition, ces auteurs incluent également une notion de taille, en distinguant les coupes à blanc continues (> 40 ha) des petites coupes (entre 0,25 et 20 ha). Les coupes concernant des surfaces inférieures à 0,25 ha sont dénommées groupes de sélection (KEENAN & KIMMINS, 1993), assez proches de la notion européenne de coupe d'abri, ou de coupe par trouées ou par bande.

La notion d'ambiance forestière s'ajoute à cette définition : il s'agit de la zone d'extraction influencée par les peuplements adjacents. Cette influence est très connue pour le climat, la radiation, les apports atmosphériques, la prospection racinaire, les restitutions de litière. On admet généralement que l'influence des boisements adjacents persiste en terrain plat, jusqu'à une distance équivalente à deux fois la hauteur dominante des peuplements voisins : si les arbres voisins ont une hauteur dominante (H_d) de 30 m, une coupe circulaire de 1 ha serait totalement sous l'ombre des peuplements adjacents. Les coupes en bande de moins de 60 m

de mètre de largeur seraient également totalement sous l'ombre ! De plus compte tenu de l'angle des rayons solaires, l'influence de la surface n'est pas la même en fonction de la latitude.

Les aménagements des forêts de production ont été faits de façon à ce que les récoltes sur un massif puissent être réalisées de manière continue en respectant les règles de la pérennité : l'âge d'exploitabilité et la surface totale déterminent les surfaces unitaires à récolter chaque année (assiette). La solution la plus simple étant que la parcelle unitaire soit équienne avec quelques essences dont le rythme de développement est voisin. Les classes d'âges ne sont représentées équitablement qu'à l'échelle du massif forestier.

La démarche conceptuelle de la foresterie post Seconde Guerre mondiale a été la même en forêt et en agriculture : redynamiser des filières exsangues pour « nourrir » la France.

Pour satisfaire la forte demande de bois, les méthodes parallèles à celles de l'agriculture ont été employées :

- dans les forêts créées ou totalement transformées (taillis simples) : introduction d'essences productives à croissance rapide, amélioration génétique, lutte contre la concurrence par voie mécanique ou chimique, apport d'engrais... traitements sylvicoles simplifiés, mécanisation progressive quand c'est possible.
- dans les forêts existantes, transformations des forêts à vocation mixte (les taillis sous futaie pour l'énergie et le bois d'œuvre) vers une futaie simple.



Figure 2. Coupe à blanc, l'andainage a été réalisé en plein et parallèlement aux courbes de niveau. Chaloux (58).

La sylviculture des forêts de production s'est traduite par une forte simplification des écosystèmes forestiers, avec son apogée dans la ligniculture industrielle, où le milieu et le végétal sont « améliorés » (SWITZER *et al.*, 1978). Le cas typique en France a été celui des Landes de Gascogne, où le Pin maritime a été traité en ligniculture intensive (labour, engrais, plants sélectionnés, contrôle de la végétation spontanée, coupe à blanc, récolte souvent totale incluant rémanents et parfois les souches, régénération artificielle...).

La sylviculture semi-intensive demeure le cas général en France. Elle se traduit par le fait que l'intensification porte sur la demande à l'écosystème, sans augmenter les intrants. Les pratiques tendent à simplifier l'écosystème de façon à limiter les interventions et à en diminuer les coûts : la sélection génétique n'a été que massale, ou avec choix de plants issus de vergers à graines, les apports d'engrais ont été largement testés mais leur utilisation a été le plus souvent limitée à un apport à la plantation, sauf en peupleraie et en ligniculture landaise. On aboutit ainsi à

des peuplements pseudo mono-spécifiques et pseudo-équiennes. De plus, compte tenu (i) des aléas dans la régénération naturelle liés à plusieurs causes (fructifications dépendant de l'espèce et du climat, germination des graines dépendant de la graine elle-même, des ravageurs, du milieu et du climat, de la survie des jeunes plants dépendant du climat et de l'entretien des régénérations), et (ii) de la présence ou non de l'essence *objectif* pour assurer une régénération. La plantation artificielle s'est souvent imposée, en regarni et en plein, car plus simple à mettre en œuvre et beaucoup plus simple à gérer par la suite, en particulier au stade juvénile où les interventions sont très coûteuses, puisque les produits n'ont aucune valeur commerciale. Il se trouve que certaines essences ont une amplitude écologique telle, que l'on a pu les introduire dans tous les milieux. Le cas de l'Epicéa commun est emblématique, car introduit avec un succès avéré, du Nord au Sud de l'Est à l'Ouest, en plaine ou en montagne, sur des sols sains ou hydromorphes, alcalins ou acides... Qui dit mieux ? Peut-être le Douglas, car sa croissance est plus rapide,

son bois est de meilleure qualité technologique, il est (était) considéré comme ayant un impact limité sur l'environnement : les forestiers aimaient à dire « le Douglas est le plus feuillu des résineux ». Il est (serait) calcifuge, mais en fait assez peu de sols forestiers productifs sont carbonatés (WEISSEN, 1991).

Autres points de contexte, concernant majoritairement la forêt privée, qui représente en moyenne en France, les trois quarts de la surface forestière totale :

- la faible rentabilité des produits forestiers et la durée pour le retour sur investissement sont des facteurs majeurs de non investissement, en particulier lorsque la propriété est de faible superficie.
- la longévité des arbres forestiers conduit à des révolutions longues, favorisant chez les propriétaires privés, l'introduction d'essences à croissance rapide, conifères en particulier, bien adaptés au climat et aux sols du Morvan et donnant des bois de bonne qualité alors que les feuillus sont en majorité de qualité moyenne à médiocre,
- la déprise agricole, en particulier en basse et moyenne montagne, s'est traduite par des reboisements généralisés de petites parcelles, dont le propriétaire n'est plus en général un rural, souvent retraité, et généralement non forestier,
- le déficit de main-d'œuvre pour le travail manuel pénible et très accidentogène, conduit à la mécanisation généralisée des opérations forestières,
- le cas rare où le propriétaire forestier privé vit de sa forêt, conduit à un certain décalage entre la sylviculture ad hoc et la connaissance et/ou l'intérêt réel du propriétaire pour optimiser, ce qui n'est qu'un patrimoine, apportant de temps en temps un revenu exceptionnel.

Tout ce contexte s'est traduit depuis la Seconde Guerre mondiale par des reboisements souvent résineux, mono-spécifiques et équiens, d'essences à croissance rapide (plusieurs millions d'ha en France), boostés par le Fonds Forestier national (au total 2,3 millions d'ha de plantations subventionnées dont plus de 50 % de surfaces inférieures à 2 ha) afin de redynamiser une filière en difficulté (CATTELOT, 2020). Les conditions locales du Morvan étaient favorables, dans cette région de moyenne montagne en mutation (ARNOULD & AMMON LOHOU, 1991). La longévité des peuplements forestiers fait que les décisions d'aménagement voient leurs effets apparaître sur le long terme (jugé par rapport à l'espérance de vie de l'homme). La prise de conscience écologique de la société française s'est affirmée dans les années 1970, avec la naissance du ministère de l'environnement en 1971. Certains types de gestion, pratiqués sur les peuplements arrivant à maturité, ne correspondent plus nécessairement à la demande sociétale actuelle. La sylviculture a évolué, de sorte que l'orientation sylvicole de peuplements immatures, ne correspondant plus aux pratiques sylvicoles actuelles (l'essence et leur traitement ne sont plus adaptés) devrait évoluer. Plus complexe est la prise en compte de l'évolution notable du climat qui modifie nettement la donne, en particulier tous les peuplements introduits à la limite de l'aire écologique d'une essence, marquent des signes notables de dépérissement. Compte tenu des changements climatiques actuels, une essence introduite il y a une vingtaine ou dizaine d'années, qui était encore bien adaptée à la station, peut ne plus l'être.

Quand l'assiette est vide, on ne se soucie qu'assez modérément de la qualité de ce qui pourrait la remplir. Ce n'est que dans les années 70 que l'on a commencé à regarder la qualité de ce qu'elle contenait...

Les justifications de la pratique de la « coupe à blanc » ont été et demeurent nombreuses :

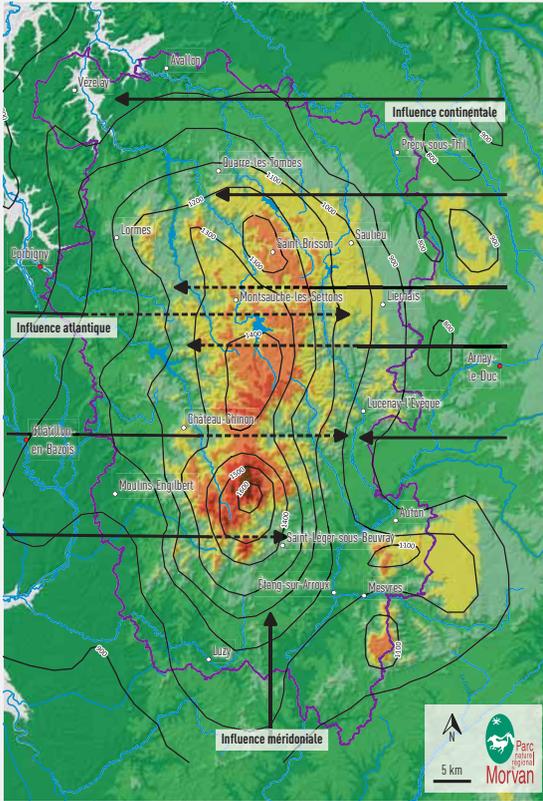
- techniques
 - récolte efficace enlevant rapidement un maximum de produits
 - gestion simplifiée de peuplements ; aménagements simples ; programmation aisée
 - régénération simplifiée surtout par la méthode artificielle par plantation
 - élimination des problèmes d'essences tolérant difficilement l'ombre
 - élimination de peuplements déperis
 - introduction aisée de nouvelles essences allochtones à la flore régionale, car soit mieux adaptées aux changements des paramètres du climat, soit plus performantes et produisant des bois de meilleure qualité que les autochtones
- économiques
 - valorisation y compris de faibles volumes
 - introduction d'essences nouvelles plus productives et de meilleure qualité correspondant à une demande accrue
 - mécanisation aisée
 - système demandant assez peu de compétences sylvicoles spécifiques
- sociales
 - méthode la moins accidentogène
 - mécanisation possible, limitant la pénibilité du travail
- environnementales
 - en général, par le passé, jugement assez favorable quant aux effets sur l'environnement (climat, sol, hydrologie, biologie, paysages). Actuellement, si elle représente toujours une opération simple et efficace pour la production, la question se pose pour les autres fonctions de l'écosystème : biodiversité, environnement, récréation... mais aussi sur la fertilité du sol et sa durabilité pour les générations futures.

Il existe toutefois des zones où cette pratique a été jugée inappropriée depuis longtemps : zones froides, chaudes, humides où la régénération est complexe, les zones pentues, venteuses, et/ou zones où la structure des peuplements est une composante importante de la biodiversité (KEENAN & KIMMINS, 1993).

La « coupe à blanc » a cependant été « banalisée » en Allemagne et en Suisse au milieu du XIX^e siècle. Elle l'a été en France un peu plus tardivement en zone de montagne, ce qui bien que demeurant le cas général, souffre d'exceptions notables dans les Alpes. Dès la fin du XIX^e siècle les reboisements RTM (Restauration des Terrains de Montagne) ont été instaurés afin d'éviter les crues et autres coulées de boue dans les vallées. Ces aménagements forestiers prônent la futaie jardinée où les récoltes se font par bouquets ne mettant jamais de grandes surfaces à nu où l'érosion peut s'initier et se propager rapidement. Des travaux de génie civil y sont associés (aménagement des cours d'eau). Les sociologues évoquent par ailleurs l'aspect sociétal, correspondant à des relations complexes entre agriculture de montagne et foresterie, mais également à la prise en main de populations jugées hors contrôle (LARRÈRE & NOUGARÈDE, 1990).

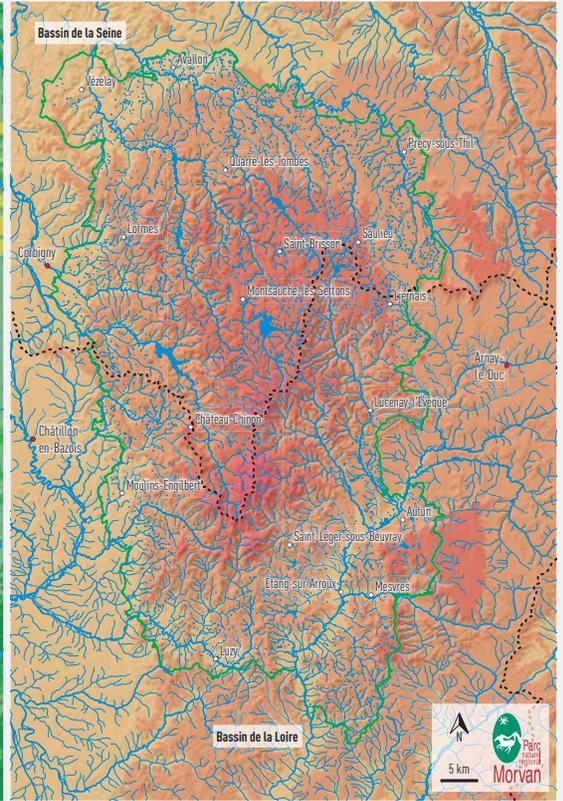
La « coupe à blanc » dérive du concept de simplification de la gestion des écosystèmes pour la production de bois. Elle concerne donc toutes les forêts cultivées, mais prend un caractère le plus drastique dans les plantations ligno-cellulosiques, que d'aucuns refusent de nommer « forêts ». Les effets de cette pratique dépendront donc de l'histoire de la forêt, ancienne ou récente, exploitée ou sur-exploitée, traitée ou non en monoculture, feuillue ou résineuse. Ces aspects historiques sont importants, voire déterminants dans les effets observés, mais souvent difficiles à identifier (travaux du Groupe d'Histoire des Forêts Françaises ; DUPOUEY *et al.*, 2004 ; JOUFFROY-BAPICOT, 2010).

Le climat du Morvan



Sources : Pnr Morvan, BD Alti, BD Topo © IGN, BD Carthage © Pnr Morvan - édition 2017

Le réseau hydrographique



Sources : Pnr Morvan, BD Alti, BD Topo © IGN, BD Carthage © Pnr Morvan - édition 2017

1200 — Cumul des précipitations annuelles :
isohyètes en mm, calculées sur
la période 1981-2010

Classes d'altitude

- < 200 m
- 200 à 300 m
- 300 à 400 m
- 400 à 500 m
- 500 à 600 m
- 600 à 700 m
- 700 à 800 m
- > 800 m

Périmètre d'étude 2020-2035

Cours d'eau principaux

Lacs principaux

Villes partenaires

Classes d'altitude

- 100 à 300 m
- 300 à 500 m
- 500 à 700 m
- 700 à 900 m

Périmètre d'étude 2020-2035

Limite des bassins versants
de la Seine et la Loire

Cours d'eau

Lacs et étangs

Mares

Villes partenaires

Figure 3. Éléments physiographiques du périmètre du Parc naturel régional du Morvan.

A2. LE CONTEXTE DU MORVAN

Le Morvan est une région naturelle située en Bourgogne-Franche-Comté, à l'extrémité Nord-Est du Massif Central. C'est la plus petite zone de montagne de France en superficie et en altitude (de 400 à 901 m) (figure 3). Son substrat de roches dures et cristallines et/ou éruptives d'âge hercynien en fait une île dans un environnement carbonaté.

La superficie boisée du périmètre actuel de Parc Naturel Régional du Morvan (soit 133 communes listées dans la Charte 2020-2035) est de l'ordre de 135 000 ha conduisant à un taux de boisement de 45 %. Cette situation moyenne regroupe des situations très diverses puisque le taux de boisement du Haut Morvan montagnard est compris entre 80 et 90 %, alors que celui de Bas Morvan septentrional est limité à 20 à 30 % de la superficie totale. Elle se traduit par des taux de boisement des communes, variant de 6 à 82 %.



Figure 4. Le Lac des Settons, Moux-en-Morvan (58).

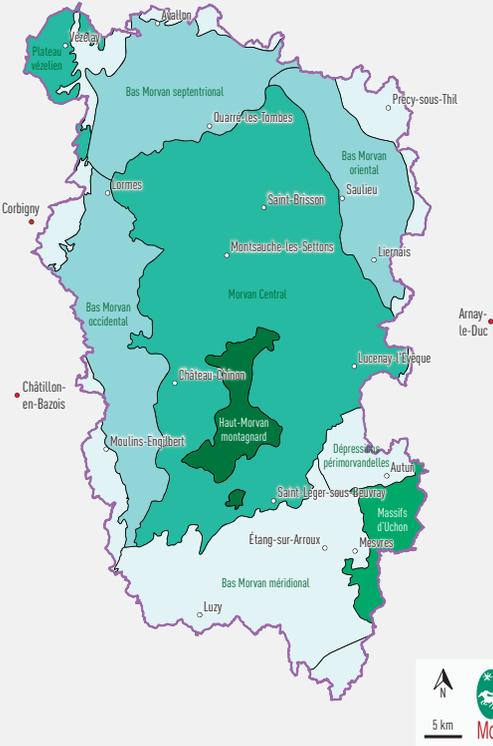


Figure 5. Châgnon, Corancy (58).

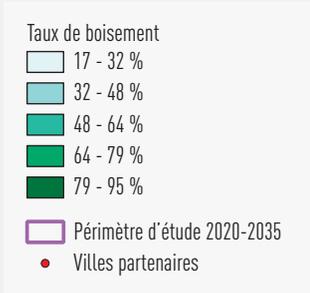


Figure 6. La montagne de Bard, Bard-le-Régulier (21).

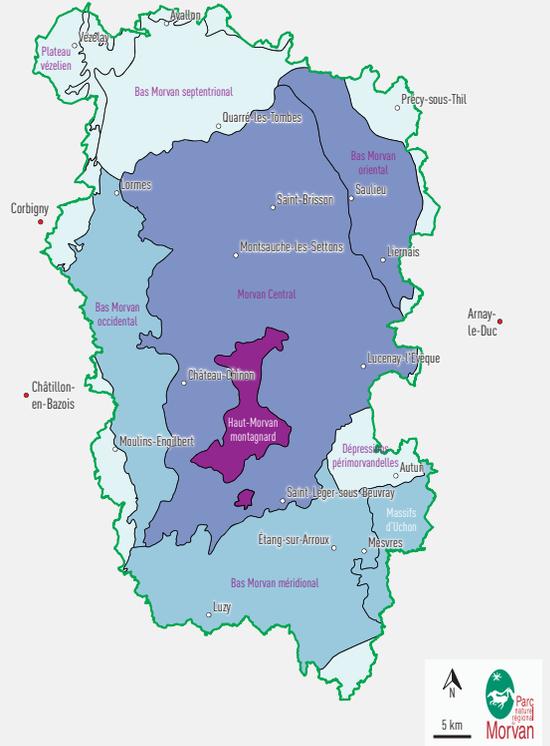
Taux de boisement par région naturelle



Sources : Pnr Morvan, BD Forêt, CBNBP © Pnr Morvan - octobre 2018



Taux d'enrésinement par région naturelle



Sources : Pnr Morvan, BD Forêt, CBNBP © Pnr Morvan - octobre 2018

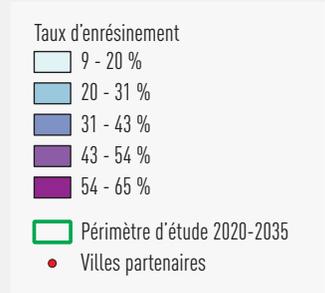


Figure 7. Variabilité des caractéristiques de la forêt dans le périmètre du Parc naturel régional du Morvan.

Les feuillus dominent en Morvan, 54 % contre 35 % de résineux, la forêt mélangée représentant les 11 % complémentaires. Là encore l'hétérogénéité spatiale est forte : les résineux dominent dans le Haut Morvan montagnard (entre 55 et 65 %) alors que ce sont les feuillus dans le Bas Morvan septentrional (entre 80 et 90 %) (figure 7). Les forêts anciennes dominent (59 %) avec un maximum de 77 % dans le Haut Morvan montagnard. Les forêts plus récentes correspondent aux accrus naturels et aux plantations suite à la déprise agricole. La forêt du Morvan est en expansion d'environ 6 500 ha entre 2005 et 2016, montrant une régression des feuillus (4 300 ha) et une augmentation des résineux (10 800 ha).

La propriété forestière du Morvan est largement privée, représentant 85 % de la superficie forestière totale. Les statistiques indiquent 20 000 propriétaires, soit de l'ordre de 17 350 entités recensées en Morvan (données du CNPF), pour des surfaces allant de quelques ares à quelques milliers d'ha (in Charte du Morvan, 2020-2035). Si la surface moyenne de ces entités est faible (26 ha), la réalité est plus nuancée, avec 357 entités propriétaires de 43 % des forêts, dont les surfaces unitaires dépassent 100 ha. Les statistiques révèlent que près de 40 % des propriétaires forestiers du Morvan habitent hors de la Région Bourgogne Franche Comté (données CRPF).

La forêt du Morvan est une forêt majoritairement gérée par des engagements contractuels : les 15 % de la forêt publique sont soumis aux aménagements légaux et sont certifiés PEFC (Pan European Forest Certification), la forêt privée pour 45 % de la superficie forestière totale, soit adhère aux Plans Simples de Gestion, par obligation si la surface unitaire est au moins de 25 ha, ou de manière volontaire, soit respecte le Code des Bonnes Pratiques Sylvicoles (253 CBPS).



Figure 8. Vue sur la forêt au Duc, le Vieux Dun, Dun-les-Places (58).



Figure 9. Au premier plan, parcelle feuillue coupée à blanc avec préparation du site pour une probable plantation de Douglas. Forêt au Duc, Quarré-les-Tombes (89).



Figure 10. Futaie cathédrale de sapin pectiné. Forêt au Duc, Quarré-les-Tombes (89).

Encart I. Quelques traits des regards et attentes de la forêt en Morvan

(extrait du document Diagnostic territorial - PNR Morvan, 2018)

Le ressenti du public

Les regards et attentes sur la forêt sont variés, complémentaires et parfois antagonistes. En témoignent les débats passionnés lors des commissions forêt-bois, les mouvements d'opposition, les démonstrations de faisabilité des différentes tendances, l'utilisation des médias locaux et nationaux pour les différentes causes... Dès 2004, une analyse proposait une classification en 4 grandes tendances :

1. Les protecteurs de la nature, pour qui une belle forêt est une forêt riche de diversité : diversité biologique et des écosystèmes, où les cortèges floristiques sont maintenus, qui abrite et nourrit une faune importante et variée (oiseaux, chauves-souris, mammifères...). Diversité des sylvicultures, avec coexistence de taillis simples, taillis sous futaie, futaies irrégulières et régulières...
2. Les forestiers pour qui une belle forêt est une forêt qui est bien gérée, adaptée à la station, et dans le long terme. Ils considèrent que la forêt est la résultante d'une histoire humaine, et non pas une forêt primaire, formation qui a disparu depuis des siècles du Morvan...
3. La forêt vue comme un capital : pour ces personnes une belle forêt est une richesse sur pied, dans un Morvan qui n'a pas été gâté en termes de ressources naturelles. L'exploitation et la transformation du bois sont des activités créatrices de richesse et d'emplois dans une région défavorisée, peu développée et où la population est vieillissante...
4. La forêt vue comme un territoire : qu'est-ce qu'une belle forêt ? C'est « la nôtre ». Une forêt dans laquelle on a ses repères, son histoire, familiale ou culturelle. C'est une forêt pleine de lieux dits, de contes et légendes, de pages d'histoire humaine dans lesquelles on se reconnaît...

Le ressenti des maires

En 2003, puis en 2015, la même enquête a été réalisée auprès des maires des communes du Parc du Morvan. Sur ces 2 périodes, les premiers rôles attendus de la forêt sont l'environnement et le cadre de vie agréable. Le

revenu de la forêt n'est pas identifié comme primordial.

Le problème le plus important est la dégradation des infrastructures. Les élus pointent aussi du doigt le comportement de certains exploitants forestiers qui débardent quand les conditions climatiques devraient l'interdire (sols détrempés), ou causent des dégâts sur les chemins ou les parcelles voisines, qu'ils n'ont pas forcément le souci de remettre en état.

Les maires, dans la grande majorité, pensent qu'ils doivent se mobiliser pour la gestion de la forêt de leur commune. De très nombreuses actions sont proposées, classées par catégorie d'action :

La première catégorie est « limiter les résineux intensifs » : elle comprend les actions d'incitation à planter des feuillus, d'interdiction des coupes à blanc, de limitation de l'enrésinement et de réglementation des boisements. Cette mobilisation, retrouvée dans les deux enquêtes contre la sylviculture intensive du résineux montre encore une fois le problème d'acceptation par la population de ces changements récents et l'actualité des coupes rases de résineux et de feuillus.

Les élus référents forêt-bois

Ce réseau rassemble une cinquantaine d'élus qui, au nom de la commune, peuvent être facilement contactés pour faciliter les travaux forestiers, le débardage et le transport du bois, mais aussi favoriser une sylviculture variée, améliorer la transformation locale du bois...

Dessertes et routes stratégiques du bois

De nombreuses communes sont équipées de schémas de desserte forestière qui permet d'organiser la création des routes et pistes forestières. Le réseau de dessertes est de plus en plus dense. Il concerne des terrains privés et parfois publics. Généralement, l'aménagement des pistes est mené collectivement.

Pour permettre d'extraire plus facilement le bois depuis les places de dépôt, 201 km de routes stratégiques du bois ont été identifiées, routes départementales comme communales. Cette sélection de routes ayant un enjeu majeur dans la sortie de la production de bois vers les unités de transformation permet aux gestionnaires de concentrer les efforts d'entretien sur ces routes. Certaines de ces routes communales ont bénéficié d'un appui financier des pouvoirs publics important.



Figure 11. Coupe à blanc d'un peuplement feuillu dans la vallée de la Cure à Dun-les-Places (58) Centre Nord Morvan.

Les coupes forestières, objet de débats passionnés car le sujet est prégnant dans le PNRM, représentent 870 ha de moyenne annuelle sur la période de 2000 à 2016. La variabilité annuelle est très forte, s'étalant pendant ces années entre 200 et 3000 ha ! L'étude commanditée par la DREAL Bourgogne Franche-Comté conduit à une estimation de 725 ha en 2016, dont 64 % portant sur des peuplements feuillus et 36 % sur des résineux (PLATTNER & MARAGE, 2018). Il faut isoler le cas des coupes définitives des régénérations naturelles qui représenteraient une centaine d'ha annuels dans le périmètre du PNR, essentiellement en forêt publique.

La forte variabilité interannuelle est souvent liée aux événements climatiques extrêmes, directement (chablis de vents), ou à leurs conséquences sur l'état sanitaire

des peuplements. À titre d'exemple, 100 ha d'épicéas scolytés ont été rasés dans le périmètre de Bibracte durant l'hiver 2019-2020. Le Département Santé des Forêts du Ministère de l'Agriculture fait état de récoltes supplémentaires d'épicéas dépérissants suite aux accidents climatiques de 2003, 2005 et 2006 en Région Franche-Comté, de l'ordre du million de m³ sur la période 2003 à 2007 (GAUQUELIN, 2010). Une conclusion importante est que les dépérissements sont observables y compris sur les épicéas d'altitude en station.

L'acceptabilité sociale des coupes rases (figure 11) est très mauvaise dans le Morvan comme le montrent les indicateurs médiatiques (encart I), et c'est bien la raison pour laquelle de Conseil scientifique du PNR a été saisi pour tenter de faire un point objectif sur la question (cf. préambule).

La question de l'abaissement du seuil de demande d'autorisation pour les surfaces coupées à blanc à 0,5 ha, soulevée par le PNRM, a fait l'objet de réunions entre l'État (DRAAF, DREAL) présidées par le Secrétaire Général pour les Affaires régionales (SGAR), le PNRM, l'ONF, les gestionnaires forestiers privés représentés par le CNPF, les syndicats de sylviculteurs et de propriétaires forestiers. Au final, les Préfets des quatre Départements concernés sont favorables pour lancer une expérimentation sur trois zones (soit 22 communes et 42 800 ha de forêt), avec un seuil d'autorisation de coupe rase abaissé à 2 ha au lieu de 4 actuellement. Le Président du Parc a de son côté accepté ces conditions, même si elles

ne correspondent pas totalement aux souhaits initiaux. Une précision indispensable : seuil d'autorisation ne veut pas dire seuil de limite de surface mise à blanc mais, seuil nécessitant une analyse préalable des conséquences pour obtenir l'autorisation de coupe.

Ces données consignées dans l'annexe I, sont issues de documents fournis par le PNR Morvan (données le plus souvent issue de l'IGN/IFN traitées en interne), le CNPF, l'ONF et la DREAL (cf. documents consultés – littérature citée).



Figure 12. Un arbre mort sert d'habitat et de nourriture à de nombreuses espèces animales et végétales : c'est un hot spot de biodiversité colonisé par les espèces animales (insectes, oiseaux, mammifères, batraciens, reptiles) et certaines espèces végétales (champignons, mousses, lichens).

B. EFFETS DES COUPES À BLANC : ASPECTS BIOPHYSIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

B1. L'IMPACT DES RÉCOLTES SUR LE STATUT CARBONÉ ET MINÉRAL DU SOL : LA FERTILITÉ DU SOL

La récolte de la biomasse forestière conduit à l'exportation de tout ou partie du carbone et des éléments nutritifs qu'elle contient. Plus la récolte sera totale, plus les exportations seront élevées ; la relation entre l'intensité de la récolte (du bois fort à la biomasse aérienne totale sur pied) et les exportations minérales ne sont toutefois pas linéaire, car les petits compartiments de biomasse, branches et feuilles/aiguilles sont beaucoup plus concentrés que le bois duraminisé, qui s'est « vidé » de ses éléments, au profit des organes en croissance, dans un processus connu sous le vocable de translocations ou transferts internes dans la plante (RANGER & BONNEAU, 1984).

La situation peut se résumer ainsi :

- les besoins des peuplements forestiers pour produire la biomasse sont élevés,
- le prélèvement au sol, qui ne prend pas en compte les translocations d'éléments nutritifs internes à la plante, est plus faible que les besoins totaux, mais demeure élevé pour les peuplements les plus productifs,
- les litières restituent au sol l'essentiel du prélèvement au sol (de 40 à 80 %). Le cas de K est particulier puisque les restitutions par voie dissoute (récréation issue de l'échange d'ions entre la pluie et la feuille) sont très importantes,
- finalement l'immobilisation, c'est-à-dire la fixation quasi définitive

d'éléments dans la biomasse, est très limitée, ne représentant que de 10 à 15 % du prélèvement au sol.

La faible immobilisation conduisant à la caractérisation de la frugalité des arbres forestiers est en fait apparente, car elle masque la réalité de leurs besoins réels élevés pour produire couramment leur biomasse. Elle illustre cependant parfaitement la stratégie très efficace des ligneux longévifs, pour optimiser le rendement productif d'une fertilité minérale le plus souvent limitée (RANGER *et al.*, 2005 ; RANGER, 2018).

Tableau 1. Illustration de la généralité de la relation entre les besoins totaux en éléments pour élaborer la biomasse et l'immobilisation de peuplements d'essence, d'âge et de traitement très différents (données en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) (RANGER & COLIN-BELGRAND, 1996 ; RANGER *et al.*, 1995, 1997).

Douglas 60 ans	N	P	K	Ca	Mg
Besoins totaux	72	9	43	35	5
Immobilisation	7	1	1	10	1
Châtaignier 15 ans	N	P	K	Ca	Mg
Besoins totaux	127	13	82	45	17
Immobilisation	12	1	6	17	3

Ces données justifient les affirmations quant au risque qu'il y aurait à ne considérer dans les aménagements que la seule immobilisation, en éliminant des parcelles les restitutions et les rémanents, réservoirs de fertilité minérale pour les futures générations forestières.

Concernant les exportations associées aux récoltes généralement limitées à la partie aérienne, les données sont suffisamment

nombreuses pour identifier des lois simples. Dans les arbres matures, quelle que soit l'essence, la concentration en éléments nutritifs est pratiquement inversement proportionnelle à la biomasse dudit compartiment. Les concentrations varient comme suit : feuilles ou aiguilles > rameaux > branches = écorce (sauf pour Ca) > bois (et plus le bois est âgé plus il est pauvre). À station égale, les feuillus ont des concentrations moyennes un peu supérieures aux résineux. La figure 13 traduit ces caractéristiques en termes d'efficacité des éléments nutritifs pour produire la biomasse, pour quelques compartiments de différentes essences.

Les conséquences sont fonctionnelles :

- récolter un arbre entier conduit à des exportations toujours plus fortes que récolter le seul bois fort,
- écorcer les arbres sur le parterre de coupe (ou les restituer), réduirait très fortement les exportations, puisque représentant de 10 à 20 % de la biomasse totale du tronc, les écorces contiennent autant d'azote et de phosphore que le bois, et deux fois plus de calcium,
- exporter totalement les rémanents d'exploitation à un coût très élevé pour le sol, tant pour que le carbone que pour les éléments,
- récolter des arbres jeunes augmente significativement les exportations d'éléments minéraux.

Les différences entre les feuillus et les résineux dépendent de plusieurs paramètres :

- les conifères sont sempervirents (sauf exception) et la récolte totale exporte la majorité des aiguilles,
- les conifères ont des masses foliaires nettement plus fortes que les feuillus (sauf exception) puisque conservant ces aiguilles plusieurs années (de 2 à 10 ans),

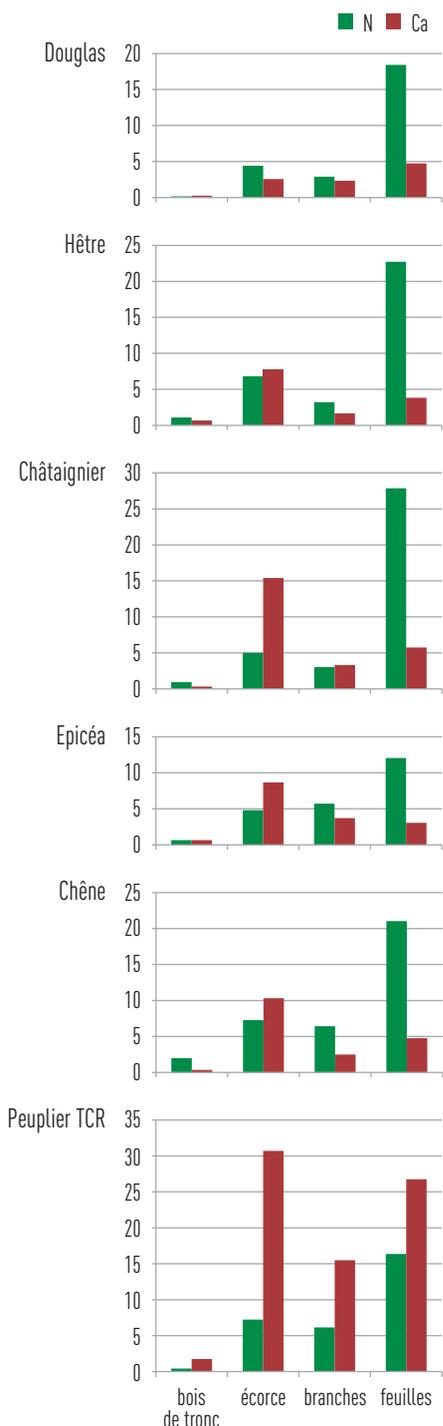


Figure 13. Immobilisation d'éléments en kg de N et Ca par tonne de matière sèche produite en fonction du compartiment, pour quelques essences et traitements.

- les feuillus à croissance plus lente et s'élaguant naturellement avec difficulté, ont en général des branches plus grosses et de masse plus forte que les résineux. La structure du peuplement influence le ratio tronc/houppier.

À titre d'illustration des données concernant des essences et des structures de peuplement représentées dans le Morvan sont présentées ci-dessous (tableau 2) :

- deux futaies de hêtre de 80 et 150 ans,
- des taillis simples feuillus mixtes de chêne, bouleau, sorbier et de châtaignier,
- des futaies de Douglas : une vingtaine de peuplements de Douglas distribués dans tout le bassin de production de cette essence en France,
- une futaie d'épicéa.

Les observations indiquent très clairement que le bénéfice en termes de biomasse collectée, de l'exportation des rémanents d'exploitation, est faible et de l'ordre de 10 à 20 % supplémentaires par rapport au bois fort (découpe 7 cm au fin bout de la grume, incluant également les grosses branches quand elles existent, pour les

feuillus de taillis sous futaie en particulier). Pour les feuillus, les feuilles sont très généralement exclues des récoltes (sauf dans le cas du bois énergie), ce qui n'est pas le cas pour les résineux.

Pour les feuillus traités en futaie, exporter les branches de diamètre inférieur à 7 cm au fin bout permet de récolter de 12 à 23 % de biomasse supplémentaire, avec un coût supplémentaire de 20 à 80 % pour les éléments minéraux. Pour les feuillus traités en taillis, la figure est assez proche, permettant au passage de comprendre pourquoi le traitement en taillis aux rotations courtes a été très contraignant pour la fertilité des sols, d'autant que la charbonnette et les fagots exportaient la biomasse presque totale : les sols du Morvan, des Ardennes et de l'Ouest du Massif Central conservent la trace de ce traitement.

Pour les résineux, exporter les branches en plus du bois fort permet de gagner 13 % de biomasse en moyenne, mais double pratiquement l'exportation d'éléments. Exporter l'ensemble de la biomasse par rapport au seul bois fort triple les exportations d'éléments pour gagner 20 % de biomasse.

Tableau 2. Intensité des récoltes et exportation minérale pour différents peuplements représentés dans le Morvan.
Légende : TA = total aérien ; TAL = total arbre ligneux aérien ; TrBF = tronc bois fort incluant l'écorce.

	ratio branches/ tronc		MS	N	P	K	Ca	Mg
Hêtraie Fougères (35) - 80 ans (LEGOUT, 2008)	0,33	$\Delta[(TAL-TrBF)/TrBF]*100$	23	60	82	44	35	27
		$\Delta[(TA-TrBF)/TrBF]*100$	24	71	91	51	38	29
Hêtraie Fougères (35) - 150 ans (LEGOUT, 2008)	0,72	$\Delta[(TAL-TrBF)/TrBF]*100$	12	59	45	21	20	20
		$\Delta[(TA-TrBF)/TrBF]*100$	13	69	48	24	21	22
Taillis simple à chêne, bouleau et sorbier (BOUCHON <i>et al.</i> , 1985)	0,23	$\Delta[(TAL-TrBF)/TrBF]*100$	23	67	80	49	39	47
		$\Delta[(TA-TrBF)/TrBF]*100$	28	132	146	87	58	85
Taillis simple de Châtaignier (RANGER & COLIN-BELGRAND, 1996)	0,09	$\Delta[(TAL-TrBF)/TrBF]*100$	9	23	34	39	18	23
		$\Delta[(TA-TrBF)/TrBF]*100$	11	73	117	114	25	49
Douglas (20 peuplements) Inrae BEF (collectif)	0,13	$\Delta[(TAL-TrBF)/TrBF]*100$	13	64	90	136	91	97
		$\Delta[(TA-TrBF)/TrBF]*100$	19	202	153	287	171	218
Epicéa plantation 75 ans Vosges (88) (RANGER <i>et al.</i> , 1992)	0,13	$\Delta[(TAL-TrBF)/TrBF]*100$	13	91	240	85	48	84
		$\Delta[(TA-TrBF)/TrBF]*100$	19	174	371	143	65	112

Les données pour les systèmes racinaires sont nettement moins nombreuses que pour la partie épigée des peuplements. Pour des raisons techniques et économiques, souches et racines ne sont généralement pas récoltées, ce qui est très positif pour l'écosystème.

Quelques données sont présentées dans le tableau 3 suivant, intéressant le Morvan pour le Douglas. Les souches et racines totales représentent une part non négligeable de la biomasse totale du peuplement (de l'ordre de 20 % de la partie aérienne) et les éléments minéraux y sont, au minimum, représentés au prorata de la biomasse. Leur exportation qui ne porte que sur les souches et une partie des grosses racines pose problème pour le carbone du sol moins pour la fertilité minérale. Il n'en est pas de même pour les aspects physiques de la fertilité (cf. § B2, p. 37).

Ces conclusions sont parfaitement généralisables et valables pour tout type de coupe, dont les coupes à blanc : l'exportation des petits compartiments de biomasse (récolte des arbres entiers) ou des rémanents d'exploitation, et surtout des menus bois (exportation, brûlage, andainage...) conduit à des pertes substantielles dommageables pour l'écosystème (DYCK *et al.*, 1994 ; ACHAT *et al.*, 2015a ; LANDMANN &

NIVET, 2014). Par définition tous ces éléments absorbés par la végétation étaient bio-disponibles et leur retrait du système élimine une partie de la fertilité active du sol. La capacité d'un sol pauvre à les renouveler est faible, puisque les éléments les plus facilement libérables par l'altération lente des minéraux primaires l'ont déjà été, et que ceux qui restent sont de plus en plus fortement inclus dans des structures minérales ou organiques stables.

Ces pratiques ne sont pas en accord avec le caractère très conservatif du fonctionnement des écosystèmes à faibles intrants, optimisant les ressources disponibles par un recyclage biologique très efficace, pour produire une quantité de biomasse satisfaisante (RANGER & BONNEAU, 1986 ; encart II, p. 38).

Le calcul des exportations des forêts françaises lors des coupes est possible, avec une marge d'erreur raisonnable de 10 à 15 %. Le calcul doit prendre en compte la réalité des exportations de produits hors de la forêt, partie exacte de la biomasse sur pied, en identifiant les compartiments exportés.

Tableau 3. Biomasse et minéralomasse des systèmes racinaires (incluant les souches) pour le Douglas (RANGER & GELHAVE, 2001) et le Pin maritime (LEMOINE *et al.*, 1986).

		MS (t)	N	P	K	Ca	Mg
		<i>t par ha</i>	<i>kg par ha</i>				
Douglas 47 ans Beaujolais	total ligneux aérien	317	362	34	331	247	38
	TOTAL souterrain	58	95	6	37	44	6
	hypogé/épigé %	18	26	16	11	18	16
	masse récoltable	35	57	3	22	27	4
Pin maritime 17 ans Landes de Gascogne	total ligneux aérien	54	89	9	65	80	22
	TOTAL souterrain	11	18	2	14	4	2
	hypogé/épigé %	21	20	19	22	5	10
	masse récoltable	7	11	1	8	3	1

Augmenter les exportations, en général, mais plus particulièrement dans les systèmes pauvres comme c'est le cas dans le Morvan, ne peut s'entendre que si des restitutions existent car cette pratique est acidifiante *e.g.* exportant des éléments participant à la capacité système à neutraliser les acides (BONNEAU *et al.*, 1987). De plus, il faut prendre en compte ce dommage dans le cadre d'une utilisation peu valorisante de la biomasse, telle l'énergie directe ! L'exportation supérieure à la capacité d'auto-restauration du système, conduit à l'appauvrissement des sols (ACHAT *et al.*, 2015a) et l'ensemble de leurs fonctions sera affecté à plus ou moins long terme, dont la production (DYCK *et al.*, 1994). Les données collectées sur le site expérimental de Breuil-Chenu, installé près de la Maison du Parc du Morvan, illustrent cette conclusion (RANGER *et al.*, 2007).

Cette affirmation est aisée à mettre en évidence dans des systèmes très pauvres où des plantations intensives ont été mises en place : par exemple, dans la plaine côtière du Congo, la production est de $13,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ dans un peuplement d'eucalyptus de 48 mois où l'élimination des rémanents d'exploitation a été totale, et de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ quand les rémanents ont été doublés (conservation des rémanents du peuplement et apport de ceux du peuplement voisin où ils ont été totalement extraits) (NZILA *et al.*, 2004). La réponse des écosystèmes tempérés est plus difficile à mettre en évidence sur le court terme car plus lente, du fait que les sols dont la fertilité minérale est nulle sont fort heureusement assez rares, et les essences sont plus rustiques, mais la question pour le long terme est identique.

B2. LA PRÉPARATION DU SOL POUR LA GÉNÉRATION SUIVANTE

La coupe à blanc concerne la récolte du peuplement végétal qu'elle élimine en une seule opération.

Remarque préalable : le seul effet « coupe à blanc » pourrait ne pas être très perturbant si l'extraction des arbres était réalisée par des méthodes ad hoc (cf. mesures alternatives, débardage par câble ou toute autre méthode protégeant le sol), qui ont pour inconvénient leur surcoût apparent, dans un contexte où le calcul économique est toujours marginal, ne prenant que très rarement en compte l'ensemble du système, par exemple la valeur réelle des fonctions d'un sol (productivité future, épuration, émission de GES, accueil de biodiversité, etc.), voire du paysage.

Les perturbations les plus graves proviennent des dégâts au sol causés par l'extraction des grumes, puis celui lié à la préparation des terrains pour la génération suivante, quand il ne s'agit pas de régénération naturelle.

Dans ces conditions, sont à prendre en compte :

- l'état d'un sol après coupe qui a pu être dégradé par les machines qui interviennent pour la coupe (abatteuses), puis pour le débardage voir le dessouchage, causant scalpage (élimination locale de la litière mettant le sol minéral à nu), mélange d'horizons, orniérage, tassement... puis érosion mécanique...
- le traitement des rémanents d'exploitation qui représentent une quantité certaine de biomasse apparemment non valorisée (de 20 à 50 tonnes de matière sèche par ha, soit 10 à 25 tonnes de carbone), et qui pourrait l'être pour l'énergie. Mais c'est une source importante de carbone

Encart II. La fertilité des sols forestiers

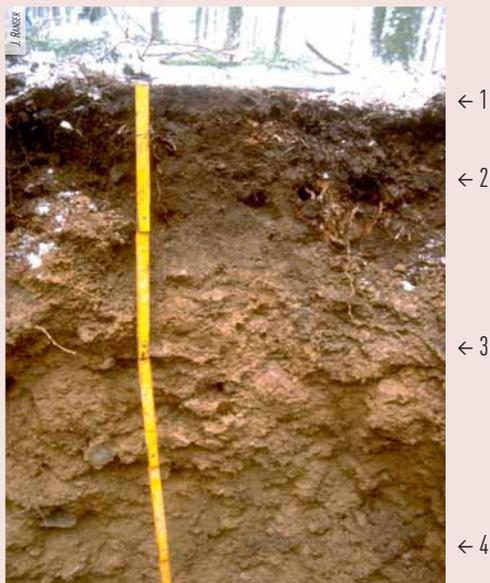
La fertilité des sols forestiers résulte d'une longue co-évolution entre un milieu naturel et une influence plus ou moins directe de l'homme. Ce dernier a transformé les milieux soit en injectant beaucoup et continuellement de l'énergie dans le système (sélection de végétaux d'intérêt, modifications du sol, contrôle de la concurrence etc.), soit au contraire, en exploitant les ressources du système, sans y restituer quoi que ce soit.

Les sols forestiers correspondant au deuxième cas de figure, sont donc rarement des milieux naturels, mais comparés aux systèmes agricoles, ils présentent un degré de naturalité nettement supérieur. Les sols réservés à la forêt sont donc de ce fait et dans un territoire donné, les sols les moins convenables pour l'agriculture et des sols relativement plus stables que les sols agricoles, car moins anthropisés entre autres, par les intrants divers (travail du sol, intrants minéraux ou organiques, ...icides). Ce sont des sols dont les composantes de la fertilité (physique chimique et biologique) sont différentes des milieux agricoles, souvent plus pentus, plus caillouteux, plus acides et plus hydromorphes, mais aussi plus organiques du fait de la stabilité.

La fertilité d'un sol forestier jugée à l'aune de celle des sols agricoles est en général qualifiée de faible à très faible, ce qui signifie que cultiver des végétaux agricoles en sol forestier conduirait à des productions très faibles, puisque ces derniers n'ont été sélectionnés que pour des milieux riches ! Par contre cela ne signifie pas que les végétaux forestiers qui ont co-évolué avec leur milieu, ne sont pas aptes à produire une biomasse et des services significatifs.

Les composantes de la fertilité des sols forestiers :

- fertilité organique et minérale : les éléments ne sont pas équi-répartis dans un sol, mais au contraire plus le sol est acide, plus les éléments intéressant la nutrition des plantes sont concentrés à la surface du sol (dans l'humus pour faire simple, celui étant composé de la zone hologanique et de la zone organo-minérale).
- fertilité physique : elle est liée à l'agencement des constituants à différentes échelles, associations nano organo-minérales, associations en agrégats macroscopiques, superstructures décimétriques, organisation horizontale (horizons de sols) caractérisée par un gradient organique le plus généralement décroissant



Sol brun acide forestier ou Allocrisol et ses principaux horizons.

- 1 : Horizon hologanique (Ol, Of, Oh) ; 2 : Horizon organo-minéral (A1) ; 3 : Horizon minéral d'altération (w) ; 4 : Roche mère très altérée (C)

du haut vers le bas du sol. La stabilité des structures rarement optimale, à cause de l'acidité, mais souvent correcte, autorise la circulation des fluides, eau et gaz, vers le bas mais aussi vers le haut.

- fertilité biologique : elle est souvent plus limitée en abondance qu'en sol riche, mais les fonctions sont remplies, nutrition via les symbioses et autres associations, biodégradation et minéralisation plus ou moins complète, etc. Les organismes sont le plus souvent fortement concentrés dans les premiers cm du sol (humus), zone où l'apport de litière et d'énergie et où les éléments nutritifs, les supports énergétiques et l'oxygène, sont présents. Toutefois, les racines et leurs associés peuvent explorer des profondeurs importantes ; de même certains vers de terres, les anéciques explorent une profondeur de sols de l'ordre du mètre si le substrat le permet (compaction, aération, richesse chimique).

Les trois composantes de la fertilité d'un sol sont de fait extrêmement liées et interactives.

De plus, les végétaux pérennes sont extrêmement performants quant à l'utilisation des

éléments nutritifs pour produire la biomasse. Leurs besoins sont assez importants, mais couverts par des recyclages efficaces, de sorte que finalement les éléments stockés dans la biomasse pérenne sont peu abondants.

Les sources des éléments disponibles pour l'arbre sont nombreuses :

- capture des éléments atmosphériques, en particulier N au niveau de la canopée
- recyclage interne à la plante des éléments des organes sénescents vers les organes en croissance
- recyclage d'une majorité du prélèvement au sol via les restitutions de litière aérienne et souterraine.
- prélèvement dès la minéralisation (dans l'humus) grâce à un réseau dense de racines fines et grâce aux symbiotes.
- parfois substitution de la partie non spécifique d'un élément pour la nutrition d'un arbre (ex Na pour K)
- utilisation des intrants quand ils existent.

La frugalité d'un arbre résulte non pas de besoins très faibles, mais d'un recyclage très puissant et très efficace.

Conséquences :

- la fertilité minérale d'un sol forestier repose plus sur un flux limité mais continu d'éléments, que sur un réservoir,
- les aspects physiques conduisant à une porosité correcte sont fondamentaux pour que le milieu soit hospitalier pour les organismes quels qu'ils soient,
- l'équilibre actuel résulte de processus d'adaptation lents et anciens
- le sol forestier est vulnérable : les pratiques « brutales » conduisant aux exportations d'éléments (exportations intempestives des rémanents, andainage, récoltes d'arbres jeunes, etc.) et /ou à des contraintes physiques mal menant la porosité du sol, sont à proscrire car elles détruisent cet équilibre complexe.

Au total, le sol forestier est une ressource pas ou peu renouvelable à l'échelle humaine, qu'il convient de protéger, compte tenu des nombreuses fonctions qu'il remplit e.g. production, biodiversité, eaux de qualité, atmosphère...

Pour en savoir plus, RANGER & LANDMANN (2014).

et de nutriments, dont la minéralisation lente va servir de réservoir pour le développement des générations futures : par définition il s'agit d'une réserve disponible sur le court et le moyen terme. Ils servent également de protection anti-érosion... mais ils représentent un obstacle pour la nouvelle plantation. L'exportation de carbone et d'éléments associés aux rémanents d'exploitation est parfaitement calculable actuellement (cf. § B1, p. 33).

- la question de la végétation spontanée qui peut coloniser plus ou moins rapidement le parterre de coupe et concurrencer le jeune peuplement, surtout s'il s'agit d'une plantation. Son rôle est cependant multiple, protecteur contre l'érosion physique et chimique, régulateur du bilan hydrique, réservoir temporaire d'éléments nutritifs qui pourront être remobilisés par le peuplement quand le couvert va se fermer, évitant les pertes de fertilité liées au drainage, éventuellement apport d'azote quand les espèces fixatrices d'azote atmosphérique se développent (par exemple *Cytisus scoparius*). Son élimination laissant un sol nu se traduit par une forte minéralisation des MO du sol, pouvant libérer un flux considérable d'éléments (cas du Hubbard Brook Forest côte Est des USA – LIKENS *et al.*, 1978)
- la préparation des sites pour la régénération du peuplement. Cette phase peut être très perturbante pour l'écosystème :
 - l'extraction des rémanents et des souches : ces opérations nécessitent le parcours de la parcelle par diverses machines lourdes en général, et en dehors des cloisonnements, augmentant le risque de tassement en période humide. L'extraction des souches est la plus dramatique, conduisant à des excavations

comblées mécaniquement par brassage local des horizons de surface et exhumation de « morts terrains », sites privilégiés pour l'initiation de l'érosion en sol en pente, y compris légère. On peut estimer à 10 % l'ordre de grandeur de la surface directement concernée par l'excavation des souches. La collecte des souches ne peut s'envisager que pour éliminer des pathogènes ou lors du changement d'affectation des sites.

- brûlage des rémanents : de nombreux éléments sont affectés directement par volatilisation (le carbone pour partie, l'azote majoritairement, le phosphore en fonction de la température d'incinération) ou indirectement (volis ou entraînement des cendres par les eaux). Bien que proscrite, cette méthode n'est jamais complètement absente.
- traitement herbicide de la végétation spontanée et dévitalisation des souches : récemment interdits en forêt publique (arrêté de 2019), leur utilisation semble marginale en forêt privée, sauf pour les problèmes de gibier et le traitement anti-fongique (*Fomes*). Le risque au moment de la coupe à blanc est double : d'une part érosion physique accentuée en condition de sol nu et d'autre part, transfert de substances toxiques vers les eaux de surface.
- andainage : cette pratique, consistant à « nettoyer » le sol des rémanents d'exploitation, disposés en rangs (andains), restreint la fertilité chimique du sol de la zone plantée en la transférant pour partie vers les andains non concernés par la plantation. Les paramètres physiques de la fertilité peuvent être également contraints si l'andainage est réalisé par des lourdes machines circulant sur toute la parcelle, surtout si le sol est humide.

- travail du sol (discage, labour, billonnage) : ces pratiques sont destinées à ameublir un sol compacté ou à éliminer les ornières (discage), à enfouir des humus épais (labour avec retournement), à surhausser le sol engorgé (billonnage), à détruire physiquement la végétation concurrente. Ces pratiques sont à éviter, dans la mesure où l'organisation du sol est perturbée, et par conséquent son fonctionnement biogéochimique. De plus, le retournement du sol oxyde la matière organique et déstocke du carbone, augmentant les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Elles ne concernent actuellement majoritairement que la sylviculture très intensive (ligniculture), bien que l'élimination mécanique de la végétation concurrente pour implanter les plantations soit de nouveau prônée, compte tenu des problèmes liés aux herbicides.

...mais les conclusions doivent toujours être modulées par les conditions locales (type de sol, relief, pratiques...).

B3. LES PARAMÈTRES MAJEURS MODIFIÉS PAR LA COUPE À BLANC IMPACTANT LE FONCTIONNEMENT DU SOL, DE L'ÉCOSYSTÈME FORÊT ET CELUI DES ÉCOSYSTÈMES DÉPENDANTS (EAUX DE SURFACE) ; RÔLE DU CONTEXTE

L'équilibre de l'écosystème a été modifié dans tous ses paramètres :

- en système à faibles intrants, l'exportation par les récoltes représente une perte nette pour la réserve de carbone et d'éléments nutritifs du sol,
- les pompes que constituent les arbres disparaissent, modifiant d'autant le

- bilan hydrique par les paramètres transpiration et interception des pluies,
- l'énergie qui arrive au sol est très différente de ce qui existait avant la récolte, puisque non interceptée par les couverts,
 - les apports au sol liés à la capture des « polluants » de la basse atmosphère et au recyclage de la strate arborée disparaissent,
 - la perturbation des couches holorganiques de surface diminue leur effet mulch, qui amortit le dessèchement du sol et l'effet mécanique des précipitations,
 - l'élimination partielle des couches holorganiques et le raclage du sol lors de l'andainage affectent la fertilité chimique, le tassement affecte la fertilité physique,
 - les niches biologiques et par conséquent les fonctions sont modifiées.

Le contexte va traduire ces effets potentiels, en contraintes réelles :

- le climat par ses composantes (précipitations, température, vent...) peut modifier largement un *stimulus* initial,
- le relief, par la pente et l'exposition, peut accélérer le transfert latéral d'eau, de solutés et de particules,
- le sol, par sa texture et sa structure, joue un rôle de tampon plus ou moins fort dans le bilan hydrique et hydrologique,
- la couverture végétale vivante ou morte tamponne les paramètres du bilan hydrique (évaporation, transfert) et l'initiation de l'érosion mécanique et chimique,
- la taille de ou des coupe(s), leur forme, leur nombre et leur position relative dans le bassin versant participent à l'amplification des impacts à différentes échelles (du petit au grand bassin versant).

B4. CONSÉQUENCES DES COUPES À BLANC ET DE LA PRÉPARATION DES TERRAINS POUR LES GÉNÉRATIONS SUIVANTES SUR LES CARACTÉRISTIQUES BIOPHYSIQUES DES ÉCOSYSTÈMES

B4.1. LES SOLS

B4.1.1. Aspects physiques

L'organisation du sol en horizons et la structure interne à chacun d'eux, c'est-à-dire l'organisation des particules élémentaires en agrégats, vont favoriser la porosité et par là même, le transfert des fluides (eau et gaz), la prospection racinaire et l'activité biologique.

La nature et l'organisation du sol en horizons, organiques en surface et de plus en plus minéraux vers la profondeur, sont des traits importants de la fertilité du sol forestier, puisque l'ensemble des acteurs s'est adapté à cet état de fait : l'enracinement des arbres colonise plus fortement les horizons de surface où sont concentrés les nutriments, l'activité biologique assurant les fonctions de recyclage (minéralisation) et de prélèvement (symbiotes *lato sensu*) l'est également puisque l'atmosphère du sol y est riche en oxygène. Le mélange des horizons peut donc avoir des répercussions importantes et durables.

La récolte de bois en elle-même ne contraint l'écosystème que par la soustraction d'éléments, dont le rôle peut être direct ou indirect sur la structure et la stabilité du sol : rôle direct liant des composés organiques, ou flocculant d'éléments comme le calcium, rôle indirect sur le changement de l'activité biologique ayant un rôle sur ladite structure (micro et macro flore ou faune). Cet aspect dépend de l'intensité de la récolte (partielle ou

totale) et concerne également toutes les extractions intermédiaires (éclaircies). Les populations de vers de terre assurant entre autres des fonctions essentielles dans les premières phases de la minéralisation et dans l'aération du sol via l'agrégation et la porosité (anéciques), sont proportionnelles à la quantité de calcium du sol, donc au pH (REICH *et al.*, 2005 ; NEIRYNCK *et al.*, 2000) : toute acidification aura un effet négatif à cet égard.

Le débardage des produits et la préparation des sites pour la génération suivante sont potentiellement très perturbants pour l'écosystème, mais varient fortement avec les méthodes employées :

- la circulation des engins divers sur la parcelle se traduisant par le scalpage (élimination locale de l'horizon de surface), l'orniérage, le brassage d'horizons et le compactage du sol (diminution de la macro-porosité par augmentation de la densité apparente et de la résistance physique du sol), a des conséquences multiples et durables sur la chimie et la biologie du sol (PISCHEDDA, 2009). Dans des milieux dits sensibles (sols à texture fine, limoneuse en particulier ; sols très organiques), quand la circulation a lieu sur des sols humides, le tassement se traduit très rapidement par l'hypoxie voire l'anoxie (déficit de transfert des gaz du sol dont l'entrée d'oxygène et l'évacuation de gaz carbonique, d'oxydes d'azote voire de méthane, conduisant à un milieu déficitaire en oxygène) et l'hydromorphie (déficit d'écoulement de l'eau entraînant un engorgement du sol), autant de caractères très défavorables pour une bonne majorité des organismes, animaux ou végétaux, micro ou macro. La végétation peut être totalement modifiée avec l'apparition d'espèces invasives (jonc, glycérie) très fortement concurrentes pour les jeunes plants forestiers. La

perturbation est importante et durable (RANGER *et al.*, 2015 ; GOUTAL-POUSSE *et al.*, 2016). La régénération naturelle de la porosité du sol est lente, comme le traduisent plusieurs indicateurs : la résistance physique du sol augmente durablement dans le sol tassé (très peu de restauration après 10 ans, POUSSE *et al.*, 2021) ; la nappe perchée temporaire peut perdurer plus d'une dizaine d'années après le tassement (BONNAUD *et al.*, 2019). La lente régénération de la porosité du sol, n'étant en forêt le fait que de processus naturels (cycles humectation-dessiccation, cycles gel-dégel, perforation par les animaux et les racines des végétaux, prélèvement d'eau), se développera en surface mais peu en profondeur. Le risque sera donc que des contraintes successives s'appliquent sur des sols dont la porosité des horizons moyens et profonds ne s'est pas restaurée. Le syndrome de la semelle de labour s'appliquerait aux sols forestiers où l'enracinement des végétaux deviendrait plus superficiel, les exposant aux stress mécaniques, hydriques et nutritionnels.

- le traitement des rémanents pour faciliter les plantations, outre les aspects physiques directs, peut contraindre indirectement le sol :
 - le brûlage, en fonction de son intensité, conduit à la perte d'éléments (cf. chimie) et à la dégradation de la microflore ; ces phénomènes contraignent la structure du sol. S'il est maintenu à nu, le risque d'érosion physique (et chimique) est accru. La stabilité du sol peut être affectée en cas d'orages estivaux violents, comme c'est le cas en zone méditerranéenne pentue (VENNETIER *et al.*, 2014). Un effet flush (stimulation initiale) peut apparaître sur la croissance des plants, devenant effet dépressif (effet négatif suite à la déplétion d'éléments) par la suite.

- l'andainage élimine physiquement une source de carbone et de nutriments de la zone où les plants vont être installés, pour les déplacer vers l'andain. Le degré de l'élimination est d'autant plus dramatique que l'opération transfère dans les andains les litières voire une partie du sol minéral superficiel riche (MCNAB & SAUCIER, 1980). La mise à nu de surfaces importantes, le tassement de la zone de plantation, la réalisation de l'andain perpendiculairement aux courbes de niveaux (cas général quand la pente devient forte) structurent la parcelle au plan du climat et de la dynamique de l'eau (figure 14). Il en résulte une augmentation notable du risque d'érosion mécanique et chimique du sol, et de chute de fertilité dans la zone accueillant la plantation. Les particules les plus fines, qui sont également les plus réactives pour l'agrégation et la rétention de l'eau (argiles, limons, petits agrégats organiques), sont entraînées le plus facilement vers les bas de pente (perte pour le sol) et les ruisseaux (pollution des eaux de surface). Les peuplements sont d'autant plus affectés que le sol est initialement pauvre. Le peuplement futur aura une structure en vague (hauteur plus forte près des andains où sont concentrés eau et nutriments), et sa production moyenne chute (BALLARD, 1977 ; BALLARD & MATSON, 1978 ; FISHER & BINKLEY, 2000). Il s'agit d'une perturbation majeure dans les forêts issues de plantations, d'autant plus forte que le sol sera pentu. De plus, les andains peuvent constituer une niche pour les pathogènes et les rongeurs
- le broyage des rémanents n'exporte rien hors de la parcelle, mais peut créer s'il est trop épais un effet mulch, pas nécessairement favorable aux plants forestiers, d'autant qu'il peut libérer des tanins toxiques et

abriter des rongeurs. En revanche, un broyage limité à la ligne de plantation, dont les produits seraient projetés sans forte concentration sur la ligne de la future plantation, n'aurait que des avantages.



Andainage réalisé dans le sens de la plus grande pente conduisant à de l'érosion du sol et à des atterrissements en bas de pente.



Coupe à blanc sur pente où l'andain a été positionné parallèlement au cours d'eau, de façon à éviter le transfert érosif dans ce dernier... L'impact sur le sol est le même. Quelle durabilité pour cet aménagement et qu'en est-il du transfert en solution ?

Figure 14. Andainage sur la commune de Saint-Brisson (Nièvre).

B4.1.2. Aspects chimiques et biochimiques

- *Extraction de carbone et d'éléments par les récoltes*

La récolte extrait du carbone et les éléments chimiques indispensables à la croissance des végétaux. Par exemple, en moyenne pour le Douglas en France (base de données Inrae-BEF Nancy portant sur une vingtaine de peuplements), l'exploitation du seul bois fort exporte de l'écosystème une centaine de tonnes de carbone et 128, 10, 35, 77, 10 kg.ha⁻¹ respectivement pour N, P, K, Ca et Mg. La récolte totale extrait 117 tonnes de carbone, mais 388, 25, 135, 200, 30 kg.ha⁻¹ pour les mêmes éléments.

Sachant que les sols supportant ces peuplements avaient des réserves à l'ha sur 60 cm d'épaisseur, variant de 1500 à 9400 kg.ha⁻¹ pour N_{org}, de 130 à 4000 pour P, de 180 à 1340 pour K, de 37 à 12000 pour Ca et de 23 à 1200 pour Mg, et que pour P, K, Ca et Mg respectivement les seuils de réserves moyennes sont de 350, 500, 600 et 250 kg.ha⁻¹, il apparaît clairement que si la récolte de bois fort est en général peu contraignante, la récolte totale l'est pratiquement toujours, au moins pour K, Ca et Mg.

Compte tenu de la pauvreté assez générale des sols forestiers français dont 50 % d'entre eux ont un pH inférieur à 5 (BADEAU *et al.*, 1999 ; ARROUAYS & RANGER, 2014), la récolte la moins impactante quant aux exportations minérales s'impose. La collecte des rémanents pour l'énergie est également une très mauvaise idée en sol pauvre, risquant de déstabiliser le système pour toutes ses fonctions (RANGER *et al.*, 2005). Qualifier une énergie de renouvelable implique que le système qui sert à la produire soit pérenne.

Remarque : dans « le schéma biomasse de Bourgogne-Franche-Comté », le volume de biomasse issu des « menus bois forestiers » est nul. Les professionnels présents ayant estimé que ces « menus bois » étaient indispensables au maintien de la fertilité des sols. Cette résolution est parfaitement en accord avec une limitation des risques pour la fertilité chimique liés à la récolte de bois.

- *Pertes chimiques par érosion*

Ce terme générique ne sera utilisé ici que pour qualifier les pertes de carbone et d'éléments associées au transfert de particules physiques (cf. point précédent). L'érosion entraîne vers les bas de pente, les particules fines, en général riches en éléments et réactives (matières organiques et argiles) activant les fonctions physico-chimiques de rétention d'éléments et les fonctions biologiques. Certains éléments très peu solubles, comme le phosphore, sont particulièrement sensibles à ce processus. Les pertes d'argiles sont parfaitement irréversibles. Ce sont par ailleurs des apports contraignants pour les eaux de surface (matières en suspension augmentant la turbidité des eaux de surface ; apports eutrophisants cf. § B4.2, p. 48).

- *Sur-minéralisation des matières organiques du sol*

Les modifications du microclimat de la zone exploitée peuvent se traduire par un regain d'activité biologique ou au contraire par sa réduction (VITOUSEK *et al.*, 1979 ; GRENON *et al.*, 2004). Il est souvent difficile de faire la part entre ce changement d'activité biologique et l'accumulation relative d'éléments suite au déficit de prélèvement par la végétation qui a été éliminée (VITOUSEK & MELILLO, 1979) puisque les observations concernent un bilan net : quelques études font la part

des choses en mettant en évidence soit une augmentation de la minéralisation (DAHLGREN & DRISCOLL, 1994) soit une stagnation (BURNS & MURDOCK, 2005 ; BARG & EDMONDS, 1999) soit une diminution (JUSSY *et al.*, 2000). La question n'est pas simple, y compris quand des produits nouveaux apparaissent, car on ne peut pas savoir directement si la végétation les prélevait entièrement ou s'ils correspondent à un nouveau processus.

La littérature montre qu'il faut observer de nombreux paramètres pour pouvoir conclure : ces paramètres dépendent du milieu, des méthodes de récolte et de préparation des sites incluant le contrôle ou non de la végétation, des essences et de la microflore active du sol.

Remarque générale : certains paramètres sont assez simples à mesurer, d'autres beaucoup moins, et uniquement en conditions contrôlées, posant la question récurrente du transfert des conclusions du laboratoire vers le terrain, où les interactions multiples et variables peuvent totalement modifier le résultat. La durée d'observation est par ailleurs un facteur clé dans le domaine de l'environnement et tout particulièrement pour les systèmes longévifs.

- le changement de microclimat, augmentation de la température au sol d'1 à 2 degrés, changement d'humidité, paramètres pouvant accroître l'activité biologique (T et H augmentent) ou la restreindre (T augmente et H diminue par exemple en zone méditerranéenne). La dimension de la coupe affecte directement ces paramètres,
- l'intensité des récoltes : plus la récolte est forte, plus la contrainte pour le sol l'est (NYKVIST *et al.*, 1994),
- le mode de préparation des sites : le brûlage des rémanents produit la volatilisation d'une partie du carbone, de l'azote, voire du phosphore

(température > 450 °C) ; les volis de cendres ou leur entraînement par les eaux de ruissellement éliminent une autre partie des éléments. Les microorganismes du sol peuvent être partiellement détruits. L'andainage exporte vers les andains non plantés des quantités importantes d'éléments qui peuvent être lixiviés et perdus pour le sol. À titre d'exemple, dans le Beaujolais, l'andainage des rémanents d'une coupe de Douglas a transféré dans les andains environ 1 000 kg d'azote organique et 100 kg de phosphore (données du site Inra – forêt des Aiguillettes – Beaujolais, Rhône). En Floride, MORRIS *et al.* (1983) estiment à 6 récoltes de bois fort, et à 10 % des réserves du sol, les éléments transférés dans les andains !

- les antécédents fertilisation et amendement : en Suède, l'augmentation des populations nitrifiantes après la coupe, est plus forte quand un antécédent chaulage existe (BÄCKMAN *et al.*, 2004) et l'activité minéralisatrice augmente avec la fertilisation (HOGBÖM *et al.*, 2001)
- le rôle de la végétation :
 - l'élimination des arbres peut largement modifier le cycle de l'azote (et par conséquent de tous les éléments) : élimination du prélèvement, élimination des essences fixatrices d'azote atmosphérique, diminuant ce flux entrant, mais augmentant la minéralisation des résidus ; élimination de l'effet filtre capturant la pollution, élimination des essences stimulant la nitrification telles que le Douglas ou l'inhibant telles que le sapin (ZELLER *et al.* 2007 ; ANDRIANARISOA *et al.* 2010 ; ZELLER *et al.*, 2019).
 - la nature des litières produites par les végétaux ligneux est plus ou moins facilement décomposable (interaction entre récalcitrance et milieu) modifiant les relations auto-hétérotrophes,

- la coupe à blanc modifie la végétation spontanée par rapport au peuplement en place (BOCK & VAN REES, 2002) mais cela dépend de la structure du peuplement et des essences initiales (GÖTMARK *et al.*, 2005), changeant par conséquent le prélèvement d'éléments en relation avec les besoins des espèces présentes (HOGBÖM *et al.*, 2001) ; des fixateurs d'azote atmosphérique peuvent apparaître (*Cytisus*, *Ulex*) augmentant le pool azoté du sol (RANGER *et al.*, 2007) ; des végétaux peuvent inhiber l'activité biologique (composés phénoliques des éricacées, allélopathie liée à certaines espèces, GRENON *et al.*, 2004). Le contrôle de la végétation spontanée peut totalement annuler le prélèvement, laissant par ailleurs le sol à nu, et augmentant dramatiquement la lixiviation (BORMANN *et al.*, 1974 ; GENAY, 2002) ou au contraire en la diminuant quand cette végétation est maintenue (RANGER *et al.*, 2007 ; LEGOUT *et al.*, 2009).
- le fonctionnement microbien du sol : la structure des communautés et leur biomasse relative sont des facteurs clés du fonctionnement du sol (minéralisation, immobilisation, dénitrification...)
 - la structure des communautés microbiennes (champignons, bactéries, archées, algues...) est affectée par la coupe à blanc et par les différents traitements (test des phospholipides, respiration, fumigation...) (SIIRA-PIETIKÄINEN *et al.*, 2001 ; BAATH *et al.*, 1995),
 - la biomasse microbienne globale est parfois diminuée (BAATH *et al.*, 1995 ; PIETIKÄINEN & FRITZE, 1995), parfois augmentée (ENTRY *et al.*, 1986 ; PARFITT *et al.*, 2002 ; BÄCKMAN *et al.*, 2004), parfois non affectée (SMOLANDER *et al.*, 1998 ; BARG & EDMONDS, 1999 ; CHANG *et al.*, 1995),
 - La réduction du nitrate en NH_4^+ : processus incontournable pour certaines espèces quel qu'en soit le coût énergétique (GRENON *et al.*, 2004),
 - La végétation peut par la rhizodéposition favoriser ou non l'immobilisation microbienne d'ammonium (NH_4^+),
 - Le changement de populations hétérotrophes vers autotrophes peut expliquer le comportement après la coupe,
 - L'augmentation de NH_4^+ après la coupe peut être un dépresseur de l'immobilisation microbienne,
 - Il peut apparaître un décalage temporel dans le déclenchement du processus de nitrification,
- la nature du sol
 - la nature de l'échangeur ionique du sol : NH_4^+ est un cation pouvant se fixer de façon difficilement réversible sur les colloïdes argileux, NO_3^- est un anion qui peut se fixer sur les oxydes (important en sol tropical riche en ces éléments),
 - la structure du sol : NO_3^- peut être retenu dans la microporosité des sols andiques présentant par ailleurs des colloïdes à « charge variable » (sols développés sur matériau volcanique),
 - le pH et l'oxygène du sol : la volatilisation de N ammoniacal peut exister en milieu carbonaté, la dénitrification peut exister en milieu hypoxique ou anoxygène (sol hydromorphe) mais également en milieu organique où l'activité biologique consomme rapidement l'oxygène du sol, utilisant alors les nitrates comme support énergétique (PHILIPPOT *et al.*, 2007)

La coupe à blanc affecte prioritairement les horizons holorganiques des sols (la litière) du fait des exportations et de l'arrêt du flux de restitutions aériennes représentant en climat tempéré, entre 1,5 et 2,5 t de carbone, 25 et 60 kg de N, 2 à 5 kg de P, 5 à 40 kg de K, 12 à 70 kg de Ca et

2 à 10 kg de Mg par ha et par an. Les processus souterrains sont plus complexes, arrêt du turnover des fines racines et des exsudations racinaires, décomposition des racines plus ou moins rapide en fonction de leur taille. Ils sont de fait intégrés à la résultante des modifications observées sur le sol.

Plus la récolte est totale, plus les pertes pour le sol sont significatives, puisqu'aucun rémanent n'est laissé sur le parterre de coupe (NYKVIST, 1977 ; OLSSON *et al.*, 1996).

Suite à la coupe, la matière organique de surface se décompose rapidement faute d'apports et par suite de mise en lumière (perte de 80 % de la masse des humus en Tchécoslovaquie – KLIMO & GRUNDA, 1989), y compris pour des composés habituellement récalcitrants de type lignine (KALBITZ *et al.*, 2004). Le carbone dissous augmente dans les solutions du sol (KALBITZ *et al.*, 2004) et s'insolubilise en général dans les parties moyennes et basses du profil de sol (SNYDER & HARPER, 1985). La méta-analyse de ACHAT *et al.* (2015b) portant sur 284 sites essentiellement répartis dans l'hémisphère Nord montre que les pertes de carbone du sol concernent toujours les horizons hologaniques, quelle que soit l'intensité de la récolte : il n'y a pas de différence entre éclaircies et coupes rases. En coupe rase sans perturbation majeure, le carbone du sol n'est en général pas ou peu affecté quantitativement. En revanche quand les récoltes conduisent à des perturbations des sols (récolte de rémanents voire des litières, préparation du parterre de coupe pour la prochaine plantation). Ces données sont confortées par la méta-analyse de MAYER *et al.* (2020), montrant la stabilité du carbone du sol en dehors de situations drastiques : afforestation, déforestation, récoltes totales répétées, travail intempestif du sol. Il peut y avoir redistribution dans le profil de sol par transfert en solution voire par

transfert de solides (matière organique particulaire et/ou figurée) (JOLIVET, 2000).

L'augmentation de la vitesse de minéralisation voire de nitrification (FRAZER *et al.*, 1990) libère des éléments qui peuvent appauvrir les horizons superficiels du sol (OLSSON *et al.*, 1996 ; PENNOCK & VAN KESSEL, 1997), les enrichir relativement (C, Ca BOCK & VAN REES, 2002 ; C, N, P, K, Ca, Mg RANGER *et al.*, 2007), migrer vers la base du sol et y être bloqués (OLSSON *et al.*, 1996), ou être exportés pour partie hors du profil, diminuant ses réserves minérales disponibles (JOHNSON, 1990 ; RANGER *et al.*, 2007 N, K, Ca et Mg sous Douglas).

Les modifications de la capacité d'échange cationique et de sa garniture ionique traduisent une perte de réactivité du sol (OLSSON *et al.*, 1996 ; PENNOCK & VAN KESSEL, 1997 ; RANGER *et al.*, 2007), résultant d'un processus général d'acidification (VAN BREEMEN *et al.*, 1983). Toutefois, compte tenu du pouvoir tampon du sol, l'acidification ne se traduit pas toujours par une baisse du pH. La désaturation du complexe d'échange du sol (perte de Ca, K et Mg échangeables) et la baisse du pH ont de très nombreuses répercussions sur toutes les composantes de la fertilité du sol (JULIEN *et al.*, 2005) :

- physique : agrégation et porosité du sol,
- chimique : perte de fertilité minérale diminuant la capacité du sol à soutenir une production,
- biologique : diminution voire disparition de certains vers de terre (anéciques), aux rôles multiples (décomposition, agrégation, aération...),

En zone méditerranéenne sèche, les résultats peuvent être inverses, avec une diminution de la vitesse de décomposition après la coupe à blanc et l'élimination des rémanents (CORTINA & VALLEJO, 1994).

B4.2. DES SOLUTIONS DU SOL AUX EAUX DE SURFACE

Le rôle de la forêt en tant que couvert forestier élevé, rigide, dense et pérenne, est majeur dans le cycle hydrologique terrestre et à l'inverse, l'eau est un facteur majeur de développement du couvert forestier. La forêt régule les écoulements via l'interception des pluies (en moyenne annuelle, en zone tempérée, de 15 à 20 % des pluies incidentes n'atteignent pas le sol forestier) et l'effet mulch des horizons holorganiques de surface : éliminer le couvert forestier, voire les couches holorganiques a des conséquences importantes sur le cycle hydrologique et le bilan hydrique (LAVABRE & ANDRÉASSIAN, 2000).

B4.2.1. Les solutions du sol et les pertes par drainage

Les solutions du sol sont d'excellents indicateurs du fonctionnement courant du sol. La quantification des flux drainés obtenue en affectant au flux d'eau drainée la composition chimique adéquate, permet de conclure quant aux pertes d'éléments du sol. Cette quantification est en revanche très complexe, nécessitant l'évaluation précise des deux paramètres, flux d'eau et concentrations.

Les anions libres du sol sont déterminants dans les pertes par drainage puisqu'aucun cation ne peut être transféré en solution sans un partenaire anion, organique ou minéral, dans des liaisons faibles à fortes (chélates). Les anions organiques sont produits dans tous les sols par dégradation de la matière organique, mais ne sont actifs que dans les sols très acides où ils ne sont ni insolubilisés ni biodégradés. Les anions minéraux sont produits par l'activité biologique ou par les agents météoriques, dégradant les matières organiques et les minéraux du sol. Le classement des principaux anions minéraux par degré

de mobilité est le suivant $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- = \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} \gg \text{HPO}_4^-$. Le phosphore très peu soluble, est pratiquement immobile dans le sol. HCO_3^- issu de la dissolution dans l'eau du CO_2 formant l'acide carbonique, n'a de rôle géochimique significatif que dans les milieux peu acides ($\text{pH} > 5$) car il demeure à l'état moléculaire aux pH plus acides. Le chlorure (Cl) est essentiellement lié aux apports atmosphériques, marins en particulier. Le sulfate (SO_4^{2-}) a des origines diverses, éruptions volcaniques, pollutions industrielles ou oxydation de composés soufrés réduits. Le nitrate (NO_3^-) issu des apports atmosphériques, mais surtout de la biodégradation de l'azote organique du sol, représente un vecteur clé, car très bien représenté dans tous les types de sols, y compris très acides. Tous ces anions sont produits et consommés, et c'est le déséquilibre entre production (cf. ci-dessus) et consommation (prélèvement des végétaux, dégradation et immobilisation par les micro-organismes, fixations chimiques ou physico-chimiques) qui conduit au transfert dans les eaux de drainage. Cette règle est particulièrement importante pour les anions organiques (quand ils ne sont pas consommés, ils dégradent le sol par leur acidité et leur pouvoir complexant), pour les sulfates qu'ils soient issus d'acide sulfurique (oxydation de sulfures), ou désorbés, pour les nitrates en excédent, qui se traduisent par de l'acide nitrique résiduel dans le sol. Dans tous les cas, le proton libre est très réactif, s'échangeant contre un cation qui migre avec l'anion : c'est la désaturation du complexe adsorbant du sol. Les cations disponibles en fonction du type de sol sont alors mobilisés : alcalins (K, Na) et alcalino-terreux (Ca, Mg) en sol peu acide, aluminium (Al), proton (H) mais aussi les faibles quantités d'alcalins et alcalino-terreux présentes, en sol acide. Le proton fixé en position échangeable, poursuivra son action en migrant à l'intérieur des réseaux minéraux, où il va créer des lacunes en s'associant à un OH^- pour

former une molécule d'eau : c'est la dégradation des structures minérales connue sous le vocable d'altération.

Il est donc capital de comprendre le fonctionnement du sol et sa perturbation par la coupe à blanc et la phase de régénération, pour prévoir la géochimie des eaux drainantes issues du sol.

Les pertes d'éléments pour les sols constituent des gains pour le sous-sol, voire pour les eaux de surface. Ces différentes échelles ne sont pas identiques mais complémentaires.

L'examen des solutions du sol montre qu'en général, la concentration en nitrates augmente après une coupe à blanc (quelle qu'en soit l'origine, augmentation de la nitrification ou déficit de prélèvement). Cette augmentation des concentrations en solution dépend de l'état des écosystèmes : faible mais significatif en système pauvre (REYNOLDS & EDWARDS, 1995 ; REYNOLDS *et al.*, 1995 ; PIIRAINEN *et al.*, 2002), très fort en système saturé (HUBER *et al.*, 2004 ; WEIS *et al.*, 2001, KATZENSTEINER, 2003), augmente en cas de fertilisation initiale (BERDEN *et al.*, 1997).

La végétation peut moduler le résultat :

- les monocultures conduiraient à des concentrations plus fortes que les peuplements mixtes (MUPEPELE & DORMANN, 2017),
- les pertes sous feuillus sont plus fortes que sous résineux (JERABKOVA *et al.*, 2011), mais l'enquête souligne à nouveau que feuillus et résineux ne sont pas distribués dans les mêmes sols,
- les essences ont un comportement spécifique vis-à-vis de la nitrification (stimulant, neutre, inhibant ZELLER *et al.*, 2007) : de ce fait leur extraction peut avoir des effets inverses,
- la végétation spontanée consomme les nitrates (REYNOLDS & EDWARDS, 1995 ;

HÖGBOM *et al.*, 2001 ; LAUREN *et al.*, 2005 ; LEGOUT *et al.*, 2009 ; MELLERT *et al.*, 1996 ; KATZENSTEINER, 2003), mais peut augmenter le stock du sol s'il s'agit de fixateurs d'azote atmosphérique,

- la régénération naturelle serait plus efficace que la végétation spontanée pour la consommation des nitrates (HUBER *et al.*, 2004 ; EMMET *et al.*, 1991 ; PARFITT *et al.*, 2002 ; STEVENS & HORNUNG, 1988).

Les traitements modulent également le résultat :

- la surface des coupes : plus elles sont de grande dimension, plus l'effet est fort (ROSEN *et al.*, 1996 ; JERABKOVA *et al.*, 2011 ; MUPEPELE & DORMANN, 2017),
- la densité initiale des peuplements,
- le maintien ou non des rémanents d'exploitation : ils peuvent constituer un puits d'azote (REYNOLDS & EDWARDS, 1995), leur exportation éliminant de la matière décomposable peut réduire les concentrations (MCCOLL, 1978), mais l'inverse est aussi observé par les mêmes auteurs (interaction avec la richesse du sol et le climat Nord et Sud de la Suède) (OLSSON *et al.*, 1996).
- les pratiques telles que l'andainage, le brûlage des rémanents augmentent les concentrations des solutions (HART *et al.*, 1981).

La littérature signale des cas où la concentration en nitrates n'est pas affectée, voire diminue après la coupe à blanc, ce qui ne signifie pas que le flux ne change pas :

- en Californie, sous climat aride où la coupe est associée à une exportation totale, dans un écosystème développé sur un sol argileux, les concentrations des solutions du sol ont tendance à diminuer ; le flux d'eau augmentant, le flux d'éléments transférés augmente également (MCCOLL, 1978),
- au Pays de Galles, ADAMSON *et al.* (1987) font le même constat,

- en Nouvelle Zélande sur un sol volcanique riche où la biomasse microbienne et la végétation spontanée se développent fortement, les concentrations en nitrates diminuent (le flux n'a pas été quantifié) (PARFITT *et al.*, 2002),
- dans le Beaujolais, RANGER *et al.* (2007) observent une stagnation des concentrations en nitrates, voire une diminution après la coupe à blanc d'un peuplement de Douglas : l'élimination de cette essence stimulant la nitrification (ZELLER *et al.*, 2007, 2019) diminue la production de nitrates. Le flux d'eau augmentant après la coupe ne conduit qu'à une augmentation limitée des pertes par drainage.

84.2.2. L'échelle du petit bassin versant

Elle rend compte des modifications dans le système sol / sous-sol, souvent complexes à interpréter, compte tenu de la succession des processus mis en jeu au cours du transfert des eaux du sol vers les exutoires des bassins versants. Il est en effet très rare (et souvent fort heureux) que les eaux de sol ne se retrouvent sans transformation géochimique au niveau des eaux de surface, en raison du fort pouvoir épurateur du système sol – sous-sol. Les voies de transfert, la nature des couches traversées et les temps de résidence, déterminent le niveau de transformation, du sol jusqu'au ruisseau.

Seul un transfert hypodermique, rapide, dans un bassin versant où le proche sous-sol est imperméable peut conduire à ce cas de figure (cas du *Hubbard Brook experimental Forest* New Hampshire-USA, BORMANN *et al.* 1974). En général, le transfert dans le sous-sol modifie profondément la qualité des eaux. Par exemple, une eau de sol très acide circulant dans une arène riche en minéraux altérables va s'y neutraliser, conduisant à la présence d'alcalins et d'alcalino-terreux dans les

eaux de surface : ce sont ces éléments qui tracent l'acidification des sols et des sous-sols, puisque leur libération met en jeu la même acidité que celle transférée depuis le sol, quelle qu'en soit la forme (DAMBRINE *et al.*, 1995).

L'effet hydrologique dépend de la surface du bassin impactée par la coupe à blanc (SWINDEL *et al.*, 1982) et du taux de récolte de la biomasse sur pied (proportion de la surface terrière éliminée) (HORNBECK *et al.*, 1986, 1990). Ce sera dans le ruisseau de rang 1 (collecteur qui draine directement la zone impactée par la coupe) que le signal hydrologique de la coupe à blanc sera le plus fort, diminuant graduellement quand l'échelle plus large intègre les ruisseaux de rangs plus élevés. Dans leur synthèse, BROWN *et al.* (2005) confirment l'augmentation générale du flux d'eau drainé au niveau du collecteur du bassin versant après sa coupe à blanc. MALLIK *et al.* (2011) dans leur synthèse concernant 23 sites en Ontario (Canada), indiquent que la morphologie du ruisseau de rang 1 est affectée plus ou moins durablement en fonction du paramètre observé (largeur, profondeur, ramification...) : la durée de la perturbation, pour au moins une partie des paramètres, y est observable pendant une vingtaine d'années. Cette affirmation est nuancée, voire invalidée dans le cas de coupes à blanc multiples, impactant des surfaces significatives dans un grand bassin versant, où le collecteur de rang le plus élevé cumulera les effets hydrologiques (COATS & MILLER, 1981), mais pas nécessairement les effets géochimiques. Le rôle des dépôts de sédiments ou la présence de tourbières au niveau de l'exutoire du bassin versant, dans le blocage (au moins temporaire) des éléments, est important : ce sont des systèmes tampons efficaces quant au maintien de la qualité des eaux de surface (LAUREN *et al.*, 2005).

Le cas historique des travaux de BORMANN *et al.* (1974) observant les effets de la coupe à blanc d'un petit bassin versant (15 ha) sur le site expérimental du Hubbard Brook Forest (New Hampshire - USA), a lancé le débat. L'augmentation du flux d'eau, du transport de matières en suspension, et les pertes très élevées de nitrates (500 kg de N par ha) et de cations associés (350 kg de Ca par ha) sont certes liées à la coupe à blanc, mais également au traitement herbicide répété éliminant la végétation spontanée, dans un contexte géologique particulier (bassin versant au sous-sol imperméable). AUBERTIN & PATRIC (1972) réagissent vivement à cet article en soulignant l'ensemble des conditions qui ont conduit au résultat, affirmant que les bonnes pratiques l'invalident. DAHLGREN & DRISCOLL reprenant en 1994 l'étude de BORMANN *et al.* (1974), précisent les conclusions, en éliminant le traitement herbicide : les pertes sont toujours élevées, mais beaucoup moins que lorsque la végétation est éradiquée durablement. Une seule référence montre que le phosphore peut augmenter après la coupe à blanc, dans le contexte très spécifique des tourbières irlandaises fertilisées en phosphore (CUMMINS & FARREL, 2003a et b).

La revue de synthèse de BINKLEY & BROWN (1993) concernant l'effet des coupes à blanc sur les eaux de surface en Amérique du Nord serait très intéressante, mais l'article ne stipule pas le rang des ruisseaux étudiés et ne prend pas en compte cette variable : ça et là dans le texte quelques informations semblent indiquer que toutes les tailles de bassin ont été intégrées (une référence cite le Hubbard Brook Forest - 15 ha - et une autre un BV de 2 400 ha). Les conclusions indiquent que les effets sont en moyenne limités (température, particules minérales et organiques, teneur en oxygène dissous, nitrates et autres éléments), et que les bonnes pratiques réduisent l'impact, bien que des réponses fortes peuvent être

observées : la valeur de cette moyenne dépend strictement de la représentation relative des différents types de bassins.

De nombreux travaux attestent du fait que l'intensité des perturbations augmente les pertes et le transfert vers les eaux de surface :

- la dimension des coupes (TITUS *et al.*, 2006 ; NYKVIST *et al.*, 1994 ; ROSEN *et al.*, 1996),
- les méthodes de récolte et le traitement des rémanents tels andainage, brûlage, broyage... (CLINTON *et al.*, 2003 ; DIDON-LESCOT *et al.*, 1998 ; NYKVIST *et al.*, 1994 ; VITOUSEK *et al.*, 1992 ; SWITZER *et al.*, 1978),
- le traitement de la végétation spontanée (BORMANN *et al.*, 1974 ; VITOUSEK *et al.*, 1992 ; SWITZER *et al.*, 1978 ; PARFITT *et al.*, 2002 ; LEGOUT *et al.*, 2009),
- le mode de régénération par plantation ou par régénération naturelle (VITOUSEK & MELILLO, 1979 ; VITOUSEK *et al.*, 1979 ; HUBER *et al.*, 2004),
- le respect du cours d'eau lui-même :
 - maintien de bandes non traitées le long des cours d'eau qui évitent les changements brutaux de température (AHTIAINEN, 1992 ; BINKLEY & BROWN, 1993), les transferts de particules...
 - le franchissement éventuel du ruisseau par les engins, qui peut être très perturbateur (modifications du lit, perturbation des habitats et des frayères, déstabilisation des berges et des zones humides associées, pollution directe éventuelle...), faisant l'objectif d'un encadrement législatif. Un travail spécifique a été réalisé sur le Morvan avec la participation du PNRM auquel on se référera (CUCHET *et al.*, 2004).

Les travaux réalisés dans le Morvan attestent de l'effet des essences et des traitements, dont la coupe à blanc, sur la chimie des eaux des cours d'eau de rangs

successifs (AMIOU-SUCHET *et al.*, 2011 ; LEGOUT *et al.*, 2021). Le transfert hydrologique rapide doit être à l'origine de ces observations. Ce dernier peut être, soit le fait d'arènes peu épaisses, soit celui de la stratification des arènes granitiques au quaternaire, sur le temps de résidence des eaux dans le sous-sol et par conséquent sur leur géochimie.

Les travaux de GENAY (2002) en Lorraine, sur les effets des surfaces forestières affectées par la tempête et sur la durée du maintien du sol à nu sur la teneur en nitrates des eaux des ruisseaux de Lorraine, renseignent indirectement sur les effets des coupes à blanc.

B4.2.3. L'échelle des grands bassins versants

Cette échelle est encore plus complexe, car intégrant l'effet « petits » bassins, leur cumul sur un espace donné et les processus propres aux ruisseaux eux-mêmes. Elle montre dans le cas général des eaux plus tamponnées par les flux d'eau, c'est-à-dire moins sensibles aux changements localisés sur les versants, à la fois pour l'hydrologie et la géochimie. Par ailleurs, la durée des perturbations est moins longue à cette échelle.

Une seule étude a été trouvée rendant compte des effets des coupes à blanc sur l'hydrologie de petits (entre 60 et 100 ha) et de grands (entre 60 et 700 km²) bassins versants (BV) ; les auteurs revisitent à l'aide de méthodes mathématiques appropriées, les bases de données récoltées dans l'Oregon (région Ouest Cascades). Les coupes n'y ont aucun effet sur les grands BV contrairement à ce qui est observé sur les petits BV, où l'effet est proportionnel à la surface coupée. L'effet des coupes sur l'intensité des crues, diminue avec l'intensité de la pluie. Sur ce même paramètre, l'effet des coupes diminue avec le temps mais demeure significatif pendant

20 ans dans les petits BV coupés à blanc et pendant 10 ans dans ceux coupés partiellement (THOMAS & MEGAHAN, 1998).

Au total, la coupe à blanc affecte potentiellement la fertilité des sols. Les nombreuses études réalisées sur le sujet apportent des informations très importantes quant à la compréhension des phénomènes. Leur quantification dans des situations environnementales très diverses est cependant beaucoup plus rare et conduit à des conclusions allant de pertes non significatives à des pertes très élevées. La variabilité spatiale des sols peu anthropisés, la prise en compte du facteur temps associé à la forêt incluant l'effet des pratiques anciennes et récentes et la relative complexité des observations à réaliser pour conclure quant aux modifications des sols, expliquent ce fait. Il est donc délicat d'identifier quelques indicateurs simples qui permettraient de prévoir les effets des coupes sur la fertilité des sols dans un environnement donné. Toutefois, l'intensité de la coupe, les perturbations induites par la récolte et la préparation du sol pour la génération suivante, la durée du maintien du sol à nu, sont des variables pertinentes d'explication de l'effet des coupes.

La coupe à blanc affecte les pertes par drainage des sols et la qualité des eaux de surface : les pertes dans les eaux de drainage à la base des sols déterminent la contrainte potentielle pour les eaux de surface, mais l'expression de ce potentiel dépend du rang du ruisseau considéré, et de la structure des bassins versants, conduisant à un mode de transfert particulier et au temps de résidence de l'eau dans le bassin, facteur géochimique clé. La connaissance de la structure géologique des bassins versants du Morvan est donc indispensable à la prévision des impacts (WYNS *et al.*, 2004). De plus, les pratiques peuvent directement affecter les cours d'eau en particulier par l'érosion des sols.

C. EFFETS DES COUPES A BLANC : ASPECTS BIOLOGIQUES

C1. L'ÉCOSYSTÈME PRIS DANS SA GLOBALITÉ, TEL QU'IL APPARAÎT APRÈS LA COUPE

Tout écosystème naturel possède un cycle qui lui est propre : le cycle sylvo-génétique, dépendant en particulier du nombre et des caractéristiques biologiques des espèces qui le composent, et des conditions du milieu dans lequel il se trouve. Ce cycle est caractérisé par des stades successifs, depuis les phases pionnières jusqu'au climax théorique (concept tombé un peu en désuétude, car trop statique). Ces cycles, caractérisés par des successions d'espèces, peuvent être très longs et plus ou moins conservatifs.

C'est ainsi que la forêt boréale naturelle, composée de peu d'espèces, se

régénère très souvent par les incendies sur de grandes surfaces, alors que la forêt équatoriale dense se régénère surtout par trouées correspondant à des chablis ou à des mortalités locales.

Les habitats et les niches écologiques changent au cours du temps, correspondant à des modifications naturelles de l'écosystème, qui n'est pas détruit pour autant.

Quand il s'agit de forêts de production, issues de régénération naturelle ou de plantation, le problème est assez différent, car d'emblée le forestier a choisi ou introduit une essence *objectif* (qui n'apparaîtrait qu'au stade naturel dryades), favorisée par toutes les actions dans le cycle sylvicole : régénération/plantation, contrôle de la concurrence liée à



Figure 15. Coupe rase d'une plantation résineuse, sur un versant. Les grumes ont été débardées et les rémanents vont être andainés.

la végétation spontanée (élimination des pionniers), puis contrôle des ligneux d'accompagnement (répression de la concurrence), éclaircies pour transférer le potentiel d'accroissement, lié aux caractéristiques du milieu, vers des individus sélectionnés comme arbres d'avenir (modification de la diversité génétique de la population), donnant le peuplement final (récolté théoriquement au stade où les accroissements moyen et courant sont identiques). La longueur du cycle peut varier de quelques dizaines d'années (traitement en taillis) à des durées nettement plus longues atteignant 150 à 250 ans dans les chênaies traitées en futaies. La régénération y est typiquement allogénique (décidée par l'homme). Par rapport au système naturel, le cycle sylvogénétique se trouve très raccourci puisque les stades initiaux et finaux disparaissent de façon à éliminer le maximum de facteurs de perte de production, puisque c'est bien l'objectif premier d'une telle gestion.

La coupe à blanc éliminant totalement le couvert végétal d'une forêt mature, modifie donc profondément l'écosystème local, faisant passer le cycle du stade mature au stade initial, en court-circuitant les stades finaux de sénescence et mortalité, et induisant une succession secondaire. Ce seront donc les proportions des coupes et des types de structure des peuplements à l'échelle d'un massif forestier complexe, qui détermineront l'impact réel de la coupe à blanc sur les fonctions de l'écosystème forestier, dont l'accueil de diversité biologique.

C2. IMPACT DES COUPES RASES SUR LA BIODIVERSITÉ DU COMPARTIMENT ÉPIGÉ

L'analyse bibliographique des impacts des coupes rases sur la faune et la flore rejoint principalement la théorie de la fragmentation du paysage décrite en écologie (FORMAN & GODRON, 1986 ; FORMAN 1995).

La notion de fragmentation ou de morcellement des écosystèmes englobe tout phénomène artificiel de morcellement de l'espace, qui empêche une ou plusieurs espèces de se déplacer comme elles le devraient et le pourraient en l'absence de facteur de fragmentation. Avec le concept d'hétérogénéité, celui de fragmentation est une des bases théoriques de l'écologie du paysage pour comprendre la dynamique des communautés végétales ou animales.

Les individus, les populations et les espèces (encart III) sont différemment affectés par la fragmentation de leur habitat. Ils y sont plus ou moins vulnérables selon leurs capacités adaptatives, leur degré de spécialisation, leur dépendance à certaines structures éco-paysagères. D'autres facteurs sont leur capacité à voler ou à franchir les obstacles et la biologie de leurs populations. Par exemple, les oiseaux forestiers, qui volent et qui peuvent donc exploiter des « taches » différentes, semblent beaucoup moins affectés par la diminution de la couverture forestière que par la fragmentation de la forêt elle-même.

Les ouvrages de FORMAN & GODRON (1986) et FORMAN (1995) ont formalisé les bases de l'analyse quantitative de la structure et des composantes du paysage en montrant que la fragmentation d'un habitat naturel est une forme de destruction de l'habitat, qui à l'exception de quelques espèces ubiquistes, affecte d'abord la taille des populations en augmentant les risques d'extinction.



Figure 16. Barbastelle d'Europe. Espèce de chauve-souris dont les milieux forestiers sont déterminants pour la chasse.

Ainsi, les coupes rases, en fonction de leur superficie, de leur importance spatiale au sein d'un massif et des groupes taxonomiques étudiés vont participer à une certaine fragmentation du paysage forestier et sont assimilables au même titre qu'une tempête aux perturbations subies par l'écosystème forestier ; la notion de perturbation désignant une détérioration naturelle et souvent provisoire d'un écosystème. Ce concept a pris une importance croissante dans l'étude des cycles naturels et des habitats.

On peut distinguer :

- *les perturbations naturelles* qui font intégralement partie des processus d'évolution des paysages et des écosystèmes, comme les chablis, suivis d'une régénération naturelle en forêt ; ce type de perturbation est par exemple nécessaire à la survie et pérennité d'espèces pionnières et des oiseaux de clairières.
- *les perturbations non-naturelles*, causées par l'Homme (perturbation anthropique) ; la coupe rase peut ainsi être comparée à une perturbation de type chablis même si elle est généralement plus vaste, s'étend sur une plus longue période de temps et se caractérise par des effets de lisière plus marqués.

Encart III. La diversité biologique des écosystèmes forestiers

La biodiversité se distribue dans tous les compartiments de l'écosystème, solide inerte ou vivant, liquide ou gazeux. Dans la partie aérienne de l'écosystème, avec un maximum en France métropolitaine de 190 espèces d'arbres, 500 espèces de champignons macroscopiques, 1 000 espèces de végétation spontanée et environ 500 espèces animales vertébrées (VALLAURI & NEYROUMANDE, 2009). Dans les sols, la biodiversité est très abondante, nettement plus riche que la diversité biologique aérienne avec au maximum, de l'ordre de 100 000 espèces de bactéries et 2 000 espèces de champignons saprophytes par gramme de sol, mais également un millier d'espèces d'invertébrés par m² (acariens, collemboles, nématodes, protozoaires, enchytréides, vers de terre, diplopodes...), sans oublier les vertébrés.

Enfin, il faut noter que le quart de la biodiversité forestière est associée au bois mort et aux micro-habitats portés par les arbres, et parmi les Insectes qui composent cette biodiversité, les Coléoptères saproxyliques qui dominent largement l'ensemble avec plus de 2 600 espèces connues et décrites à ce jour pour la France métropolitaine (BOUGET *et al.*, 2019).

Dans les eaux de surface en métropole sont recensées de l'ordre de 15 000 espèces dont 7 000 animales (2 000 mollusques, 3 900 crustacés et 820 poissons) et 7 700 végétaux. Aucune donnée n'est accessible quant à la microflore, dont on connaît cependant le rôle dans la décomposition des matières organiques ou dans l'épuration en général.

La perturbation d'un milieu forestier, qu'elle soit naturelle ou non, est donc suivie d'une série de séquences de recolonisation et on parle alors de succession secondaire. Cette succession forestière secondaire se caractérise par des courbes de richesse et d'abondance clairement bimodales entre les premiers stades riches en espèces pionnières, de stades forestiers (gaulis, perchis) moins riches car très homogènes sans la présence d'habitats de

forêts matures, puis de stades plus riches en diversité et en abondance avec l'arrivée d'espèces de forêts âgées et matures quand le site s'approche du stade climacique.

ZOLLINGER (2015) confirme ce type de modèle de réponse des communautés d'oiseaux nicheurs en forêt sur des secteurs post-tempête en signalant le parallélisme avec le même type de suivis sur des secteurs ayant subi des coupes rases, les premiers maxima se situant dans les premières années après la perturbation et ce jusqu'à 10 ans, et avec un rythme d'évolution de la succession se trouvant être plus rapide en peuplements dominés par les conifères que dans les peuplements feuillus (BIBBY *et al.*, 1985 ; DECEUNINCK & BAGUETTE, 1991). Des conclusions du même type ont été dressées dans de nombreux exemples traitant des effets de la gestion forestière sur l'avifaune en Amérique du Nord (SEYMOUR & HUNTER, 1999 ; PERRY *et al.*, 2018 ; ROLEK *et al.*, 2018) ou en Australie (LEFORT & GROVE, 2009).

GONDARD *et al.* (2004) notent le même type de conclusions sur la richesse spécifique en espèces végétales sur des coupes rases réalisées dans des forêts de Pin d'Alep avec une augmentation rapide des espèces anémochores (espèces véhiculées par le vent) et un retour rapide à la situation antérieure, le temps de résilience étant de trois années dans cet exemple. L'environnement immédiat et la surface de la coupe forestière semblent jouer un rôle important dans ce phénomène de résilience.

Des réarrangements dans la communauté fongique ont été notés au sein de différents peuplements feuillus et résineux de Colombie britannique avec un effet marqué de la coupe rase sur la composition et la fructification des espèces de champignons ectomycorhiziens liés à ces peuplements (JONES *et al.*, 2003, 2010 ; BARKER *et al.*, 2013).

Des travaux menés sur les Carabes forestiers (BROUAT *et al.*, 2004) montrent un effet des coupes à blanc sur le cortège des Carabes mais pas sur les abondances à partir de quatre espèces différentes échantillonnées dans les Pyrénées dans des peuplements de sapin. Si les communautés sont différentes au cours des années qui suivent la coupe à blanc avec des variations importantes notées chez des espèces classées généralistes par rapport à des espèces spécialistes, les résultats montrent les processus dynamiques d'échanges parmi les communautés et des recolonisations rapides de milieux qui s'avéraient au départ défavorables.

Parmi les invertébrés, les résultats convergent vers ces changements dans la structure des peuplements juste après la coupe rase, avec des abondances plus ou moins altérées en fonction de la gestion des rémanents exercée au moment de la coupe rase. Chez les collemboles, au sein de peuplements de pin, cette variation d'abondance est très dépendante des méthodes de la coupe rase, avec la réduction la plus forte liée au labour des parcelles. Un intérêt est noté pour l'ajout de copeaux et de piles de rémanents, mais aussi du maintien de quelques arbres dans la parcelle (SLAWSKA & SLAWSKI, 2009). Les réponses initiales sont comparables dans le groupe des Staphylins, lesquels apparaissent très sensibles à l'enlèvement des résidus de coupes suite à des coupes à blanc en forêts boréales du Québec (WORK *et al.*, 2013).

Des suivis, menés sur l'entomofaune dix années après différents types de coupe au sein de peuplements d'Epicéas en Norvège, montrent que les communautés d'arthropodes décomposeurs du sol sont affectées même après dix ans, sauf dans les parcelles où moins de 30 % du volume a été prélevé (SIIRA-PIETIKÄINEN & HAIMI, 2009).

De nombreux travaux ont également porté sur les mammifères, dont la guildes des micromammifères forestiers, lesquels peuvent être très affectés par les coupes rases en forêt (SIMON *et al.*, 2002 ; SULLIVAN & SULLIVAN, 2016). Comme parmi l'avi-faune, il existe une succession secondaire au sein de ce groupe avec, dès l'année qui suit la coupe à blanc, certaines espèces du groupe *Microtus* prenant la place d'espèces du genre *Myodes* (SULLIVAN & SULLIVAN, 2011). Dans les suivis post-coupe, ces dernières espèces peuvent aller jusqu'à s'éteindre trois années après des coupes rases de 10 hectares, après que le succès reproducteur et/ou la survie des juvéniles soient affectés (SULLIVAN *et al.*, 1999 ; KLENNER & SULLIVAN, 2003 ; KLENNER & SULLIVAN, 2009). Pour une espèce spécialiste des vieilles forêts, le Campagnol à dos roux (*Myodes gapperi*), des effets sur la démographie peuvent être notés jusqu'à 20 ans après la coupe (SULLIVAN & SULLIVAN, 2018).

On retrouve le même type de résultats au sein du groupe des amphibiens-reptiles avec la répartition différenciée des espèces généralistes par rapport aux espèces spécialistes (POPESCU *et al.*, 2012). À partir de Salamandres géantes du Pacifique (*Dicamptodon tenebrosus*) équipées et de suivis par radio-télémetrie, JOHNSTON & FRID (2002) notent une modification du comportement de l'espèce avec une réduction de l'aire vitale dans les zones de coupe à blanc, et une utilisation de bandes de protection mises en place le long de berges, confortant le rôle de refuges que peuvent jouer ces éléments au sein d'un habitat perturbé par l'activité forestière. Des suivis menés sur le Crapaud terrestre (*Bufo terrestris*) aux États-Unis montrent que, s'il n'y a pas de différences d'abondance entre zone boisée et coupe rase ; c'est le taux de survie des juvéniles dans les deux premiers mois après la coupe qui explique les différences d'abondance au sein de la



Figure 17. La guildes des micromammifères varie avec les différents stades forestiers. Le Campagnol agreste (en haut) se rencontre dans les premiers stades tandis que le Campagnol roussâtre (en bas) dans les stades « futaie ».

population étudiée (TODD & ROTHERMEL, 2006). Dans le groupe des salamandres terrestres aux États-Unis, HOMOYACK & HAAS (2009) notent des effets des coupes rases sur les proportions de juvéniles au sein d'une population et du nombre d'œufs produits par femelle qui peuvent aller jusqu'à sept années pour une espèce (genre *Plethodon*) et pour treize années pour une seconde espèce étudiée (genre *Desmognathus*). VEYSEY POWELL & BABBITT (2015) évoquent également des effets sur la productivité des amphibiens en périphérie des coupes rases, avec des réponses différentes entre grenouilles et salamandres d'une part et d'autre part des réponses variables selon les phases de développement étudiées au sein de ces espèces (phase terrestre et phase aquatique).

ASH *et al.* (2003) notent de la même façon des effets des coupes rases sur une population de salamandres portant sur l'équilibre démographique avec une proportion plus faible de juvéniles et de mâles adultes au sein de ces espaces déboisés.

La réponse de la guildes des reptiles à l'exploitation forestière a également été étudiée aux États-Unis montrant, au sein de plantations de pin sur six espèces de serpents, des différences significatives d'abondance entre les peuplements avec coupes rases en comparaison avec ceux sans coupes et l'importance de la structure de la canopée et de la litière au sol comme variable explicative. Dans ce travail, les effets « négatifs » de la coupe rase semblent plus marqués pour les « petits » serpents (TODD & ANDREWS, 2008).

Par ailleurs, des réponses de l'herpétofaune au sein de zones humides isolées et dans le cadre de la gestion forestière avec coupes rases (RUSSEL *et al.*, 2002) montrent des réactions différenciées dans la recolonisation des milieux humides entre les espèces du genre *Rana* (Amphibien) et du genre *Coluber* (Reptile) : on note des variations allant à moins de six mois dans le temps pour la première à plus de dix-huit mois pour la seconde après les modifications du couvert forestier.

Pour des espèces à grand territoire, le rôle des rémanents et de la gestion de la coupe rase a également été noté. Un suivi par pièges photographiques de la Martre américaine (*Martes americana*) montre l'importance des rémanents maintenus au sein de la coupe rase en tant que zone refuge des micro-mammifères, à certaines époques de l'année lorsque la forêt ne produit plus suffisamment de ressources alimentaires. Ces zones refuges, riches en souris, campagnols et musaraignes, deviennent alors pour quelques mois en hiver le terrain de chasse privilégié de la martre (SEIP *et al.*, 2018). De la même façon, en Suède au sein de peuplements résineux (épicéa et Pin sylvestre), la fréquentation des coupes à blanc par l'ours brun (*Ursus arctos*) apparaît importante en fin de printemps et au début de l'été pour y aller prélever les fourmis charpentières (*Camponotus herculeanus*) dont il dépend, ceci à une période de l'année où il y a absence de production de baies (myrtille principalement) (FRANK *et al.*, 2015). La coupe à blanc, dans ces exemples, apparaît ainsi comme un élément du territoire fréquenté par l'espèce à une période déterminée de l'année et c'est la gestion et la surface des coupes à blanc qui conditionneront la fréquentation ou non au sein du territoire vital de l'espèce (POTVIN *et al.*, 1999).

Des effets indirects des coupes rases sur les communautés animales sont observés par les effets de lisière induits et la prédation qui en découle par un certain nombre d'espèces exploitant les coupes rases en tant que zone de chasse (KING & DEGRAAF, 2000). MANOLIS *et al.* (2002) signalent ainsi des effets significatifs sur la réussite de reproduction de la Paruline couronnée (*Seiurus aurocapillus*), dus à la prédation du Vacher à tête brune (*Molothrus ater*) lors de coupes rases. Dans cet exemple, l'effet de lisière créé par la coupe rase semble très marqué depuis la bordure



Figure 18. Salamandre tachetée. Les coupes rases ne sont pas propices aux populations de cet Urodèle.

jusqu'à 100 mètres au sein des peuplements non exploités, s'atténue entre 100 et 500 mètres, pour être ensuite très fortement atténué. Les études de VERGARA (2011) et de VERGARA & SIMONETTI (2003), également parmi les oiseaux en Amérique du Sud, confortent l'impact de la fragmentation sur les espèces forestières, avec un effet de la prédation qui semble important sur les espèces nichant à terre.

La fragmentation induite par les coupes rases a également été expérimentée sur certaines espèces d'oiseaux forestiers et pour lesquelles, en absence de sous-étage ou d'éléments boisés maintenus au sein de la coupe rase, tout déplacement au sein de cette nouvelle entité dans le paysage apparaît limité voire impossible (RAMIREZ-COLLIO *et al.*, 2017), principalement chez les juvéniles (MITCHELL *et al.*, 2009).

Un effet indirect des coupes à blanc a été noté par l'apport de plantes invasives au sein des zones ouvertes au sein de peuplements de *Pinus contorta* (PAUCHARD & ALABACK, 2006). Cet effet est à mettre en relation avec les effets de lisière notés à proximité des coupes rases et ayant tendance à favoriser les espèces à forte capacité de dispersion et s'installant avec facilité dans les espaces perturbés.

En conclusion, on peut citer WIENS qui, dès 1997, fait valoir que la fragmentation modifie la taille, les formes et l'isolement des « taches » du paysage, générant un impact sur les fonctions éco-paysagères des éléments ainsi isolés et – par effet second – sur des éléments situés aux niveaux supérieurs ou inférieurs du paysage.

La fragmentation :

- induit le remplacement d'éléments éco-paysagers par d'autres,
- modifie le contexte spatial, notamment en altérant la connectivité



Figure 19. Engoulevent d'Europe. Avec la Linotte mélodieuse, le Pipit des arbres, le Busard Saint-Martin, il fait partie du cortège d'oiseaux des stades initiaux.

écologique et donc le degré d'intégrité éco-paysagère,

- est un puissant facteur d'isolement écologique de milieux naturels (ou semi-naturels) au sein d'une « matrice » plus « hostile » (car aux conditions environnementales altérées par les activités humaines ou leurs conséquences secondaires),
- provoque l'insularisation qui diminue les taux de dispersion et d'immigration,
- augmente les risques d'extinction de certaines espèces,
- modifie les effets-bordure (écotone/effet lisière), plus ou moins selon les caractéristiques de la matrice environnante.

Cependant, la relation entre la fragmentation et la régression de la biodiversité est de type « non-linéaire » et les effets de seuil sont encore à rechercher parmi les espèces animales et végétales. Ainsi l'effet cumulatif de plusieurs coupes rases de superficies variées et selon leurs emplacements au sein de la matrice forestière est à étudier pour mieux évaluer les effets des coupes rases sur les peuplements animaux et végétaux.



Figure 20. Envahissement d'une coupe à blanc par la végétation pionnière dominée ici par la Digitale pourpre.

Conséquences pour les pratiques sylvicoles :

L'homogénéité de peuplements équiennes et mono-spécifiques qui conduit aux coupes à blanc de large dimension, a fait l'objet de nombreuses comparaisons avec le traitement plus irrégulier aux échelles locales ou de territoires plus larges.

La résistance des peuplements réguliers face aux agresseurs : les travaux de JACTEL & BARBARO (2004) indiquent que les monocultures sont plus sensibles aux dégâts d'insectes ravageurs et de champignons pathogènes que les peuplements mixtes feuillus et résineux autochtones en particulier, du fait que la diminution de la diversité végétale réduit le contrôle par les ennemis naturels. Les conclusions montrent l'intérêt des îlots de peuplements feuillus intégrés au massif de Pin maritime pour la biodiversité (avec des réponses variables avec les taxons) et la diminution des ravageurs du pin (chenilles de pyrale du tronc et processionnaires). Cette étude montre par ailleurs que des espèces des

milieux ouverts se montrent sensibles à la fragmentation de leur habitat par la pinède, voire à la présence de feuillus ! Ces espèces héritées des landes pâturées se seraient adaptées aux jeunes pinèdes et dépendent du régime des coupes à blanc. La gestion par parquets répond aisément à l'intérêt des îlots de feuillus dans les zones résineuses, par exemple dans le centre montagnard du Morvan.

L'intérêt de l'irrégularité pour la biodiversité : le développement de l'irrégularité, d'essences, de classes d'âge ou par distribution spatiale pour la biodiversité sont résumées dans la méta-analyse de NOLET *et al.* (2017). Ces auteurs, prenant en compte plusieurs indicateurs et des groupes taxonomiques variés de la diversité épigée, ne valident pas l'affirmation que le traitement irrégulier améliore la biodiversité par rapport au traitement régulier, mais les résultats varient fortement en fonction des taxons. Dans la mesure où les conclusions de la méta-analyse de GUSTAFSSON *et al.* (2020) pour la zone nord-Europe sont transposables, il ressort que des mesures

limitées et par conséquent relativement aisées à appliquer, sont efficaces pour une majorité de groupes : par exemple, des surfaces importantes sur lesquelles sont maintenus des arbres ne sont pas plus efficaces que de conserver quelques arbres dispersés au sein des coupes en cours, les zones tampons près des ruisseaux peuvent être de faible dimension, la conservation de bois morts sous forme de grumes, chandelles, souches hautes est très importante, mais qu'une diversité importante de grumes issues de plusieurs essences différentes et laissées sur la coupe est souvent moins intéressante qu'une seule essence. Ces deux études confirment cependant la nécessité de conserver des zones de réserves pour plusieurs espèces strictement forestières (Lichens, Coléoptères saproxyliques, certaines espèces de Mousses) sensibles aux aménagements, quels qu'ils soient.

L'intérêt de mosaïques de milieux pour certaines espèces, dont les milieux humides d'altitude. Les travaux pluridisciplinaires menés dans le cadre du PNR Morvan sur la Bécasse des bois réalisés dans le but de mieux identifier les habitats de reproduction afin de les protéger, sont significatifs à cet égard (HORELLOU & SIRUGUE, 2007 ; CHANTIER *et al.*, 2008 ; DETROIT *et al.*, 2018). L'habitat de reproduction de la Bécasse se situe sur le territoire du Morvan dans les forêts humides spontanées de type aulnaie marécageuse, avec une strate herbacée dense au sol, en altitude, avec un dénivelé modéré en configuration de plateau et/ou de fond de vallon peu encaissé, en mosaïque avec des milieux ouverts comme les clairières, les coupes forestières et les prairies pour la croule. Ces résultats sont cohérents avec les habitats observés dans toute la zone de vie de la Bécasse des bois (Europe et Russie). Le maintien des populations nicheuses de cet oiseau dépend étroitement de la préservation des forêts humides spontanées dans leur

surface et leur fonctionnalité (respect des sols, de la strate herbacée, maintien d'une mosaïque de milieux ouverts et fermés).

Au total, si les conséquences des travaux sur la biodiversité pour la sylviculture sont complexes voire contradictoires car très nettement inféodées aux taxons considérés, les analyses aux échelles du massif voire du territoire, apportent les conclusions les plus pertinentes :

- si l'irrégularité améliore la biodiversité d'un nombre important de taxons, sa généralisation à l'échelle d'un large territoire n'est pas souhaitable, où des parcelles traitées en régulier doivent exister, compte tenu de leur rôle bénéfique pour de nombreux autres taxons (SCHALL *et al.*, 2018).
- les coupes à blanc de large dimension sont à proscrire pour la biodiversité ; des mesures indispensables sont à respecter, mais la taille des entités de rétention ou des zones tampons le long des ruisseaux, peut être plus limitée qu'il n'est souvent prôné.
- le mélange d'essences feuillues et résineuses, ou les îlots de feuillus dans les monocultures résineuses, sont très intéressants pour la réduction de l'impact des pathogènes.



Figure 21. Bécasse des bois. Le Morvan abrite encore une petite population nicheuse qui dépend étroitement de la préservation des forêts humides spontanées.

- le respect du sol et de la végétation spontanée sont déterminants pour les espèces nichant au sol (nidification et alimentation).
- le bois mort debout ou au sol est très important pour l'écosystème forestier puisque près de 25 % des espèces forestières animales et végétales (insectes, champignons, oiseaux) dépendent de la présence de bois mort pour tout ou partie de leur cycle de vie (GOSSELIN & PAILLET, 2017). Au moins un arbre mort ou sénescant doit être conservé par hectare, de 35 cm de diamètre minimum Depuis 2009, l'Office s'engage à classer 1 % de l'ensemble des forêts domaniales en îlots de sénescence afin d'augmenter la densité de bois mort.

C3. IMPACT DES COUPES RASES SUR LA BIODIVERSITÉ DU COMPARTIMENT SOL

La biodiversité intervient dans de multiples fonctions qui sont à l'origine de l'expression usuelle mais discutable de « sol vivant », qui en réalité atteste du caractère hospitalier du sol pour le vivant. La diversité biologique des microorganismes du sol jouant un rôle clé dans toutes ses fonctions, demeure cependant très mal connue. Les méthodes actuelles de la biologie moléculaire permettent cependant des avancées notables, en particulier grâce au haut débit analytique. La plateforme Genosol de l'Inrae de Dijon a réalisé l'analyse de la diversité bactérienne à l'échelle de la France, portant sur les 2 200 points du réseau RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) (RANJARD *et al.* 2010 ; TERRAT *et al.*, 2018 ; DEQUIEDT *et al.*, 2020).

Les sols forestiers présentent le nombre le moins élevé de taxons bactériens parmi toutes les occupations, en raison des types

de sols occupés par la forêt, de leur acidité et de la qualité de leur matière organique jugée par le rapport C/N, mais également du fait de leur stabilité, la perturbation des sols agricoles étant un facteur favorable à la diversité bactérienne. Leur biomasse microbienne moléculaire totale indique que d'autres paramètres interviennent. Les sols forestiers en moyenne très acides (50 % ont un pH inférieur à 5) présentent une diversité fongique très élevée, dont le rôle fonctionnel est majeur : ce compartiment est en cours d'analyse dans le RMQS. Ce travail souligne un point fondamental : il n'est pas possible actuellement de relier diversité bactérienne et qualité du fonctionnement. La littérature montre parfaitement que si la biodiversité des sols est un facteur favorable à leur fonctionnement, la réciproque n'est cependant pas vérifiée : la relative faible diversité des sols forestiers acides conduit à des redondances plus limitées qu'en sol riche, mais l'adaptation à cette situation fait que les fonctions sont remplies, souvent par des organismes ubiquistes ; leur résilience est toutefois plus limitée.

Il ne faudrait pas surinterpréter cette observation, et conclure que l'acidification des sols est sans conséquence : il faut rappeler ici que cette adaptation résulte d'une très lente évolution et que les modifications brutales du système ont des conséquences tout aussi brutales.

Le rôle de la biologie des sols est majeur pour leur fonctionnement, notamment dans les domaines suivants :

- la physique, par le rôle des racines, des mycéliums de champignons et des animaux fousseurs dans la porosité, la densité, la résistance, l'agrégation, la fissuration...
- l'installation et le développement de la végétation, dont le rôle fondamental des mycorhizes et du microbiome associé, dans l'alimentation en eau

et la nutrition minérale des plants forestiers,

- la biochimie via la décomposition des matières organiques, fonction essentielle pour le recyclage de carbone et des éléments, pour la dégradation des acides organiques ou la stabilisation du carbone du sol...
- la biogéochimie du sol par :
 - les entrées d'azote atmosphérique par la fixation symbiotique ou non, mais aussi la capture des polluants,
 - le prélèvement biologique des végétaux supérieurs et de leurs associés symbiotiques ou non : prélèvement d'eau et d'éléments y compris les moins mobiles tels P, dont la forme chimique modifie le pH rhizosphérique (cas de N), conduisant parfois à une hyper-accumulation, à l'origine de hot spots...
 - les immobilisations maintenant les éléments dans le système,
 - la restitution aérienne et souterraine figurées, les excréments sécrétions et efflux,
 - l'altération des minéraux du sol, indispensable pour la libération des éléments biodisponibles.

La biodiversité n'est pas équi-distribuée dans le sol forestier et c'est dans les horizons de surface holo- ou héli-organiques qu'elle se concentre (HEINONSALO & SEN, 2007). La diversité varie également avec la profondeur du sol, moins abondante mais plus efficace pour y développer des rhizomorphes (HEINONSALO & SEN, 2007).

Par conséquent, toutes les pratiques contraignantes pour la partie superficielle organique du sol présentent le risque potentiel d'altérer la biodiversité, voire les fonctions sur le court et le long terme.

Les travaux des microbiologistes conduisent à des conclusions divergentes quant aux effets de la coupe rase sur le

sol. La diversité ecto-mycorhizienne est modifiée (JONES *et al.*, 2003) ou non (HEINONSALO & SEN, 2007), mais les mêmes auteurs s'accordent sur le constat de la non modification du taux d'infection des plants. Les modifications dépendent de l'intensité et de la nature de la perturbation du sol, le spectre mycorhizien s'adapte assez rapidement aux nouvelles conditions environnementales. Par exemple, la diversité mycorhizienne dans les patches d'horizon holorganique non perturbées par la coupe rase, est identique à celle observée dans la forêt en place.

Une observation très intéressante concerne la relation entre diversité observée et fonctionnalité, analysée à partir des spectres enzymatiques des champignons. Dans l'étude en question, les modifications de biodiversité liées à la coupe rase ne modifient pas les spectres enzymatiques, ce qui signifie que les fonctionnalités fongiques demeurent malgré le changement de biodiversité, mettant en évidence les relais fonctionnels efficaces existant dans le sol au moins pour ce groupe. Les auteurs signalent qu'il ne faut toutefois pas extrapoler ce résultat à des modifications plus profondes, causées par exemple par des changements climatiques drastiques (JONES *et al.*, 2010). Il faut retenir également qu'il s'agit de la fonctionnalité des seuls champignons.

Toujours dans la même zone géographique Nord-Ouest américaine, l'étude de MUMMEY *et al.* (2010) observant un spectre microbiologique plus large grâce à la méthode PLFA (biomasse microbienne totale, champignons totaux et bactéries Gram-) conclut que 9 ans après une coupe rase, la réduction est toujours significative. Les modifications de l'environnement (agrégation du sol, végétation) contrôlent ces changements microbiologiques durables, liés surtout aux champignons. Les nématodes sont également affectés

positivement pour les groupes fongivores et bactériovores, mais négativement pour les omnivores et les prédateurs (FORGE & SIMARD, 2001).

Après coupe rase ou en boisement de landes, les plantations sur sol hydromorphe sont en général réalisées après un travail du sol mettant le jeune plant dans des conditions plus favorables à sa reprise, en le positionnant sur une zone surélevée mécaniquement (ados, billons...). Les observations réalisées en Finlande par PENNANEN *et al.* (2005) montrent que cette pratique favorise le développement racinaire et augmente la colonisation ecto-mycorhizienne en changeant la structure, sans toutefois en modifier la diversité.

Les observations des effets du brûlage des résidus d'exploitation comparés à une coupe à blanc dans une plantation de Douglas en Colombie Britannique, montrent que le spectre mycorhizien est le plus faible après brûlage, mais que le rétablissement de la situation est réalisé après un an (BARKER *et al.*, 2013).

Aucune étude n'a été trouvée concernant l'andainage, qui sans nul doute, transférant les couches supérieures du sol dans l'andain, devrait fortement affecter la biodiversité du sol, au moins dans les sols les plus pauvres. S'il s'accompagne d'un tassement du sol, et en fonction de la sensibilité de ce dernier, les contraintes supplémentaires portent sur l'apparition de traits d'hydromorphie attestant de la réduction de la macroporosité du sol et des contraintes pour le transfert des fluides (eau et gaz). Tous les organismes sensibles sont perturbés du microbe aux vers de terre et aux végétaux (BRUSSAARD & VAN FAASSEN, 1994). Les émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) sont modifiées par la dénitrification (PHILIPPOT *et al.*, 2007), la réduction du puits de méthane qu'est le sol

(EPRON *et al.*, 2016), la réduction de l'émission de CO₂ due à la diminution de l'activité biologique (GOUTAL *et al.*, 2012). Quand le pH du sol est ≥ 5 , les vers anéciques participent à la lente restauration de la porosité du sol (CAPOWIEZ *et al.*, 2015) ; en sol plus acide, les vers de terre disparaissent et la restauration est encore plus lente, liée essentiellement à des processus physiques. Une végétation spontanée invasive peut se développer (jonc, glycérie), modifiant le fonctionnement du sol et imposant une forte concurrence aux plants forestiers (RANGER *et al.*, 2015).

La question récurrente est de savoir en quoi ces changements initiaux, qui correspondent à une adaptation aux nouvelles conditions de l'environnement (état du sol, biologie en particulier nouvelles espèces dont des invasives) vont être ou non favorables au développement et à la croissance des plants individuels et des peuplements futurs (MARSHALL, 2000 ; JONES *et al.*, 2003), mais également aux diverses fonctions du sol.

C4. IMPACT DES COUPES RASES SUR L'HYDROBIOLOGIE DES COURS D'EAU

Les effets des coupes à blanc et des pratiques de récolte et régénération des peuplements forestiers sur les ruisseaux sont résumés par FREEDMAN (1995) :

- érosion/colluvionnement, conduisant à la fois à des apports de matière sèche produisant des atterrissements, et érosion des berges et des lits, modifiant les habitats et le pouvoir épurateur des films bactériens localisés sur les cailloux et le lit des ruisseaux,
- modification des paramètres physiques tels la turbidité modifiant le transfert de lumière et d'énergie solaire (en particulier du PAR), la température de l'eau, l'hydrologie dont le débit des cours d'eau, la géochimie des eaux.

La littérature concerne largement l'Amérique et l'Europe du Nord.

Les conséquences des exploitations forestières peuvent être importantes sur la biologie des eaux de surface en général, plus ou moins fortes en raison du rang du ruisseau et/ou des effets de dilution. Elles affectent directement la production primaire et les changements des communautés du phyto et du zooplancton, les insectes (RASK *et al.*, 1993 ; PATOINE *et al.*, 2000), plus subtilement les communautés de poissons (ST-ONGE & MAGNAN, 2000), mais également le parasitisme (changement des communautés de parasites, modification des résistances) (MARCOGLIESE & CONE, 1997).

HERNANDEZ *et al.* (2005) montrent dans des ruisseaux en Alaska que la coupe rase augmente la richesse, la densité et la biomasse des communautés benthiques par rapport aux vieux peuplements fermés. STEEDMAN (2000) et STEEDMAN & KUSHNERIUK (2000) observent que les coupes rases, y compris les plus fortes, affectent les paramètres physiques de l'eau des lacs de tête de bassins versants forestiers du Nord du Canada (vitesse du vent sur le lac, thermoclines, transparence, géochimie), sans toutefois modifier significativement ni le volume de l'habitat ni les populations de Touladi (truite de lac) dans ces lacs dont le renouvellement de l'eau s'opère sur une dizaine d'années.

MARCOGLIESE *et al.* (2001) rapportent que les coupes rases diminuent le parasitisme des poissons, et c'est même dans les lacs affectés par les coupes à blanc les plus intensives que l'on observe des poissons sans parasites. Ce serait la diminution des éphémères, hôtes secondaires de nombreux parasites, qui en serait l'origine.

L'acidification progressive des sols forestiers, qui peut être accélérée par

les récoltes (totales en particulier) et les pratiques de préparation des sites pour la régénération est un processus important de dégradation de la biodiversité des cours d'eau. L'épisode des pluies acides des années 80 a mis en évidence les processus d'oligotrophisation et de toxicité aluminique dans les eaux de surface, sur la chute de la biodiversité. Dans les ruisseaux vosgiens, GUÉROLD (1992) met en évidence les effets de l'acidification sur les peuplements benthiques (richesse, abondance, diversité, équitabilité). PROBST *et al.* (1990), décrivent dans les situations de sols acides développés sur des roches leucocrates associés à des végétations résineuses des Vosges, une disparition totale des salmonidés quand le taux d'aluminium de l'eau dépassait 0,1 mg.L⁻¹.

Au cours des dernières années, le programme français de recherche SYLECOL « Impact de la sylviculture sur les écosystèmes lotiques », portant sur des ruisseaux forestiers de la Montagne noire dans les départements de l'Aude et du Tarn, avait pour objectif d'apporter des bases scientifiques nouvelles pour une gestion forestière respectueuse des cours d'eau et de développer des outils diagnostics de l'impact de la sylviculture sur les écosystèmes aquatiques. Au cours de ce travail, une méta-analyse de la littérature scientifique internationale a permis d'évaluer l'impact de l'exploitation forestière dans les cours d'eau dans des contextes variés. Il ressort que généralement les coupes rases stimulent la production d'algues dans les cours d'eau, conduisant généralement à une augmentation de l'abondance des macro-invertébrés. Les coupes accélèrent également le processus de décomposition des litières. Ce travail montre également une forte variabilité de réponses des indicateurs écologiques suivis, en fonction des types d'opérations forestières, de l'état post coupe de la végétation après la coupe rase, et de la spécificité des écosystèmes

étudiés. Il ressort également l'importance de l'aspect temporel, avec des effets sur la décomposition des litières et l'abondance des invertébrés détritivores qui peuvent atteindre dix années ou plus. Enfin, ce travail bibliographique important souligne un important déficit de connaissances sur l'impact de la sylviculture sur les cours d'eau au niveau des forêts caducifoliées en Europe (LECERF, 2014 ; CHAUVET *et al.*, 2016).

La Région Bourgogne Franche-Comté et les Agences de l'Eau se sont préoccupées du sujet dans un programme européen Life (2004-2009) donnant lieu à un rapport substantiel décrivant les bonnes pratiques pour éviter les atteintes à la biodiversité des ruisseaux, voire de les restaurer (DURLET, 2009). Ces mesures concernent la conversion des peuplements allochtones résineux substitués aux feuillus, la proposition d'ouvrages de franchissement des cours d'eau et celle de l'utilisation de techniques de débardage alternatives. Il reste à l'appliquer voire à promouvoir son existence !

Au total, les pratiques forestières inappropriées, en particulier en phase finale de récolte et de régénération des peuplements peuvent rapidement altérer le potentiel biologique d'un ruisseau, en particulier en tête de bassin mais que de larges différences s'observent en fonction des milieux.

C5. ASPECTS MOINS CONNUS À NE PAS NÉGLIGER

Plusieurs articles montrent que les *a priori* sur les coupes à blanc et la biodiversité, ou bien sur la protection vs l'aménagement des forêts pour la diversité biologique, ne sont pas toujours validés par les observations :

- En Afrique, les plantations clonales d'Eucalyptus sur des savanes millénaires, peuvent abriter une régénération

d'essences de la forêt naturelle voisine, ce que ne faisait pas la savane (LOUMETO & BERNHARD-REVERSAT, 1997). L'évolution de l'ambiance forestière sous les plantations, qui enrichissent le sol en matière organique, conduit à l'évolution de l'ensemble de la biodiversité, incluant la faune du sol et l'avifaune.

- De la même façon au Royaume-Uni, la coupe à blanc de plantations conifères mono-spécifiques, conduit à l'apparition d'espèces feuillues de la forêt native voisine (SPRACKLEN *et al.*, 2013). Les modifications induites par les plantations permettent ce développement à condition que des forêts voisines puissent fournir les graines. La lande à éricacées ne conduit pas à l'apparition d'espèces feuillues de la forêt naturelle. Parallèlement, les peuplements d'épicéa de plaine dévastés par la tempête de 1999 en Lorraine, se régénèrent naturellement en essences feuillues, mais pas en épicéa (webinaire Éric LACOMBE, UMR Silva AgroParisTech décembre 2020).
- Une comparaison des forêts allemandes et roumaines montre que les plantations coupées à blanc puis laissées à l'abandon renferment plus de biodiversité que les forêts protégées (SCHULZE *et al.*, 2014).

Ces exemples apportent des informations intéressantes la question majeure de la réversibilité des phénomènes : la monoculture y compris de résineux en zone tempérée, (ou d'Eucalyptus sous les tropiques), modifie l'équilibre actuel de l'écosystème, mais la réversibilité vers un autre type de forêt est possible. Ce seront plutôt les pratiques sylvicoles mises en œuvre pour la récolte et la régénération qui devront faire l'objet d'une attention particulière *e.g.* la mécanisation qui peut altérer le sol de manière pour partie irréversible.

D. LA SIMPLIFICATION DES ÉCOSYSTÈMES

L'évolution mondiale de la foresterie depuis un siècle, s'est traduite par une gestion très simple des écosystèmes, qu'ils proviennent de gestion simplifiée, de substitution d'essences ou de reboisement. Les traitements en monocultures plus ou moins équiennes se sont largement développés ; ils constituent une part importante de la ressource en bois mobilisée. Les coupes à blanc représentent la suite logique et la conséquence de tels itinéraires sylvicoles simplifiés.

Dès les années 60, la littérature internationale signale le déclin de la production dans les générations successives traitées en futaie mono-spécifiques. Le constat a également été fait pour les traitements en taillis extensifs surexploités pendant des siècles comme dans le Morvan. Outre la diminution de la fertilité du sol, l'âge de l'ensouchement et le nombre de recépages peuvent être incriminés comme en attestent les travaux dans les domaines méditerranéens et tropicaux. Les causes sont potentiellement multiples et difficiles à prévoir, mais la détérioration des humus est toujours un indicateur important (FLORENCE, 1965) :

- les plantations utilisant des essences allochtones, peuvent ne pas disposer de l'équipement symbiotique optimum,
- les décomposeurs peuvent être inhibés par des composés biochimiques nécessitant des enzymes dont ils ne disposent pas, voire ne pas exister dans un sol non forestier en particulier,
- les plantations faites sur d'anciennes terres agricoles utilisent des éléments reliquats de fertilisations anciennes, qui ne correspondent pas à la fertilité naturelle du sol, ne sont pas renouvelables,

- les monocultures denses éliminent de l'écosystème une bonne partie de la végétation spontanée, dont des fixateurs de l'azote atmosphérique,
- le simplisme des aménagements ne respectant pas la règle élémentaire de mise en station des essences, fait que les peuplements en limite d'aire sont plus sensibles à tous les aléas que ceux en station.

La simplification des écosystèmes facilitant une gestion des peuplements, réduite voire nulle (les éclaircies ne sont pas des pratiques généralisées dans le monde forestier), diminue la diversité et la complémentarité des agents susceptibles d'accomplir une même fonction. La résistance de tels peuplements aux aléas est réduite et le déclenchement de processus de dégradation du sol n'est pas réprimé. L'étude de BONNEAU *et al.* (2011) est édifiante à cet égard : dans la comparaison des sols sous une haute futaie mature de chêne en zone ligérienne, à un taillis adjacent recépé régulièrement tous les 20 à 25 ans, ce sont les sols sous la futaie stable qui sont les plus dégradés. La perturbation régulière mais limitée, en régime de taillis, devient ici favorable, évitant le développement d'un humus acide de type moder, qui se traduit en milieu limoneux pauvre par une lixiviation des cations alcalins et alcalino-terreux, dégradant la fertilité d'un sol sensible.

Toute monoculture traitée en révolution moyenne et *a fortiori* longue, réalisée sur des sols plutôt pauvres, serait défavorable sur le moyen terme, d'une part en réduisant des complémentarités biologiques aptes à prendre le relai dans la réalisation de certains processus (simplification du

spectre microbiologique du sol) et d'autre part, en réduisant les perturbations (limitées) aptes à rompre la « monotonie » de l'environnement, autorisant par exemple le développement d'humus dégradés (variation de l'énergie au sol).

Dans un autre aspect de la biodiversité, l'étude de MARION & FROCHOT (2001) montre que le développement de peuplements mono-spécifiques denses se traduit par un appauvrissement de la faune ornithologique dans les stades intermédiaires, de la

fermeture du couvert jusqu'à la réalisation des éclaircies ouvrant les peuplements. Ceci est particulièrement vrai pour les résineux dont le Douglas du fait de sa forte dominance sur la végétation concurrente, mais le phénomène est général dans les structures de futaies régulières denses, quelle que soit l'essence. Ce phénomène est réversible et la moindre trouée se traduit par un enrichissement de l'avifaune.

La simplification tendrait à diminuer la résilience des écosystèmes. À l'inverse, l'hétérogénéisation des essences et des âges serait beaucoup plus favorable limitant l'amplification de processus défavorables liés à une essence : par exemple la dégradation des humus moins forte dans un mélange feuillus-résineux que dans un peuplement résineux pur ; la compensation de la stimulation de la nitrification d'une essence, par le prélèvement d'une autre essence ; le spectre des besoins nutritifs offrant la possibilité de pseudo-niches complémentaires accentuées par les restitutions par les litières ; la colonisation complémentaire du sol et du sous-sol, la sensibilité différente aux stress climatiques, la sensibilité différente aux bio-agresseurs.



Figure 22. L'érosion liée à la coupe à blanc, canalisée par le chemin creux, a déposé à la partie aval du versant un mini cône de déjection constitué de particules fines. Les pluies à venir les transféreront vers le ruisseau, le cas échéant.

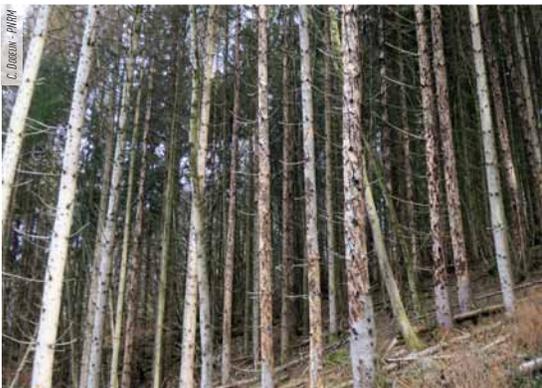


Figure 23. Épicéas scolytés au Mont Beuvray. Le déficit d'éclaircie du peuplement est un facteur majeur de son affaiblissement, précèdent l'invasion des insectes qui conduit à son dépérissement final.

Au total, la simplification d'un écosystème l'ampute de propriétés spécifiques qui correspondent globalement à des complémentarités indispensables à sa pérennité. Dans cette optique, la simplification doit se traduire par des compensations sous forme d'intrants, quelles qu'en soient les formes.

E. LES SOLS DANS TOUTES LEURS COMPOSANTES SONT UNE RESSOURCE NON RENOUVELABLE À PROTÉGER

E1. LES ALTERNATIVES À LA COUPE À BLANC DANS UN SYSTÈME PRODUCTIF

1. Les récoltes par bande ou par parquets de surface ne dépassant pas 1,5 hectare, évitent les grandes surfaces mises à nu, en particulier en zone montagneuse où les conséquences sont beaucoup plus apparentes qu'en plaine : l'ouverture temporaire du milieu évite l'accumulation trop forte des litières en système acide, elle est favorable à certaines espèces animales, et le paysage conserve une certaine constance bien que le système soit productif. Ce type de récolte pourrait (devrait) être associé à la récolte par câble réduisant à quelques pourcents, la part de surface dégradée par les engins, et limitant l'infrastructure de chemins de débardage (cf. § systèmes alternatifs, p. 83). En plaine, la transformation de taillis épuisés par les nombreux recépages peut se faire également par parquets, alternant zones plantées et zones d'enrichissement du taillis, évitant l'homogénéisation des écosystèmes.
2. La futaie irrégulière : elle consiste en un peuplement où toutes les classes d'âge sont représentées à l'échelle d'une cinquantaine d'hectares, puisqu'éclaircies, récolte et régénération, se font sur des surfaces unitaires de faible taille (quelques ares) ; le débardage devrait également s'y faire par câble. Elle peut (doit) être mixte, feuillue et résineuse, évitant les inconvénients des monocultures. Le mélange d'essences d'intérêt

économique présente des avantages environnementaux (meilleure utilisation des ressources, meilleure résistance globale) et économiques (récoltes continues de produits divers permettant de contrer les contraintes des marchés). C'est le système qui a été adopté en montagne sous forme de futaie jardinée à la fin du XIX^e siècle dans les reboisements dits RTM (Restauration des Terrains de Montagne) afin d'éviter les crues et autres coulées de boue dans les vallées (VENNETIER *et al.*, 2014). La généralisation de cette gestion conduisant à des peuplements dont la structure demeure quasiment stable pose plusieurs questions :

- La durabilité des sols : les travaux de l'Association Futaie Irrégulière indiquent que les rotations en peuplement feuillu sont de 7 à 12 ans et celles en peuplement résineux de 5 à 10 ans (MARTIN *et al.*, 2020). Si ces travaux sont mécanisés, ce qui est le cas dans 85 % des situations en résineux et 15 % en feuillus (données 2019), et si la circulation des engins n'est pas strictement encadrée, diminuer les rotations augmente le nombre de passage des engins, et le risque de circulation sur un sol humide très déformable. L'expérience montre que la restauration naturelle d'un sol est très longue et que le problème du tassement des horizons profonds est une épée de Damoclès.
- Le maintien de la biodiversité : l'ouverture raisonnée des espaces est salutaire à certaines populations (cf. § C2, p. 54 ; ANDERSON, 2003). Les peuplements d'insectes floricoles assurant

la pollinisation de nombreuses espèces végétales vont être favorisés dans un système où des trouées forestières existent localement (MARTY, 2020), certaines espèces forestières de Chiroptères utilisent communément les lisières comme territoire de chasse (TILLON, 2015), la Bondrée apivore (*Pernis apivorus*), rapace forestier bien présent dans les forêts bourguignonnes, va trouver le long des sommières et dans les clairières riches en Ronces les Hyménoptères dont elle dépend pour son régime alimentaire (GODREAU, 2017).

La diversification des paysages : il n'est pas évident que le maintien d'un couvert stable soit totalement favorable pour les touristes avides de paysages dégagés ! En effet, la recherche de paysages ouverts est le plus souvent invoquée par les touristes avides de campagne et de sites d'observation.

E2. LA PROTECTION DES SOLS À L'INTER-GÉNÉRATION

1. Réaliser un zonage du milieu : au lieu de se faire en plein, la récolte est organisée à partir de cloisonnements d'exploitation, avec des engins de dimension modeste quant à la charge utile, et équipés de dispositifs évitant la dégradation des sols (pneus larges, chenilles, tracks, chaînes) : les cloisonnements d'exploitation sont des zones « sacrifiées » pour la production, où les engins doivent circuler durant toutes les opérations forestières. Ce sont des 'chemins' installés à des positions fixées par le sylviculteur (en fonction du terrain, de la présence de ruisseau, de zones à protéger, etc.) pour éviter la circulation en plein des engins forestiers divers. Ils sont surtout utilisés pour les éclaircies, mais doivent être maintenus lors des récoltes finales, ce qui
2. Utiliser des matériels alternatifs : la récolte par câble (mâts, téléphériques, chariots autotractés) est un dispositif utilisé en montagne pour débarder des arbres pratiquement de toutes tailles. Les arbres sont portés totalement ou attachés par une extrémité, ne provoquant pas ou peu de dégât au milieu (sols, ruisseaux, zones humides...), par rapport au débardage classique avec du matériel roulant. Outre le peu de dégât au sol, ce dispositif ne nécessite qu'une infrastructure de chemins ou routes relativement limitée. Il faut cependant une organisation spécifique pour le rendre opérationnel. Il est utilisable pour toute topographie et pour tous milieux fragiles ou moins fragiles. Il est rarement utilisé en France, voire de manière rarissime, probablement du fait d'un manque de volonté et/ou d'incitations financières. En revanche dans des pays comme l'Autriche ou la Suisse. L'organisation spécifique améliorant la productivité, la formation des acteurs, l'internalisation des coûts totaux (valeur

patrimoniale, valeur environnementale, valeur esthétique, valeur du sol et coût d'une réelle remise en état, coût réel de la dégradation des chemins...), et les incitations financières orientées, devraient changer la situation, en ne compromettant aucunement la filière.

3. Régénérer naturellement plutôt que de planter : quand elle est possible, la régénération naturelle assure la transition entre un état boisé par des arbres matures et un sol couvert par des jeunes plants, puisque les semis sont acquis avant l'élimination des semenciers adultes : les statistiques forestières indiquent que moins de 100 ha annuels sont concernés dans le PNRM (annexe I). La concurrence avec la végétation spontanée est fortement atténuée et le sol n'est jamais à nu. Certaines essences, dont les semis peuvent se développer à l'ombre, sont cependant favorisées, mais rien ne s'oppose à des enrichissements localisés par plantation quand la diversité est jugée insuffisante pour une conversion vers un peuplement plus mixte et/ou pour introduire une nouvelle essence potentiellement mieux adaptée aux modifications de la station liées aux changements climatiques prédits.

4. Développer une sylviculture de précision dans la préparation du sol pour la nouvelle génération : il est souvent inutile de « nettoyer » la surface totale de la parcelle lors de la préparation du sol pour faciliter une plantation éventuelle, en plein ou en regarni. Compte tenu des inconvénients et du coût de l'andainage, le nettoyage pourrait se faire uniquement sur les zones où seront positionnés les plants. Les rémanents d'exploitation seraient broyés sur des bandes étroites, laissant au sol du bois réduit en copeaux de faible taille, facilement biodégradable, n'exportant



Figure 24. Plantation de Douglas d'une cinquantaine d'année, régulièrement éclaircie, autorisant l'apport d'énergie au sol et le développement d'une végétation spontanée abondante.



Figure 25. Régénération naturelle de hêtre, qui permet de rajeunir la forêt par trouées, évitant les perturbations majeures au sol, et maintenant une continuité des niches biologiques en en créant de nouvelles dans l'espace ouvert.

aucune matière minérale. Cette technique qui commence à être utilisée en Région Bourgogne-Franche-Comté, devrait être plus largement diffusée, d'autant qu'elle réduit les coûts : la démonstration et la formation sont là encore les outils pour aboutir.

F. FORÊTS ET PAYSAGES

Il ne s'agit pas dans cette partie de développer une problématique autour du paysage. Rappelons toutefois qu'une définition précise a été proposée par la Convention Européenne du Paysage incluant un volet écologique et un volet biodiversité. Rappelons enfin qu'en 2016, l'Assemblée nationale a adopté la Loi Reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, largement inspirée de la Convention Européenne du Paysage (un point exhaustif sur ces questions, réalisé par Yves LUGINBÜHL doit paraître dans un prochain numéro des Cahiers scientifiques du PNR du Morvan).

Nous examinerons donc dans ce travail, uniquement des pratiques pouvant impacter plus ou moins durablement notre environnement paysager.

F1. LA FORÊT ET LA DÉPRISE AGRICOLE

La forêt est la résiduelle de l'évolution du monde rural : plus la forêt occupe une large partie d'un territoire plus les ressources des gens qui y vivent sont limitées. Les évolutions sont anciennes dans l'hémisphère Nord, plus récentes dans le Sud. Le gain de productivité limite par ailleurs les surfaces actives, redonnant de l'espace pour la forêt.

L'intérêt est majeur pour les bilans environnementaux aux échelles supra, mais les enjeux sont différents dans une petite région.

Au niveau mondial et national : le gain en surface forestière est considéré comme un plus environnemental, amortissant le bilan net de déboisement, favorisant la

fixation de carbone. La forêt française a pratiquement doublé de surface en deux siècles, et sa surface s'est accrue de 2 millions ha en 20 ans, soit 100 000 ha par an ! De la même façon le volume moyen de bois par ha est passé de 129 à 161 m³ par ha en 30 ans, soit un peu plus d'1 m³ par ha et par an ! Les changements de méthode de mesure doivent participer à ces écarts, mais ne sauraient cacher la dynamique réelle. En 2012, le capital sur pied moyen des forêts de production traduit de fortes disparités, puisque les peuplements feuillus ont environ 150 m³ sur pied et les résineux de l'ordre de 200 m³ mais aussi entre les essences principales : de l'ordre de 170 à 200 m³ par ha pour les feuillus mais de 270 pour le Douglas et 320 pour l'épicéa (source IGN-IFN).

Au niveau local : le problème est très différent et dépend des situations. Pour ce qui concerne le Morvan, terrain agricole de basse montagne, une forte érosion des surfaces cultivées ou en herbe est observée depuis les années 50 ; les données IGN-IFN montrent que depuis 30 ans la surface forestière augmente peu (accroissement annuel < 0,3 %), ce qui représente de l'ordre de 500 ha par an, compte tenu du taux de boisement supérieur à la moyenne nationale, 45 % dans le Morvan vs 30 % en moyenne en France. Le gain en surface, et le vieillissement des plantations, très actives jusque dans les années 70 avec l'aide du FFN, conduisent à un fort taux de boisement et à des paysages qui se ferment.

La déprise agricole : le « ne rien faire » après l'abandon de culture, ou plus généralement de pâturages, conduit à l'envahissement progressif des parcelles par



Figure 26. Coupe à blanc d'un peuplement de Douglas sur un versant relativement pentu : phase de débardage final précédant la préparation du site par andainage, pour la future plantation.

des ligneux pionniers (accrus forestiers), qui conduit à des peuplements initiaux de très faible valeur économique (bouleaux, sorbiers, saules, érables, trembles...) ; le temps passant les successions d'espèces conduiront lentement à l'apparition des dryades et une sylviculture raisonnée pourra être mise en œuvre. Ce point est important puisque l'augmentation de la surface forestière actuelle, ne se traduira pas avant longtemps par un potentiel économique intéressant la filière bois déjà fortement déficitaire, certes par l'aval (cf. rapport de la Cour des comptes, 2020).

Les boisements ne peuvent se faire que par plantations artificielles donc équiennes : l'hétérogénéité proviendra le cas échéant du mélange d'essences introduites, dont la vitesse de croissance sera en général différente, en particulier si une partie est composée d'essences feuillues non sempervirentes. Les accrues peuvent aussi être utilisés à cet égard. L'hétérogénéisation des classes d'âge se fera lentement naturellement, mais pourra être accélérée par le forestier. Dans tous les cas, cette opération aura un coût élevé. En Région Bourgogne-Franche-Comté, ces mélanges sont déjà préconisés et mis en œuvre dans les reboisements récents pour favoriser la résilience des peuplements et leur adaptation au changement climatique.

F2. LA FORÊT ET LA RÉCOLTE DE BOIS

Une des fonctions de la forêt est la production, ce n'est pas la seule, mais en général en France cette fonction demeure importante au plan socio-économique.

Dans ces conditions, les conséquences sur le milieu dépendront de l'intensification des pratiques : plus la sylviculture est intensive, plus elle tendra vers une homogénéisation des milieux, plus la coupe à blanc ouvrira régulièrement les paysages. La perception varie alors avec la taille des parcelles récoltées. Quand elles sont vastes, les échelles parcelles et versants peuvent se confondre. Dans le cas du Morvan, où les parcelles sont de moindre dimension, ce n'est pas le cas, et le changement des paysages va dépendre des coupes individuelles et de l'ensemble des coupes réalisées au même moment sur un versant ; les outils de télédétection peuvent fournir les données réelles.

La question de l'aménagement se pose alors à l'échelle du versant dépassant les règles établies pour la parcelle individuelle. Limiter la surface de coupe pour un propriétaire ne suffit pas à garantir la stabilité du paysage. La gestion à l'échelle du versant, donc supra-parcelle et supra-propriété individuelle, est intéressante, car elle pourrait permettre de

régler plusieurs problèmes à la fois : (i) sociaux (valoriser effectivement un patrimoine), (ii) économiques (valoriser une ressource qui ne l'est pas toujours¹, limiter les infrastructures pour collecter le bois), et, (iii) environnementaux (en évitant les coupes à blanc sur de grandes surfaces, l'érosion mécanique serait limitée et les eaux de surface protégées).

Les paysages pourraient être gérés/maîtrisés de manière active :

- techniquement, en définissant la zone de récolte, la quantité de bois à récolter, la mise en œuvre du système de récolte (classique, câble), l'organisation du chantier de collecte via la création de dessertes pour l'extraction des produits, les zones à exclure, etc.
- socialement, l'organisation des propriétaires en « groupements » où les règles seront définies pour satisfaire au point précédent.

Cette question est complexe, probablement plus au plan social et juridique, que biotechnique (*parole aux juristes*). L'aspect environnemental devrait être un point fort d'entrée pour faire avancer ce concept. Les subventions généralisées en France, pourraient être orientées pour le favoriser, s'il est jugé défendable (*question à poser aux décideurs politiques*).

Les crises sanitaires en cours avec le dépérissement marqué de l'Épicéa commun à moins de 800 mètres d'altitude et les difficultés du hêtre sur certaines stations à faible réserve hydrique accentuent ce phénomène d'ouverture brutale dans le

1. En France de l'ordre d'un tiers de la forêt privée n'est pas gérée, pour partie du fait du manque d'intérêt des propriétaires ou d'intérêts autres, et, pour partie du fait de la faible superficie des propriétés ou des conditions de milieu. L'aspect positif est que ces espaces sont des refuges de biodiversité.

paysage. Ce sont ainsi des versants complets de peuplements résineux qui sont attaqués depuis quelques années par les scolytes, et pour lesquelles des interventions d'urgence sont à planifier dans un délai très court. La notion d'aménagement citée ci-dessus vole alors en éclat et les tendances annoncées par rapport aux changements climatiques ne conduisent pas à être totalement optimiste par rapport à ces phénomènes de crise.

F3. LES PRATIQUES RESPECTUEUSES DES PAYSAGES

Signalons tout d'abord que les coupes rases n'ont pas toujours un impact négatif. En effet elles peuvent parfois contribuer à une ouverture du paysage et à des projets de réaménagement de territoires particulièrement boisés. Il faut également considérer le cas marginal des coupes rases dont l'objectif est la mise en culture d'anciennes parcelles agricoles abandonnées à la forêt pour diverses raisons. Mais il ne s'agit pas ici d'opposer sylviculture et agriculture !

Par ailleurs, la relation paysages et biodiversité est complexe, avec des espèces inféodées à des milieux ouverts, d'autres à des milieux fermés, et enfin d'autres nécessitant des paysages en mosaïque (fourrés denses, clairières, prairies voire champs cultivés) (cf. § C2, p. 54).

Comment réduire l'impact paysager d'une coupe rase dans des structures forestières homogènes ?

- Pour une coupe sur versant on adaptera la taille de la coupe en fonction de la distance de perception et la forme de cette même coupe aux lignes principales du paysage et aux zones les plus exposées aux regards. Ce qui signifie pour le propriétaire ou l'exploitant de



Figure 27. Vue sur le Mont Beuvray, le Puits au premier plan, Villapourçon (58).

maintenir des plages de peuplement pour atténuer la perception de l'étendue de la coupe.

- Les récoltes par bande en plaine, passent relativement inaperçues si l'on prend la précaution pour que les bandes n'atteignent pas les voies de desserte ; en montagne, elles confèrent au paysage une structure souvent régulière.
- Les récoltes par bouquets dans les futaies jardinées maintiennent un paysage plutôt fermé puisque les récoltes par pied ou par petit bouquet n'ouvrent pas le peuplement.
- Quand un peuplement de résineux existe, il est possible de rompre le sentiment de tunnel sans fin oppressant aussi bien pour l'automobiliste que pour le simple marcheur (cf. gestion des lisières proposées par l'ONF, le CRPF et le PNRM). L'objectif est de valoriser cette interface potentiellement riche en biodiversité animale et végétale, en particulier en la rendant plus « transparente ». Paradoxalement, la

nature va faire l'inverse car, en plantation, les arbres de lisière se comportent comme des arbres d'alignement ; ils sont plus nombreux, plus trapus, plus branchus... une sylviculture très active doit être réalisée sur la lisière afin de lui conférer un aspect hospitalier.

L'hétérogénéisation des forêts en types d'essences et en classes d'âge, de fait, limite le problème des ouvertures brutales des paysages sur de larges surfaces.

La préparation des sites pour les générations futures joue un rôle très important qui peut largement amplifier celui des coupes rases elles-mêmes. Tel est le cas de l'andainage, qui part du concept que le parterre de coupe doit être propre, de façon à limiter les difficultés pour reboiser : cette pratique devrait être abolie... dans un premier temps, il convient de privilégier des petits andains rapprochés, à de gros andains massifs (réf. Fiche Paysage ONF, CRPF, PNRM : réaliser une coupe rase sur versant).

La régénération naturelle est une solution élégante, mais elle nécessite une sylviculture active (saisir l'opportunité des fructifications, prévoir les essences en laissant les semenciers ad hoc, etc.). Si elle échoue, le regarni par plantation est possible, autorisant une nouvelle diversification... gérable.

La recherche de compromis entre aménagements, dont la phase de récolte des peuplements forestiers, et préservation des paysages est indispensable car il faut concilier sur nos territoires les considérations écologiques, environnementales, paysagères, et économiques. De nombreux paramètres façonnent les paysages :

- l'occupation des terres, dont le ratio agriculture/forêt, plus faible en montagne qu'en plaine, mais fluctuant au cours du temps en fonction des orientations agricoles (ovins vs bovins, intensif vs extensif...) (LARRÈRE & NOUGARÈDE, 1990).
- le milieu et en particulier la qualité des sols et l'altitude qui contraignent les essences et la qualité des produits forestiers. Le cas du Morvan est typique à cet égard avec (i) des sols issus de roches cristallines pauvres et drainants, (ii) des taux de boisement variant très fortement avec l'altitude (de 25 % à 300 m à 90 % à 800-900 m), et (iii) des bois feuillus de qualité médiocre en altitude. Tous ces facteurs tendent à handicaper les feuillus.
- Les extrêmes climatiques récents, conduisant à des analyses de risques qui tendent à privilégier les bois jeunes de taille moyenne.
- le marché actuel du bois transformé, qui privilégie les résineux aux dépens des feuillus, et les bois moyens aux dépens des gros bois.
- la pression sociétale actuelle qui vise à promouvoir le respect inconditionnel de l'environnement, avec des postures

parfois extrêmes bien connues dans le Morvan.

- et **FINALEMENT**, le sylviculteur dont le rôle d'intégration des précédentes contraintes est majeur en sélectionnant l'essence, la structure des peuplements, la méthode de récolte et de régénération : mono-spécifiques vs mixtes, peuplements clairs vs peuplements denses, degré, taille et rotation des interventions, régénération naturelle vs plantation.

Le gisement de bois récoltable est important en France, si l'on considère que la récolte actuelle ne concerne que de l'ordre de 50 à 60 % au maximum de la production biologique. Le rapport de la Cour des comptes (2020) souligne, à nouveau, la sous-exploitation en forêt privée due pour partie à la structure de cette propriété, au manque d'entreprises de la filière utilisant des bois de qualité secondaire, et aux zones peu productives type forêts méditerranéennes.

Le déficit de la filière bois en France est abyssal (7 milliards d'euros actuellement), dans un pays boisé (30 % en moyenne), où la société évolue favorablement vers les matériaux et énergies renouvelables, mais où paradoxalement les récoltes sont assimilées à de la déforestation !

Ledit rapport souligne parfaitement que l'origine du déficit économique concerne la partie bois de la filière (secteurs papier et sciage résineux). L'augmentation programmée de la récolte de 10 à 20 millions de m³ par an à l'horizon 2025 ne résoudra pas ce déficit. Si elle est équirépartie, la durabilité de la forêt ne devrait pas être compromise, mais si par facilité cette récolte se faisait aux dépens des zones actuellement les plus sollicitées, la réponse serait très différente.

G. CONCLUSION

G1. IMPACT DES COUPES À BLANC : LE DIAGNOSTIC

La forêt longévive est souvent implantée dans des situations de pauvreté absolue du sol, ce qui ne signifie pas qu'en valeur relative son adaptation n'est pas satisfaisante, pour des écosystèmes remplissant au mieux leurs fonctions, y compris celle de production. Le cas du Morvan est typique à cet égard.

Transférer le modèle agricole intensif à la forêt est une erreur trop souvent commise, car sous-entendant que les sols forestiers ne pourraient remplir les services, surtout la production, rendus par les sols agricoles. Les coupes à blanc appartiennent à ce transfert de concept, puisqu'associées à la sylviculture intensive utilisant des aménagements et une gestion simple pour la fonction de production. L'intensification ne concerne le plus généralement que les pratiques et les sorties des écosystèmes, rarement les intrants, ce qui pose le problème de la pérennité de tels systèmes, en réalité semi-intensifs. La culture lignocellulosique n'a pas sa place dans le Morvan.

L'effet précis de la coupe à blanc d'un peuplement forestier s'avère complexe à prévoir sur un site donné. Toutefois, les grandes lois sont connues à partir des travaux de la bibliographie, le plus souvent nord-américaine, dont les problématiques sont cependant spécifiques : espaces de grande dimension, forêts anciennes souvent peu anthropisées ou au contraire, forêts de plantation où la mécanisation des opérations sylvicoles est généralisée.

Les effets des coupes à blanc sur l'environnement sont identifiables si l'on comprend les variables qui contrôlent le fonctionnement biologique et géochimique actuel de l'écosystème avant la coupe, dans son contexte socio-environnemental donné qui a orienté les pratiques, ce qui est loin d'être toujours le cas. Les paramètres du bilan hydrique et les mécanismes conduisant à la libération des éléments dans le sol et à leur mobilité dans un milieu donné sont essentiels pour estimer les effets géochimiques sur le milieu continental.

Il faut définir les échelles :

- *échelles spatiales* : de la parcelle, au versant, puis au grand bassin versant. Ces échelles sont tout aussi importantes pour les aspects géochimiques que biologiques. Pour le premier point l'impact des coupes et des pratiques de régénération du futur peuplement, peut être important et durable sur le sol et les eaux de surface, principalement sur les émissaires de rang inférieur (les plus étudiés), mais le cumul sur de grands espaces peut affecter les rangs supérieurs. Concernant la biodiversité, les niveaux parcelle (diversité dite α), petit bassin (diversité dite β) voire grand bassin versant (diversité dite γ), sont le plus souvent perturbés, plus ou moins durablement (perturbation ne veut pas dire obligatoirement effet négatif). De même la forme et la taille des coupes et leur distribution dans l'espace, modifient la colonisation future à partir des peuplements environnants ou via les agents de dispersion.
- *échelles temporelles* : des temps courts aux temps longs. Les temps courts sont souvent les mieux étudiés, pour

des raisons pratiques évidentes : les impacts des coupes décroissent avec le temps (impacts décrits d'une à dix années après l'impact), mais les rares études sur le long terme permettent de faire le point sur les restaurations ou sur la persistance d'effets (étude modèle de THOMAS & MEGAHAN, 1998), les deux étant cruciaux pour les écosystèmes longévifs, entre autres pour déterminer le caractère réversible ou non des perturbations. Un point rarement étudié en forêt concerne les effets cumulatifs des perturbations liées aux coupes et aux méthodes utilisées pour les opérations sylvicoles associées. Ces résultats permettraient d'étayer les indicateurs d'éventuelle évolution de la résistance des peuplements, voire du franchissement de seuils de déclenchement de dépérissements ; quelques approches rétrospectives abordent cette question délicate.

La sylviculture semi-intensive, se traduit par une chaîne de processus contraignant l'écosystème épigé et hypogé, s'ajoutant aux seules exportations de matière sèche et d'éléments : l'effet des traitements des sites pour régénérer un nouveau peuplement peut avoir un impact très fort et durable. IL s'agit d'un point important de vigilance pour la durabilité des écosystèmes forestiers, puisque la dégradation d'un écosystème peut être très rapide, mais sa restauration sera très lente et probablement toujours incomplète.

La littérature montre que la coupe modifie en général fortement le bilan hydrique par diminution de l'évapotranspiration réelle. L'humidité du sol augmente significativement et peut conduire soit à un engorgement local (sol imperméable et topographie plane) soit à une augmentation du flux d'eau drainé quittant le sol (sol poreux), accompagné ou non d'un

ruissellement de surface en fonction de la topographie. Les effets eau, énergie et température dopent l'activité biologique, se traduisant en particulier par un accroissement de la minéralisation des matières organiques, et souvent de la nitrification. Si la production d'éléments, anions en particulier, dépasse leur consommation (prélèvement et immobilisation), alors le drainage d'éléments (cations) augmente dans un flux d'eau plus important. Si la récolte s'accompagne de mesures supplémentaires censées faciliter ou favoriser la régénération naturelle ou artificielle d'un nouveau peuplement, les conséquences pour le sol et l'environnement dépendent de ces pratiques. L'impact est ici envisagé pour la parcelle et pour les émissaires hydrologiques de rang inférieur.

En sol pentu, l'augmentation de la composante ruissellement du bilan hydrique peut initier le phénomène d'érosion, et les grandes surfaces mises à nu sur un versant, sa propagation, impactant les échelles plus larges.

Comme pour l'ensemble des fonctions de l'écosystème, la coupe à blanc avec une récolte intégrale de biomasse sur des grandes surfaces, perturbe la biodiversité. Les niches biologiques à l'échelle locale et à celle du paysage sont modifiées par fragmentation des habitats forestiers en place. Les effets dépendent cependant de la mobilité et des aires de dispersion des espèces. La littérature est importante sur le sujet, mais le plus souvent centrée sur une ou quelques espèces diffusant des conclusions apparemment contradictoires, mais liées généralement aux traits de vie des espèces sur lesquelles on travaille. Les synthèses à l'échelle des paysages ou des territoires sont rares, mais le message est beaucoup plus lisible, conduisant à la nécessité de conserver à cette échelle une hétérogénéité de traitements associant régulier et irrégulier à un grain

compatible avec les autres fonctions de la forêt : l'unanimité porte sur la nuisance potentielle des coupes rases sur des larges étendues.

Concernant le sol, acide en particulier, les horizons de surface concentrant la biodiversité, ont un rôle majeur : toute pratique conduisant à leur acidification (exportation d'alcalinité) ou pire à leur destruction, est potentiellement dramatique pour les fonctions de biodégradation, donc d'épuration.

Qu'il s'agisse du milieu physique ou de la biodiversité, les effets cumulés de coupes sur le long terme sont largement méconnus.

Ces messages seront traduits ci-dessous en recommandations adaptées au contexte du Morvan

G2. ADAPTATION DE LA GESTION DURABLE DES FORÊTS AUX CARACTÉRISTIQUES DU MORVAN

G2.1. LES CARACTÉRISTIQUES DU MORVAN

- Un climat humide de basse à moyenne montagne, présentant une pluviométrie annuelle moyenne à élevée (1 000 à 1 500 mm), aux températures hivernales faibles, aux brouillards fréquents et aux printemps tardifs.
- Une géologie de terrains anciens cristallins, cristallophylliens et volcaniques d'âge hercynien, pénéplanisés puis relevés et faillés par les contrecoups des plissements alpins et pyrénéens, formant une sorte de horst fracturé, basculant vers le nord. Il est souvent défini comme « un îlot granitique au cœur et au sommet de la Bourgogne calcaire et sédimentaire ».

- une altitude moyenne d'environ 450 m et des sommets d'altitude modeste (maximum 901 m).
- Un relief faiblement ondulé sur les sommets, mais pouvant être escarpé le long des rivières empruntant les réseaux de failles d'orientation N/S ou varisque.
- Un réseau hydrographique dense (3 300 km de cours d'eau de toute taille répertoriés dans le périmètre du PNR Morvan, 2018 cf. diagnostic territorial).
- Des sols développés sur des arènes de roches siliceuses remaniées par les glaciations quaternaires, dont la texture est plutôt sableuse, souvent caillouteux, toujours acides et désaturés, mais parfois hydromorphes sur les arènes litées et/ou dans les dépressions comblées par des colluvionnements où se développent des tourbières. Ils seront sensibles à l'érosion mécanique en situation de versant à relief pentu. Leur fertilité chimique est limitée.
- Une histoire de l'occupation du milieu montre des sols ayant subi des pratiques relativement épuisantes pour leur fertilité minérale (régime taillis pour le bois de chauffage).
- Une propriété très morcelée et de faible taille (85 % de forêt privée ; plus de 17 000 entités propriétaires) issue de déprises agricoles successives, dont la culture de propriétaires actuels peut être très éloignée de celle des « terriens » qui ont modelé le paysage. Il est cependant notable que dans le périmètre du PNR Morvan, plus de 45 % de la surface de la forêt privée possède un document de gestion durable, obligatoire pour les propriétés de plus de 25 ha, volontaire pour moins de 25 ha (486 PSG) voire de Bonnes Pratiques Sylvicoles (253 CBPS). La faible taille des propriétés est donc relative puisque les statistiques montrent que (i) 88 % de la superficie de la propriété privée correspond à

des entités de plus de 4 ha, (ii) 78 % à des superficies supérieures à 10 ha, et, (iii) 43 % des 110 000 ha de forêt privée concerne des entités propriétaires de plus de 100 ha.

62.3. LA GESTION DURABLE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

La gestion des écosystèmes forestiers productifs ou non, devrait prendre en compte certaines recommandations pour une transition progressive :

- *Choix des essences et de leur traitement*

- Utiliser les essences correspondant aux stations du Morvan (cf. catalogue ONF et/ou CRPF) : toute essence en station aura une résilience plus forte en cas de stress présent ou à venir. La difficulté provient des changements climatiques récents qui doivent être pris en compte pour en préciser les paramètres et si possible leur dynamique à relativement long terme.
- Préférer les peuplements mélangés et hétérogènes aux monocultures équiennes : tout système simplifié se traduit par des résiliences plus limitées que pour un système complexe et par des services moins diversifiés. En forêt de production, associer des feuillus aux conifères souvent plus productifs, de façon à éviter les peuplements denses uniformes où les niches écologiques sont limitées, augmente le niveau de biodiversité ; ceci vaut également en zone de montagne où les feuillus sont de mauvaise qualité, ces derniers ne constituent cependant pas l'essence *objectif*. Le problème de la coupe à blanc serait par là même largement résolu.
- Privilégier la régénération naturelle à chaque fois que cela est possible en évitant la loi du tout ou rien. Si les peuplements mixtes sont privilégiés et si les aménagements sont réalisés

en futaie par parquets, il devrait toujours être possible de trouver quelques semenciers, puis d'enrichir par plantation avec une autre essence *objectif*, inexistante, mais jugée utile suite à l'évolution des caractéristiques stationnelles, climatiques en particulier.

- Réserver les plantations aux reboisements, ou aux zones où la ou les essences sont manifestement mal adaptées en visant la diversité spécifique, également aux enrichissements des accrus si nécessaire. Le choix d'une essence est un compromis qui doit allier objectifs, services écosystémiques, dont la production, et adaptation à la station. Une essence dispose d'une amplitude écologique qui lui permet de coloniser une gamme plus ou moins étendue de situations. En retour, elle agit sur le milieu par des paramètres physiques (bilan hydrique et énergétique, interception des polluants atmosphériques), et des paramètres biologiques (besoins propres, croissance, recyclage, associations et contrôle microbiologique, humus induit) qu'il est nécessaire de prendre en compte dans leur choix. Tel est par exemple cas du Douglas largement utilisé dans le Morvan, qui bien qu'étant « le plus feuillu des résineux », peut acidifier fortement le sol par son action stimulante sur la nitrification, y compris en sol acide. Un accompagnement par amendement léger est nécessaire, améliorant production et qualité de l'environnement (base de données du site expérimental de Breuil-Chenué – Morvan). Le débat des années 70 semble ressurgir malgré les nombreux travaux réalisés sur ce sujet, en particulier sur l'effet des résineux : ces derniers acidifient plus les sols que les feuillus (AUGUSTO *et al.*, 2002 ; LEGOUT *et al.*, 2016), mais ne les stérilisent en aucun cas (exemple de travaux dans le Morvan : LEJON *et al.*, 2005 ;

BUÉE *et al.*, 2011). Il existe de plus DES résineux et DES feuillus (AUGUSTO *et al.*, 1998) et la structure des peuplements a des conséquences directes sur les niches écologiques donc la biodiversité, souvent faussement attribuées à l'essence (FROCHOT & MARION, 2001 ; DUMAS, 2016).

- Éviter les peuplements trop denses qui empêchent la lumière d'atteindre correctement le sol, conduisant à un faible développement de la végétation spontanée et à un ralentissement de la décomposition des litières, conditions acidifiantes pour le sol. Par ailleurs, l'ouverture brutale de tels peuplements lors d'une coupe rase expose le sol nu à la pluie incidente, situation potentiellement favorable au déclenchement de l'érosion.
- Maintenir la qualité des sols pour toutes ses fonctions (production, diversité biologique, fonctions environnementales *sensu lato*, dont la qualité des eaux surface) : utiliser les amendements quand les sols sont trop acides ou quand des essences acidifiantes sont introduites, à des faibles doses, aptes à dynamiser la microflore du sol assurant les fonctions majeures, en particulier la décomposition des matières organiques, base de la fertilité dans toutes ses composantes. Un sol pauvre chimiquement peut assurer des fonctions correctes sans être optimales s'il est stable, mais le basculement peut se faire plus rapidement que pour un sol mieux pourvu, en cas de stress naturel ou anthropique brutal. Le seuil de pH_{eau} de 4,5 dans l'horizon organo-minéral de surface du sol, semble être une limite en deçà de laquelle la chaîne biologique du sol est incapable de remplir ses fonctions, immobilisation de nitrates par exemple (NUGROHO, 2006). Le site expérimental de la forêt de Breuil-Chenué dans le périmètre du PNR testant l'effet des essences

forestières sur le sol est démonstratif à cet égard (LEGOUT *et al.*, 2016). Un travail sur les effets à long terme de l'interaction tassement x amendement de sols acides, confirme la validité de ce seuil (RANGER *et al.*, 2021). Compte tenu des mauvaises interprétations généralement diffusées, contrairement au concept agricole l'amendement forestier n'est pas destiné à modifier profondément le sol en augmentant son pH, mais à catalyser le fonctionnement biologique du sol, lui redonnant son potentiel de biodisponibilité pour les essences forestières : le cycle biogéochimique très conservatif se charge de maintenir pendant des dizaines d'années les éléments apportés à la plantation (base de données Inrae site expérimental de Breuil-Chenué -58).

- Zones où la coupe à blanc est à exclure

- Zones pentues où le risque érosif est élevé, entraînant une perte de matière du sol, en général les particules fines les plus réactives, atterrissements aux bas de pentes, apport particulière vers les ruisseaux augmentant la turbidité et colmatant le lit.
- Zones plates à tendance hydromorphe où l'équilibre fragile peut être rapidement détruit.
- Couloirs à vent où l'élimination d'un peuplement peut conduire à des chablis de vent dans les peuplements voisins.
- Zones de haute valeur ajoutée au plan de la biodiversité (source diagnostic territorial) : Natura 2000 (12 sites), ZNIEFF (144 sites de type 1 et 21 de type 2), tourbières (12 sites), mares (3018 recensées), 7 APPB, une réserve biologique intégrale en forêt d'Anost, site d'intérêt définis aux articles L.341-1 et 342-22 du code de l'environnement (38 sites classés et 20 sites inscrits)

- Zones archéologiques telles que Bibracte et autres sites moins emblématiques
- Zones de haute valeur historique, par exemple celles de la forêt refuge au cours de la Seconde Guerre mondiale, qui abritait les maquis : ainsi la forêt, ressource traditionnelle pour le bois, devient le lieu de vie de clandestins, les « maquisards » qui ont été nomades, puis sédentaires et qui ont construit des campements, des « villages » dans les bois (au total il y a plus d'une vingtaine de maquis du nord au sud). Certains ont même transformé la forêt en cimetière (voir Ouroux-en-Morvan).

- Pratiques à éviter voire à proscrire, car souvent déterminantes quant à la durabilité des écosystèmes en provoquant des ruptures brutales

- Les éclaircies brutales fragilisant le peuplement restant sur pied. Les opérations sylvicoles progressives sont toujours à privilégier de façon à ce que les arbres maintenus puissent s'adapter à leur nouvel environnement.
- Les coupes à blanc sur des surfaces unitaires importantes, ou par suite de cumul sur un versant. Une gestion par parquets dont les surfaces unitaires varient entre un demi et un hectare et demi au maximum semble réaliste dans le Morvan, prioritairement dans la zone montagnarde, mais en fait dans toutes les zones écologiques du Morvan. Cette limite permet de transformer progressivement un paysage homogène quel qu'il soit (plantations mono-spécifiques, taillis épuisés, zones d'accrus pauvres). Les aménagements doivent de plus être raisonnés à l'échelle des versants de façon à éviter un effet cumul compte tenu de la structure de la propriété, et assurer un continuum des niches écologiques (pour ce point ce ne sont pas

uniquement les surfaces coupées qui comptent) et des paysages. Ces coupes à blanc représentent en Morvan des surfaces relativement importantes, de l'ordre du millier d'hectares par an en moyenne, mais dont la perception et les effets perdurent pendant plusieurs années au cours desquelles les peuplements se reconstituent. L'urgence actuelle de prise de décision est liée à l'arrivée à maturité d'une quantité importante de peuplements implantés sur une courte période, grâce aux subventions du Fonds Forestier National. La situation est telle qu'une organisation territoriale pourrait s'avérer nécessaire afin d'éviter le cumul des coupes rases sur de grandes surfaces et leur impact négatif sur l'environnement, le paradoxe étant que ce cumul est plutôt favorable au plan économique.

- Le maintien du sol à nu qui conduit à la sur-minéralisation des matières organiques, à son érosion chimique et physique. La gestion de la végétation spontanée (et non adventice) est importante en forêt et nécessite un subtil équilibre entre concurrence et assistance au peuplement principal. Cette végétation spontanée protège le sol, et gaine la strate arborée qui s'élague naturellement et conserve une dominance apicale. L'éradication chimique de la végétation spontanée a montré ses effets dramatiques (LIKENS *et al.*, 1978) ; elle semble de fait très peu utilisée dans le Morvan.
- Les récoltes d'arbres jeunes, dont l'efficacité est faible dans l'utilisation des ressources pour produire la biomasse, exportant beaucoup d'éléments. Cette pratique résulte de considérations commerciales et technologiques discutables, incompatibles avec la durabilité des écosystèmes traités semi-intensivement. Elle conduit de plus à l'augmentation de la fréquence

des perturbations liées aux coupes à blanc et aux reconstitutions des peuplements (SWITZER *et al.*, 1973).

- Les récoltes totales ou celle des rémanents, y préférer les récoltes concernant le seul bois fort, respectant ainsi la possibilité du sol en terme de potentiel de fertilité, généralement limitée dans le Morvan, et évitant l'élimination inutile du pool actif de la fertilité minérale du sol. La récolte des souches négative à tous égards (sauf en cas de présence dramatique de pourridiés) est à proscrire totalement en Morvan, de manière plus stricte que ne l'indiquent les recommandations du projet Gerboise (LANDMANN *et al.*, 2018).
- Le brûlage des rémanents qui élimine directement les volatils (N en particulier) et indirectement de nombreux éléments (volis ou lessivage des cendres) est à proscrire.
- D'une manière générale le travail en plein sur les parcelles forestières :
 - l'andainage qui transfère vers les andains la partie la plus riche du sol et conduit le plus souvent au tassement, à l'érosion des sols et à des atterrissements au bas des versants, ne devrait plus être pratiqué ; il sera remplacé par un broyage localisé des rémanents quand cela s'avère nécessaire,
 - le labour de sols forestiers mélangeant les horizons organiques riches de surface, par ailleurs très efficace en tant que mulch, à des horizons organo-minéraux voire minéraux nettement plus pauvres. Tout travail répété du sol conduirait comme en agriculture à la minéralisation des matières organiques, appauvrissant le sol mais alimentant l'atmosphère en CO₂... effet totalement antinominique des politiques visant à réduire l'émission de GES.
- La mécanisation mal contrôlable des opérations sylvicoles dans un contexte

où les cloisonnements sont difficiles à mettre en œuvre compte tenu de la structure de la propriété foncière. Il s'agit là d'une problématique complexe puisque plus les parcelles unitaires sont de faible taille moins le cloisonnement sera mis en place. De plus, si le groupement de parcelles y compris de propriétaires différents permet de récolter des lots commercialisables et d'installer des dessertes communes, il conduit à augmenter les surfaces coupées. Ce dilemme pour éviter des dégâts très difficilement réversibles et récolter les produits sans mettre à blanc de grandes surfaces n'a que peu de solutions, sauf à innover vers des systèmes alternatifs discutés ci-dessous.

- Promouvoir et développer des systèmes alternatifs de débardage

- Pour les éclaircies, si la pente n'est pas trop forte, la traction animale peut être utilisée pour le débuscage et le débardage de petits bois. L'impact sur le milieu est faible et ne nécessite pas de matériels sophistiqués (figure 28). Il faut cependant que le savoir-faire existe localement et que l'environnement pour l'animal soit adéquat (alimentation, maréchalerie, bourrellerie, service vétérinaire). Le territoire du Morvan est plutôt propice à cet égard.

Le cheval de fer, parfois équipé d'un treuil, est une alternative intéressante : il s'agit d'un petit débusqueur – transporteur très maniable, équipé de chenilles larges qui lui confèrent une très faible pression au sol.

En zone de montagne, un câble « léger », avec simple ou double chariot, peut être utilisé pour réaliser l'extraction des bois. Le coût de l'opération est relativement élevé, mais peut se justifier pour la protection des ouvrages ou habitations situés en aval.

Toutes ces méthodes sont adaptées au débardage de bois en zone sensible, et *a fortiori* en toute circonstance.

Rappelons que les éclaircies sont indispensables en forêt gérée et, en particulier, dans les plantations. Leur objectif est d'éliminer progressivement des individus, diminuant la densité des peuplements et augmentant par conséquent l'énergie arrivant au sol, enlevant les arbres sans intérêt productif et/ou les individus dont l'état sanitaire présente des risques pour l'avenir du peuplement, transférant le potentiel de production vers les arbres conservés. Cette opération peut cependant générer des dégâts au sol considérables si elle est mal conduite. Le débardage par animal de trait, une alternative pour la récolte des bois d'éclaircie.

- Pour les peuplements matures, le débardage par câble en particulier peut être envisagé. Installé sur un versant, il autorise la récolte partielle simultanée chez plusieurs propriétaires, y compris dans des zones peu accessibles, économisant les infrastructures d'accès aux parcelles pour y récolter les grumes, et limitant très fortement les dégâts aux sols se propageant dans tout l'environnement. Ce dernier point est très important, puisque structurer l'espace en futaie irrégularisée par parquet (un parquet pouvant être une parcelle de taille de l'ordre de l'hectare) nécessite néanmoins une grande vigilance pour le sol, entre autres, pour y limiter au maximum la circulation d'engins lourds. Si elle diminue le risque de dégradation de toutes les fonctions du sol, la limitation des superficies coupées ne suffit pas à garantir ces fonctions si le sol n'est pas respecté. Certes ces



Figure 28. Illustration du débardage à l'aide du cheval en zone pentue.

systèmes alternatifs de débardage sont actuellement plus onéreux que les systèmes classiques et ne se développeront que s'ils deviennent économiquement viables. Plusieurs remarques peuvent être formulées à ce sujet : le travail d'apprentissage à cette méthode améliorant les performances, l'internalisation de recettes liées aux infrastructures (voierie en particulier) et au respect de l'environnement (par exemple le maintien de la qualité de l'eau), la redéfinition du ciblage des aides (aide ciblée pour les matériels, subventions pour les schémas de dessertes), devraient aider à la résolution de cette équation. De plus, la participation des territoires pourrait être acquise si ces pratiques respectueuses de l'environnement, participent à leur développement économique direct et indirect via l'attractivité touristique (illustration de la figure 29 vs encart IV).

Ces impacts se complexifient avec la prise en compte des changements climatiques, dont le scénario local est encore très imprécis. Dans le domaine forestier, malgré ces incertitudes, les aménagements consistent à anticiper aujourd'hui ce que sera l'environnement global à l'horizon 2100 : l'évaluation des risques pour prendre une décision ad hoc, conservatrice ou plus interventionniste, nécessite une expertise certaine dans le domaine forestier, conduisant à la nécessité d'accompagnement des propriétaires privés, petits en particulier, dans des conseils ou plans de gestion appropriés (JANDL *et al.*, 2019). Les facteurs de stress liés aux changements climatiques, devront particulièrement être envisagés, en tentant de répondre à la question, en quoi une coupe à blanc mal gérée peut compromettre la durabilité de l'écosystème pour toutes ses fonctions ?

- Le stress physique : la stabilité des peuplements aux vents violents dépend de



Organisation d'un chantier de câble mât avec classement des bois par destination.



Débardage de bois longs par câble mât réduisant très fortement les dégâts au sol et à l'écosystème.

Figure 29. Le débardage par câble permet la récolte de bois en respectant les écosystèmes.



Figure 30. Le cheval de fer, petit engin mécanique utilisé pour le débusquage et le débardage de petites grumes, dont l'empreinte au sol est très faible (site expérimental Azerailles, 54).

Encart III. Ces pratiques qui font un tort considérable à l'image de la foresterie...



C. DOUILLON - PNRM

L'andainage réalisé sur de grandes surfaces parallèlement à la ligne de pente, sans protection du ruisseau.



V. LEBONNECQ - PNRM

Le débardage et le stockage du bois dans le lit du ruisseau non protégé.



V. LEBONNECQ - PNRM

La chaussée de desserte forestière liquéfiée lors d'un débardage mécanisé par temps trop humide.



V. LEBONNECQ - PNRM

Le débardage par temps humide par des engins lourds, détruisant chemins et ruisseaux.



V. LEBONNECQ - PNRM

Le ruisseau totalement pollué par les argiles en suspension, issues d'une parcelle coupée à blanc en amont.



V. LEBONNECQ - PNRM

L'eau terreuse du ruisseau drainant la coupe à blanc.

la position dans le paysage, du sol et de son état hydrique au moment de la contrainte, des essences (sempervirent vs décidus), du type d'enracinement plus ou moins associé à la structure des peuplements (denses vs ouverts), du dynamisme de la sylviculture (fréquence et intensité des éclaircies), de la coupe elle-même (taille, forme, répartition sur un versant), du mode de régénération (naturelle progressive ou plantation) et des contraintes mécaniques éventuelles au sol réduisant la zone d'enracinement des arbres.

- Le stress hydrique : l'alimentation en eau des peuplements est liée au climat, à la capacité de rétention du sol, au type d'enracinement du végétal pour capter tout ou partie de cette réserve, enracinement éventuellement contraint par la compacité du sol, à la stratégie de l'essence face à la disponibilité en eau (évitante, résistante ?) et à la structure du peuplement. L'adéquation de ces données doit être la meilleure possible tant pour la résistance à la sécheresse qu'à celle liée à l'excès d'eau.
- Le stress pour la nutrition minérale : toutes les fonctions d'un sol sont altérées par son appauvrissement minéral, dont la nutrition minérale des essences va constituer un facteur primaire des dépérissements et des bio-agressions potentiels des peuplements ; l'appauvrissement affecte également la dynamique microbiologique essentielle pour les fonctions vitales de l'écosystème.

Les stress et leurs effets relèvent d'interactions complexes entre végétation, eau, nutriments, biologie du sol et statut des peuplements forestiers : tous les épisodes de dépérissement ont montré l'association de facteurs prédisposant, de facteurs aggravant et de facteurs déclenchant. Mieux vaut prévenir en utilisant les bonnes essences (en confrontant les

recommandations anciennes à la réalité locale des changements des paramètres du climat), des traitements sylvicoles et des pratiques adaptés : les récoltes doivent éviter l'exportation des petits compartiments de biomasse et des souches, la mécanisation doit être très encadrée. Le respect de la qualité des sols est centrale pour la gestion durable : il est indispensable d'éviter toute dégradation, car la remédiation est complexe, onéreuse et jamais ni complète ni définitive.

Rappelons que la définition statique de la station forestière est en difficulté, puisque des identifiants majeurs peuvent être perturbés par les changements climatiques, pouvant conduire à redéfinir les essences cibles en fonction de leur autécologie.

Les stades récolte et régénération des peuplements sont cruciaux à cet égard, car de leur bilan et de la durée des impacts négatifs dépendra le comportement des générations suivantes. Il ne faut jamais oublier que l'écosystème forestier peu anthropisé est particulièrement efficient mais vulnérable. La conséquence est que toute intensification doit être raisonnée, en ne confondant pas foresterie semi-intensive et ligniculture intensive, qui ne relèvent pas des mêmes concepts.

H. PERSPECTIVES

H1. DISPOSER D'ÉCOSYSTÈMES DE RÉFÉRENCE POUR IDENTIFIER LES DÉRIVES ET LA DURÉE DES IMPACTS

La longévité des écosystèmes forestiers n'est pas un facteur simple à prendre en compte objectivement, mais le changement climatique contraint à faire des hypothèses sur le long terme. Les observations portent le plus souvent sur des durées inférieures à 10 ans après la coupe à blanc ne mettant en évidence que des effets sur les court et moyen termes. Cela est évidemment insuffisant, car la restauration totale peut demander plus de temps, voire ne jamais exister. Les séries chronologiques sont souvent utilisées, mais toutes choses doivent être égales par ailleurs, sauf la variable testée, ce qui est le plus souvent impossible à vérifier, voire inexact (exemple gradients climatiques, ou gradients de pollutions atmosphériques).

Il convient donc, soit de suivre des écosystèmes dans des observatoires suivis sur le long terme, soit de parfaitement repérer des écosystèmes cibles. Ces observatoires permettent de disposer de bases de données d'excellente qualité, utilisées pour modéliser et simuler des dynamiques temporelles et identifier les effets à long terme. Sur quelles données reposerait la reconnaissance collective des changements climatiques sans la décision éclairée de Charles KEELING, de suivre dès 1958 les teneurs en CO₂ de la basse atmosphère, sur le flanc du volcan Mauna Loa à Hawaï ? Soixante ans de suivi continu est quasiment unique... et pourtant relativement modeste par rapport à la longévité des écosystèmes forestiers !

Le débat est récurrent en France se traduisant par une extrême difficulté pour affecter les moyens indispensables au suivi à long terme d'écosystèmes. Plusieurs structures existent cependant pour les favoriser : le GIS Sols, le GIP Ecofor, l'Alliance pour l'environnement Allenvi et la plateforme Anaee pour l'étude des écosystèmes. À notre connaissance aucun suivi de coupe à blanc n'existe en France.

H2. CHANGER DE PARADIGME DANS UN SYSTÈME LONGÉVIF, LOURD EN INERTIE : VERS UNE MULTIFONCTIONNalité ACTIVE

La prise en compte d'une multifonctionnalité active s'entend ici dans le cadre d'une forêt française métropolitaine diverse, dont une partie importante est cultivée (la partie Outre-mer qui représente plus de 8 millions d'hectares n'est pas abordée). La récolte de bois est et restera un service important de l'écosystème forestier pour la société. Le biomatériau bois est plutôt abondant en France et valorisable sans mise en cause de la pérennité des forêts, à condition de respecter les caractéristiques intrinsèques de l'écosystème. La récolte actuelle totale incluant l'autoconsommation concerne entre 50 et 60 % de la production biologique nette estimée par l'IGN-IFN à environ 85 millions de m³ ; 10 % supplémentaires peuvent être mobilisés, en y ajoutant une décapitalisation raisonnable, en particulier dans le tiers de la forêt privée actuellement sous exploitée. La vigilance s'impose car les solutions les plus simples sont souvent privilégiées, par exemple de sur-récolter là où la forêt est déjà la plus sollicitée. Il

faut cependant noter que le lourd déficit de la filière provient surtout de l'aval, hors du propos du présent document. Pour ce point spécifique la récolte supplémentaire ne résoudra rien. Cependant, les effets de l'aval de la filière sont à considérer à au moins deux égards : (i) la transformation néglige une partie significative de la production feuillue dont le hêtre et, (ii) les gros bois y compris résineux, inadaptés aux *canters* actuels ne sont que peu traités en France. Les conséquences sont que les propriétaires se désintéressent du hêtre et que la récolte de bois de diamètre moyen, donc relativement jeunes, contraint plus l'écosystème que celle de gros bois, par les exportations et la fréquence des interventions, généralement mécanisées en peuplement résineux.

La forêt française métropolitaine actuelle résulte de concepts et priorités définies plusieurs dizaines d'années auparavant, dans une économie post Seconde Guerre mondiale, avec une filière forêt-bois exsangue, une agriculture en pleine mutation et une société en pleine transformation.

Les objectifs ont changé sous l'effet de contraintes nouvelles *e.g.* besoin en matériau bois, prise en compte de services environnementaux multiples, changement du contexte socio-économique avec en particulier une forte modification de la ruralité (45 % de ruraux en 1950, 20 % actuellement suivant le zonage en unités urbaines de l'Insee, décidé à la suite du recensement de 1954), mutations en faveur de propriétaires dont les activités sont éloignées du terrain, mécanisation se développant très rapidement, changement climatique... Les traitements en taillis ou en taillis sous futaie, puis leur conversion en futaie équienne ou leur transformation en plantations résineuses, les plantations sur sol agricole des années 1950 doivent évoluer : 70 ans après, les produits sont

appréciés mais les méthodes pour les obtenir ne correspondent plus nécessairement au standard sociétal actuel.

Ceci est particulièrement vrai dans le Morvan où la multifonctionnalité active concerne les principes classiques de la foresterie durable (BARTHOD, 2015), mais beaucoup plus équilibrés pour satisfaire les intérêts multiples de la vie locale, ruralité dont la néo-ruralité, histoire, culture, tourisme. La Charte forestière du PNR du Morvan et son « *fil rouge des paysages* » détaille parfaitement ces attendus.

Les transformations ne peuvent être brutales, mais l'époque est parfaitement ad hoc pour initier les évolutions à mettre en place dans les décennies à venir. La masse de connaissances acquises au cours de cette période permettra de guider les mutations, à condition que leur transfert, incluant les stades de généralisation, d'adaptation et de démonstration soit mieux respecté qu'il ne l'est actuellement.

H3. FAIRE DU MORVAN UNE ZONE D'EXPÉRIMENTATION DANS LE DOMAINE DE LA GESTION MULTIFONCTIONNELLE ET DURABLE DE VERSANTS BOISÉS, OÙ LA PROPRIÉTÉ EST PRIVÉE ET DE FAIBLE DIMENSION

Les travaux actuels permettent déjà de fixer les limites écologiques de l'exploitation forestière dans la zone du Morvan. Cependant prévoir avec précision et pour une situation donnée, l'ensemble des conséquences d'une coupe à blanc de taille donnée, sur les court et long termes, et pour des échelles allant de la parcelle unitaire au bassin versant, demeure une gageure, dans la mesure où cela signifierait que les modèles de prédiction du

comportement d'écosystèmes après un aléa et/ou traumatisme sont disponibles... ce qui est loin d'être le cas.

Dans ces conditions, et pour affirmer un des rôles du PNR du Morvan, outre les recommandations actuelles, pourquoi ne pas entreprendre une démarche nouvelle, expérimentale sur la gestion forestière multipropriétaire et multifonctionnelle active, prenant en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux actuels de la gestion durable ?

Cette approche dans les prérogatives d'un PNR, devrait servir de cas type, recueillant l'adhésion des acteurs, servant de démonstration et répondant à des préoccupations dépassant le seul Morvan.

L'expérimentation de longue durée porterait sur l'observation d'un bassin versant complet, dans la structure de propriété privée représentative du Morvan ; de nombreux paramètres biophysiques (biologiques, physiques et géochimiques) et socio-économiques y seraient observés en intégrant toutes les échelles spatiales et temporelles.

L'objectif est double :

- acquérir des connaissances déficitaires spécifiques (indicateurs locaux des seuils environnementaux conduisant à la dégradation des services écosystémiques) ou plus génériques (échelles spatiale et temporelle, temps longs).
- disposer d'une plateforme de formation / démonstration, indispensable pour la communication et le transfert des savoir-faire. Il est incontestable que les connaissances sont déficitaires, mais appliquer ce qui est acquis en temps réel permettrait de résoudre bon nombre de problèmes.

La démarche est complexe et nécessite un cahier des charges rigoureux, recevant l'aval des différents acteurs. L'objectif est de montrer qu'une alternative existe à la gestion actuelle.

- les intérêts de chacun sont respectés : la démarche inclusive est indispensable pour gérer l'environnement morcelé, sans spolier les différents acteurs, dans un système où la connaissance est largement insuffisante,
- les objectifs de la multifonctionnalité active sont définis clairement,
- la démarche est inter voire transdisciplinaire, incluant sciences biotechniques et sciences sociales,
- l'échelle territoire est indispensable pour des conséquences dépassant très largement le cadre individuel : sans remettre en cause la propriété privée, tout ce qui a trait à l'environnement dépasse largement ce cadre, et doit pouvoir être géré activement,
- les courts et longs termes sont envisagés,
- la priorisation des aides pour les matériels et les infrastructures est identifiée,
- les avantages peuvent être réellement évalués.

La participation à un dispositif de recherches tel le projet d'une Zone Atelier serait très positive à cet égard, dans un territoire qui possède des atouts importants : un diagnostic social, économique, écologique et environnemental très avancé ; une charte forestière homologuée ; une couverture Lidar réalisée ; une communication active bien rodée ; un ensemble d'acteurs de la recherche et du développement menant depuis longtemps des travaux sur le territoire. Le projet ZAMO est présenté en annexe III.

La définition du cahier des charges est classique :

- mise en place d'un comité d'initiation du projet,
- définition de l'assiette de la zone expérimentale,
- définition des objectifs de l'étude et des attendus,
- définition des méthodes et des paramètres du suivi,
- enquête auprès des propriétaires afin d'analyser les positions,
- identifications des acteurs dans une approche participative,
- recherche de financement,
- mise en œuvre du projet,
- suivi et résultats même partiels partagés en temps réel.

Concernant cette problématique très globale des coupes rases, il convient de rappeler les responsabilités des acteurs forestiers qui ont accepté une charte forestière, des communes qui doivent faire respecter les bonnes pratiques d'exploitation sylvicoles adoptées en conseil Syndical du Parc du Morvan, des habitants, qui en tant que citoyens ont un droit de questionnement et de pétition ! Mais surtout il faudrait que se mettent en place, en tout point de ce territoire, des lieux de rencontres pour échanger, dialoguer et établir des règles respectueuses de l'intérêt de chacun, dans le droit fil de la démarche initiée lors des deniers Entretiens de Bibracte en 2019 : *Faire monde commun.*

Ce travail est l'occasion de dépasser le seul cadre des coupes à blanc, puisqu'il apparaît que la forêt morvandelle est à un tournant, prenant en compte l'héritage du passé et adoptant de manière volontariste des objectifs actualisés pour une gestion territoriale durable, multifonctionnelle et active.

Les conclusions de ce rapport montrent que la gestion du massif forestier pour le développement durable du territoire du Morvan nécessite une démarche novatrice de la part de l'ensemble des acteurs socio-économiques. Cette démarche plus complexe que l'actuelle sera coordonnée, interdisciplinaire et basée sur une forte expertise dans tous les secteurs.

Le PNR a un rôle important à jouer dans ce projet.



Figure 31. Un sentier de randonnée aux alentours du site de Bibracte, dans un décor bucolique de forêt feuillue.

REMERCIEMENTS

Le Conseil scientifique du PNR Morvan remercie vivement les trois relectrices et les deux relecteurs externes du rapport préparatoire à la saisine « Coupes à blanc », dont les remarques constructives ont permis l'amélioration significative du manuscrit initial.

Que soient donc remerciés :

Madame Marie-Cécile DECONNINCK, Directrice Adjointe du CNPF Bourgogne Franche-Comté, 18 Boulevard Eugène Spuller, 21000 Dijon

Madame Christine DELEUZE, Directrice du Pôle RDI de l'ONF, Région Bourgogne Franche-Comté, 21 Rue du Muguet, 39100 Dole

Madame Marion GOSSELIN, Ingénieur de Recherche à l'Inrae, Domaine des Barres, 45290 Nogent-sur-Vernisson

Monsieur Philippe AMIOTTE-SUCHET, Maître de Conférences, UMR Biogéosciences, Université de Bourgogne, 6 bd Gabriel, 21000 Dijon

Monsieur Pierre PACCARD, Référent Forêts à la Fédération Nationale des Parcs Naturels Régionaux, Chargé de mission au PNR des Bauges, Avenue Denis Therme, 73630 Le Chatelard

Le Conseil scientifique du PNR Morvan remercie Madame Soraya BENNAR, Directrice adjointe du CNPF Bourgogne Franche-Comté, et Monsieur Damien MARAGE, de la DREAL Bourgogne Franche-Comté, pour la mise à disposition de données ou informations relatives au Morvan.

Ce travail collectif a mobilisé plusieurs chargés de mission du PNR Morvan pour la mise à disposition des données et la vérification du document, qu'ils soient remerciés : Théo DAMASIO, chargé de missions forêts - filière bois, Céline DAVOT, chargée de missions SIG - Observatoire - centre de ressources, Laurent PARIS, responsable du pôle ressources naturelles et Daniel SIRUGUE, conseiller scientifique. Merci à Michelle CORSON (Editor du Jour Rennes) et Michael CORSON pour la relecture du résumé en anglais.

Membres du Conseil scientifique du Parc naturel régional du Morvan

Corinne BECK (Archéologie - histoire médiévale)
co-Présidente

Caroline DARROUX (Ethnologie)

Alain DELAVEAU (Agronomie - Paysages)

Christian DORET (Aménagement du territoire)

Vincent GODREAU (Forêt, Environnement, Biodiversité)

Roger GOUDIARD (Agroéconomie)

Vincent GUICHARD (Archéologie)

Sylvie GRANGE (Médiation scientifique)

Isabelle JOUFFROY-BAPICOT (Paléoécologie)

Pierre LEGER (Patrimoine oral)

Sophie MONTUIRE (Biodiversité Écologie Évolution),

Patrice NOTTEGHEM (Écologie)

Jacques RANGER (Sols et Écosystèmes Forestiers)

Stanislas SIZARET (Géologie)

Élisabeth REMY (Sociologie)

Jean VIGREUX (Histoire contemporaine)
co-Président

LITTÉRATURE CITÉE

- ACHAT D.L., DELEUZE C., LANDMANN G., POUSSE N., RANGER J. & AUGUSTO L. 2015a. Quantifying environmental consequences of residue harvesting in forest ecosystems – a meta-analysis. *For. Ecol. Manag.* 348: 124-141.
- ACHAT D.L., FORTIN, M., LANDMANN G., RINGEVAL, L. & AUGUSTO L. 2015b. Forest soils carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Sci. Rep.* 5: 15991.
- ADAMSON J.K., HORNUNG M., PYATT D.G. & ANDERSON A.R. 1987. Changes in solute chemistry of drainage waters following the clear-felling of a Sitka spruce plantation. *Forestry* 60(2): 165-177.
- AHTIAINEN M. 1992. The effects of forest clear-cutting and scarification on the water quality of small brooks. *Hydrobiologia* 243: 465-473.
- AMIOTTE-SUCHET P. *et al.* 2011. Impact des essences et des pratiques forestières, sur la géochimie des eaux de ruisseaux du Morvan. Rapport interne Université de Bourgogne.
- ANDERSON R. 2003. Open ground in upland forests : a review of its potential as wildlife habitat and appropriate management methods. 69 p.
- ANDRIANARISOA K.S., ZELLER B., POLY F., SIEGENFUHR H., BIENAIMÉ S., RANGER J. & DAMBRINE E. 2010. Control of nitrification by tree species in a common garden experiment. *Ecosystems* 13(8): 1171-1187.
- ARNOULD P. & AMMON LOHOU C. 1991. Modes et Forêts. *La Forêt Privée* 197: 70-88.
- ARROUAYS D. & RANGER J. 2014. La qualité des sols forestiers face aux changements globaux. *Rev. For. Française* 4: 407-412.
- ASH A. N., BRUCE R. C., CASTANET J. & FRANCILLON VIELLOT H. 2003. Population parameters of *Plethodon metcalfi* on a 10-year-old clearcut and in nearby forest in the southern Blue Ridge Mountains. *J. Herpetol.* 37: 445-452.
- AUBERTIN G.M. & PATRIC J.H. 1972. Quality water from clearcut forest land. *The Northern Logger and Timber Processer* 20(8): 14-15, 22-23, illus.
- AUGUSTO L., BONNAUD P. & RANGER J. 1998. Impact of tree species on forest soil acidification. *For. Ecol. Manag.* 105(1-3): 67-78.
- AUGUSTO L., RANGER J., BINKLEY D. & ROTHE A. 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Ann. For. Sci.* 59(3): 233-253.
- BAATH E., FROSTEGARD A., PENNANEN T. & FRITZE H. 1995. Microbial community structure and pH response in relation to soil organic matter quality in wood-ash fertilized, clear-cut or burned coniferous forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 27(2): 229-240.
- BADEAU V., DAMBRINE E. & WALTER C. 1999. Propriétés des sols forestiers français : Résultats du premier inventaire systématique. *Étude et Gestion des Sols* 6(3): 165-179.
- BÄCKMAN J.S.K., KLEMEDTSSON Å.K., KLEMEDTSSON L. & LINDGREN P.E. 2004. Clear-cutting affects the ammonia-oxidising community differently in limed and non-limed coniferous forest soils. *Biol. Fertil. Soils* 40: 260-267.
- BALLARD R. 1977. Effect of slash and soil removal on the productivity of second rotation Radiata pine on a pumice soil. *N. Z. J. For. Sci.* 8(2): 248-258.
- BALLARD R. & MASON E. 1978. Windrowing is a useful tool but... *Forest Industries Review* 9(5): 35-36.
- BARG A.K. & EDMONDS R.L. 1999. Influence of partial cutting on site microclimate, soil nitrogen dynamics, and microbial biomass in Douglas-fir stands in Western Washington. *Can. J. For. Res.* 29(6): 705-713.
- BARKER J.S., SIMARD S.W., JONES M.D. & DURALL D.M. 2013. Ectomycorrhizal fungal community assembly on regenerating Douglas-fir after wildfire and clearcut harvesting. *Oecologia* 172: 1179-1189.
- BARTHOD C. 2015. La multifonctionnalité des forêts entre discours et pratiques : illusion ou réalité à assumer ? *Rev. For. Fr.* LXVII 4: 293-319.
- BERDEN M., NILSSON I. & NYMAN P. 1997. Ion leaching before and after clear-cutting in a Norway spruce stand – effects of long-term application of ammonium nitrate and superphosphate. *Water Air Soil Pollut.* 93: 1-26.
- BIBBY C.J., PHILLIPS B.N. & SEDDON A.J.E. 1985. Birds of restocked conifer plantations in Wales. *J. Appl. Ecol.* 22: 619-633.

- BINKLEY D. & BROWN C.T. 1993. Forest practices as nonpoint sources of pollution in North-America. *Water Resour. Bull.* 29(5): 729-740.
- BOCK M.D. & VAN REES K.C.J. 2002. Forest harvesting impacts on soil properties and vegetation communities in the Northwest Territories. *Can. J. For. Res.* 32(4): 713-724. doi.org/10.1139/x02-014
- BONNAUD P., SANTENOISE Ph., TISSERAND D., NOURRISSON G. & RANGER J. 2019. Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched water table. *For. Ecol. Manag.* 437: 380-395.
- BONNEAU M., DAMBRINE É., NYS C. & RANGER J. 1987. L'acidification des sols. *Bull. Ecol.* 18(3): 127-136.
- BONNEAU M., SLAK M.F., SURAN J.C., LEGOUT A. & RANGER J. 2011. Un exemple de l'effet du régime de traitement sur l'humus et la richesse du sol en éléments nutritifs. *Rev. For. Française* LXIII 6: 683-690.
- BORMANN F.H., LIKENS G.E., SICCAMI T.G., PIERCE R.S. & EATON J.S. 1974. The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hubbard Brook. *Ecol. Monogr.* 44(3): 255-277.
- BOUCHON J., NYS C. & RANGER J. 1985. Cubage, biomasse et minéralomasse : comparaison de trois taillis simples des Ardennes primaires. *Acta Oecol., ser. Oecol. Plant.* 6(1): 53-72.
- BOUGET C., BRUSTEL H., NOBLECOURT T. & ZAGATTI P. 2019. Les Coléoptères saproxyliques de France. Catalogue écologique illustré. Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 744 p.
- BROUAT C., MEUSNIER S. & RASPLUS J.Y. 2004. Impact of forest management practices on carabids in European fir forests. *Forestry* 77(2): 85-97.
- BROWN A.E., ZHANG L., MCMAHON T.A., WESTERN A.W. & VERTESSY R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. Hydrol.* 310(1-4): 28-61.
- BRUSSAARD L. & VAN FAASSEN H.G. 1994. Effects of compaction on soil biota and soil biological processes. In : STONE B.D. & VAN OUYVERKERK C. (eds) Soil compaction and crop production. Chapter 10: 215-235.
- BUÉE M. MAURICE J.P., ZELLER B., ANDRIANARISOA S., RANGER J., COURTECUISSÉ R., MARCAIS B. & LE TACON F. 2011. Influence of tree species on richness and diversity of epigeous fungal communities in a French temperate forest stand. *Fungal Ecol.* 4(1): 22-31.
- BURNS P.A. & MURDOCK P.S. 2005. Effects of a clearcut on the net rates of nitrification and mineralization in a Northern hardwood forest, Catskill Mountains, NY USA. *Biogeochemistry* 72: 123-146.
- CAPOWIEZ Y, BOIZARD H., BOTTINELLI N. & RANGER J. 2015. Capacity of earthworms to restructure compacted soils. Colloque Regeneration of compacted forest soils, Osnabrück, (Germany). 29 octobre 2015.
- CATTELOT A.L. 2020. La forêt et la filière bois à la croisée des chemins : l'arbre des possibles. Rapport au gouvernement. 220 p.
- CHANG S.X., PRESTON C.M. & WEETMAN G.F. 1995. Soil microbial biomass and microbial and mineralizable N in a clear-cut chronosequence on Northern Vancouver Island, British Columbia. *Can. J. For. Res.* 5: 1595-1607.
- CHANTIER M., ALLAIN C., LERAT D. & SIRUGUE D. 2008. Étude de la population nicheuse de Bécasse des bois *Scolopax rusticola* en Morvan. *Rev. sci. Bourgogne-Nature* 8: 125-138.
- CHAUVET E., FERREIRA V., GILLER P.S., MCKIE B.G., TIEGS S.D., WOODWARD G., ELOSEGI A., DOBSON M., FLEITUCH T., GRAÇA M.A.S., GULIS V., HLADYZ S., LACOURSIÈRE J.O., LECERF A., POZO J., PREDÁ E., RIIPINEN M., RIȘNOVEANU G., VADINEANU A., VOUGHT L.B.M. & GESSNER M.O. 2016. Litter decomposition as an indicator of stream ecosystem functioning at local-to-continental scales: insights from the European RivFunction project. *Advances in Ecol. Res.* 55: 99-182.
- CLINTON B.D., VOSE J.M., KNOEPP J.D. & ELLIOTT K. 2003. Stream nitrate response to different burning treatments in southern appalachian forests. P 174-181 In : GALLEY KEM, KLINGER R.C. & SUGIHARA N.G. (eds.) proceed. 5th Conf on Fire Ecology, Prevention, Management. Publ. N°13 Tall Timbers Research Station Talabassee, FL.
- COATS R.N. & MILLER T.O. 1981. Cumulative silvicultural impacts on watersheds: a hydrological and regulatory dilemma. *Environn. Manag.* 5: 147-160.

- CORTINA J. & VALLEJO V.R. 1994. Effects of clearfelling on forest floor accumulation and litter decomposition in a radiata pine plantation. *For. Ecol. Manag.* 70: 299-310.
- Cour des comptes, 2020. La structuration de la filière forêt-bois, ses performances économiques et environnementales. Communication à la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire de l'Assemblée nationale. Communication à la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire de l'Assemblée nationale, Avril 2020, France, 151 p.
- CUCHET E., LAMISCARRE J., LE NET E., CACOT E., RICORDEAU D. & PARIS L. 2004. Le franchissement des cours d'eau et des zones humides lors des exploitations forestières dans le Parc naturel Régional du Morvan. Rapport final AFOCEL – PNRM, 6 p + annexes.
- CUMMINS T. & FARRELL E.P. 2003a. Biogeochemical impacts of clearfelling and reforestation on blanket peatland streams: I Phosphorus. *For. Ecol. Manag.* 180(1-3): 545-555.
- CUMMINS T. & FARRELL E.P. 2003b. Biogeochemical impacts of clearfelling and reforestation on blanket peatland streams: II Major ions and dissolved carbon. *For. Ecol. Manag.* 180(1-3): 557-570.
- DAHLGREN R.A. & DRISCOLL C.T. 1994. The effects of whole-tree clear-cutting on soil processes at the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire, USA. *Plant Soil* 158: 239-262.
- DAMBRINE E., BONNEAU M., RANGER J., MOHAMED A.D., NYS C. & GRAS F. 1995. Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). *In* : LANDMANN G., BONNEAU M. & KAENNEL M. (eds.) Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 233-258.
- DECEUNINCK B. & BAGUETTE M. 1991. Avifaune nicheuse de la séquence de l'Epicéa (*Picea abies*) dans la région du Plateau des Tailles (Province de Luxembourg). *Aves* 28: 189-207.
- DEQUIEDT S., KARIMI B., CHEMIDLIN PRÉVOST-BOURÉ N., TERRAT S., HERRIGUE W., DJEMIEL C., LELIEVRE M., NOWAK V., WINCKER P., JOLIVET C., SABY N.P.A., ARROUAYS D., BISPO A., FEIX I., EGLIN T., LEMANCEAU P., MARON P.A. & RANJARD L. 2020. Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français. *Étude et Gestion des Sols* 27: 51-71.
- DETROIT C., BELLENFANT S. & LERAT D. 2018. Étude de l'habitat de reproduction de la Bécasse des bois *Scolopax rusticola* dans le Morvan. *Rev. sci. Bourgogne-Franche-Comté Nature* 28: 152-167.
- DIDON-LESCOT J.F., GUILLET B. & LELONG F. 1998. Le nitrate des ruisseaux, indicateur de l'état sanitaire et des perturbations de l'écosystème forestier. Exemple du Mont Lozère. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes* 327: 107-113.
- DUMAS Y. 2016. Introducing tree species in forest and the implications for biodiversity. *In* : KRUMM F. & VÍTKOVÁ L. (eds.) Introduced tree species in European forests: challenges and opportunities. European Forest Institute: 286-293.
- DUPOUEY J.L., DAMBRINE E., DARDIGNAC C., GEORGES-LEROY M. (eds.) 2004. La mémoire des forêts. Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement », 14-16 décembre 2004. Coédité par l'ONF, l'INRA et la DRAC Lorraine, 295 p.
- DURLET P. (coord.) 2009. Eléments techniques pour la préservation des ruisseaux. Retour d'expériences du programme LIFE « Ruisseaux et têtes de bassins et faune patrimoniale associée 2004-2009. 84 p.
- DYCK W.J., COLE D.W. & COMERFORD N.B. 1994. Impacts of forest harvesting on long-term site productivity. Eds Chapman et Hall, 368 p.
- EMMETT B.A., ANDERSON J.M. & HORNUNG M. 1991. The controls on dissolved nitrogen losses following two intensities of harvesting in a Sitka spruce forest (N. Wales). *For. Ecol. Manag.* 41(1-2): 65-80.
- ENTRY J.A., STARK N.M. & LOEWENSTEIN H. 1986. Effect of timber harvesting on microbial biomass fluxes in a Northern Rocky Mountain forest soil. *Can. J. For. Res.* 16(5): 1076-1081.

- EPRON D., PLAIN C., NDIAYE F.K., BONNAUD P., PASQUIER C. & RANGER J. 2016. Effects of compaction by heavy traffic on soil fluxes of methane and carbon dioxide in a temperate broadleaved forest. *For. Ecol. Manag.* 382 : 1-9.
- FISHER R.F. & BINKLEY D. 2000. Ecology and management of forest soils. Ed. J. Wiley & Sons, 3rd edition, New-York, 489 p.
- FLORENCE R.G. 1965. Decline of old-growth redwood forests in relation to some microbiological processes. *Ecology* 46(1-2): 52-64.
- FORMAN R.T.T. 1995. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge, Angleterre, 656 p.
- FORMAN R.T.T. & GODRON M. 1986. Landscape Ecology. Ed. J. Wiley & Sons, New York, 620 p.
- FORGE T.A. & SIMARD S.W. 2001. Structure of nematode communities in forest soils of southern British Columbia: relationships to nitrogen mineralization and effects of clearcut harvesting and fertilization. *Biol. Fertil. Soils* 34: 170-178.
- FRANK S.C., STEYAERT S.M.J.G., SWENSON J.E., STORCH I., KINDBERG J., BARCK H. & ZEDROSSER A. 2015. A "clearcut" case? Brown bear selection of coarse woody debris and carpenter ants on clearcuts. *For. Ecol. Manag.* 348: 164-173.
- FRANKLIN J.F. & DEBELL D.S. 1973. Effects of various harvesting methods on forest regeneration. In : HERMANN R.K. & LAVENDER D.P. (eds.) Proceedings of Symposium on Even Aged Management. School of Forestry, Oregon State University, Corvallis: 29-57.
- FRAZER D.W., MCCOLL J.G. & POWERS R.F. 1990. Soil nitrogen mineralization in a clearcutting chronosequence in a Northern California conifer forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(4): 1145-1152.
- FREEDMAN B. 1995. Environmental ecology. The ecological effects of pollution, disturbances and other stresses. Academic Press, San Diego, California, 606 p.
- GAUQUELIN X. (coord.) 2010. Guide de gestion des forêts en crise sanitaire. ONF-IDEF, 100 p.
- GENAY G. 2002. Conséquences de la tempête du 26 décembre 1999 sur la chimie des ruisseaux forestiers d'un secteur des basses Vosges gréseuses (Lorraine). Rapport stage MST Université de Rouen. 25 p.
- GODREAU V. 2017. La Bondrée apivore (*Pernis apivorus*). In : EPOB (coord.) Atlas des oiseaux nicheurs de Bourgogne. *Rev. sci. Bourgogne-Nature* Hors-série 15, 542 p.
- GONDARD H., ROMANE F., SHATER Z., GRANDJANNY M. & RENAUX A. 2004. Conséquences d'une coupe rase ou d'une éclaircie sur la richesse spécifique et le mode de dissémination des espèces végétales dans des forêts de Pin d'Alep du Var (Sud de la France). *Forêt méditerranéenne* XXV(1): 3-14.
- GOSSELIN M. & PAILLET Y. 2017. Mieux intégrer la biodiversité dans la gestion forestière. Nouvelle édition. Editions Quae, 2^e édition, 159 p.
- GÖTMARK F., PALTTO H., NORDEN B. & GÖTMARK E. 2005. Evaluating partial cutting in broadleaved temperate forest under strong experimental control: short-term effect on herbaceous plants. *For. Ecol. Manag.* 214(1-3): 124-141.
- GOUTAL N., PARENT F., BONNAUD P., DEMAISON J., NOURRISSON G., EPON D. & RANGER J. 2012. Soil CO₂ concentration and efflux as affected by forest heavy traffic in northeast France. *Eur. J. Soil Sci.* 63(2): 261-271. Doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01423.x
- GOUTAL-POUSSE N., LAMY F., RANGER J. & BOIVIN P. 2016. Structural damage and recovery as determined by the colloidal constituents in two forest soils compacted by heavy traffic. *Eur. J. Soil Sci.* 67(2): 160-172.
- GRENON F., BRADLEY R.L., JOANISSE G., TITUS B.D. & PRESCOTT C.E. 2004. Mineral N availability for conifer growth following clearcutting : responsive versus non responsive ecosystems. *For. Ecol. Manag.* 188(1-3): 305-316.
- GUÉROLD F. 1992. L'acidification des cours d'eau : impact sur les peuplements de macroinvertébrés benthiques – application au massif Vosgien. Thèse Univ. Paul Verlaine 263 p.
- GUSTAFSSON L., HANNERZ M., KOIVULA M., SHORHOVA E., VANHA-MAJAMAA I. & WESLIEN J. 2020. Research on retention forestry in Northern Europe. *Ecol. Process.* 9: 3, 13 p.
- HART G.E., DEBYLE N.V. & HENNES R.W. 1981. Slash treatment after clearcutting Lodgepole pine affects nutrients in soil water. *J. For.* 79(7): 446-450.

- HEINONSALO J. & SEN R. 2007. Scots pine ectomycorrhizal fungal inoculum potential and dynamics in podzol-specific humus, eluvial and illuvial horizons one and four growth seasons after forest clear-cut logging. *Can. J. For. Res.* 37(2): 404-414.
- HERNANDEZ O., MERRIT R.W. & WIPFLI M.S. 2005. Benthic invertebrate community structure is influenced by forest succession after clearcut logging in southeastern Alaska. *Hydrobiologia* 533: 45-59.
- HÖGBOM L., NOHRSTEDT H.Ö., LUNSTRÖM H. & NORDLUND S. 2001. Soil conditions and regeneration after clear felling of a *Pinus sylvestris* L. stand in a nitrogen experiment, central Sweden. *Plant Soil* 233: 241-250.
- HOMYACK J.A. & HAAS C.A. 2009. Long-term effects of experimental forest harvesting on abundance and reproductive demography of terrestrial salamanders. *Biol. Conserv.* 142(1): 110-121.
- HORELLOU A. & SIRUGUE D. 2007. Influence des types de boisement sur la diversité spécifique des insectes Coléoptères en Morvan. Exemple des sites diurnes d'hivernage de la Bécasse des bois (*Scolopax rusticola*, Linné, 1758). *Rev. sci. Bourgogne-Nature* 5: 85-98.
- HORNBECK J.W., MARTIN Q.W., PIERCE R.S., BORMANN F.H., LIKENS G.E & EATON J.S. 1986. Clearcutting northern hardwoods: effects on hydrologic and ion budgets. *For. Sci.* 32(3): 667-686.
- HORNBECK J.W., SMITH C.T., MARTIN Q.W., TRITTON L.M. & PIERCE R.S. 1990. Effects of intensive harvesting on nutrient capitals of three forests in New England. *For. Ecol. Manag.* 30(1-4): 55-64.
- HUBER C., WEIS W., BAUMGARTEN M. & GÖTTLEIN A. 2004. Spatial and temporal variation of seepage water chemistry after felling and small scale clear-cutting in a N-saturated Norway spruce stand. *Plant Soil* 267: 23-40.
- JACTEL H. & BARBARO L. 2004. Projet ISLANDES : Évaluation de la méthode des îlots feuillus pour restaurer la biodiversité de l'écosystème simplifié de pin maritime des Landes de Gascogne et améliorer sa résistance aux insectes ravageurs et champignons pathogènes. Rapport final programme biodiversité et gestion forestière GIP Ecofor.
- JANDL R., SPATHELF P., BOLTE A. & PRESCOTT C. 2019. Forest adaptation to climate change—is non-management an option? *Ann. For. Sci.* 76: 48, 13 p. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0827-x>
- JERABKOVA L., PRESCOTT C.E., TITUS B.D., HOPE G.D. & WALTERS M.B. 2011. A meta-analysis of the effects of clear-cut and variable-retention harvesting on soil nitrogen fluxes in boreal and temperate forests. *Can. J. For. Res.* 41(9): 1852-1870.
- JOHNSON C.E. 1990. The role of soil processes in accelerated leaching of dissolved cations from watersheds following forest clear-cutting. Congrès rep. Tchecoslovaquie MOST.
- JOHNSTON B. & FRID L. 2002. Clearcut logging restricts the movement of terrestrial Pacific giant salamanders (*Dicamptodon tenebrosus* Good). *Can. J. Zool.* 80(12): 2170-2177.
- JOLIVET C. 2000. Le carbone organique des sols des landes de Gascogne : variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse Université de Dijon, 313 p.
- JONES M.D., DURALL D.M. & CAIRNEY J.W.G. 2003. Ectomycorrhizal fungal communities in young forest stands regenerating after clearcut logging. *Tansley Review. New Phytol.* 157: 399-422.
- JONES M.D., TWIEG B.D., WARD V., BARKER J., DURALL D.M. & SIMARD S.W. 2010. Functional complementarity of Douglas-fir ectomycorrhizas for extracellular enzyme activity after wildfire or clearcut logging. *Funct. Ecol.* 24(5): 1139-1151.
- JOUFFROY-BAPICOT I. 2010. Évolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne - France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique. Variations climatiques et impact des activités anthropiques. Sciences de l'Homme et Société. Université de Franche-Comté. Vol. 1 Texte, 373 p. ; Vol. 2 Annexes, 43 p.
- JULIEN J.L., CHARLET L. DAMBRINE E., DELVAUX B., DUFÉY J., FARDEAU J.C., LE CADRE E., TESSIER D. 2005. L'acidification des sols. In : GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J. & MOREL J.L. (Ed.) Sols et Environnement. Ed. Dunod, Paris: 516-537.

- JUSSY J.H., COLIN-BELGRAND M. & RANGER J. 2000. Production and root uptake of mineral nitrogen in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the Beaujolais Mounds. *For. Ecol. Manag.* 128(3): 197-209.
- KALBITZ K., GLASER B. & BOL R. 2004. Clear-cutting of a Norway spruce stand : implications for controls on the dynamics of dissolved organic matter in the forest floor. *Eur. J. Soil Sci.* 55(2): 401-413.
- KATZENSTEINER K. 2003. Effects of harvesting on nutrient leaching in a Norway spruce (*Picea abies* Karst.) ecosystem on a lithic leptosol in the Northern Limestone Alps. *Plant Soil* 250: 59-73.
- KEENAN R.J. & KIMMINS J.P. 1993. The ecological effect of clear-cutting. *Envir. Rev.* 1(2): 121-144.
- KING D.I. & DEGRAAF R.M. 2000. Bird species diversity and nesting success in mature, clearcut and shelterwood forest in northern New Hampshire, USA. *For. Ecol. Manag.* 129(1-3): 227-235.
- KLENNER W. & SULLIVAN T.P. 2003. Partial and clear-cut harvesting of high-elevation spruce-fir forests: implications for small mammal communities. *Can. J. For. Res.* 33(12): 2283-2296.
- KLENNER W. & SULLIVAN T.P. 2009. Partial and clearcut harvesting of dry Douglas-fir forests: implications for small mammal communities. *For. Ecol. Manag.* 257(3): 1078-1086.
- KLIMO E. & GRUNDA B. 1989. Effect of clear-felling on the condition of surface humus in forest soils. *Ekológia (ČSSR)* 8(2): 203-210.
- LANDMANN G. & NIVET C. (coord.) 2014. Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. ADEME, Angers ; Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Paris. GIP Ecofor. Rapport final, 243 p.
- LANDMANN G., AUGUSTO L., POUSSE N., GOSSELIN M., CACOT E., DELEUZE C., BILGER I., AMM A., BILOT N., BOULANGER V., LEBLANC M., LEGOUT A., PITOCCHI S., RENAUD J.-P., RICHTER C., SAINT-ANDRE L., SCHREPPER L. & ULRICH E. 2018. Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les menus bois et les souches. ECOFOR, Paris ; ADEME, Angers, 50 p.
- LARRÈRE R. & NOUGARÈDE O. 1990. La forêt dans l'histoire des systèmes agraires : de la dissociation à la réinsertion. *Cahiers d'économie et sociologie rurales* 15-16: 12-38.
- LAURÉN A., FINÉR L., KOIVULASO H., KOKKONEN T., KARVONEN T., KELLOMÄKI S., MANNERKOSKI H. & AHTIAINEN M. 2005. Water and nitrogen processes along a typical water flowpath and streamwater exports from a forested catchment and changes after clear-cutting : a modelling study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9(6): 657-674.
- LAVABRE J. & ANDRÉASSIAN V. (coord.) 2000. Eaux et forêts. La forêt : un outil des gestion des eaux ? Cemagref Editions, 116 p.
- LECERF A. 2014. Impact de la sylviculture sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes lotiques Programme SYLECOL. Rapport final, 58 p.
- LEFORT P. & GROVE S. 2009. Early responses of birds to clearfelling and its alternatives in lowland wet eucalypt forest in Tasmania, Australia. *For. Ecol. Manag.* 258(4): 460-471.
- LEGOUT A. 2008 Cycles biogéochimiques et bilans de fertilité minérale en hêtraies de plaine. Thèse Université Lorraine, 250 p.
- LEGOUT A., NYS C., PICARD J.F., TURPAULT M.P. & DAMBRINE E. 2009. Effect of Storm Lothar (1999) on the chemical composition of soil solutions and on herbaceous cover umus and soils (Fougères, France). *For. Ecol. Manag.* 257(3): 800-811.
- LEGOUT A., VAN DER HEIJDEN G., JAFFRAIN J., BOUDOT J.P. & RANGER J. 2016. Tree species effects on solution chemistry and major element fluxes: a case study in the Morvan (Breuil, France). *For. Ecol. Manag.* 378: 244-258.
- LEGOUT A., VAN DER HEIJDEN G., JAFFRAIN J. & RANGER J. 2016 . Tree species effects on solution chemistry and major element fluxes: a case study in the Morvan (Breuil, France). *For. Ecol. Manag.* 378: 244-258.
- LEGOUT A. *et al.* 2021. Impact des essences et des pratiques forestières, sur la géochimie des eaux de ruisseaux de rang divers. Travail en cours Inrae BEF Nancy.
- LEJON D.P.H., CHAUSSOD R., RANGER J. & RANJARD L. 2005. Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest soil (Morvan, France). *Microb. Ecol.* 50(4): 614-625.

- LEMOINE B., GELPE J., RANGER J. & NYS C. 1986. Biomasses et croissance du pin maritime. Étude de la variabilité dans un peuplement de 16 ans. *Ann. Sci. For.* 43(1): 67-84.
- LEMOINE B., RANGER J. & GELPE J. 1988. Distributions qualitative et quantitative des éléments nutritifs dans un jeune peuplement de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait). *Ann. Sci. For.* 45(2): 95-116.
- LIKENS G.E., BORMANN F.H., PIERCE R.S. & REINERS W.A. 1978. Recovery of a deforested ecosystem replacing biomass and nutrients lost in harvesting northern hardwoods may take 60 to 80 years. *Science* 199: 492-496.
- LOUMETO J.J. & BERNHARD-REVERSAT F. 1997. La biodiversité dans les plantations d'arbres à croissance rapide au Congo. *Bois et Forêts des Trop.* 253(3): 57-61.
- MALLIK A.U., NEWAZ S., MACKERETH R.W. & SHAHI C. 2011. Geomorphic changes of headwater systems 3-23 years after forest harvesting by clearcutting. *Ecosphere* 2(4): 1-14.
- MANOLIS J.C., ANDERSEN D.E. & CUTHBERT F.J. 2002. Edge effect on nesting success of ground nesting birds near regenerating clearcuts in a forest-dominated landscape. *The Auk* 119(4): 955-970.
- MARCOGLIESE D.J. & CONE D.K. 1997. Food webs: a plea for parasites. *Trends Ecol. Evol.* 12(8): 320-325.
- MARCOGLIESE D.J., BALL M. & LANKESTER M.W. 2001. Potential impacts of clearcutting on parasites on minnows in Small boreal lakes. *Folia Parasitologica* 48: 269-274.
- MARION P. & FROCHOT B. 2001. L'avifaune nicheuse de la succession écologique du sapin de Douglas en Morvan (France). *Rev. Écol. (Terre Vie)* 56: 53-79.
- MARSHALL V.G. 2000. Impacts of forest harvesting on biological processes in northern forest soils. *For. Ecol. Manag.* 133(1-2): 43-60.
- MARTIN M.L., SUSSE R. TOMASINI J., PICHERY C. & BRUCIAMACCHIE M. 2020. Les apports de la futaie irrégulière sur les différentes fonctions de la forêt. *Forêt.Nature* 156: 31-47.
- MARTY P. 2020. Insectes pollinisateurs et forêt, une histoire d'amour... CNPF-IDF, 16 p.
- MAYER M., PRESCOTT C.E., ABAKER W.E.A., AUGUSTO L., CECILLON L., FERREIRA G.W.D., JAMES J., JANDL R., KATZENSTEINER K., LACLAU J.P., LAGARINIERE J., NOUVELLON Y., PARE D., STANTURF J.A., VANGUELOVA E.I. & VERSTEDAL L. 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *For. Ecol. Manag.* 466 : 118127, 25 p.
- MCCOLL J.G. 1978. Ionic composition of forest soil solutions and effects of clearcutting. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42(2): 358-363.
- MENAB W.H. & SAUCIER J.R. 1980. Estimating quantities of windrowed forest residues. A management tool for increased biomass utilization. *Georgia For. Res. Paper* 11, 8 p.
- MELLERT K.H., KÖLLING C. & REHFUESS K.E. 1996. Stoffauswaschung aus Fichtenwaldökosystemen Bayerns nach Sturmwurf. *Forstw Cbl* 115: 363-377.
- MITCHELL G.W., WARKENTIN I.G. & TAYLOR P.D. 2009. Movement of juvenile songbirds in harvested boreal forest: assessing residency time and landscape connectivity. *Avian Conserv. Ecol.* 4(1): 5, 17 p.
- MORRIS L.A., PRITCHETT W.L. & SWINDEL B.F. 1983. Displacement of nutrients into windrows during site preparation of a flat wood forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47(3): 591-594
- MUMMEY D.L., CLARKE J.T., COLE C.A., O'CONNOR B.G., GANNON J.E. & RAMSEY P.W. 2010. Spatial analysis reveals differences in soil microbial community interactions between adjacent coniferous forest and clearcut ecosystems. *Soil Biol. Biochem.* 42(7): 1138-1147.
- MUPEPELE A.C. & DORMANN C.F. 2017. Influence of forest harvest on nitrate concentration in temperate steams. A meta-analysis. *Forests* 8(1): 5, 14 p. DOI: 103390/f8010005
- NEIRYNCK J., MIRTICHEVA S., SIOEN G. & LUST N. 2000. Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus Excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil. *For. Ecol. Manag.* 133(3): 275-286.
- NOLET Ph., KNEESHAW D., MESSIER C., BELAND M. 2017. Comparing the effects of even- and uneven-aged silviculture on ecological diversity and processes: A review. *Ecol. Evol.* 8(2): 1217-1226. DOI: 10.1002/ece3.3737

- NUGROHO R.A. 2006. Nitrification in acid coniferous forests: some soils do, some soils don't. PhD thesis Institute of Ecological Science. Vrije University Amsterdam The Netherlands, 102 p.
- NYKVIST N. 1977. Changes in the amount of inorganic nutrients in the soil after clear-felling. *Silva Fennica* 11(3): 224-229.
- NYKVIST N., GRIP H., LIANG SIM B., MALMER A. & KHIONG WONG F. 1994. Nutrient losses in forest plantation in Sabah, Malaysia. *Ambio* 23(3): 210-215.
- NZILA J.D., DELEPORTE P., BOUILLET J.P., LACLAU J.P. & RANGER J. 2004. Effects of slash management on tree growth and nutrient cycling in second-rotation *Eucalyptus* replanted sites in the Congo. In : NAMBIAR E.K.S., RANGER J., TIARKS, A. & TOMA T. (eds.) Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests. Proceedings of Workshops in Congo July 2001 and China February 2003. CIFOR. [Center for International Forestry Research], Jakarta: 15-30.
- OLSSON B.A., BENGSSON J. & LUNDKVIST H. 1996. Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. *For. Ecol. Manag.* 84: 135-147.
- PARFITT R.L., SALT G.J. & HILL L.F. 2002. Clear-cutting reduces nitrate leaching in a pine plantation of high natural N status. *For. Ecol. Manag.* 170(1-3): 43-53.
- PATOINE A., PINEL-ALLOUL B., PREPAS E.E. & CARIGNAN R. 2000. Do logging and forest fires influence zooplankton biomass in Canadian boreal shield lakes ? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57(S2): 155-164.
- PAUCHARD A. & ALABACK P.B. 2006. Edge type defines alien plant species invasions along *Pinus contorta* burned, highway and clearcut forest edges. *For. Ecol. Manag.* 223(1-3): 327-335.
- PENNANEN T., HEISKANEN J. & KORKAMA T. 2005. Dynamics of ectomycorrhizal fungi and growth of Norway spruce seedlings after planting on a mounded forest clearcut. *For. Ecol. Manag.* 213(1-3): 243-252.
- PENNOCK D.J. & VAN KESSEL C. 1997. Clear-cut forest harvesting impacts on soil quality indicators in the mixedwood forest of Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 75(1-2): 13-32.
- PERRY R.W., JENKINS J.M.A., THILL R.E. & THOMPSON F.R. 2018. Long-term effects of different forest regeneration methods on mature forest birds. *For. Ecol. Manag.* 408: 183-194.
- PHILIPPOT L., HALLIN S. & SCHLOTTER M. 2007. Ecology of denitrifying prokaryotes in agricultural soil. *Adv. Agron.* 96: 249-305.
- PIETIKÄINEN J. & FRITZE H. 1995. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration and nitrification. *Soil Biol. Biochem.* 27(1): 101-109.
- PIIRAINEN S., FINÉR L., MANNERKOSKI H. & STARR M. 2002. Effects of clearcutting on the carbon and nitrogen fluxes through podzolic soil horizons. *Plant Soil* 239: 301-311.
- PISCHEDDA D. (coord.) 2009. Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « Prosol ». Guide pratique. FCBA et ONF, 110 p.
- PISCHEDDA D. & HELOU T.E. (coord.) 2017. Pratic'sols. Guide sur la praticabilité des parcelles forestières. Guide technique. Office national des Forêts. 48 p.
- PLATTNER G. & MARAGE D. 2018. Analyse diachronique du couvert forestier par télédétection dans le Parc naturel régional du Morvan. Rapport pour la DREAL Bourgogne-Franche-Comté.
- PNR Morvan, 2018. Diagnostic territorial - projet de charte 2020-2035. 156 p.
- POPESCU V.D., PATRICK D.A., HUNTER Jr M.L. & CALHOUN A.J.K. 2012. The role of forest harvesting and subsequent vegetative regrowth in determining patterns of amphibian habitat use. *For. Ecol. Manag.* 270 : 163-174.
- POTVIN F., COURTOIS R. & BÉLANGER L. 1999. Short-term response of wildlife to clear-cutting in Quebec boreal forest : multiscale effects and management implications. *Can. J. For. Res.* 29(7): 1120-1127.
- POUSSE N., BONNAUD P., LEGOUT A., DARBOUX F. & RANGER J. 2021. Medium-term soil natural recovery after forest trafficking. Assessment by soil penetration resistance. *Soil Use Manag.* (sous presse).

- PROBST A., MASSABUAU J.-Ch., PROBST J.-L. & FRITZ B. 1990. Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides : rôle de la végétation et du substratum pour les populations de truites. Le cas des ruisseaux des Vosges. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 311, Série II: 405-411.
- RAMIREZ-COLLIO K., VERGARA P.M. & SIMONETTI J.A. 2017. Converting clear cutting into a less hostile habitat: the importance of understory for the abundance and movement of the Chestnut-throated Huet-Huet (*Pteroptochos castaneus*: Rhyncroptidae). *For. Ecol. Manag.* 384: 279-286.
- RANGER J. 2018. Les sols forestiers, spécificités et durabilité. Chapitre 7. In : BERTHELIN J., VALENTIN Chr. & MUNCH J.-Ch. (dir.) Les sols au cœur de la zone critique 1 : fonctions et services. Editions ISTE.
- RANGER J. & BONNEAU M. 1984. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. I. Le cycle biologique en forêt. *Rev. For. Française* XXXVI(2): 93-112.
- RANGER J. & BONNEAU M. 1986. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. II. Les effets de la sylviculture. *Rev. For. Française* XXXVIII(2): 105-123.
- RANGER J. & COLIN-BELGRAND M. 1996. Nutrient dynamics of chestnut tree (*Castanea sativa* Mill.) coppice stands. *For. Ecol. Manag.* 86(1-3): 259-277.
- RANGER J. & GELHAYE D. 2001. Belowground biomass and nutrient content in a 47-year-old Douglas-fir plantation. *Ann. For. Sci.* 58(4): 423-430.
- RANGER J. & LANDMANN G. 2014. Ateliers Regefor : la gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant. *Rev. For. Française* LXVI(4): 391-644.
- RANGER J., FÉLIX C., BOUCHON J., NYS C., RAVART M., BONNAUD P., BOUCHARD D., BRÉCHET C., CANTA R., GARNIER P., GELHAYE L. & DELHAYE D. 1990. Dynamique d'incorporation du carbone et des éléments nutritifs dans un taillis simple de châtaignier (*Castanea sativa* Miller). *Ann. Sci. For.* 47(5): 413-433.
- RANGER J., CUIRIN G., BOUCHON J., COLIN M., GELHAYE D. & MOHAMED AHAMED D. 1992. Biomasse et minéralomasse d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst.) de forte production dans les Vosges (France). *Ann. Sci. For.* 49(6): 651-668.
- RANGER J., MARQUES R., COLIN-BELGRAND M., FLAMMANG N. & GELHAYE D. 1995. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. *For. Ecol. Manag.* 72(2-3): 167-183.
- RANGER J., MARQUES R. & COLIN-BELGRAND M. 1997. Nutrient dynamics during the development of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stand. *Acta Oecol.* 18(2): 73-90.
- RANGER J., ANDREUX F. & DAMBRINE E. 2005. Les sols forestiers. In : GIRARD M.-C., WALTER C., REMY J.-C., BERTHELIN J. & MOREL J.-L. Sols et Environnement. Ed. Dunod, Paris: 516-537.
- RANGER J., LOYER S., GELHAYE D., POLLIER B. & BONNAUD P. 2007. Effects of the clear-cutting of a Douglas-fir plantation (*Pseudotsuga menziesii* F.) on the chemical composition of soil solutions and on the leaching of DOC and ions in drainage waters. *Ann. For. Sci.* 64(2): 183-200.
- RANGER J., GELHAYE D., BIENAIMÉ S., BONNEAU M., BONNAUD P., CALMET J.P., CALVARUSO C., FORÊT M., GELHAYE L., GÉRARD F., JAFFRAIN J., MARESCHAL L., MOUKOUMI L., NOURRISSON G., NYS C., POLLIER B., SAINT-ANDRÉ L., SICARD C., TURPAULT M.P., ZELLER B., BUÉE M., FREY-KLET P., LE TACON F., UROZ S., MAURICE J.P., AMIOTTE-SUCHET P., ANDREUX F., CHAUSSOD R., LEJON D., RANJARD L., SIMONSSON M., BERTHELIN J., BÉGUIRISTAIN T., BOUDOT J.P., KULHÁNKOVÁ A., MALLOUHI N., MUNIER-LAMY C., DELVAUX B., TITEUX H. & TRUM F. 2007. Effet de la substitution d'essence sur le fonctionnement et la durabilité des écosystèmes forestiers : l'apport des travaux pluridisciplinaires menés en forêt de Breuil Chenue – Morvan. *Rev. sci. Bourgogne-Nature* Hors-série 3: 45-68.
- RANGER J., GOUTAL-POUSSE N., BONNAUD P., BEDEL L., DAVESNE R., DEMAISON J. & NOURRISSON G. 2015. Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. 78 p.

- RANGER J., BONNAUD P., SANTENOISE Ph., NOURRISSON G., PELLETIER M., GELHAYE D. & LEGOUT A. 2021. Assessment of forest soil changes and recovery after a limited compaction, using soil solution chemistry collected by porous cup lysimeters as an indicator: two case studies of acidic environments in the plateau lorrain (France). *For. Ecol. Manag.* (soumis).
- RANJARD L., DEQUIEDT S., JOLIVET C., SABY N.P.A., THIOULOUSE J., HARMAND J., LOISEL P., RAPAPORT A., FALL S., SIMONET P., JOFFRE R., CHEMIDLIN PRÉVOST-BOURÉ N., MARON P.A., MOUGEL C., MARTIN M.P., TOUTAIN B., ARROUAYS D. & LEMANCEAU P. 2010. Biogeography of soil microbial communities: a review and a description of the ongoing french national initiative. *Agron. Sustain. Dev.* 30: 359-365. doi:10.1051/agro/2009033
- RASK M., ARVOLA L. & SALONEN K. 1993. Effects of catchment deforestation and burning on the limnology of a small forest lake in Southern Finland. *Verh. Int. Ver. Limnology* 25: 525-528.
- REICH P.B., OLEKSYN J., MODRZYNSKI J., MROZINSKI P., HOBBIE S.E., EISSENSTAT D.M., CHOROVER J., CHADWICK O.A., HALE C.M. & TJOELKER M.G. 2005. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species. *Ecol. Lett.* 8(8): 811-818.
- REYNOLDS B. & EDWARDS A. 1995. Factors influencing dissolved nitrogen concentrations and loadings in uplands streams of the UK. *Agric. Water Manag.* 27(3-4): 181-202.
- REYNOLDS B., STEVENS P.A., HUGUES S., PARKINSON J.A. & WEATHERLEY N.S. 1995. Soil chemistry impacts of conifer harvesting in welsh catchments. In : CERNÝ J., NOVÁK M., PACES T. & WIEDER R.K. (eds.) Biogeochemical monitoring in small catchments refereed papers from Biogeomon, the symposium on ecosystem behaviour: evaluation of integrated monitoring in small catchments held in Prague, Czech Republic, September 18-20, 1993. Klumwer, Dordrecht, Boston, London: 147-170 (Reprinted from *Water Air Soil Pollut.* 79(1-4): 147-170).
- ROLEK B.W., HARRISON D.J., LOFTIN C.S. & WOOD P.B. 2018. Regenerating clearcuts combined with postharvest forestry treatments promote habitat for breeding and post-breeding spruce-fir avian assemblages in the Atlantic Northern Forest. *For. Ecol. Manag.* 427: 392-413.
- ROSEN K., ARONSON J.A. & ERIKSSON H.M. 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *For. Ecol. Manag.* 83(3): 237-244.
- SCHALL P., GOSSNER M.M., HEINRICH S., FISCHER M., BOCH S., PRATI D., JUNG K., BAUMGARTNER V., BLASER S., BÖHM S., BUSCOT F., DANIEL R., GOLDMANN K., KAISER K., KAHL T., LANGE M., MÜLLER J., OVERMANN J., RENNER S.C., SCHULZE E.D., SIKORSKI J., TSCHAPKA M., TÜRKE M., WEISSER W.W., WEMHEUER B., WUBET T. & AMMER C. 2018. The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests. *J. Appl. Ecol.* 55(1): 267-278.
- SCHULZE E.D., BOURRIAUD L., BUSSLER H., GOSSNER M., WALENTOWSKI H., HESSEMÖLLER D., BOURRIAUD O. & GADOW K.V. 2014. Opinion paper : Forest management and biodiversity. *Web Ecol.* 14: 3-10.
- SEIP C.R., HODDER D.P., CROWLEY S.M. & JOHNSON C.J. 2018. Use of constructed coarse woody debris corridors in a clearcut by American martens (*Martes americana*) and their prey. *Forestry* 91(4): 506-513.
- SEYMOUR R.S. & HUNTER M. 1999. The principles of ecological forestry. In : HUNTER M. L. (Ed.) Managing biodiversity in forest ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge: 22-61.
- SIIRA-PIETIKÄINEN A. & HAIMI J. 2009. Changes in soil fauna 10 years after forest harvestings: comparison between clear felling and green-tree retention methods. *For. Ecol. Manag.* 258 (3): 332-338.
- SIIRA-PIETIKÄINEN A., PIETIKÄINEN J., FRITZE, H. & HAIMI J. 2001. Short-term response of soil decomposer communities to forest management: clear felling versus alternative forest harvesting methods. *Can. J. For. Res.* 31(1): 88-99.
- SIMON N.P.P., STRATTON C.B., FORBES G.J. & SCHWAB F.E. 2002. Similarity of small mammal abundance in post-fire and clearcut forests. *For. Ecol. Manag.* 165(1-3): 163-172.

- SLAWSKA M. & SLAWSKI M. 2009. Response of springtail communities (Hexapoda : Collembola) to attempts of clearcut silviculture improvements in Forest Promotional Complex « Lasy Mazurskie ». *Sylwan* 153(8): 534-547.
- SMOLANDER A., PRIHA O., PAAVOLAINEN L., STEER J. & MALKONEN E. 1998. Nitrogen and carbon transformations before and after clearcutting in repeatedly N-fertilized and limed forest soil. *Soil Biol. Biochem.* 30(4): 477-490.
- SNYDER K.E. & HARPER R.D. 1985. Changes in solum chemistry following clearcutting of Northern hardwoods stands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49(1): 223-228
- SPRACKLEN B.D., LANE J.V., SPRACKLEN D.V., WILLIAMS N. & KUNIN W.E. 2013. Regeneration of native broadleaved species on clearfelled conifer plantations in upland Britain. *For. Ecol. Manag.* 310: 204-212.
- ST-ONGE L. & MAGNAN P. 2000. Impact of logging and natural fires on fish communities of Laurentian shield lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57(S2): 165-174.
- STEEDMAN R.J. 2000. Effect of experimental clearcut logging on water quality in three Small boreal forest lake trout (*Salvelinus namaycush*) lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57(S2): 92-96.
- STEEDMAN R.J. & KUSHNERIUK R.S. 2000. Effect of experimental clearcut logging on thermal stratification, dissolved oxygen, and lake trout (*Salvelinus namaycush*) habitat volume in three Small boreal forest lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57(S2): 82-91.
- STEVENS P.A. & HORNUNG M. 1988. Nitrate leaching from a felled Sitka spruce plantation in Beddgelert Forest, North Wales. *Soil Use Manag.* 4(1): 2-9.
- SULLIVAN T.P. & SULLIVAN D.S. 2011. Balancing pest management and forest biodiversity : vole populations and habitat in clearcut versus variable retention harvested sites. *Crop Prot.* 30(7): 833-843.
- SULLIVAN T.P. & SULLIVAN D.S. 2016. Wildfire, clearcutting and vole populations : balancing forest crop protection and biodiversity. *Crop Prot.* 85: 9-16.
- SULLIVAN T.P. & SULLIVAN D.S. 2018. Green-tree retention and recovery of an old-forest specialist, the southern red-backed vole (*Myodes gapperi*), 20 years after harvest. *Wildl. Res.* 44(8): 669-680.
- SULLIVAN T.P., LAUTENSCHLAGER R.A. & WAGNER R.G. 1999. Clearcutting and burning of northern spruce-fir forests: implications for small mammal communities. *J. Appl. Ecol.* 36(3): 327-344.
- SWINDEL B.F., LASSITER C.J. & RIEKERK H. 1982. Effects of clearcutting and site preparation on water yields from slash pine forests. *For. Ecol. Manag.* 4(2): 101-113.
- SWITZER G.L., MOHRING D.M. & TERRY T.A. 1978. Clear-cutting vs alternative timber harvesting – stand regeneration systems: effects on soils and environment in the South. In : YOUNGBERG C.T. (ed.) Forest soils and land use. Proceed. 5th North America. For. Soils Conf. Colorado State University Fort Collins: 477-515.
- SWITZER G.L., NELSON L.E. & SMITH W.H. 1973. Effet des raccourcissements des révolutions et de la récolte de la biomasse sur la fertilité des sols. In : Colloque « Utilisation des engrais en forêt ». INRA, Paris: 355-381.
- TERRAT S., KARIMI B., DEQUIEDT S., PREVOST-BOURE C.N., HARRIGUE W., DJEMIEL CH. & RANJARD L. 2018. La caractérisation des communautés microbiennes du sol à l'échelle de la France pour évaluer l'effet de l'usage des sols. *Innovations Agronomiques* 69: 27-37.
- THOMAS R.B. & MEGAHAN W.F. 1998. Peak flow response to clear cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion. *Water Resour. Res.* 34 (12): 3393-3403.
- TILLON L. 2015. Utilisation des gîtes et des terrains de chasse par les Chiroptères forestiers, propositions de gestion conservatoire. Thèse Université de Toulouse, 303 p.
- TITUS B.D., PRESCOTT C.E., MAYNARD D.G., MITCHELL A.K., BREDLEY R.L., FELLER M.C., BEESE W.J., SEELY B.A., BENTON R.A., SENYK J.P., HAWKINS B.J. & KOPPENAL R. 2006. Post-harvest nitrogen cycling in clearcut and alternative silvicultural systems in a montane forest in coastal British Columbia. *For. Chron.* 82(6): 844-859.

- TODD B.D. & ANDREWS K.M. 2008. Response of a reptile guild to forest harvesting. *Conserv. Biol.* 22(3): 753-761.
- TODD B.D. & ROTHERMEL B.B. 2006. Assessing quality of clearcut habitats for amphibians : effects on abundances versus vital rates in the southern toad (*Bufo terrestris*). *Biol. Conserv.* 133(2): 178-185.
- VALLAURI D. & NEYROUMANDE E. 2009. Les forêts françaises : une biodiversité à la fois riche et menacée. *Responsabilité & Environnement* 53: 75-81.
- VAN BREEMEN N., MULDER J., & DRISCOLL C.T. 1983. Acidification and alkalization of soils. *Plant Soil* 75: 283-308.
- VENNETIER M., LADIER J. & REY F. 2014. Le contrôle de l'érosion des sols forestiers par la végétation, face aux changements climatiques. *Rev. For. Française* LXVI(4): 517-530.
- VERGARA P.M. 2011. Matrix-dependent corridor effectiveness and the abundance of forest birds in fragmented landscapes. *Landsc. Ecol.* 26: 1085-1096.
- VERGARA P.M. & SIMONETTI J.A. 2003. Forest fragmentation and rhinocryptid nest predation in central Chile. *Acta Oecol.* 24(5-6): 285-288.
- VEYSEY POWELL J.S. & BABBITT K.J. 2015. Despite buffers, experimental forest clearcuts impact amphibian body size and biomass. *PLoS ONE* 10(11): e0143505, 31 p.
- VITOUSEK P.M. & MELILLO J.M. 1979. Nitrate losses from disturbed ecosystems: patterns and mechanisms. *For. Sci.* 25(4): 605-619.
- VITOUSEK P.M., GOSZ J.R., GRIER C.C., MELILLO J.M., REINERS W.A. & TODD R.L. 1979. Nitrate losses from disturbed ecosystems: interregional comparative studies show mechanisms underlying forest ecosystem response to disturbance. *Science* 204: 469-474.
- VITOUSEK P.M., ANDARIESE S.W., MATSON P.A., MORRIS L. & SANFORD R.L. 1992. Effects of harvest intensity, site preparation, and herbicide use on nitrogen transformations in a young Loblolly pine plantation. *For. Ecol. Manag.* 49(3-4): 277-292.
- WEIS W., HUBER C. & GÖTTLEIN A. 2001. Regeneration of mature Norway spruce stands: early effects of selective cutting and clear-cutting on seepage water quality and soil fertility. *Sci. World J.* 1(S2): 493-499.
- WEISSEN F. (dir.) 1991. Le fichier écologique des essences. MRW, DGRNE, DNF, Jambes, 45 p. (T1), 190 p. (T2) et 205 p. (T3).
- WIENS J.A. 1997. Metapopulation dynamics and landscape ecology. In : Hanski I. & Gilpin M.E. (eds.) *Metapopulation Biology Ecology, Genetics and Evolution*. Academic Press, Waltham: 43-62.
- WORK T.T., KLIMASZEWSKI J., THIFFAULT E., BOURDON C., PARE D., BOUSQUET Y., VENIER L. & TITUS B. 2013. Initial responses of rove and ground beetles (Coleoptera, Staphylinidae, Carabidae) to removal of logging residues following clearcut harvesting in the boreal forest of Quebec, Canada. *ZooKeys* 258: 31-52.
- WYNS R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J. & MATHIEU F. 2004. Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bull. Soc. Géol. Fr.* 175(1): 21-34.
- ZELLER B., RECOUS S., KUNZE M., MOUKOUMI J., COLIN-BELGRAND M., BIENAIMÉ S., RANGER J. & DAMBRINE E. 2007. Influence of tree species on gross and net N transformations in forest soils. *Ann. For. Sci.* 64(2): 151-158.
- ZELLER B., LEGOUT A., BIENAIMÉ S., GRATIA B., SAINTENOISE Ph., BONNAUD P. & RANGER J. 2019. Douglas fir stimulates nitrification in French forest soils. *Sci. Rep.* 9(1): 10687, 11 p. doi.org/10.1038/s41598-019-47042-6.
- ZOLLINGER J.-L. 2015. Étude d'une succession secondaire forestière : méthodologie et structure de la communauté des oiseaux nicheurs. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.* 94(3): 221-242.

AUTRES DOCUMENTS CONSULTÉS

Atlas des paysages du Morvan : Site internet du Parc Naturel Régional du Morvan.

Charte 2020-2035 du PNR Morvan 2019. 178 p.

CNPF Bourgogne Franche Comté 2019. Chiffres clés des forêts morvandelles.

CNPF, ONF, PNR Morvan. 2006. Fiches paysage réalisées dans le cadre de la rédaction de la Charte forestière, i- réaliser une coupe rase sur versant 4 p., et ii- traiter une lisière de peuplement résineux 4 p.

FIBOIS Bourgogne Franche Comté - Groupe de travail « Forêt-Bois » du PNR du Morvan. 2019. La filière forêt-bois dans le Morvan - Chiffres clés.

SIRUGUE D. 1995. Les mammifères sauvages du Morvan. Ed. PNRM, 208 p.

SIRUGUE D. 1997. Les oiseaux du Morvan. Ed. PNRM, 64p.



Figure 32. Les bois feuillus de qualité médiocre sont exploités pour l'industrie ou l'énergie. Ces peuplements seront remplacés par des plantations, généralement résineuses et mono-spécifiques.

ANNEXE I

La Forêt du périmètre du Parc naturel régional du Morvan

SUPERFICIE PNR Morvan (SIG)			superficie totale (ha)			
137 communes du périmètre du PNR			331998			
133 communes adhérentes du PNR			324957			
POPULATION (2019)		population totale				
137 communes du périmètre du PNR		69256				
133 communes adhérentes du PNR		67903				
dont emplois forestiers directs (rapport FIBOIS)		9000 à 10000				
SUPERFICIE et PROPRIETE			superficie totale ha	% superficie totale		
dossier territoires (PNRM - IGN)			149236			
PROPRIETE et structure (PNRM)						
forêt publique			18109	12%		
domaniale				5,50%		
collectivités Etablissement				6,50%		
forêt privée totale			131127	88%		
source CNPF groupe travail MORVAN		nb entités propriétaires	superficie totale ha	% surface	% propriétaires	% parcelles
source Charte PNR Morvan		20000				85
structure propriété privée		17350	110370	100	100	
0 - 4 ha		13533	13244	12	78	
0 - 10 ha		15789	24281,4	22	91	
>100 ha		347	47459	43	2	
structure entité (CNPF)			superficie moyenne ha			nb parcelles
localisation des entités			26			19
				Région BFC %	Région IdF %	
				62	24	
TAUX de BOISEMENT		total	Δ f (communes)			
source dossier territoires PNR (IGN)		moyenne générale	45%	6 - 82 %		
		Haut Morvan montagnard	79-95%			
		Morvan septentrional	32 - 48 %			
		Morvan méridional	17-32 %			
variation taux de boisement (DREAL BFC)		2005-2016	+ 6590 ha			

ESSENCES		<i>feuillus</i>	<i>résineux</i>	<i>peuplements mixtes</i>	
rapport DREAL BFC		64%	36%		
source (dossier territoires)		54%	35%	11%	
Haut Morvan montagnard			54-65 %		
Bas Morvan Septentrional			9-20 %		
forêt publique		60%	40%		
forêt privée		53%	47%		
rapport DREAL BFC (variation essences)	2005-2016	-4270	10860		
TYPES DE FORETS		<i>anciennes</i>	<i>récentes</i>		
ancienneté forêts	moyenne	59%	41%		
	Haut Morvan montagnard	77%	23%		
	Morvan méridional	41%	59%		
sites classés	totaux	5%			
réserves	totales	1%			
COUPES à blanc		<i>surface totale ha</i>	<i>feuillus</i>	<i>résineux</i>	
charte PNR MOVAN	moyenne an. 2000-2003	207			
source diagnostic territorial PNR	moyenne an. 2004-2016	1074			
	moyenne an. 2000-2016	870			
	moyenne an. 2009-2016	808			
DREAL BFC	2005	1419	78%	22%	
	2016	725	64%	36%	
Coupes à blanc exceptionnelles	PNRM 2004	2350			
	PNRM 2008	2950			
	zone Bibracte 2019-2020	80-100			
Coupes de régénération (naturelle)	moyenne an. 2012-2015	86			
Eclaircies	moyenne an. 2012-2015	1125			
Plantations	moyenne an. 2012-2015	242			
GESTION FORESTIERE (source CNPF)				<i>% superficie totale</i>	
Domaniales, Collectivités, Etablissements	documents d'aménagement	ONF	toujours	15%	60%
Forêt privées de superficie supérieure à 25 ha	plan simple de gestion (PSG)	CNPF	486 PSG	45%	
Forêt privée propriétaires volontaires	code de bonnes pratiques sylvicoles (CBPS)		253 CBPS		

ANNEXE II

Forêts anciennes du Parc du Morvan

Ancienneté des forêts

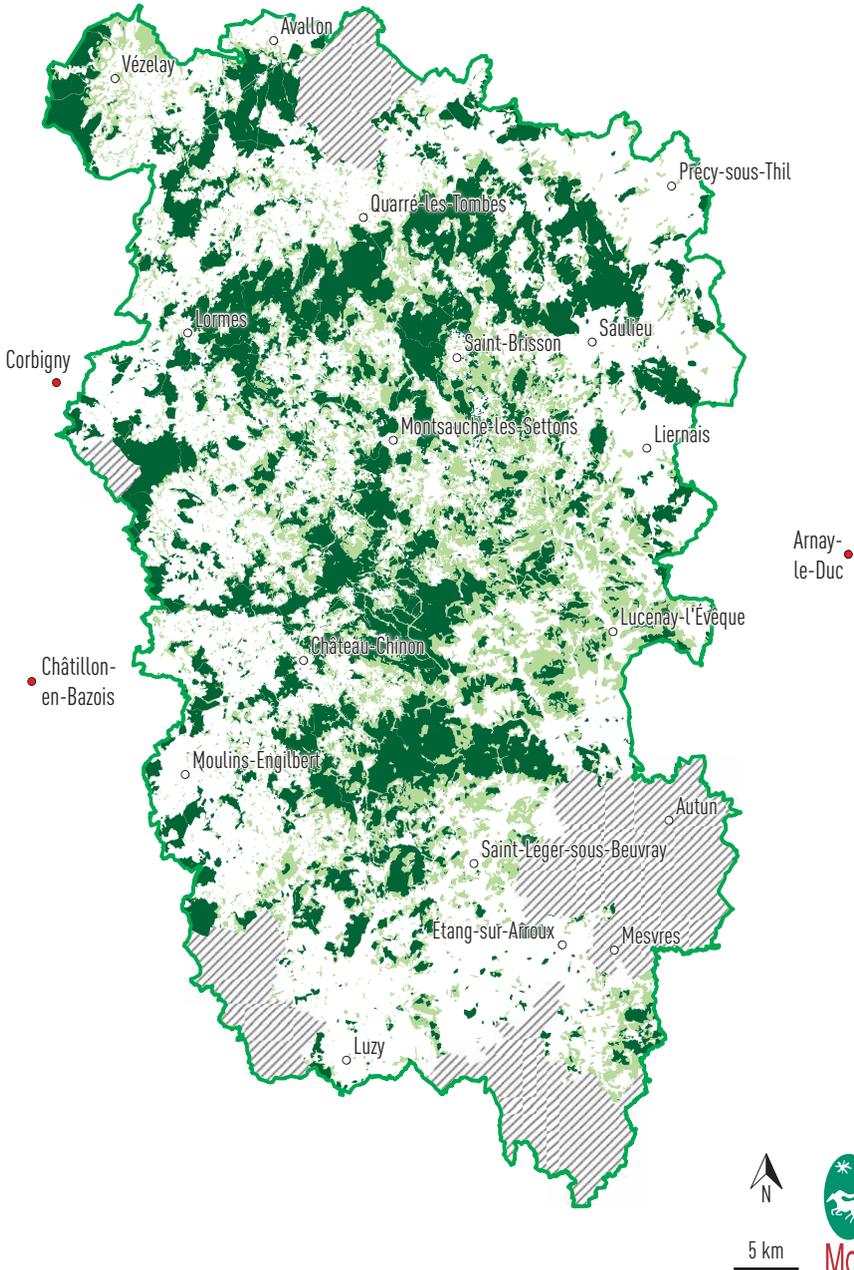
■ Forêt ancienne

■ Forêt récente

▨ Zone non étudiée

□ Périmètre d'étude 2020-2035

● Villes partenaires



Sources : Pnr Morvan, IPAMAC © Pnr Morvan - avril 2017

ANNEXE III

LE PROJET DE ZONE ATELIER MORVAN (ZAMO)

« Évolution des écosystèmes forestiers du massif du Morvan dans un contexte de transition climatique et socio-économique » Des héritages aux trajectoires actuelles et futures des écosystèmes forestiers

OBJECTIF GÉNÉRAL DES ZONES ATELIERS (<https://inee.cnrs.fr/fr/zones-ateliers>)

Elles ont comme problématique de recherche, de décrire, comprendre et prédire la réponse des socio-écosystèmes au changement global, pour formaliser et théoriser leur fonctionnement, et aider à leur gestion et à leur gouvernance. C'est le seul outil à ce jour couplant les approches bio-géophysiques, écologiques et sociétales à l'échelle des territoires. Leur spécificité réside dans la taille de l'objet d'étude, qui est de dimension régionale. Leur problématique est celle des interactions entre un milieu et les sociétés qui l'occupent et l'exploitent.

La compréhension de ces interactions implique une approche pluridisciplinaire qui inclut les sciences de la nature, les sciences de la vie, les sciences humaines et les sciences de l'ingénieur. L'objectif est de répondre à une question territoriale spécifique élaborée en interaction avec les gestionnaires et les acteurs locaux en réponse à leur demande de connaissance et d'expertise. Les recherches sont menées sur le temps long (plusieurs décennies) dans le cadre théorique des socio-écosystèmes et des biens communs. Les résultats des recherches alimentent les débats

locaux sur la gestion, l'aménagement et l'évaluation des politiques publiques.

CADRE GÉNÉRAL DE LA ZAMO

Le Parc naturel régional du Morvan a été créé en 1970. Il s'agit d'un des plus anciens Parcs Régionaux de France (50 ans). Sa superficie de 320 000 ha (117 communes et 8 villes partenaires) est occupée à 45 % par des forêts. Le socio-écosystème forestier est au cœur des préoccupations environnementales et des enjeux actuels et futurs du territoire. « La forêt et l'arbre sont des éléments clefs de la prospérité du Morvan, par les services économiques, sociaux et environnementaux qu'ils apportent au territoire et à ses habitants ».

Dans le paysage national, le Morvan est caractéristique de zones boisées de moyenne montagne exposées aux changements climatiques. C'est un marqueur des transitions en cours (*e.g.* hydrogéologiques, physiographiques) et des enjeux socio-techniques, socio-économiques et socio-culturels que ces changements impliquent et constitue une zone d'étude privilégiée.

Le Morvan est depuis très longtemps le terrain d'étude de laboratoires et de structures de recherche régionales, nationales, ou internationales (ex site expérimental de Breuil-Chenu ; centre archéologique européen de Bibracte). Cependant ces recherches sont éparpillées, sans liens directs entre elles et sans synthèse à l'échelle du territoire du Morvan.

La création d'une « Zone Atelier Morvan » (ZAMO) pourrait permettre de donner un cadre fédérateur à ces recherches,

d'accroître leur capitalisation, leur visibilité, leur synthèse, tout en augmentant le potentiel pour de nouvelles études et de nouvelles synergies. Ce projet de zone atelier s'inscrivant dans une démarche interdisciplinaire à long terme sur l'étude du socio-écosystème forestier du Morvan permettrait également de partager les ressources et les données des différents acteurs et programmes de recherche impliqués. Ainsi, en combinant recherche fondamentale et appliquée, elle apporterait sa contribution à des questions scientifiques et enjeux sociétaux majeurs (ex. caisse de résonance climatique et ses conséquences) tout en favorisant par ailleurs le transfert des connaissances vers les acteurs locaux et régionaux (décideurs, gestionnaires, citoyens).

Ce projet, porté par le laboratoire Biogéosciences associé à de nombreuses structures et groupes de chercheurs pluridisciplinaires, a le soutien du PRNM dont la charte vient d'être renouvelée (2020-2035). Les socio-écosystèmes forestiers et leurs évolutions en constituent le « fil rouge » à un moment où divers facteurs naturels et humains contribuent à une évolution rapide et largement inconnue de la physionomie de ce territoire.

Le projet ZAMo est structuré en 4 principaux axes thématiques :

- Dynamiques des occupations anthropiques sur le temps long et leurs interactions avec les écosystèmes forestiers

Cet axe serait dédié à l'analyse de la dynamique des socio-écosystèmes forestiers sur le temps long en vue de leur trajectoire future, en lien avec les dynamiques sociales, économiques, politiques des différentes périodes concernées.

- Résilience des écosystèmes forestiers, flux de carbone, ressources en eau et changements climatiques : enjeux présents et futurs

Les propriétés de ce territoire croisées aux grands modes de la dynamique atmosphérique sous ces latitudes conduisent à un contexte pédoclimatique spécifique. Le Morvan est une « île » climatique au milieu des plaines qui l'entourent et constitue un territoire de transition en prise directe avec le changement climatique et à ses effets sur la ressource en eau ainsi que sur la dynamique des flux de carbone à l'échelle du bassin versant.

- Biodiversité et structure paysagères

Les questions de recherche en lien avec la biodiversité sont liées aux effets des évolutions climatiques sur les milieux naturels, agricoles et forestiers. Comment repenser la gestion forestière pour obtenir des forêts résilientes, productrices et protectrices de la biodiversité et économiquement rentables ? Quels modes de gestion les plus adaptés, quelles essences, quels modèles économiques ?

- Gestion des ressources et enjeux socio-économiques

La propriété des ressources du Morvan pose le problème de la gestion publique des enjeux environnementaux dans des zones où la propriété privée morcelée domine (88 % privé vs 12 % publique). La question des leviers d'action politique sur les écosystèmes forestiers en période de réchauffement climatique, dans un contexte budgétairement contraint pour les gestionnaires publics, se pose. Les problèmes en économie et sciences sociales doivent être explorés en lien avec les biogéosciences : (i) stratégies d'intervention sur les marchés fonciers afin de concilier intérêts économiques

et environnementaux ; (ii) évolution des filières de transformation ; (iii) devenir des usages productifs et récréatifs de la forêt ; (iv) accroissement de l'économie présentielle et forte polarisation sociale (majorité d'employés et d'ouvriers chez les actifs, importance de néo-ruraux parisiens ou hollandais dotés en capitaux culturels chez les retraités). La comparaison se fera avec des zones où l'économie forestière jouera un rôle majeur dans les trajectoires socio-économiques (ZAAJ, PN Champagne-Bourgogne, PN de moyenne montagne (Livradois-Forez, Plateau de Millevaches, etc.).

Intervenants et acteurs : (i) Structures de recherche : Fédération des MSH (Besançon et Dijon), UMR Biogéosciences (CNRS/EPHE/uB, Dijon), UMR Chrono-environnement (CNRS/UFC, Besançon), UMR CESAER (INRA/AgroSup Dijon), UMR ArTeHiS (CNRS/uB/Ministère de la Culture), UMR Agroécologie (AgroSupDijon, INRA, UB), UR BEF (INRAe, Nancy), UMR Silva (INRAe,

Nancy), LIR 3S UMRS CNRS Dijon, MSH Dijon, MSHE Besançon, AgroParisTech, UMR Arscan (CNRS, Nanterre), UMR ISTO (CNRS/BRGM, Univ. Orléans), UMR LGP (CNRS, Meudon), MNHN Paris... (ii) Établissements : UBFC, UB, UFC, CNRS, INRAe, EPHE, AgroSup Dijon, et (iii) acteurs de terrain PNRM, ONF, CNPE, DRAC (SRA), Bibracte Centre archéologique européen, Musées du Morvan, Région BFC, Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien (CBNBP), Conservatoire des Espaces Naturels de Bourgogne, FIBOIS BFC, Agences de l'eau, SHNA-OFAB (Société d'Histoire Naturelle d'Autun - Observatoire de la Faune de Bourgogne), Bourgogne-Franche-Comté Nature, Conseils départementaux (21, 58, 71, 89), Réserves Naturelles de France...



Site expérimental INRAE de Breuil-Chenu en Morvan : vue aérienne BLOC 1 (cité dans le texte aux pages 37, 80 et 81).

LES OUVRAGES SCIENTIFIQUES DU PARC NATUREL RÉGIONAL DU MORVAN



LES CAHIERS SCIENTIFIQUES DU PARC NATUREL RÉGIONAL DU MORVAN



www.patrimoinedumorvan.org
www.parc dumorvan.org
www.bourgogne-franche-comte-nature.fr



Brûlage d'andain dans le Morvan :
une pratique à proscrire doublement !

Les coupes à blanc dans le massif forestier du Morvan sont l'enjeu d'âpres discussions : légitimées au plan technico-économique, mais rejetées par une partie de la population. Le résultat de la saisine du Conseil scientifique du PNR Morvan sur ce thème, est présenté dans ce numéro des Cahiers scientifiques.

La récolte d'un peuplement en une seule fois est efficace, car totalement mécanisable. Elle pose par contre la question de la pérennité des fonctions des écosystèmes. La coupe rase est remise en cause, en particulier quand elle substitue à la forêt feuillue native, des plantations résineuses gérées intensivement. Si les produits de cette sylviculture sont appréciés, ce n'est pas le cas de la méthode pour les obtenir.

Dans les milieux pauvres, les fortes exportations de biomasse, puis la préparation des sites pour la nouvelle génération par des méthodes inappropriées, remettent en cause la durabilité du sol pour toutes ses fonctions : productivité, biodiversité, épuration. Plus la surface concernée, unitaire ou par cumul, est grande et plus les risques de dégradation sont élevés.

Les mots-clés pour la durabilité des écosystèmes morvandiaux sont : diversification des essences et des structures de peuplements, aménagement par parquets, coupe rase ne dépassant pas 1,5 ha, respect des sols et des zones fragiles.

Des propositions sont faites pour une gestion multifonctionnelle active à l'échelle territoriale, autorisant la conservation de toutes les fonctions des forêts, dont la production... mais il est temps de changer de paradigme.