

t

RenD ez-Vous e c h n i q u e s

n° 43 - hiver 2014

patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable



p. 3

Réflexions sur la plantation

Diversité des forêts de Guyane



p. 46

Rendez-Vous techniques

Directeur de la publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Jean-Marc Brézard, Bernard Gamblin, Laurence Lefèbvre, Prisca Léon, Marianne Rubio, Leslie Vey, Jean-François Dhôte, Véronique Vinot

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture :

En haut : Florian Vast, INRA

En bas : Olivier Brunaux, ONF

Périodicité : 4 numéros ordinaires par an
(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

[http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/
Publications ONF/ Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/ Périodiques))

Disponibilité au numéro, abonnement

Renseignements

ONF - documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : documentalistes@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : mars 2014

sommaire

n° 43 - hiver 2014

- 3 Méthodes
Nouveaux besoins de plantation en forêt publique française : réflexion sur la plantation mécanisée ou manuelle
par Erwin Ulrich et al.
- 11 Méthodes
Préparer le sol avant plantation selon la technique « 3B » avec tracteur et l'outil Culti 3B® - Validation sur chantiers test
par Erwin Ulrich, Claude Becker et Jean-Pierre Franco
- 22 Méthodes
Contrôler la fougère aigle sans asulame : quelles méthodes alternatives pour réussir les plantations ?
par Xavier Auzuret, Gwénaëlle Gibaud, Jérôme Piat, Catherine Collet, Léon Wehrlen, Claudine Richter, Quentin Girard, Jean-Yves Fraysse
- 33 Connaissances
Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle
par Noémie Goutal-Pousse, Jérôme Bock et Jacques Ranger
- 40 Connaissances
Le réseau lorrain d'observation de la reconstitution après tempête en forêts publiques – Premier bilan sur la régénération
par Nicolas Gomez
- 46 Connaissances
HABITATS : décrire et cartographier la diversité des forêts de Guyane
par Stéphane Guitet, Olivier Brunaux, Gaëlle Jaouen, Cécile Richard-Hansen, Sophie Gonzalez, Daniel Sabatier, Raphaël Pelissier, Nicolas Surugue
- 54 Pratiques
Le positionnement par satellite : les nouveaux récepteurs améliorent-ils les performances sous couvert forestier ?
par Alain Munoz
- 63 Fiche techniques
Fiche n°10 - Intervenir sur un monument historique classé ou inscrit du plan d'action environnemental

éditorial

Le projet de loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt est actuellement examiné par le Parlement.

En matière forestière ce texte souligne l'importance d'une gestion durable et multifonctionnelle, fournit un cadre rénové permettant de relever les défis de demain, notamment en matière de changement climatique, et consacre le fonds stratégique de la forêt et du bois comme outil financier au service de cette politique.

Reste à préciser les modes opératoires adéquats pour répondre aux ambitions de ce texte de loi. Ce numéro des RenDez-Vous techniques aborde quelques unes des questions soulevées par une telle démarche : celle de la plantation comme outil d'adaptation des forêts aux conditions climatiques futures et de la mécanisation possible de ces travaux, celle du risque accru de tassement des sols du fait d'une mécanisation plus forte et des moyens de gérer ce risque.

La question des savoir-faire est également essentielle pour éviter les problèmes de mortalité observés dans certaines plantations. Ce numéro des RDVT souligne ainsi l'importance du diagnostic stationnel, de la qualité des plants, chaîne logistique incluse, de l'adéquation des travaux préparatoires et d'une bonne maîtrise de la végétation concurrente.

Les exigences de la gestion durable face aux enjeux des changements globaux concernent aussi bien la forêt métropolitaine que celle des DOM et nécessitent encore dans ce dernier cas, notamment en Guyane, une meilleure caractérisation des habitats forestiers. Il a fallu pour cela développer une méthodologie adaptée au contexte amazonien et dont on trouvera ici la description et les principaux résultats.

Enfin le progrès technique s'accompagne d'un progrès constant observé dans les outils mis à disposition du forestier pour mener à bien ses opérations de gestion. Les avancées récentes en matière de positionnement par satellite, par exemple, sont significatives et sont abordées sous forme de test comparatif en conditions forestières des différents matériels proposés par les fournisseurs.

Bonne lecture à tous,

Le Directeur Forêts et Risques Naturels
Albert MAILLET

Nouveaux besoins de plantation en forêt publique française : réflexion sur la plantation mécanisée ou manuelle

Il est des cas où les questions de R&D n'aboutissent pas... Du moins pas au sens du progrès ou de l'innovation escomptés initialement. En général on n'en fait pas état, comme s'il s'agissait d'un échec. Cependant, si la question a été bien appréhendée, une absence de résultat est en soi une réponse riche de sens. Et c'est ce qui nous intéresse ici : de l'idée d'une nouvelle machine à planter au choix de la plantation manuelle...

Ces dernières décennies, les surfaces plantées en forêt publique ont diminué fortement, notamment grâce au recours à la régénération naturelle. Au début des années 80 on plantait environ 35 millions de plants en forêt publique. En 2009, ce n'étaient plus que 10 millions de plants. La perspective du changement climatique commence à avoir un impact sur les besoins en matière de régénération. L'adaptation des forêts nécessitera en effet, dans de nombreuses régions, d'orienter la composition des peuplements vers des essences *a priori* mieux indiquées compte tenu des conditions attendues d'après les modélisations récentes. Pour cela, il faut passer par la plantation : sont concernés en particulier les chênes, les pins, le douglas, l'épicéa, le mélèze, l'acacia...

Se pose alors la question de la méthode de plantation, pour faire face à l'augmentation prévisible des surfaces totales à planter tout en réduisant les coûts : doit-elle rester plutôt manuelle ou est-il possible de développer la plantation mécanisée ? À la demande de la direction technique, le groupe de travail ONF-MGVF/INRA (Mission Gestion de la Végétation Forestière) -FCBA qui planche sur la « Maîtrise des méthodes de préparation du

sol avant régénération naturelle ou plantation » a donc essayé de faire le point sur cette question.

Dans la perspective d'un éventuel « cahier des charges » de la plantation mécanisée, les membres de ce groupe ont donc listé tous les critères qu'une planteuse devrait idéalement remplir pour égaler ou, mieux, dépasser les qualités du planteur. Après un aperçu des planteuses existantes et des nouveaux concepts nordiques, cet article présente la façon dont le groupe de travail a appréhendé le sujet et commente ensuite l'ensemble des aspects jugés importants pour une planteuse adaptée au contexte français. La confrontation avec les performances de plantation des ouvriers forestiers et les besoins liés à toute la chaîne de plantation permet de mieux comprendre les conclusions finales exprimées par ce groupe de travail.

Planteuses existantes – forces et faiblesses dans le contexte français

Le premier projet (et brevet) de planteuse forestière mécanisée semble dater de la fin du 19^e siècle aux États-Unis (Trenk, 1963). Apparemment ce projet ne s'est concrétisé que dans les années 40, en raison d'une main d'œuvre devenue rare en période

de guerre. Les premiers prototypes ne se distinguent pas beaucoup des modèles les plus simples commercialisés aujourd'hui. Ces premiers modèles ont surtout travaillé dans les grandes régions avec des sols à texture sableuse aux États-Unis.

Planteuses classiques pour les plants à racines nues

Presque tous les modèles « classiques » sont portés sur l'attache trois-points d'un tracteur. Munis d'un soc, ils ouvrent dans le sol un sillon qui permet à un ou deux opérateurs, assis à l'arrière, de placer un plant à racines nues à intervalles réguliers. À l'arrière de la machine se trouvent deux roues, soit en fonte, soit avec des pneus, qui referment le sillon et tassent le sol de chaque côté du plant. Le modèle Egedal dispose, en plus, d'un soc écartant une partie du sol latéralement. Selon quelques expériences en conditions réelles, la productivité journalière de ce type de planteuse serait autour de 3 000 plants/jour pour du pin laricio.

Ce genre de planteuse, dont la planche 1 donne illustration, trouve son utilité dans les sols sableux à sablo-limoneux, où le sillon peut se refermer facilement après la plantation sous l'action de la pluie et où les racines n'ont pas trop de mal à pénétrer dans le sol minéral au-delà du sillon.

Mais il ne convient pas aux sols limoneux à argileux où le soc lisse les parois du sillon, qui s'endurcissent ensuite. De plus, le sillon n'est pas toujours fermé correctement par les deux roues arrière. Les experts en la matière reconnaissent que cela conduit au développement d'un système racinaire le long du sillon, ce qui rend les plants très vulnérables (dessèchement, problème de stabilité mécanique). C'est le gros point faible de ce type de planteuse, surtout parce que les sols français en forêt feuillue sont à 80 % de texture plutôt limono-argileuse (selon une évaluation à dire d'expert concernant la sensibilité au tassement).

Si cette vulnérabilité ne s'exprime pas forcément les premières années après la plantation, elle peut s'avérer fatale pour le peuplement dès qu'il prend de la hauteur, face aux vents forts et aux tempêtes. Ce système racinaire unidirectionnel rend également les arbres vulnérables lors de périodes de sécheresse car, souvent, il ne se développe pas suffisamment en profondeur : il ne se forme pas de pivot qui permette une alimentation hydrique de profondeur et un bon ancrage.

Ajoutons que l'emploi de ce type de planteuse est nécessairement précédé d'une préparation qui élimine par broyage la concurrence ligneuse en place ainsi que les rémanents de coupe. Notons aussi qu'une présence trop importante de souches est réductrice, et impose un dessouchage ou arasement sur la bande à planter.

Planteuses scandinaves pour les plants résineux en godets

Dans les pays scandinaves, qui ne plantent quasiment que des conifères en godet, les planteuses actuelles reposent sur un système de « barillet de revolver » (planche 2, page 6). Le godet, transporté dans un carrousel, est chargé dans l'outil qui ouvre le sol (il peut même le travailler un peu avant), puis introduit dans le trou. Éventuellement l'outil de plantation



Egedal, type « OK » Danemark



Planteuse tchèque RZS-2

Planche 1 : deux machines récentes pour les plants à racines nues ; planteuse danoise (Marque Egedal) et planteuse tchèque RZS-2 (photos extraites des comptes-rendus de démonstration, ONF, 2009)

permet une alimentation du plant en eau et en fertilisant. Ces planteuses doivent être portées, à cause de leur poids (>1 tonne), par des pelles mécaniques de 16-20 tonnes. Une étude réalisée entre 2006 et 2008 par FCBA (Peuch et al., 2009) sur 19 chantiers dans le Limousin avec la planteuse Bracke montée sur machine de bûcheronnage montre une productivité journalière (8 heures machine) de 984

à 1096 plants de douglas en godet. Ce type de planteuse est, là encore, adapté seulement aux sols sableux ou sablo-limoneux, meubles et bien drainants, typiques de Scandinavie du Nord et qu'on trouve aussi dans le Limousin. Mais leur handicap majeur reste que la mise en place du plant se fait sans le travail de sol en profondeur qui favoriserait le développement de racines pivotantes.

Nouveaux concepts pour de nouveaux enjeux

Le souhait d'augmenter la productivité tout en diminuant l'impact au sol, et en fonctionnant éventuellement à l'énergie renouvelable, a inspiré les concepteurs modernes. Deux exemples sont présentés dans la planche 3 (page 6). Le concept récent d'Anne-Karin Bergkvist (Suède) est un robot pas plus haut que l'homme, avec une très faible pression au sol. Il peut déterminer s'il y a des cailloux dans le sol avant de traiter le patch de plantation à la vapeur à 160 °C (pour limiter la concurrence herbacée) et d'introduire le plant dans le sol. Le montage de l'outil sur 4 pattes lui garantit une bonne stabilité et lui permet d'éviter les obstacles. Le deuxième concept, de Van Horlick (Canada) prévoit 3 planteuses réglables en distance entre elles et montées sur le bras articulé d'une pelle mécanique. Des couteaux tranchants en bas de chaque planteuse peuvent faire un petit travail du sol avant plantation.

Méthode d'approche du groupe de travail

Une approche de type « brainstorming » a convaincu le groupe de travail de la nécessité de définir les besoins pour une machine unique, mais modulable selon les besoins afin de s'adapter aux spécificités d'une région. Il n'était pas imaginable de faire construire plusieurs modèles de planteuses, car le marché est assez restreint pour ce genre de machine et il s'en vendrait au mieux quelques dizaines au niveau français.

Une partie de la discussion a concerné les contextes pour lesquels la plantation mécanisée peut être envisagée. L'idée initiale était de ne pas chercher à développer une machine pouvant travailler sur tous les sols, mais de couvrir d'abord les contextes les plus faciles et les plus importants en surface à régénérer; ensuite on s'attaquerait aux contextes plus difficiles. Cette idée a été abandonnée car les contextes

faciles sont plutôt rares, en dehors des sols sableux (par exemple dans les Landes) auxquels les planteuses existantes sont bien adaptées. La plupart des situations présentent des contraintes multiples. Nous avons donc analysé l'ensemble des contraintes possibles pour en déduire le champ d'application possible (ou pas).

Brainstorming : aspects « machine »

En France, et dans la plupart des situations rencontrées sur terrain plat ou en légère pente, une planteuse ne peut raisonnablement être qu'un outil tracté par un tracteur forestier. On peut techniquement imaginer un outil monté sur machine de bûcheronnage, pelle mécanique ou mini pelle, afin de pouvoir planter aussi en potet (et non dans un sillon continu) ou sur terrain pentu. Ce genre d'outil existe, comme nous l'avons vu, dans d'autres pays, mais répond à des circonstances assez rares chez nous. Les facteurs limitants sont surtout le coût horaire élevé des machines « porte-outil » et l'impact important au sol du fait du poids de ces machines, sauf si elles sont dûment équipées de pneus larges ou jumelés ou encore de chenilles. Ce genre de combinaison a été jugé peu pertinent dans le contexte français où les sols sont assez sensibles au tassement, notamment pendant la saison de plantation. C'est pourquoi nous ne présentons ici que les exigences concernant la plantation en plaine ou légère pente, situation majoritaire dans les régions forestières françaises les plus productives.

Pour intéresser un grand nombre d'acheteurs, une planteuse doit pouvoir être attelée à un tracteur forestier classique de 100 à 200 chevaux, afin d'optimiser la polyvalence de ces tracteurs, très courants dans les entreprises de travaux forestiers (ETF) et dans les agences travaux de l'ONF. Les tracteurs forestiers ont l'avantage de la maniabilité sur un terrain mouvementé (microreliefs),

d'un poids modeste comparé à une machine de bûcheronnage, et du moindre coût à l'heure machine. L'unité « planteuse » doit donc être conçue pour être montée sur la prise 3 points de ces tracteurs. Se pose par ailleurs la question de la façon d'avancer (en continu ou semi-continu), liée à la façon dont le plant doit être mis en place, et qui a une incidence sur la conception de l'outil dans son ensemble. Cet aspect sera présenté plus loin.

Pour tenir compte de la réalité du terrain, une planteuse doit pouvoir travailler sur terrain ensouché ou présentant d'autres types d'obstacles. Elle doit donc pouvoir détecter l'obstacle pour l'éviter (par exemple en relevant l'outil travaillant en terre) sans se casser ni fragiliser les éléments qui la composent. Le maintien d'îlots paysagers, souvent préconisé, oblige également à multiplier les phases de relevage/reprise du travail.

De même, il n'est pas rare de devoir planter sur sol encombré, après broyage sommaire de la végétation ou des rémanents : il peut rester des rémanents assez longs (50-100 cm) et assez gros (diamètre 5-15 cm), ou bien une couverture d'épaisseur variable (0-20 cm). C'est donc un vrai défi pour une machine d'installer le plant non pas dans cette couche de rémanents (où il séchera car elle est inapte à retenir l'eau) mais bien dans le sol minéral.

L'ensemble, tracteur et planteuse, doit être suffisamment léger pour ne pas causer d'ornières ou de tassement. Sur des sols très sensibles au tassement, on pourrait envisager l'utilisation d'un chenillard comme porte-outil, mais ce type d'engin n'est pas fréquent chez les ETF : cela demanderait un investissement supplémentaire, ou le recours à la location.

Les éléments en contact avec les sols doivent être résistants et facilement remplaçables à cause de l'abrasivité



RISUTEC PM 100 - Finlande



RISUTEC PM 160-Finlande



BRACKE P11.a - Suède

Planche 2 : deux types de planteuses scandinaves pour résineux en godets ; les photos proviennent des sites Internet respectifs des marques RISUTEC (Finlande) et BRACKE (Suède)



Anne-Karin Bergkvist (Umea Institute of Design, Suède)
Système de chargement des plants en godet

Planche 3 : deux concepts pour une nouvelle génération de planteuses : l'un développé par Anne-Karin Bergkvist (Umea Institute of Design, Suède) avec l'aide de Husqvarna, et l'autre par Tim C. Van Horlick Forestry (Canada) ; les photos proviennent de leurs sites Internet respectifs



Van Horlick's Cultivator Planter (VHCP)

variable des matériaux dont le sol est constitué. La machine doit pouvoir fonctionner avec de l'huile Bio, afin de répondre à l'engagement PEFC et ISO 14001 de l'ONF.

Bien évidemment une planteuse doit respecter tous les aspects règlementaires en matière d'ergonomie, et de santé et sécurité au travail.

Brainstorming : exigences liées à l'état du terrain

Traitement des rémanents...

Les rémanents de coupe peuvent avoir été laissés tels quels, éparpillés sur toute la parcelle, ou traités selon diverses modalités : nettoyage complet (par exemple mise en andain ou enlèvement de toute la biomasse ligneuse comme combustible), broyage sommaire ou fin, en plein ou limité aux lignes de plantation... Selon l'état d'encombrement de la parcelle, l'écartement des rémanents avant mise en terre du plant doit être réalisé soit de manière indépendante avant la plantation (fort encombrement), soit au moment de la plantation à l'aide d'un outil à monter à l'avant du tracteur portant la planteuse (faible encombrement).

Préparation du sol et maîtrise de la végétation herbacée

Dans les sols limoneux, argileux ou tassés, il paraît logique de n'utiliser une planteuse qu'après un travail préparatoire du sol sur une profondeur de 40 à 60 cm, pour faciliter l'enracinement du plant; il faut alors laisser le sol se (re) poser pendant plusieurs mois avant de planter. Sinon, les plants installés trop tôt dans un sol soufflé, avec des poches d'air, risquent de se déraciner (notamment si des billons ont été créés) ou de sécher dès la première année. La largeur idéale de la préparation du sol en ligne serait de 1 à 1,5 m, pour que le plant dispose d'un bon volume de terre facilement prospectable. Pour une plantation en potet individuel (un plant par potet) le diamètre idéal serait de 1 m.

En présence d'une végétation herbacée trop haute (fougère, calamagrostis...), il est préférable de recourir à la confection de placeaux (2x2 à 7x7 m) pour mieux gérer la concurrence et la recolonisation ultérieure, par la végétation. Cette évocation très sommaire de la préparation du sol (qui n'est pas l'objet de cet article) montre à quel point une planteuse doit pouvoir être flexible, sauf à ne lui réserver que le travail en ligne. Quoi qu'il en soit, il faut au moins pouvoir éviter de rouler avec le tracteur sur le sol travaillé...

Brainstorming : contraintes de qualité des plants et de leur mise en place

Taille et forme des plants

En principe, et selon la note de service ONF NDS -10-T -320 du 16 décembre 2010 - Gestion des ressources génétiques dans les forêts publiques, « Il convient [pour conserver la diversité génétique] d'éviter les tris sélectifs sévères sur la hauteur en pépinière ». Le tri en pépinière ne vise pas à homogénéiser la taille des plants, mais simplement à éliminer les « petits vieux », « ficelles », chétifs ou tordus... qui meurent rapidement et ne donneront jamais des arbres de qualité.

La planteuse doit donc pouvoir accepter indistinctement toutes les tailles de plants, sans calibration; quelle que soit la hauteur des plants (30 à 50 cm), la planteuse ne doit pas les endommager, ni avant ni après mise en terre. Elle doit également être capable de prendre en charge des plants monocaules mais aussi des plants ramifiés ou à têtes multiples (cas fréquents chez les chênes par exemple).

Mise en place du plant

La planteuse doit pouvoir planter des plants à racines nues ou en godet. C'est en soi une demande assez compliquée, car le stockage et la manipulation de ces deux types de plants ne sont pas du tout comparables. De plus, il faut que les outils

de la machine puissent s'adapter à la taille des godets (0,08 à 0,6 litres). Cela nécessite de prévoir des modules, dont chacun est adapté à une gamme de tailles précise (diamètre/hauteur). De plus, le système de stockage de la planteuse doit protéger les plants en attente de plantation contre le soleil et donc le dessèchement.

La mise en place du plant dans le sol, c'est-à-dire le bon positionnement du collet, doit pouvoir être maîtrisée parfaitement ce qui suppose de définir précisément pour chaque espèce où se trouve l'optimum pour la hauteur du collet en fonction de l'âge et la taille du plant.

Tous les outils en contact avec le plant doivent être munis de protections en caoutchouc (ou équivalent) pour éviter de le blesser (branches, tige, écorce, collet, racines). Il faut aussi pouvoir serrer le plant au collet, sans écraser le chevelu des racines, ce qui nécessite une adaptation assez fine du point de vue technique. De plus, la mise en terre de plants à racines nues doit pouvoir se faire avec un système racinaire de 25-30 cm sans le déformer. La biomasse racinaire recèle une grande partie des réserves de l'arbre; c'est elle qui favorisera activement la croissance de racines nouvelles, après la plantation. Il doit donc être possible de planter sans taille préalable des racines (uniquement un habillage très léger), sauf cas exceptionnel de racines trop longues. Vient enfin la phase particulièrement sensible du re-tassement du sol autour du plant: il faut exercer une légère pression, bien dosée, pour chasser l'air et permettre aux racines de mieux adhérer au sol. Cela nécessite donc un système de pression adaptable localement en fonction de la texture et de l'humidité du sol. La pression ne devant pas être appliquée trop près de la tige, mais à environ 5-10 cm du collet, on pourrait penser à deux demi-anneaux (pièces plates, dont le diamètre intérieur serait de 10 cm), positionnés autour du plant après sa mise en terre.

Par ailleurs la planteuse « idéale » doit éviter les inconvénients d'un sillon, ce qui milite en faveur d'un travail semi-continu avec deux phases de travail principales : 1) arrêt + création du trou + plantation ; 2) déplacement de l'engin sur la distance prédéfinie (par exemple 2 m). La distance de déplacement d'un point de plantation au suivant doit pouvoir être gérée parfaitement (distances programmables de 100 à 500 cm) afin de bien prendre en compte les consignes de plantation du gestionnaire.

Enfin la gestion du mélange des essences doit pouvoir être automatique. Cela suppose de gérer plusieurs bacs d'alimentation (un par espèce) qui « servent » la machine selon une alternance programmée, mais aussi de comptabiliser par essence les plants mis en terre, pour pouvoir contrôler le respect des consignes de plantation. Cependant aujourd'hui ce mélange est souvent préconisé par plateaux et non plus pied à pied : de fait il semble préférable que cette biodiversité localisée reste installée manuellement...

Options à prévoir ?

Afin d'éviter l'assèchement des racines un pralinage automatique peut être prévu, mais cette tâche pourrait être réalisée de manière indépendante de la phase de plantation proprement dite.

Certaines espèces ont une meilleure capacité de reprise lorsque leurs racines sont « rafraîchies » avant plantation (habillage). L'intensité de l'habillage est à adapter à l'espèce, car toutes ne supportent pas le même traitement. On peut se demander si la coupe automatisée et adaptable a un quelconque avantage dans le cadre de la plantation mécanisée ou s'il vaut mieux qu'elle reste manuelle dans tous les cas, comme le serait par exemple le pralinage.

Selon les situations, il peut s'avérer utile de pouvoir mettre un manchon de protection (contre le gibier) sur

le plant, avec ou sans tuteur. Pour maîtriser les coûts, cela doit pouvoir se faire en même temps que la plantation, sans avoir à revenir sur les lignes de plantation ou les potets. Mais cela semble techniquement bien compliqué à résoudre...

Aspects économiques, productivité

Le développement d'une machine coûte cher, notamment si elle doit être capable de s'adapter aux multiples exigences dont nous venons de parler. Cependant son amortissement doit être possible dans un laps de temps équivalent à celui qui s'applique aux machines traditionnelles travaillant en forêt, c'est-à-dire entre 6 et 8 ans.

Si on veut que l'engin « planteuse » (ensemble tracteur et outil avec un ou plusieurs opérateurs) soit rentable, il doit être obligatoirement plus performant que l'ouvrier planteur, c'est-à-dire planter bien plus de plants par jour (donc un coût/plant plus faible), sans pour autant rogner sur la qualité. Sinon, le développement d'une telle machine serait d'avance voué à l'échec. Afin de simplifier la comparaison, nous supposons ici que toute la logistique en amont de la plantation est identique pour la plantation manuelle et mécanisée (achat et acheminement des plants, mise en jauge éventuelle sur place...).

Référence : la performance d'un ouvrier planteur

Un ouvrier peut planter entre 400 et 1 000 plants par jour selon l'essence, le type de plant (âge, taille, racines nues ou godet de volume variable) et les conditions rencontrées sur la parcelle : type et densités de rémanents ou autres obstacles, texture et humidité du sol, préparé ou pas avant la plantation. Le maximum est évidemment lié à de longues journées de travail parfois pratiquées par les entreprises spécialisées.

Pour une plantation de qualité, et selon l'expérience du groupe de

travail, on peut planter au mieux un plant par minute, en vrai potet travaillé et non en fente. En 8 heures de travail, un ouvrier plantera donc en moyenne au mieux 480 plants. Le coût horaire complet employeur se situe en gros entre 25 et 35 €/heure, selon l'entreprise et la région. Le coût journalier (8 heures de travail) serait donc de 200 à 280 € soit un coût de 0,42 à 0,58 € HT/plant.

Conséquence : objectif de productivité machine

L'ensemble « planteuse » serait composé d'un tracteur avec chauffeur et de l'outil tracté avec un ou deux opérateurs ; nous faisons ici pour simplifier l'hypothèse d'un seul opérateur. Le coût horaire technique complet du tracteur (entre 140 et 200 ch) avec chauffeur, mais sans les frais de structure (variables selon la taille de l'entreprise), est de l'ordre de 60 € HT/heure machine, avec un amortissement en 6 ans. Le coût horaire technique complet de la planteuse (engin + opérateur) serait de 32 ou 40 €/h.m, respectivement pour deux hypothèses de prix de vente d'une planteuse imaginée : 20 000 ou 45 000 € HT La planteuse serait utilisée 70 jours/an et amortie sur 8 000 heures machine, donc sur 13,5 années ; cela dépasse largement le souhait initial (6-8 ans), mais on peut supposer qu'une telle machine ne se dégrade pas aussi rapidement qu'un tracteur forestier.

Le coût total horaire serait donc de 92 à 100 € HT. En 8 heures de travail la machine doit donc pouvoir planter au moins 1 269 à 1 905 plants pour égaler le coût technique de la plantation manuelle ; ou plutôt 1 650 à 2 477 plants si on vise un gain de productivité de 30 %. Cela fait un plant tous les 12 à 17 secondes, tout en respectant les exigences décrites ci-dessus...

Supposons maintenant que l'ensemble « planteuse » puisse être géré par une seule personne : le chauffeur du tracteur. Le coût total horaire serait alors de 67 à 75 € HT En 8 heures

de travail la machine devrait encore pouvoir planter au moins 924 à 1 429 plants pour égaler le coût technique de la plantation manuelle et 1 201 à 1 858 plants pour obtenir un gain de productivité de 30 % ; c'est-à-dire un plant tous les 16 à 24 secondes.

Ne pas négliger les pannes

Ces deux scénarios ont déjà un air de défi techniquement irréaliste en travail continu mais, en supposant que ce soit possible, il faut encore intégrer le fait que toute machine est source de pannes. Que ce soit sur le tracteur ou la planteuse, chaque panne a ici un coût élevé, puisqu'elle immobilise non seulement les deux engins mais également les deux opérateurs qu'il faut quand même payer...

En comparaison, si un des planteurs tombe malade, il peut être facilement remplacé pendant la durée de sa maladie par un autre ouvrier, qui intervient en dépannage sans que cela engendre obligatoirement de grands frais supplémentaires.

Prendre en compte toute la chaîne de plantation

L'idée qui sous-tend l'éventuel développement d'une planteuse est aussi d'éviter des échecs en standardisant la phase « plantation ». Il semble en effet que les cas d'échec de plantation augmentent. Mais l'analyse détaillée de ces échecs montre souvent des causes ou défaillances multiples, dans toute la chaîne logistique et pas seulement lors de la « plantation » proprement dite.

La chaîne de « plantation » démarre par un bon choix d'essences et de provenances dont l'origine doit être rigoureusement contrôlée. La production des plants en pépinière a fait beaucoup de progrès, mais elle peut encore se montrer hétérogène voire parfois médiocre. Ensuite, la qualité des plants peut rapidement se dégrader si les conditions de transport et de stockage avant plantation sont approximatives. **La réception des**



L. Wehrliet INRA



F. Vaast INRA

plants est d'une importance vitale : si la qualité des plants n'est pas conforme à la commande et aux exigences réglementaires (normes qualitatives applicables à la production sur le territoire national de matériels forestiers de reproduction), la livraison doit être rejetée. La méthode du contrôle est très bien définie dans le fascicule « Réussir la forêt – contrôle et réception des travaux », édité par le ministère chargé de la forêt et

l'ONF en 1990, et qui n'a rien perdu de sa pertinence. Après la réception, **les conditions de stockage** des plants sont déterminantes : un mauvais stockage (jauge mal préparée, bottes de plants entassées dans la jauge... ou à l'air libre) peut dessécher ou geler le système racinaire ; de même, un stockage trop long peut compromettre la reprise des plants (risques de pourriture...). Une bonne organisation de la campagne et des

chantiers de plantation (notamment l'articulation livraison → plantation) est cruciale. Enfin, **la préparation ou non du terrain** peut également avoir une grande influence : il faut savoir observer, choisir en conséquence les opérations pertinentes. **Après la plantation**, il faut encore maîtriser la concurrence herbacée pendant les 2 ou 3 premières années, pour que le plant puisse s'installer ; les dégagements contre les ligneux devront intervenir ensuite, au bon moment.

Conclusions du groupe de travail

La question de la plantation mécanisée n'est pas nouvelle. Force est de constater que, depuis qu'elle est posée, on n'observe pas de boom dans l'emploi des quelques modèles de planteuses existants, ni en France ni ailleurs. Pourquoi ?

Sans être exhaustives, nos réflexions soulignent l'ampleur des obstacles qu'il faudrait surmonter pour le développement d'une planteuse (ou de plusieurs types de planteuses, chacun devant alors répondre à un ensemble de contextes plus restreint). On comprend aussi qu'un ouvrier planteur a bien plus de facilité et de souplesse pour s'adapter, plant par plant, aux différentes situations rencontrées au fur et à mesure de son cheminement. Il peut facilement éviter les obstacles, planter là où les rémanents (ou broyats) sont moins abondants ; ou bien il peut adapter la profondeur de plantation dans une couche épaisse de rémanents, etc. Si l'on considère qu'avant la plantation il est conseillé de travailler le sol par une préparation mécanisée, alors le travail du planteur exige moins d'effort physique : il peut se concentrer sur la qualité d'installation du plant.

Tout ceci milite donc en faveur de la plantation manuelle, à condition de recouvrer un savoir-faire technique qui s'est plus ou moins évanoui avec les années du retour à la régénération naturelle (période 1990 à 2010 environ).

Et peut-être serait-il même utile de réapprendre à semer des graines car les semis développent des racines bien équilibrées et sans déformations, et préparer le sol comme il convient ? Mais restons-en ici à la question de la plantation.

Mieux maîtriser la plantation, c'est d'abord une meilleure formation/habilitation des planteurs sur les techniques de plantation. C'est aussi s'attacher à la qualité, quitte à limiter le cas échéant les exigences en nombre de plants à planter par jour. Un travail sur le choix de meilleurs outils à planter est aussi nécessaire, pour réduire la pénibilité de cette opération. Entre autres conséquences positives, cela diminuerait les coûts « annexes » qu'on a tendance à oublier : regarnis, replantation, effet de « bombe à retardement » lorsque les conséquences d'une mauvaise qualité de plantation se manifestent 5 à 30 ans plus tard...

Par ailleurs les nouvelles générations de gestionnaires forestiers qui ont à réaliser un nombre croissant de plantations ont de plus en plus de mal à contrôler toute la chaîne, en partie par manque d'expérience et de savoir-faire. Mais c'est aussi que les évolutions de la gestion et l'augmentation de la taille des circonscriptions ne permet plus d'y consacrer le même temps que les générations de forestiers précédentes. Là encore, il y a un besoin de formation/habilitation des prescripteurs sur le choix du type de plants (âge, taille, racine nue ou godet...), des provenances ou des densités adéquates. C'est un enjeu d'autant plus important que la réussite de l'adaptation de nos forêts au changement climatique dépendra en partie de la maîtrise de toute cette chaîne de plantation.

Erwin ULRICH

Chargé de R&D mécanisation
ONF, département R&D

Groupe de travail

(voir les remerciements)

Remerciements

Cet article retrace les réflexions des membres du groupe de travail ONF-MGVF/INRA-FCBA sur la « Maîtrise des méthodes de préparation du sol avant régénération naturelle ou plantation ». Merci à eux tous, à savoir : ONF : Christophe Dugat, Didier François, Jean-Paul Grandjean, Bernard Heois (aujourd'hui : CRPF Nord Pas-de-Calais Picardie), Bernard Jovignot, Laurent Lévêque, Marie Leys, François Poupard, Claudine Richter, Patrick Schwirtz, Jean-Pierre Thomassin
MGVF : Léon Wehrlen, Florian Vast
FCBA : Daniel Michaud
AgroParisTech-Nancy : Gérard Falconnet (aujourd'hui : en retraite)

Bibliographie

Peuch D., Paillot E., Bobinet G., Moulin M., 2009. La plantation mécanisée de douglas avec le « Bräcke Planter » : quels enseignements après quatre années d'utilisation ? Rapport FCBA-MECAFOR-CFBL, 15 p.

Trenk F.B., 1963. Evolution of modern tree planting machines. Journal of Forestry vol. 61 n° 10, pp. 726-730

Wehrlen L., 2009. Mieux planter ! La technique « 3B » élimine la végétation et décompacte le sol en une seule opération. Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 25-26 pp.7-12

Préparer le sol avant plantation selon la technique « 3B » avec tracteur et l'outil Culti 3B® - Validation sur chantiers test

Les questions de préparation du sol et maîtrise de la végétation avant régénération représentent un enjeu majeur de la gestion forestière durable. L'ONF pratique depuis longtemps différentes méthodes de préparation, mais les besoins sont croissants et les moyens contraints. Dans le cadre de l'optimisation de la mécanisation forestière, on a donc intérêt à chercher comment harmoniser les méthodes et en limiter le nombre. Pour conduire cette réflexion, le groupe de travail ONF-MGVF¹ « Maîtrise des méthodes de préparation du sol avant régénération naturelle ou plantation » a dressé un état des lieux. Il a identifié 32 plantes ou groupes de plantes herbacées, semi-ligneuses ou ligneuses pouvant conduire à une situation de blocage avéré, ainsi que 13 problèmes physiques liés au sol ; il a aussi recensé à l'ONF 23 méthodes de travail mécanisées pour pallier ou éviter ces problèmes de blocage. Certains types de blocage, concernant des surfaces à régénérer importantes, n'ont pas encore de solution satisfaisante, mécanisée ou chimique. En outre, la voie chimique tend à se réduire avec la diminution du nombre de produits phytopharmaceutiques homologués pour un usage en forêt.

L'objet de cet article est de présenter le résultat d'un nouveau développement de la technique « 3B » (Billon-Bombé-Becker) que les forestiers connaissent depuis quelques années (Wehrle, 2009). Cette évolution permet dès à présent de répondre aux besoins croissants de travail du sol en profondeur et au-dessus du terrain naturel en améliorant fortement

la vitesse de travail tout en maintenant un bon niveau de qualité, et en diminuant très nettement le coût total de mise en œuvre.

Problématique à l'origine d'un nouveau développement « 3B »

Parmi les problèmes identifiés, celui des sols compactés en surface ou en profondeur est d'une acuité particulière pour l'ONF. Il concerne le plus souvent des parcelles aux sols sensibles (à texture surtout limoneuse à argileuse) et/ou qui ont été parcourues en exploitation par des engins trop lourds et sur une trop large part de leur surface (>30 %) ; elles n'ont pas connu dans le passé l'organisation stricte de la circulation qui s'impose aujourd'hui à l'ONF (NDS-09-T-297). « L'ère du tassement » s'est amorcée dans les années 50, lorsque le machinisme forestier a commencé à se développer de façon importante. Le nombre de parcelles tassées depuis 50-60 ans à des degrés divers, et souvent à répétition, est donc probablement élevé.

Pour décompacter le sol, il existe plusieurs outils mécanisés qui réalisent un travail semi-profond (15-40 cm) à profond (40 cm et plus) et permettent en même temps d'écarter la végétation herbacée de la surface travaillée. Ainsi le plant profite d'un sol décompacté relativement nu, sans véritable concurrence herbacée pendant 2-3 ans, le temps de pousser suffisamment pour dépasser la hauteur de la végétation concurrente qui se sera réinstallée. En particulier, la technique 3B (Billon-Bombé-Becker) développée par Claude Becker apporte

une amélioration remarquable dans des situations difficiles.

La technique 3B

Lorsque le travail est réalisé correctement, la technique 3B permet de décompacter le sol jusqu'à 60 cm de profondeur, sans mélange des horizons et en formant un billon surélevé de 30 cm environ. Le billon permet à la plante de disposer d'un volume de terre important, la hauteur totale étant d'environ 80-90 cm, et facile à prospector sur une largeur d'environ 1,20 m. Après ce travail du sol, la plantation est facilitée et, au démarrage de la croissance, les racines du plant se situent au-dessus de l'éventuelle nappe asphyxiante.

Au départ, cette technique a été conçue pour une réalisation avec minipelle équipée d'un sous-soleur multifonction, et pour un travail en potets ou en bandes. Aujourd'hui, et c'est l'objet de cet article, elle peut également être mise en œuvre avec un tracteur pour améliorer la vitesse de travail, grâce à l'outil Culti3B®.

Version initiale sur minipelle

Le sous-soleur multifonction monté sur minipelle (Wehrle, 2009) rencontre un certain succès depuis quelques années. La clé de la réussite réside dans la formation des opérateurs, sans quoi on observe souvent des problèmes, voire des échecs, après plantation. L'inconvénient est cependant de ne pouvoir travailler qu'une faible surface par unité de temps, ce qui revient cher et réserve de fait la méthode aux cas de regarnis d'une régénération partiellement acquise. Il est rare de l'utiliser dans des parcelles entières, surtout pour

¹ MGVF = Mission Gestion de la Végétation Forestière ; c'est une équipe du LERFoB (Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois), unité mixte INRA/AgroParisTech ; son rôle est d'apporter aux gestionnaires des connaissances et des outils pour gérer la végétation accompagnatrice des jeunes ligneux forestiers sous les contraintes socio-économiques et environnementales actuelles

des raisons financières, sauf lorsqu'on travaille par potets (carrés allant le plus souvent de 1*1 à 5*5 m, selon la concurrence de la végétation herbacée ou ligneuse présente).

Adaptation pour tracteur : l'outil Culti 3B®

D'où l'idée de développer un autre outil dont les résultats soient analogues à ceux du sous-soleur multifonction de la technique 3B initiale, mais en travail linéaire et continu (largeur travaillée : 1,20 à 1,50 m) pour augmenter la rapidité et réduire les coûts. Ce développement a fait partie d'un accord de partenariat R&D conclu en 2011 entre l'ONF et la société Claude Becker (qui s'est ensuite associée au constructeur Grenier-Franco), en visant un gain de productivité d'au moins 50 %. L'outil,

appelé « Culti 3B », devait également pouvoir travailler sur sol ensouché, dans la limite de 400 souches/hectare (coupées à hauteur raisonnable). De plus, il devait permettre la possibilité d'un semi-drainage, en liant le cas échéant le sillon travaillé à un réseau hydraulique existant.

Comparaison « minipelle + sous-soleur multifonction » et « tracteur + Culti 3B® »

Depuis 2012, la technique 3B (Billon Bombé Becker) peut donc se pratiquer soit avec la minipelle équipée du sous-soleur multifonction (planche 1 ; Chavet 2009 ; Wehrlen 2009), soit avec le billonneur forestier Culti 3B attelé à un tracteur forestier (planche 2). À la différence près qu'avec la minipelle on travaille toute

la largeur souhaitée en profondeur (donc 65 cm), alors que le Culti 3B ne permet d'atteindre cette profondeur qu'au milieu de la bande travaillée. Le volume exploitable par le système racinaire est donc moins important. Le Culti 3B s'adapte sur le système 3 points des tracteurs à partir de 140 chevaux. Sur sol lourd ou truffé d'obstacles (ex. : fort enracinement ou forte pierrosité), l'expérience a montré qu'il vaut mieux travailler avec des tracteurs de 160 à 200 chevaux. Si nécessaire les roues arrière doivent être jumelées (c'est-à-dire 2 fois 2 roues) pour diminuer la pression au sol. Le Culti 3B ne travaille qu'en linéaire ; son utilisation est donc essentiellement destinée à la régénération artificielle (par plantation ou semis) et sur terrain plat ou en légère pente (<10 %).



Sous-soleur multifonction

Poids : 120 Kg
 Largeur du peigne : 63 centimètres
 Hauteur sans sabot : 65 centimètres
 Profondeur maxi de travail dans le sol : 65 cm



Minipelle

Poids : 2,5 à 5 tonnes maxi
 Longueur : de 5 à 6 mètres (bras déployé)
 Largeur : de 1,50 à 1,80 mètres

Planche 1 : caractéristiques du sous-soleur multifonction monté sur minipelle pour la réalisation de la technique « 3B »

Dimensions et fonctionnement

Poids : 2,2 tonnes pour le Culti 3B (+ 5-7 tonnes pour le tracteur, selon puissance et options permanentes)

Longueur 3,5 mètres ; largeur 2,4 mètres

L'outil comprend :

- une dent de sous-solage de 87 cm avec deux ailettes (une de chaque côté) soudées à la même hauteur
 - deux paires de disques billonneurs. - Diamètre des disques : 81 cm
- NB : le jalon est gradué tous les 10 cm

Les disques, indépendants, non motorisés, s'effacent sur un plan vertical et horizontal devant un obstacle (rémanents, buttes, souches...). Portés par deux « bras », ils sont plaqués au sol avec des ressorts à lame (voir flèche).



Les disques s'écartent vers l'extérieur dès qu'ils sont plaqués au sol. La paire la plus proche de la dent de sous-solage travaille le sol jusqu'à 20-30 cm maxi et réalise le petit bombé ; celle qui est en arrière travaille de même et réalise le grand bombé. Pour un bombé bien formé, la vitesse de déplacement doit être > 4 km/h, (mieux vers 4,5 km/h).

Les bras peuvent être réglés de manière à pouvoir travailler 2 largeurs différentes (150 et 180 cm).



En option,

des vérins (voir flèches) peuvent soulever le cadre qui porte les disques, pour travailler ponctuellement avec la dent de sous-solage seulement. Si, par exemple, le travail d'une ligne part d'un fossé de façon à relier le sillon travaillé au réseau hydraulique (effet de semi drainage), cela évite de fragiliser le fossé ou d'y faire tomber de la terre.



Planche 2 : caractéristiques du prototype billonneur forestier Culti 3B®, composé d'une dent de sous-solage et de disques billonneurs et attelé à un tracteur

Des chantiers test pour cerner le domaine d'utilisation du Culti3B

Un deuxième partenariat R&D entre l'ONF et les sociétés Claude Becker et Grenier-Franco a permis de préciser le domaine d'utilisation du Culti 3B sur 8 chantiers test décrits dans le tableau 1, représentant un total de 42,5 hectares et répartis dans 4 forêts domaniales : Francois-Bryas (08), Vierzon (18), Le Pochon (21) et la forêt indivise d'Eu (80). L'objet est de confirmer (ou améliorer) les aptitudes du prototype et de vérifier l'effet du travail sur le sol, sans perdre de vue les considérations économiques.

Les sols sur lesquels le Culti 3B a été testé sont *a priori* sujets au compactage : sols bruns acides ou lessivés voire pseudogleys sur substrat essentiellement limoneux ou argileux. Les blocages sont donc presque uniquement provoqués par des problèmes physiques du sol (tassement superficiel à moyennement profond ou hydromorphie). La forêt de Vierzon fait figure d'exception avec un sol sableux hydromorphe sur plancher argileux. Les types de couverture végétale sont variés, depuis la quasi absence de végétation jusqu'au tapis épais de molinie plus ou moins mélangé de fougère aigle, en passant par des ensembles plus ou moins denses de ronces associées à des graminées (poacées), cypéracées ou joncacées. Les densités de souches varient de 0 (dessouchage complet) à 356 souches/ha et les différents schémas de plantation prévus correspondent à un linéaire théorique de plantation de 2,5 à 4,2 km/ha.

Préparation du sol avant l'intervention du Culti 3B

Différentes variantes ont été testées depuis un broyage léger, ou lourd et fin, jusqu'à un dessouchage complet suivi d'un broyage lourd. Dans les situations à végétation herbacée un peu plus dense (Eu : léger mélange de jonc, fougère aigle, ronce, carex, canche, etc.) voire très dense (tapis épais de molinie à Vierzon), un travail

du sol a été réalisé avec deux types de cover-crop, parallèlement aux futures lignes de plantations mais sans retournement du sol; l'objectif était de hacher les mottes de terre pour faciliter le travail du Culti 3B lors de la création du billon.

Travail avec le Culti 3B

Le Culti 3B a été testé avec des tracteurs de 141 à 200 chevaux. Dans tous les cas sauf Vierzon, il a fallu deux passages sur chaque ligne de plantation car le premier passage n'a pratiquement jamais donné le résultat souhaité, à savoir une profondeur de travail suffisamment homogène et un billon suffisamment formé et haut. La vitesse minimum nécessaire à la bonne formation des billons est de 4 km/h : c'est à partir de ce seuil que les disques peuvent projeter la terre au milieu du billon. Or pendant la phase « travail sur sillon », dent de sous-solage en terre et disques plaqués au sol, la vitesse de travail sur le compteur (= vitesse instantanée) au premier passage a varié selon le chantier entre 3,2 et 4,0 km/h : il n'a pas été possible de rouler plus vite du fait de l'état du terrain. Les principaux obstacles ont été aussi bien les dimensions des rémanents (diamètre et longueur) dans le cas d'un broyage sommaire, ou l'épaisseur de résidus si le broyage a été plus intensif, que la résistance du sol par endroits. La vitesse de travail a pu augmenter au deuxième passage (entre 4,1 et 4,5 km/h lu sur le compteur).

Les meilleurs résultats, correspondant aux objectifs de développement du Culti 3B, ont été obtenus en forêt de Francois-Bryas. Viennent ensuite ceux de la forêt de Le Pochon puis de la forêt d'Eu. En forêt de Vierzon, le résultat n'est pas du tout satisfaisant sur sable limoneux couvert d'un tapis épais et quasiment impénétrable de molinie, même après qu'il ait été haché en deux passages par un cover-crop lourd. Il a été impossible d'y créer un billon, car les disques n'arrivaient pas à entrer dans le sol : soit ils tournaient dans le vide, soit ils faisaient des bombés composés de molinie broyée.

Forêt parcelle (surface)	•Sol/station •Végétation herbacée susceptible d'effet bloquant
FD Francois-Bryas 122/123 (14 ha)	<ul style="list-style-type: none"> •Sol brun acide •Sans végétation au sol (ancienne pessière adulte ou douglas, victime de la tempête de 2010), sauf quelques taches de fougère aigle
FI d'Eu 403.1 (10,2 ha)	<ul style="list-style-type: none"> •Sol brun acide sur des limons sur argile •Couverture régulière mais pas dense de Rubus sp., Deschampsia coespitosa, Luzula pilosa, Pteridium aquilinum, Carex pilulifera, Agrostis tenuis, Juncus effusus
FI d'Eu 605.1 (16 ha)	<ul style="list-style-type: none"> •Sol brun faiblement lessivé (limon sur argile avec silex) •Couverture régulière mais pas dense de Rubus sp., Carex sylvatica, Deschampsia coespitosa, Carex remota, Juncus effusus
FD Vierzon 137 (22 ha)	<ul style="list-style-type: none"> •Chênaie acidiphile hydromorphe sur sable avec plancher argileux •Tapis épais de molinie
FD Le Pochon 26 (7,1 ha)	<ul style="list-style-type: none"> •Du sol brun lessivé au pseudogley •Couverture régulière, mais pas dense de Festuca heterophylla, Rubus sp. et Carex brizoïdes
FD Le Pochon 61 (4,62 ha)	<ul style="list-style-type: none"> •Du sol brun lessivé au pseudogley •Couverture régulière, mais pas dense de Carex brizoïdes, Rubus sp., Urtica dioica et Festuca heterophylla

Profondeur pH (CaCl ₂ , 0,01 mol/L) S/T, saturation en bases Texture (d'après Jamagne, sols de l'Aisne, 15 classes)	Surface travaillée [et nombre moyen de souches à l'ha]	•Préparation avant le travail au Culti 3B •Tracteurs utilisés avec le Culti 3B (2 passages par ligne sauf Vierzon : 1 passage)	Périodes d'intervention pour les différents travaux du sol
0 - 60 cm (pH) 3,9 - 4,1 (S/T) 6,4 - 13,5 % Limon argileux	8,5 ha [0]	•Dessouchage (pelle 23 tonnes+lame de Becker) puis broyage lourd (broyeurs axe horizontal à marteaux fixes Variotrac 400 et Galotrac 400) •Valtra T161 (170 ch)	Dessouchage : juin à début juillet 2012 (5 semaines) Broyage : 20 août - 3 septembre 2012 Culti 3B : 28 août - 6 septembre 2012
0 - 70 cm (pH) 3,9 - 4,0 (S/T) 7,6 - 41,1 % Limon moyen sableux à limon argilo-sableux	6,2 ha [124]	•Broyage habituel local = broyeur axe horizontal à marteaux fixes AHWI FM500, avec tracteur Valtra 80-50 (141 ch) •Valtra 80-50 (141 ch)	Broyage : août 2012 Culti 3B : 11-13 septembre 2012
0 - 70 cm (pH) 3,9 - 4,0 (S/T) 7,6 - 41,1 % Limon moyen sableux à limon argilo-sableux	4,0 ha [124]	•Broyage habituel local (idem), suivi d'un travail au Cover Crop "Crabe" avec tracteur Valtra T191 (200 ch) parallèle aux lignes de plantation, en un passage rapide destiné à trancher les mottes enherbées sans les retourner •Valtra T191 (200 ch)	Broyage : août 2012 Cover-Crop : 26-28 septembre 2012 Culti 3B : 28 septembre - 2 octobre 2012
0 - 70 cm (pH) 3,9 - 4,1 (S/T) 14 - 65,3 % Limon argilo-sableux, argile limoneuse à argile lourde	6,0 ha [85]	•Broyage habituel local (idem pille 403) •Valtra T191 (200 ch)	Broyage : début septembre 2012 Culti 3B : 14-19 septembre 2012
0 - 70 cm (pH) 3,9 - 4,1 (S/T) 14 - 65,3 % Limon argilo-sableux, argile limoneuse à argile lourde	4,0 ha [85]	•Broyage lourd avec broyeur axe horizontal à marteaux fixes (chenillard AHWI RT 400), puis rebroyage lourd (rémanents trop longs, trop abondants) avec broyeur à axe horizontal Plaisance BF 501-2000 et tracteur Valtra T191 (200 ch) •Valtra T191 (200 ch)	Broyage lourd : début septembre 2012 Rebroyage : 18-20 septembre 2012 Culti 3B : 21-26 septembre 2012
0 - 70 cm (pH) 3,6 - 4,3 (S/T) 4,5 - 39,4 % Sable limoneux à sable argileux	2,6 ha [61]	•Broyage habituel local = broyeur axe horizontal à marteaux fixes AHWI FM500 avec tracteur Valtra T131 (141 ch) , puis travail avec un Cover Crop lourd (avec Bull) parallèle aux lignes de plantation, les disques étant orientés parallèlement à la direction d'avancement •Valmet 89-50 (200 ch)	Broyage habituel local : août 2012 Cover Crop lourd : 4-8 octobre 2012 Culti 3B : 9 octobre 2012 (un seul passage par ligne), puis abandon
0 - 70 cm (pH) 4,1 - 4,3 (S/T) 43,2 - 78,2 % Limon moyen à argile limoneuse	6,55 ha [356]	•Broyage habituel local = broyeur axe horizontal à marteaux fixes, AHWI FM 500, avec tracteur Valtra T191 (200 ch) •Valtra T191 (200 ch) avec roues arrières jumelées, le sol étant déjà bien humide	Broyage : 15-20 novembre 2012 Culti 3B : 22-24 novembre 2012
0 - 70 cm (pH) 4,2 - 4,6 (S/T) 59,4 - 81,9 % Limon moyen sableux, limon argileux à argile limoneuse	4,62 ha [167]	•Broyage habituel local (cf. pille 26), avec tracteur Valtra T161 (170 ch) •Valtra T191 (200 ch) avec roues arrières jumelées, le sol étant déjà bien humide	Broyage : 8-11 octobre 2013 Culti 3B : 13-14 novembre 2013

Tab. 1 : présentation sommaire des chantiers test ; voir aussi la planche 3

Forêt domaniale de Francois Bryas – sol dessouché, rémanents broyés finement



Forêt Indivise d'Eu parcelle 430 – rémanents broyés sommairement



Forêt domaniale de Le Pochon – rémanents broyés sommairement



Forêt domaniale de Vierzon – molinie et les quelques rémanents broyés sommairement



Forêt Indivise d'Eu parcelle 605 - rémanents broyés plus finement



Planche 3 : exemples du travail avec le Culti 3B

L'impression initiale de « champ de culture » disparaîtra dès la première année de végétation, avec la repousse de l'accompagnement ligneux et herbacé habituel (photo p. 21). Les repères (et tracés) orange dans les profils de sol indiquent la limite de la zone travaillée (+ jalons de 1,50 m gradués tous les 10 cm).

Résultats « machine » - Vitesse réelle d'exécution

En moyenne (figure 1), 57,4 % du temps est utilisé pour l'objectif principal du travail avec le Culti 3B : le travail sur sillon. Les tournières (passage d'une ligne travaillée à la suivante ou retournement sur la même ligne) représentent la deuxième phase avec 14,0 % du temps. Le temps passé pour éviter les souches en relevant l'outil, ou pour les contourner si elles sont trop hautes, représente 16,9 % du temps, à part presque égale pour les deux types de manœuvre. Le temps moyen passé pour éviter ou contourner tout autre obstacle (arbres restants, grands trous, petites surfaces de régénération pré-existante) représente 6,4 %. Les tournières durent en moyenne 39,6 secondes. La durée moyenne de l'évitement des souches (11 secondes) est le tiers de celle d'un contournement (34 secondes).

En moyenne, la vitesse au compteur relevée lors du travail sur sillon surestime la vitesse réelle d'exécution de 32 % au premier passage et 38 % au deuxième passage, car elle ne rend pas compte des temps d'arrêt. Pour appréhender la productivité, il faut au minimum intégrer le temps nécessaire aux tournières, ce qui conduit à une vitesse moyenne de 2,0 km/h pour le premier passage et de 2,4 km/h pour le deuxième passage. **Pour obtenir la qualité de travail souhaitée et livrer un sol prêt à la plantation, la vitesse moyenne d'exécution (en deux passages, avec tournières et incidents) est donc de 1,1 à 1,2 km/h. C'est cette vitesse moyenne d'exécution qui doit faire référence lors de toute communication sur le travail du sol au Culti 3B.**

Compte tenu des schémas de plantation, la longueur totale moyenne des lignes de plantation par hectare est de 3,5 km. Cette longueur est parcourue en gros en 2,9 à 3,2 heures machine ; autrement dit le Culti 3B permet

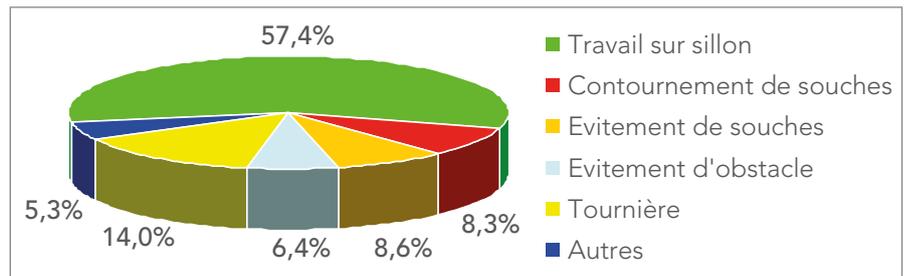


Fig. 1 : proportions moyennes des phases de travail dans le temps global de travail avec le Culti 3B
Résultats des chronométrages sur 43,5 km et prenant en compte toutes les modalités.

de réaliser en moyenne environ 2,5 à 2,7 hectares par jour (8 heures machine/jour).

Effet du travail sur le sol

Il était prévu de travailler autant que possible par temps sec et sur sol sec, même en profondeur. Cela rend le travail du sous-sol plus efficace, du fait qu'il peut fracturer le sol en profondeur avec la dent et les ailettes latérales au lieu de ne créer que des sillons lisses dans un sol trop humide. Un sol fracturé en profondeur permet aux plants de développer plus facilement un système racinaire équilibré horizontalement et verticalement.

Ces conditions ont été parfaitement respectées en FD de Franchois-Bryas (travail fin août - début septembre 2012), mais de moins en moins sur les autres chantiers, avec l'arrivée de l'automne et de périodes pluvieuses de plus en plus longues et intenses. Nous avons ainsi commencé le travail en forêt d'Eu sur sol sec, parcelle 430, continué parcelle 605 sur sol légèrement humide, et poursuivi sur sol déjà très humide en forêts de Vierzon et Le Pochon. Du coup, nous avons pu constater l'effet des différents états d'humidité du sol sur la qualité de travail du sol avec le Culti 3B et les limites de son emploi.

Mesure précise de la résistance du sol à la pénétration

En forêt de Franchois-Bryas des mesures de résistance du sol à la pénétration ont été réalisées avec un PANDA® (Pénétrömètre Automatique

Numérique Dynamique Autonome), sur sol non travaillé et travaillé dans des conditions très sèches (plus de 3 semaines sans pluie, le temps étant très ensoleillé et parfois venteux).

Avant travail du sol, la résistance à la pénétration entre 10 et 40 cm de profondeur est de 1 à 5 MPa (1 MPa = 1 Mega Pascal = 10^6 Pa \approx 10 bar), puis 2 à 6 MPa jusqu'à 70 cm de profondeur (figure 2). Dans des zones à sol très dur (difficultés d'avancement observées lors du chronométrage), la résistance au-dessus de 70 cm de profondeur peut même dépasser les 10 MPa. Après travail du sol, la résistance reste presque toujours inférieure 2 MPa. Dans les deux cas, la résistance augmente fortement en dessous de 70 cm de profondeur (zone non travaillée), atteignant voire dépassant les 10 MPa, surtout dans un sol très dur.

Nous avons pu mesurer l'évolution de la résistance du sol dans les états successifs « non travaillé » → « travaillé une fois » → « travaillé deux fois ». Après le premier passage, la fourchette de résistance le long du profil diminue (mais reste dans la gamme de 1 à 6 MPa le plus souvent). Le vrai bénéfice du travail du sol est atteint après le deuxième passage, qui permet de baisser la résistance en dessous de 2-3 MPa sur presque tout le profil, jusqu'à 60 cm de profondeur. **Il faut donc toujours deux passages. Pour éviter de créer des poches d'air avec des racines délogées, il est recommandé de toujours travailler dans le même sens.**

Approche plus simple de la résistance du sol à la pénétration

Dans les autres chantiers, nous avons mesuré très simplement, avec un jalon gradué, la profondeur du sol facilement pénétrable ainsi que la hauteur des billons ou la profondeur des creux créés. Lors de l'interprétation de ces données, il faut bien garder à l'esprit qu'il ne s'agit pas de mesures standardisées et que l'humidité du sol était différente d'un site à l'autre; or l'humidité a un effet sur la capacité de pénétration, notamment dans le sol non travaillé. Néanmoins, ces mesures donnent un aperçu de ce que le travail du sol avec le Culti 3B a eu comme effet. Au total, nous avons fait 769 mesures de cette « profondeur facilement pénétrable » depuis le milieu du bombé ou du creux. En moyenne, il a été possible d'enfoncer le jalon à 69 cm de profondeur, la moyenne des profondeurs minimale et maximale observées sur l'ensemble des chantiers étant respectivement de 41 et 91 cm.

Résultats du travail observés en surface

La présence ou non de rémanents ou de mottes de terre de taille plus ou moins importante a conduit soit à la formation des billons souhaités (hauteur maximale de 55 cm), soit à un dégradé de ces billons plus ou moins bien formés (jusqu'au sol plat). Lorsque les obstacles ont été trop fréquents sur la ligne à travailler, les disques n'ont pas pu former de billon (le travail en profondeur étant toujours assuré par le sous-soleur), conduisant à un sol plat ou même à des creux par rapport au niveau initial du sol (profondeur maximale : -30 cm). Le résultat moyen est un bombé d'une hauteur de +11 cm au-dessus du niveau initial du sol, cette moyenne intégrant les creux, notés en valeurs négatives. Considérés séparément, les creux sont en moyenne de -11 cm et les bombés de +31 cm. La proportion de creux est de 1 à 3 % quand les rémanents sont suffisamment bien

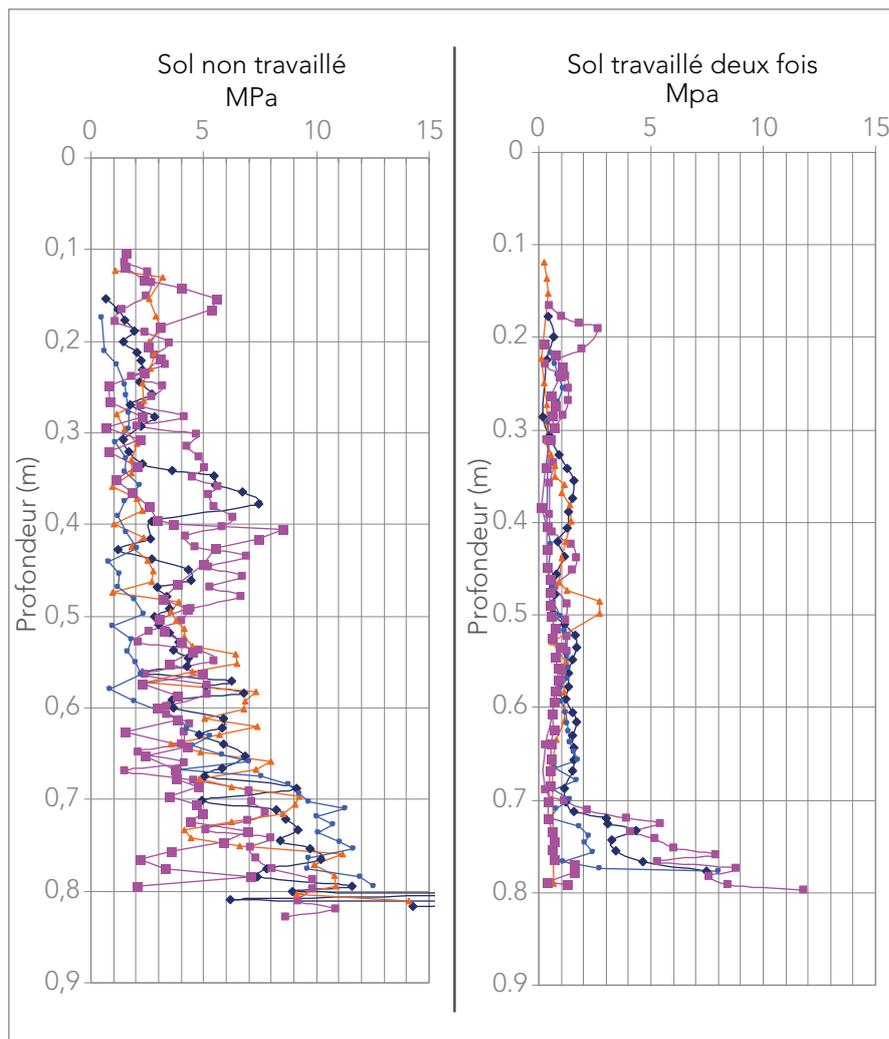


Fig. 2 : FD de Francois-Bryas : comparaison de la résistance du sol à la pénétration d'une tige standard en MPa entre plusieurs profils de sol non travaillés (a) et travaillés deux fois (b) avec le Culti 3B 1MPa = 1 MegaPascal = 106 Pa ≈ 10 bar. Il n'y a pas de lien entre les couleurs ou symboles entre les cas a (non travaillé) et b (travaillé).

broyés et monte jusqu'à 34 % dans un sol encombré de rémanents broyés trop sommairement (planche 4).

Les conditions réelles du terrain, avec ses multiples obstacles (mottes de terre avec végétation dense, tapis de rémanents trop épais, même si les rémanents ont été bien broyés et présence de rémanents trop gros ou trop longs), ne permettent pas de créer en moyenne des billons aussi hauts et réguliers qu'avec la minipelle. Le Culti 3B est capable de créer des billons d'une moyenne de 20-50 cm de haut, sous condition de ne pas rencontrer d'obstacles trop importants.

Résultats visibles sur profils de sol seulement

Dans les meilleures conditions (voir planche 3, profils de sol), l'étendue latérale du travail du sol correspond bien aux attentes, avec une forme de « V » évasé en partant de la plus grande profondeur atteinte; les profils permettent également de voir que le bombé est bien formé, conformément à ce qui était prévu. L'éclatement du sol en profondeur est bien visible à l'œil nu dans les sols secs. Par contre, il n'est pas vraiment visible dans les sols déjà bien humides. On voit que le sol a été travaillé, mais pas avec un effet de fracturation.

Résultats du travail en profondeur

La **profondeur moyenne** du sol travaillé par **rapport au niveau naturel** a été de 58 cm, la moyenne des profondeurs minimales et maximales des différents chantiers étant de 33 et 84 cm (598 paires de mesure). Le Culti 3B réalise donc effectivement l'objectif visé pour le travail en profondeur, c'est-à-dire proche du résultat de la minipelle de 65 cm de profondeur. Le travail dans des sols trop humides a cependant ses limites et il vaut mieux s'en abstenir, car la fracturation dans le sous-sol ne se fait pas bien, voire pas du tout. En condition humide, l'étendue de la fracturation éventuelle n'atteindra pas la largeur ni, en profondeur, la qualité que l'on peut obtenir dans le même sol en état sec.

Approche économique

L'objectif de l'approche économique est de comparer des itinéraires de préparation du sol, leurs coûts et bénéfices, par rapport à une situation de blocage. Rappelons que nous nous intéressons ici à des blocages provoqués essentiellement par des problèmes physiques du sol (tassement superficiel à moyennement profond ou hydromorphie). Ne rien faire pour débloquer cette situation obligerait à accepter des coûts annexes importants après la plantation : regarnis, parfois à répétition en cas de forte mortalité, et éventuellement de nombreux dégagements des plants. Car il faudrait les libérer de la concurrence d'une végétation d'accompagnement trop dense, dont ils ne parviendraient pas à s'extraire assez vite.

Éléments de contexte

L'approche économique complète devrait prendre en compte tous les coûts observés dès la réception de la coupe finale et jusqu'à ce que les plants aient atteint une hauteur de 3 m. Comme nous n'en sommes qu'à la première phase, l'approche économique ne peut pas être complète car nous ne disposons pas encore des coûts de la plantation, des regarnis et des dégagements. Nous nous en tiendrons donc à une approche partielle qui ne comparera que les coûts liés à la préparation du sol, jusqu'à ce qu'il soit prêt à la plantation. L'approche complète sera faite dès que possible et probablement avant 5 ans.

Dans l'approche économique, nous n'avons pas procédé au calcul des coûts

Bonne préparation du sol avec un broyage suffisamment fin

Sol préparé au cover-crop sans retourner le sol (FI d'Eu)



Bon dosage du broyage avant l'intervention du Culti3B (FD Le Pochon)



Bon dosage du broyage avant l'intervention du Culti3B (FD Le Pochon)



Préparation du sol insuffisante avec un broyage trop sommaire (exemples de la forêt d'Eu)



Planche 4 : exemples des résultats observés ; les creux ne représentent que 1-3 % lorsque la préparation du sol avant intervention du Culti 3B a été bien dosée

de revient des engins, mais avons plutôt préféré présenter les prix de sous-traitance, qui sont relativement stables dans les mêmes types et puissances et se prêtent donc facilement à un calcul standardisé. Le prix de sous-traitance du Culti 3B a été estimé en intégrant son amortissement, entretien etc., ce qui donne un coût direct horaire de 6,8 € HT/heure machine; le prix complet comprend le tracteur avec chauffeur et le Culti3B.

Par ailleurs, les schémas de plantation varient selon les chantiers, ce qui a une incidence sur le linéaire travaillé et ne permet pas de comparer directement les prix cumulés à l'hectare. C'est pourquoi le schéma de plantation a été standardisé comme suit : 3 lignes distantes de 2 m, suivies d'un cloisonnement sylvicole de 4 m (=3,5 km/ha); d'où la notion d'hectare standard. Cette standardisation prend en compte les spécificités de chaque chantier, intégrées dans la durée moyenne nécessaire pour réaliser un kilomètre de ligne de plantation.

Prix de sous-traitance standardisés

Selon ces éléments, la moyenne des **prix standardisés au km** pour le travail du sol au Culti 3B est de 98 € HT. L'amplitude entre le prix minimal et maximal entre chantiers est de 54 € HT/km. Les prix varient au maximum d'un facteur de 1,8. Si on intègre l'ensemble des interventions (préparation préalable + travail du sol), on arrive à 230 € HT/km, l'amplitude entre le prix minimal et maximal étant de 180 € HT. Les prix varient au maximum d'un facteur de 2,2.

La moyenne des **prix standardisés par hectare standard** pour le travail du sol au Culti 3B est de 343 € HT. L'amplitude entre le prix minimal et maximal est de 190 € HT/km. En cumulant l'ensemble des interventions, on arrive à 804 € HT, l'amplitude entre le prix minimal et maximal étant de 630 € HT. Dans les deux cas, le facteur de variation des prix est le même que pour les prix au km.

Le broyage lourd sommaire, suivi d'un rebroyage lourd fin sur l'un des chantiers est à l'origine de l'amplitude importante constatée. En routine, il faut donc bien savoir doser les besoins de broyage, pour obtenir à la fois un broyat de qualité acceptable, même si elle n'est pas optimale, et un prix raisonnable à l'hectare de l'ensemble des travaux nécessaires avant plantation. Ce prix total avant plantation se situerait donc en gros entre 800 et 1 000 € HT par hectare « standard ».

Conclusions

Les deux éléments les plus contraignants à gérer avant le travail du Culti 3B sont la taille des rémanents (longueur et diamètre) et l'épaisseur de la couche des rémanents, ainsi que le type et l'épaisseur de la couverture végétale pré-existante. À l'heure actuelle, il est possible de bien gérer techniquement les rémanents, mais cela aura généralement un coût supplémentaire par rapport aux pratiques ordinaires. Il est par contre bien plus difficile d'intervenir avec la « bonne solution » pour gérer des tapis épais de couverture végétale, sans provoquer l'inverse de ce qui est visé, c'est-à-dire un envahissement important et rapide par une couverture végétale dès la première année de plantation. Dans toutes les situations présentant des blocages par la végétation herbacée, il sera nécessaire de faire précéder le travail au Culti 3B d'un dégageage mécanisé ou chimique de la végétation. Cette problématique fait l'objet d'un projet lancé en 2013, faisant intervenir un nouvel outil pour dégager la végétation avant le travail du Culti 3B (projet INRA-MGVF multipartenaire « PILOTE », 2013/2015). Sous ces réserves, nous pouvons tirer les conclusions ci-après, en réponse aux questions que posent régulièrement les gestionnaires.

■ Le travail du sol au Culti 3B est-il vraiment utile, et a-t-il un effet bénéfique pour les plants ?

- Oui, parce qu'il ameublisse le sol en profondeur (60 cm) et permet ainsi une meilleure installation des plants

dès la première année en facilitant la prospection racinaire et l'alimentation hydrique : les racines peuvent rapidement descendre profondément dès la première année pour atteindre des horizons plus frais et être ainsi à l'abri de la sécheresse. Dans le cas de sols à forte hydromorphie, l'effet est moins important.

- Oui, parce que la plantation est plus facile et que le plant peut être mieux installé par le planteur que dans un sol non travaillé. Le travail du sol réduit également la pénibilité du travail pour le planteur.

■ Ne fait-on pas plus de mal que de bien, étant donné que les tracteurs parcourent deux fois chaque ligne de plantation, avec un effet possible de tassement en dehors de la largeur travaillée ?

- Non ! Sous condition de travailler par temps et sol secs (fin d'été à début d'automne, selon les régions) il n'y a pas de tassement par les roues du tracteur.

- Non, parce que l'outil est derrière le tracteur et, de par sa conception, la traction est répartie sur l'empattement.

- De plus, l'écartement recommandé des lignes de plantation est de 2 m pour ne pas rouler dans le sol travaillé de la ligne précédente.

■ Sur quels types de sol et de végétation, le Culti 3B avec tracteur est-il le mieux employé ?

Les cas de figure suivants, mêmes combinés, se trouvent dans la gamme des sols à travailler avec le Culti 3B :

- sols limoneux à argileux (exclure sols sableux) ;

- sols compactés ;

- sols hydromorphes une partie de l'année, mais qui arrivent quand même à sécher en été ; les sols dont le taux d'argile dépasse 50 % doivent obligatoirement être travaillés en été, en période sèche et sol sec ;

- sols avec couverture herbacée et ligneuse non bloquante ; en contexte de végétation bloquante le travail au Culti 3B doit être précédé d'une préparation avec une autre technique.

■ Est-ce que l'investissement en vaut la peine ?

Oui ! Le travail du Culti 3B avec tracteur coûte entre 239 et 429 € HT/ha (prix de sous-traitance standardisé). Dans bien des cas le broyage préalable à la plantation est de toute façon réalisé. Ce broyage doit être plus fin que d'habitude pour obtenir ensuite un bon résultat du travail du sol par le Culti 3B. Son prix de sous-traitance se situe entre 325 et 400 € HT/ha, mais peut atteindre plus si la quantité de rémanents est très importante. Le prix de sous-traitance total des deux interventions varie donc en gros entre 564 et 829 € HT/ha, parfois même 1 000 € HT/ha avant plantation. Sous condition de réussite de la plantation et dans la mesure où on évitera un à deux dégagements par la suite, le coût de la préparation du sol est rapidement amorti : un seul dégagement coûte en moyenne entre 450 et 650 € HT/ha (prix de sous-traitance pour un dégagement manuel) et c'est un travail pénible

■ Quel est le gain de productivité du Culti 3B avec tracteur par rapport à l'utilisation de la minipelle en technique 3B ?

- Le travail en linéaire avec la minipelle (environ 800-1 000 m/jour) permet de réaliser un hectare « standard » (environ 3,5 km de lignes de plantation/ha) en 4 jours, tandis que le travail avec le Culti 3B avec tracteur permet de réaliser un hectare en une demi-journée ; l'économie réalisée, en travaillant avec tracteur et le Culti 3B (prix de sous-traitance : 655-700 € H.T/jour) par rapport au coût de la minipelle (prix de sous-traitance : 550-650 € HT/jour) est donc de l'ordre de 70-80 %.

- En pratique, la minipelle s'utilise le plus souvent pour un travail en potet qui permet de réaliser un hectare par jour ; l'alternative d'un travail en linéaire avec le Culti 3B offre encore par comparaison un gain de productivité de l'ordre de 50 %.

Signalons enfin que le suivi intensif du travail du Culti 3B avec tracteur a permis de proposer 7 améliorations du prototype pour améliorer soit le rendu, soit la vitesse de travail. Les deux plus importantes seront le basculement en arrière de la dent de sous-solage à partir d'une commande en cabine, pour passer plus facilement par-dessus les souches, et le relevage optionnel des disques, selon les besoins régionaux. Valorisons les métiers de la forêt par la mécanisation et facilitons la tâche des sylviculteurs !

Erwin ULRICH

Chargé de R&D mécanisation
ONF, département R&D

Claude BECKER

Conseil – Vulgarisation
– Formation
(travaux forestiers mécanisés)

Jean-Pierre FRANCO

PDG de Grenier-Franco

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement le personnel de terrain de ces sites pour son aide, sans laquelle ces travaux n'auraient pas pu être menés à si bon terme.

Pour de plus amples informations

Le personnel de l'ONF peut consulter sous peu la fiche technique correspondante sur Intranet (http://intraforret.onf.fr/dg/dmd/rescomp/restrav/sommaire/fiches_techniques_me). Il y trouvera également le rapport détaillé des chantiers test : Ulrich E., Becker C., Franco J.-P., 2013 : Délimitation du champ de travail optimal du Culti 3B. Synthèse « Machine et résultats du travail du sol » du projet R&D ONF/Grenier-Franco/C. Becker – 2012/13. ONF-Département R&D, document interne, 65 p.

Bibliographie

Chavet P., 2009 : Préparation de sol et entretien de régénération forestière. La Forêt Privée, n° 306, pp. 52-60

Wehrlen L., 2009 : Mieux planter ! La technique « 3B » élimine la végétation et décompacte le sol en une seule opération. Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 25-26, pp. 7-12.



E. Ulrich, ONF

Un an après les travaux... état du sol en FD Le Pochon : on n'a plus l'impression d'un champ de cultures

Contrôler la fougère aigle sans asulame : quelles méthodes alternatives pour réussir les plantations ?

La fougère aigle entrave souvent le renouvellement des peuplements, que ce soit par régénération naturelle ou par plantation. L'asulame, herbicide sélectif utilisé contre la fougère, offrait une solution de maîtrise peu coûteuse et efficace. Pour faire face à son retrait du marché, des méthodes nouvelles sont à évaluer. Cet article examine des solutions alternatives mécanisées pour les contextes de plantation forestière : premiers résultats d'un réseau expérimental installé et suivi par l'équipe MGVF de l'INRA, l'ONF et leurs partenaires.

La fougère aigle (*Pteridium Aquilinum*) (figure 1) est une espèce herbacée qui peut induire des échecs de plantation, partiels ou complets. Principalement présente sur des stations acides sans engorgement en eau, elle a une large amplitude écologique qui lui assure une présence dans de nombreux contextes et sur des surfaces importantes (Gama *et al.*, 2006). La fougère aigle a une croissance rapide et, à plein développement, sa hauteur peut dépasser 3 m (Dumas, 2002). Elle est fortement consommatrice en eau, notamment en période estivale, et en éléments minéraux qu'elle stocke dans ses rhizomes (Gaudio, 2010). Elle est également très compétitrice pour la lumière, notamment vis-à-vis des jeunes arbres (Gaudio, 2011). Ses rhizomes gênent la plantation et freinent le développement racinaire des plants. En fin de saison de végétation, ses frondes s'affaissent et, en cas de fort développement, peuvent provoquer des déformations sur les jeunes arbres. Lorsqu'elle est sèche, elle constitue un bon combustible, augmentant ainsi les risques d'incendie dans les zones sensibles. On comprend donc que, dans bien des cas, les forestiers doivent intervenir



Équipe MGVF, INRA



Pôle R&D de Compiègne, ONF

Fig. 1 : fougère en sous-bois ; fougère haute, en plein découvert

pour contrôler le développement de la fougère aigle et permettre une installation rapide et une croissance soutenue des plants.

L'apparition des herbicides en forêt, à la fin des années 70, a fourni pour ces situations difficiles un moyen de contrôle efficace et bien moins onéreux que les dégagements à répétition qui s'imposaient auparavant pour maîtriser la fougère. Le traitement à l'asulame, un herbicide sélectif, a été en particulier utilisé avec succès pendant près de 3 décennies (voir encadré 1).

Mais aujourd'hui, le contexte général de réduction des produits phytopharmaceutiques (plan Ecophyto 2018)¹ se traduit, en particulier pour les plantations forestières, par la nécessité de concevoir de nouveaux itinéraires techniques « sans herbicide ». Le recours aux herbicides doit être réservé « aux seules situations dans lesquelles aucune autre technique ne peut être mise en œuvre dans des conditions économiques satisfaisantes pour le propriétaire et dès lors qu'aucun dommage pour l'environnement n'est à craindre » (Instruction ONF

du 22 mai 2013 sur l'utilisation des produits chimiques).

En particulier, le retrait du marché de l'asulame, depuis le 1^{er} janvier 2013, rend plus insistante encore la nécessité de disposer de techniques alternatives pour contrôler la fougère aigle lorsqu'elle est un obstacle à la réussite des plantations (encadré 2). Cet article présente les premiers résultats obtenus sur un réseau expérimental installé et suivi de manière collaborative par l'équipe MGVF de l'INRA de Nancy, l'ONF et leurs partenaires.

1 - Une gestion de la fougère historiquement fondée sur les dégagements et les herbicides dans le Nord-Ouest

Avant l'apparition des herbicides dans la gestion forestière, les gestionnaires confrontés à une concurrence sévère de la fougère réalisaient des dégagements très réguliers pendant les dix années qui suivaient la plantation. Dans le Nord-Ouest, particulièrement concerné, les premiers recours aux herbicides datent des années 70 avec l'utilisation du dichlobénil qui permettait de maîtriser la fougère pendant une année. À partir de 1976, l'asulame a été testé en dégagement avec de très bons résultats (Martin, 1991). Au milieu des années 80, il a été intégré dans la phase « préparation du terrain » de l'itinéraire technique de plantation du chêne en forêts publiques : traitement à l'asulame puis labour en plein. En fin d'hiver, un traitement supplémentaire au dalapon ou au fluzafop-p-butyl était éventuellement appliqué contre les graminées qui se substituaient alors à la fougère éliminée.

Au début des années 90, les itinéraires techniques élaborés permettaient un bon contrôle de la fougère. Néanmoins, une meilleure maîtrise des coûts des travaux préparatoires et d'entretien était encore attendue, en envisageant la suppression de certains travaux. C'est dans cet esprit qu'en 1992 l'ONF a installé dans le Nord-Ouest de la France, en forêt de Lyons (76), une expérimentation suivie par l'équipe R&D de Compiègne (Piat, 2012) : il s'agissait de comparer différents types de travaux préparatoires à la plantation, pour une plantation de chêne sessile située en contexte de fougère bloquante. Deux types de travaux préparatoires ont été comparés :

- modalité H « Herbicide » : traitement de préparation au glyphosate l'été précédant la plantation,
- modalité C « Combinée » : idem Herbicide puis labour complet du terrain en début d'automne au pulvérisateur à disques lourd suivi d'un émiettement au cover-crop.

Dans chacune des modalités, des dégagements ont été réalisés par la suite pour contrôler la compétition exercée par la végétation sur les plants. Chaque dégagement a été programmé en fonction du développement de la végétation dans chaque modalité, et dûment consigné. L'expérimentation a été suivie de 1992 à 2000, de la plantation à la sortie de la période de compétition avec la fougère.

Le test ne comportait pas de modalité « Témoin sans intervention » car la forte mortalité et la croissance réduite des plants en l'absence d'intervention étaient attestées par les gestionnaires normands. De même, il n'y avait pas de modalité impliquant la mise en œuvre d'un traitement mécanique seul, car le recours aux herbicides, peu coûteux et efficaces, n'était pas remis en cause à l'époque.

Les résultats (tableau) montrent le succès du traitement chimique en préparation avec 78 et 72 % de survie des plants après 8 ans dans les modalités Herbicide et Combinée, respectivement. L'analyse économique a montré que les coûts de mise en œuvre des modalités (hors coût des plants et mise en place) diffèrent fortement : la modalité H est simple et peu coûteuse (500 €/ha, valeur 2012) et la modalité C est plus coûteuse (1 200 €/ha) à cause du labour. Mais il n'y a plus de différence notable quand on considère l'ensemble des travaux réalisés pendant les 8 années de l'étude, avec un coût total de régénération estimé à 1 700 €/ha (hors coût des plants et mise en place) dans les 2 cas. La modalité H, initialement moins coûteuse, a nécessité deux dégagements supplémentaires contre la fougère et les ligneux. D'où l'importance de considérer l'itinéraire dans son ensemble pour évaluer correctement l'efficacité d'une technique et son intérêt économique.

À partir des années 2000, des évolutions rapides ont eu lieu avec le retrait du dalapon (2002), le recours plus fréquent à la régénération naturelle et enfin les réserves émises par les forestiers vis-à-vis du labour des terrains à planter. Depuis, les itinéraires se sont limités à une préparation chimique par application d'asulame, suivie d'un broyage et d'un éventuel sous-solage sur les futures lignes de plantation. Le coût de cette préparation est de 500 €/ha (750 €/ha avec le sous-solage).

Résultats de l'expérimentation	Modalité Herbicide	Modalité Combinée
Survie à 8 ans	78 %	72 %
Diamètre au collet à 8 ans		+ 3 mm / Herbicide
Hauteur totale à 8 ans		+ 33 cm / Herbicide
Plants concurrencés par la fougère en 3 ^e année	11 %	4 %
Plants concurrencés par la fougère en 4 ^e année	22 %	8 %
Nombre de dégagements après plantation	3	1

¹ Lancé en 2008 à la suite du Grenelle de l'Environnement, ce plan vise à réduire progressivement l'utilisation des produits agropharmaceutiques : http://agriculture.gouv.fr/img/pdf/plan_ecophyto_2018.pdf

2 - Les difficultés de gestion liées au retrait de l'asulame de la liste des herbicides homologués pour les usages en forêt

L'asulame (spécialités commerciales : Asulox et Fougerox), dont l'homologation a pris fin le 31 décembre 2012, permettait, en une seule application bien réalisée, de contrôler la fougère aigle sur plusieurs années. L'asulame était utilisé principalement en préparation avant régénération, pour un coût compris entre 200 et 400 €/ha selon les situations. Étant relativement sélectif des autres végétaux, il était également utilisé en dégagement après plantation, pour un coût similaire.

Depuis le 1^{er} janvier 2013, le glyphosate est la seule matière active utilisable pour contrôler la fougère en forêt. Il présente un coût et une efficacité similaires à l'asulame. Néanmoins, contrairement à l'asulame, le glyphosate n'est pas sélectif des autres plantes et ne peut donc être appliqué qu'en préparation, avant plantation.

De façon classique, les dégagements mécaniques ou manuels (dont le bâtonnage) peuvent également être utilisés. Le plus souvent, ils doivent être répétés une à deux fois par an pendant plusieurs années, pour un coût total allant de 2 400 à 5 000 €/ha.

Le retrait de l'asulame a donc des répercussions importantes sur les coûts de plantation et motive la R&D pour trouver des solutions alternatives aux herbicides, pour le contrôle de la fougère. Par ailleurs, l'ONF participe aux travaux de la Commission sur les Usages Orphelins, qui devrait appuyer le renouvellement de la demande d'autorisation de mise sur le marché de l'asulame en France (usage « forêt, dégagement »). Cette demande doit être faite par la firme détentrice de l'homologation.

Évaluer des méthodes alternatives aux herbicides : le réseau ALTER

Le projet ALTER (ALternatives aux hERbicides) a été initié en 2009 afin d'évaluer des **méthodes innovantes de contrôle de la végétation, en préparation à la plantation**, qui permettent d'assurer une bonne installation des plants tout en requérant un nombre limité d'interventions en dégagement. Le projet est mené conjointement par l'INRA, l'ONF, FCBA, la Compagnie des Landes, l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace) et le CRITT RITTMO Agroenvironnement. Les méthodes à évaluer sont basées sur l'utilisation d'outils mécaniques montés sur minipelle. Ces outils, nouvellement développés², permettent d'effectuer des actions combinées sur la végétation et le sol. Par ailleurs, la minipelle, parce qu'elle exerce une pression au sol réduite, est un engin intéressant pour limiter le tassement induit par l'intervention avec l'outil. Le projet se focalise sur deux grands types de végétation forestière bloquante, la molinie et la fougère aigle, mais on ne présentera ici que les résultats obtenus sur la fougère.

Le projet ALTER s'appuie sur un réseau de sites expérimentaux installés dans quatre régions (Alsace, Aquitaine, Normandie, Bretagne) de façon à couvrir une large gamme de conditions pédoclimatiques (figure 2). Dans chaque région, une parcelle présentant une couverture dense et homogène de fougère a été sélectionnée (qu'on désignera dans le reste du texte sous le terme site ou dispositif). Les différentes méthodes de préparation du terrain y ont été mises en œuvre, puis les parcelles ont été plantées en chêne (sessile ou pédonculé, selon la région) et en pin (sylvestre ou laricio ou maritime, selon la région). Les deux essences sont plantées séparément et non en mélange.

Pour chaque site, deux méthodes utilisant des outils montés sur minipelle sont comparées à deux méthodes

« extrêmes » (témoin sans intervention ; suppression complète de la végétation) ainsi qu'à une méthode de référence locale. Le choix de cette dernière est spécifique à chaque région ; *a contrario* les 4 autres méthodes sont communes à l'ensemble des régions.

L'objectif du projet est de caractériser les effets des différentes méthodes, constituant les modalités expérimentales étudiées, sur le développement des plants (survie et croissance), sur la dynamique de la végétation spontanée (composition spécifique, recouvrement) et sur certains paramètres du milieu influençant le développement des plants (compaction du sol, disponibilité en eau, en nutriments et en lumière pour les plants). Un suivi est prévu pendant 5 à 10 ans, de façon à couvrir toute la période d'installation, jusqu'à ce que les plants soient affranchis de la végétation accompagnatrice.

Le site de Normandie (forêt domaniale de Bord-Louviers, 27) a été installé en 2010, avec une année d'avance sur les trois autres sites. Il sera donc privilégié dans la présentation des résultats obtenus.

L'expérimentation : le dispositif ALTER de Bord-Louviers

Le dispositif de Bord-Louviers a été installé sur un site présentant un sol limono-sableux à forte charge en cailloux (station 422 du catalogue du nord de la Haute-Normandie), en terrain plat. La végétation est très fortement dominée par la fougère. À pleine maturité, la fougère présente une hauteur moyenne de 1,5 m.

Des taches de bouleau étaient présentes et, pour homogénéiser les conditions d'expérimentation dans l'ensemble du dispositif, un traitement préalable contre les ligneux (triclopyr, 960 g/ha) a été réalisé en mai 2010, avant mise en œuvre des modalités. Les cinq modalités

² Les outils innovants évalués dans le projet ont été mis au point par l'entrepreneur Claude Becker et sont protégés par brevet.

de contrôle de la végétation et de préparation du sol prévues dans le projet ont été mises en œuvre comme indiqué ci-après (tableau 1).

Les trois modalités de référence :

■ **Témoin** : c'est une situation « extrême » qui correspond à une végétation se développant spontanément. Pas de préparation à la plantation, hormis un broyage de la fougère sèche sur les futures lignes de plantation (sur une largeur de 1 mètre) pour faciliter l'accès des planteurs. Ce broyage n'affecte pas la dynamique de la fougère.

■ **Herbicide** : c'est la méthode de référence locale à Bord-Louviers. En juillet 2010, un traitement à l'asulame (4000 g/ha) a été effectué en plein. Un broyage en plein de la fougère sèche a été réalisé avant la plantation.

■ **Sol Nu** : c'est l'autre situation « extrême », qui correspond à un sol maintenu sans végétation pendant toute la durée de l'expérimentation. En juillet 2010, un traitement à l'asulame (4 000 g/ha) a été effectué en plein. Un broyage en plein de la fougère sèche a été réalisé avant la plantation. En juin 2012, des dégagements manuels sur la ligne et un traitement dirigé au glyphosate (1800 g/ha) ont été réalisés.

Les deux modalités alternatives, utilisant des outils montés sur minipelle (de type Takeushi, TB228, poids : 2,9 T) :

■ **Scarificateur réversible®** (désigné par Scarificateur) : cet outil permet d'extraire la végétation (biomasse aérienne et racinaire) et de travailler le sol jusqu'à une profondeur de 40 cm par piochage, sans retournement des horizons pédologiques. La largeur de la zone travaillée est d'environ 1,5 m. La biomasse arrachée est déposée latéralement à la bande travaillée en petits andains. Ce travail a été réalisé en octobre 2010.

■ **Scarificateur réversible® + 3B®** (désigné par SR+3B) : cette méthode consiste à éliminer préalablement les rhizomes sur une bande de

1,5 m de large au Scarificateur réversible, comme précédemment, pour permettre ensuite, dans un deuxième passage, l'intervention du Sous-soleur multifonction®, pour la confection d'un billon 3 B® (Wehrle, 2009). Cette deuxième opération consiste en un décompactage du sol sur 60 cm de profondeur, et la confection d'un billon de 20 cm de haut à l'aplomb de la zone de sol travaillée. Ce travail a été réalisé en octobre 2010.

Chaque modalité a fait l'objet de trois répétitions, appliquées sur des placettes unitaires de 19 ares. Chaque placette unitaire est constituée d'une zone centrale de mesure comportant 96 plants de chêne et 96 plants de pins, et d'une zone tampon comportant un nombre similaire de plants.

La plantation a eu lieu pendant l'hiver 2010-2011 à la densité de 2200 plants/ha : les pins laricio (plants 1-0 en godet en 200 cm³, provenance PLO-VG-001) ont été plantés en novembre 2010 et les chênes sessiles (plants 1S2 en racines nues, provenance QP102) en mars 2011.

Le suivi des plants porte sur l'ensemble des plants de la zone de mesure : chaque année, la survie, la hauteur totale et le diamètre basal des plants sont mesurés (sauf pour le diamètre des pins l'année de plantation, en raison de difficultés techniques pour réaliser la mesure). Le suivi de la végétation se base sur des inventaires floristiques réalisés en septembre de chaque année, sur 171 placeaux permanents de 1 m², centrés sur les lignes de plantation et répartis de façon systématique dans la zone de mesure.

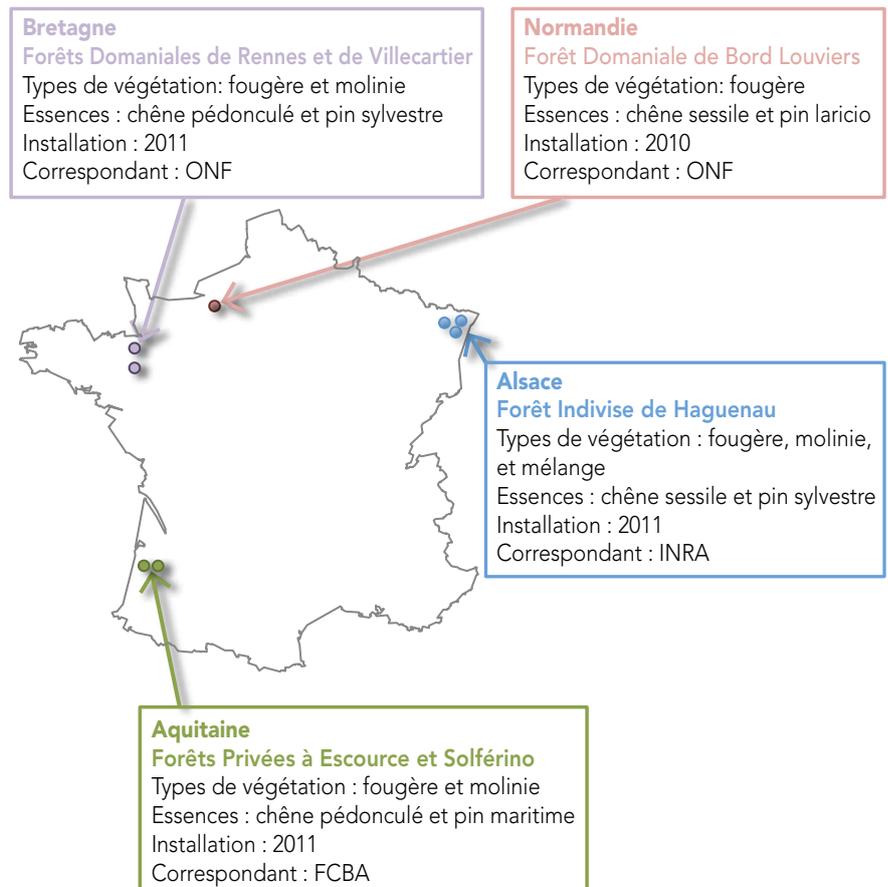


Fig. 2 : réseau expérimental ALTER (Alternatives aux herbicides); sites installés, types de végétation, essences plantées, année de plantation et organisme responsable pour chaque site.

Outil utilisé	État des parcelles immédiatement après intervention	État des parcelles 2 ans après intervention
<p>Modalité Témoin</p> 		
<p>Modalité Herbicide</p> 		
<p>Modalité Sol Nu</p> 		
<p>Modalité Scarificateur réversible</p> 		
<p>Modalité Scarificateur réversible + 3B (SR+3B)</p> 		

Tab. 1 : modalités installées dans le dispositif de Bord-Louviers

Réponse de la végétation : un contrôle efficace assuré par les méthodes alternatives

Recouvrement global

Après un an, toutes les modalités -sauf la modalité Témoin-présentaient une réduction significative du recouvrement par la végétation (figure 3). Après deux années, seules les modalités Scarificateur et SR+3B montraient un contrôle de la végétation efficace : le recouvrement de la végétation sur la ligne de plantation y était très faible (inférieur à 20 %). Le retour de la végétation était notamment beaucoup plus rapide dans la modalité utilisant des herbicides (Herbicide) : après deux saisons de végétation, le recouvrement global y était proche de celui du Témoin sans intervention. Il faut également noter que dans la modalité Sol Nu le développement de la végétation en fin d'été a été insuffisamment contrôlé par rapport aux exigences du protocole expérimental.

Dans les sites ALTER des trois autres régions, le recouvrement de la végétation a montré les mêmes tendances après un an : les méthodes Scarificateur et SR+3B ont été très efficaces pour contrôler la végétation alors que le retour de la végétation a été rapide dans les modalités locales, quelle qu'ait été la méthode locale utilisée.

Composition spécifique

En 2011, un an après l'installation du dispositif de Bord-Louviers, la fougère dominait très largement la végétation spontanée dans toutes les modalités (figure 4). On a néanmoins constaté l'apparition rapide de graminées (canche flexueuse et agrostis) dans les modalités Sol Nu et Herbicide. La ronce était présente à l'état de traces dans toutes les modalités, avec une part plus importante dans Sol Nu et Herbicide. Initialement présentes en sous-étage, ces espèces ont profité de la réduction sélective de la fougère. En revanche, dans les modalités Scarificateur et SR+3B,

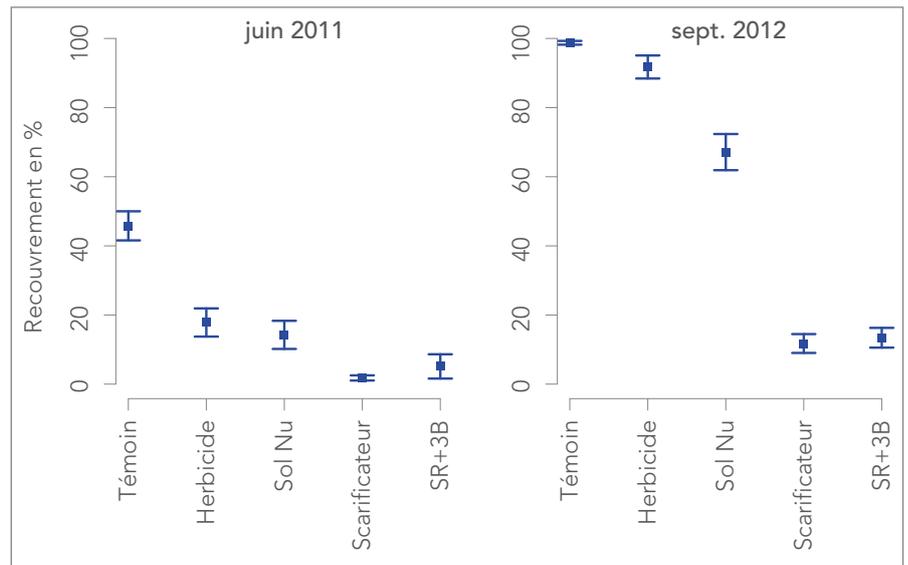


Fig. 3 : recouvrement global de la végétation, dans les différentes modalités du dispositif de Bord-Louviers en 2011 et 2012 (moyenne et écart-type)

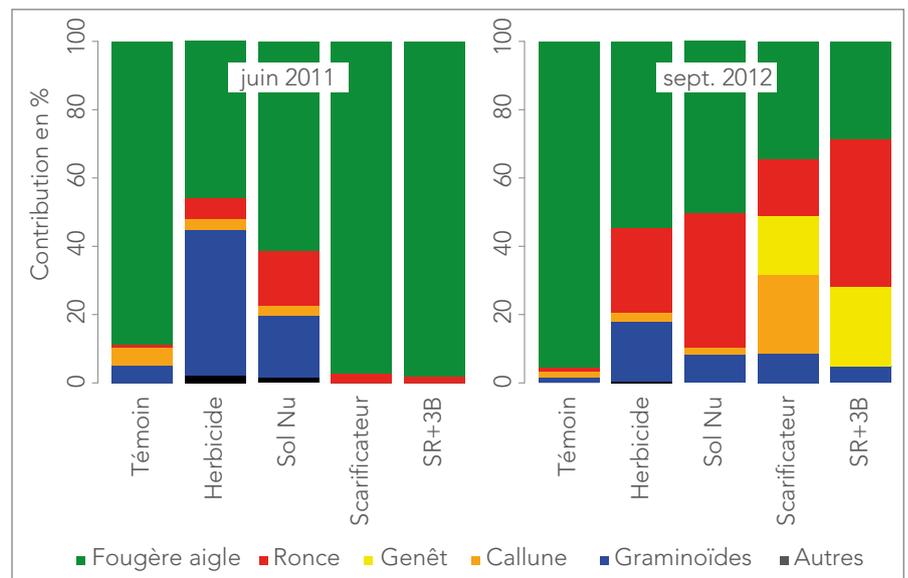


Fig. 4 : contribution des différents groupes d'espèces au recouvrement global, dans les différentes modalités du dispositif de Bord-Louviers en 2011 et 2012

toute la végétation a été détruite, hormis quelques frondes de fougère résiduelles, et les plantes présentes en première année étaient toutes issues de semis nouvellement germés.

En 2012, un développement important de la ronce a eu lieu dans toutes les modalités, sauf dans le Témoin. Le développement des graminées s'est poursuivi. Le genêt est apparu dans les modalités SR+3B et Scarificateur, favorisé par le travail du sol. Le genêt sera intéressant pour l'engainage

ultérieur des plants. De manière générale, dans les modalités SR+3B et Scarificateur, le recouvrement de la fougère est resté limité. L'inversion de flore, au profit de la ronce et des graminées, a permis de limiter le retour de la fougère, plus compétitrice vis-à-vis des plants. Cependant, il faudra gérer cette nouvelle végétation si elle devient trop concurrente.

Sur les autres sites ALTER, la composition spécifique de la végétation spontanée a évolué de façon similaire.

Les méthodes Scarificateur et SR+3B se sont avérées les plus efficaces pour éliminer la fougère et limiter son retour. Il y a eu des inversions de flore d'amplitude variable en fonction de la fertilité des sites et des espèces initialement présentes. Elles se sont faites principalement au profit de la ronce et des éricacées dans les Landes, de la ronce, des graminées et cypéracées en Bretagne, et du raisin d'Amérique (*Phytolacca americana*, espèce invasive) en Alsace.

Survie des plants : des effets très variables selon les sites

Une mortalité généralement réduite dans les modalités Scarificateur et SR+3B

À Bord-Louviers, la mortalité des plants après un an était globalement faible, même si de légères différences existaient entre les modalités et entre essences (figure 5). En deuxième année, la mortalité a augmenté et les différences se sont amplifiées. La modalité Témoin présentait la mortalité la plus élevée (16 % pour les chênes et 17 % pour les pins en 2012). Le pourcentage de plants sains y était le plus faible (53 % pour les chênes et 63 % pour les pins en 2012), laissant présager une augmentation plus forte de la mortalité dans cette modalité dans les années à venir, notamment pour les pins.

Pour les chênes, les plants des modalités Scarificateur et Herbicide présentaient le meilleur état sanitaire en 2011 et 2012. En revanche, les modalités SR+3B et Scarificateur étaient les plus favorables aux pins, avec respectivement, 100 % et 97 % de pins sains en 2012. En terme d'état sanitaire, les pins et les chênes n'ont donc pas répondu de la même manière aux modalités, et il reste à tenter de comprendre ces différences.

Des phénomènes divers d'un site à l'autre

Sur les sites ALTER des 3 autres

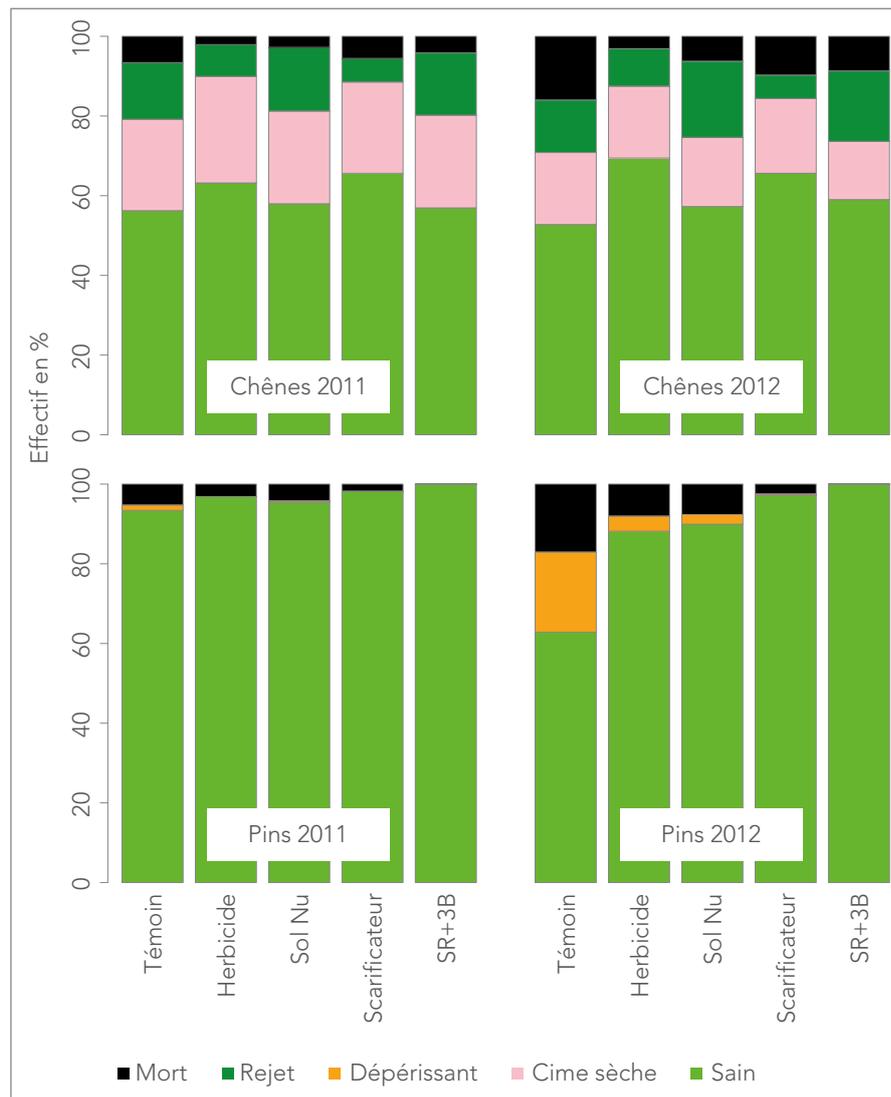


Fig. 5 : état sanitaire des plants dans les différentes modalités du dispositif de Bord-Louviers en 2011 et 2012

régions, les résultats de mortalité en fin de première année étaient fortement contrastés. Ils démontrent la grande sensibilité de la réponse des plants en terme de mortalité aux conditions stationnelles et aux accidents climatiques locaux et ce en interaction avec les méthodes de préparation du terrain.

En Alsace, la mortalité des pins sylvestres était faible (3,5 %) dans toutes les modalités, alors que la mortalité des chênes sessiles était forte et dépendante de la modalité (98, 75, 32, 30 et 57 % dans les modalités SR+3B, Scarificateur, Cover-Crop, Sol Nu et Témoin, respectivement). Cette mortalité particulièrement forte des

chênes dans les modalités SR+3B et Scarificateur a été reliée à l'effet des gels particulièrement intenses qui ont eu lieu durant le premier hiver (2011/2012). Ces modalités ont un effet d'aération du sol qui pourrait accentuer la baisse des températures hivernales dans le sol et augmenter les dégâts sur les systèmes racinaires des plants.

À l'opposé, dans les Landes, c'est dans ces modalités SR+3B et Scarificateur que la mortalité était la plus faible (38, 38, 39, 50, 56 % pour les pins et 65, 71, 72, 92, 95 % pour les chênes dans les modalités SR+3B, Scarificateur, Cover-Crop, Sol Nu et Témoin, respectivement). Dans les

Landes, la mortalité a été attribuée à une sécheresse estivale, dont l'effet serait moins marqué pour les plants des modalités SR+3B, Scarificateur et Cover-Crop qui auraient bénéficié d'un meilleur contrôle de la végétation et d'un meilleur travail du sol en profondeur et auraient ainsi pu développer plus rapidement un système racinaire fonctionnel.

Sur le site de Bretagne, la mortalité des pins sylvestres était très faible dans les modalités Scarificateur et SR+3B et elle était moyenne pour les chênes sessiles. Pour les deux espèces, la mortalité la plus forte était dans la modalité Témoin (1, 1, 13, 7, 35 % pour les pins et 14, 9, 8, 12, 21 % pour les chênes dans les modalités SR+3B, Scarificateur, Cover-Crop, Sol Nu et Témoin, respectivement). Dans ce site, la mortalité a également été attribuée aux effets d'une sécheresse estivale, qui seraient moins marqués dans les modalités avec travail du sol.

Une interprétation délicate

Ces résultats illustrent la complexité du processus de mortalité et les facteurs multiples qui la déterminent. Ils montrent clairement la difficulté à extrapoler les résultats obtenus dans un site à d'autres sites ou bien à d'autres années climatiques. En prenant les précautions requises pour cette extrapolation, nous pouvons penser que les méthodes Scarificateur et SR+3B semblent, de façon générale, accélérer l'installation des plants (probablement en raison d'une installation du système racinaire facilitée par le travail du sol) et réduire la mortalité initiale. Néanmoins, dans certaines situations, notamment en cas de gels hivernaux en période de sensibilité des plants (exemple des chênes dans le site d'Alsace), ces techniques peuvent au contraire accentuer la mortalité. Il s'agit maintenant, dans un futur proche, de bien identifier les conditions dans lesquelles ces méthodes peuvent s'avérer négatives pour les plants.

Croissance des plants : un effet très positif des méthodes alternatives

La figure 6 présente les résultats de croissance des plants de 2010 à 2012 à Bord-Louvières. L'analyse est cependant restreinte aux résultats de la deuxième année de croissance. En effet : sur les chênes, de façon classique, les descentes de cimes et les tiges relais issues de rejets, qui ne préjugent pas de la croissance ultérieure, perturbent l'interprétation des mesures de croissance en première année. Pour les pins, le diamètre n'a pas pu être mesuré à la plantation.

Pour chacune des deux espèces, les hauteurs et les diamètres moyens les plus élevés étaient dans les modalités SR+3B et Scarificateur, et les plus faibles dans la modalité Témoin. La hauteur des plants des modalités SR+3B et Scarificateur était supérieure à celle des plants Témoin, respectivement de +23 % et

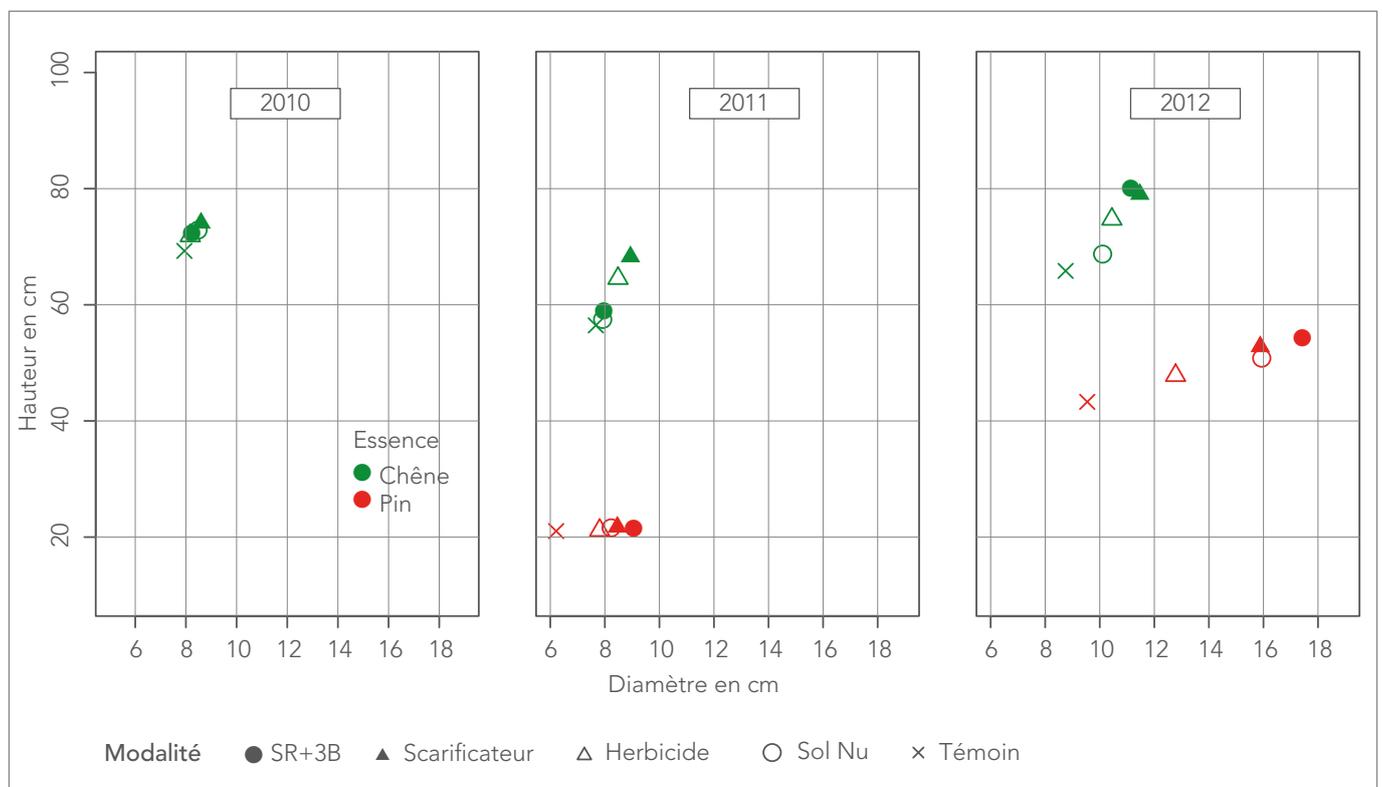


Fig. 6 : dimensions des chênes et des pins dans les différentes modalités du dispositif de Bord-Louvières en 2010, 2011 et 2012, pour les plants sains, ou avec cime sèche ou issus d'une tige relais. Le diamètre des pins n'a pas été mesuré en 2010.

+11 % pour les chênes, et de +26 % et +24 % pour les pins. Les mêmes tendances ont été observées pour le diamètre avec, respectivement, +27 % et +20 % pour les chênes et +83 % et +67 % pour les pins.

Une à deux années supplémentaires seront nécessaires pour pouvoir analyser les résultats de croissance des plants sur les autres sites ALTER, et les comparer à ceux obtenus à Bord-Louviers.

Des méthodes alternatives qui limitent les dégagements

À Bord-Louviers, deux ans après la plantation, la méthode SR+3B a donné des résultats équivalents à ceux de la méthode Scarificateur en terme de survie, de croissance des plants et de dynamique de réinstallation de la fougère; la méthode Scarificateur, avec un seul passage d'engin, apparaît donc à ce stade la plus intéressante du point de vue technique et économique. À partir de ces résultats, une étude préliminaire a été réalisée afin de comparer l'intérêt économique d'un itinéraire de régénération artificielle qui utiliserait le Scarificateur, par rapport à un itinéraire avec une préparation minimale du terrain (broyage des bandes de plantation, pas de travail du sol, pas d'herbicide – voir tableau 2). En effet, ce deuxième itinéraire pourrait se généraliser avec le retrait de l'asulame.

Évaluer les itinéraires complets, en tâches et en coûts

La comparaison intègre l'ensemble des interventions depuis la préparation du terrain jusqu'à un stade où la plantation est considérée comme acquise (plants affranchis de la concurrence de la fougère) et prend donc en compte l'ensemble des dégagements jugés nécessaires sur la période. Les coûts unitaires des opérations sont indiqués dans le tableau 2. Ils ont été estimés à partir du référentiel de travaux sylvicoles 2012 de la direction territoriale

Itinéraire avec préparation minimale	Itinéraire avec Scarificateur réversible
- Broyage des bandes de plantation : 186 €/ha	- Pas de broyage
- Pas de travail du sol	- Râteau scarificateur : 0,75 €/m linéaire
- Mise en place des plants : 0,72 €/plant	- Mise en place des plants : 0,53 €/plant
- Coût d'un dégagement : 569 €/ha	- Pas de dégagement

Tab. 2 : coûts unitaires des différentes opérations, utilisés pour le chiffrage de l'itinéraire avec Scarificateur réversible et de l'itinéraire avec une préparation minimale du terrain

Guide biogéographique des sylvicultures	Système de plantation	Écartement moyen entre lignes	Nombre de plants/ha	Nombre seuil de dégagements
Guide des chênaies continentales	Avec recru - une ligne par bande	4,5 m	1 100	3
	Avec recru - deux lignes par bande	3,3 m	1 100	4
	Sans recru - une ligne par bande	4,5 m	1 500	3
Guide de la chênaie atlantique	Avec accompagnement ligneux	3,0 m	1 650	4
	Sans accompagnement ligneux	2,0 m	2 500	6
Guide des pineraies de plaine	Pin sylvestre avec cloiso. exploitation	2,5 m	2 500	5
	Pin sylvestre sans cloiso. exploitation	2,0 m	2 500	6
	Pin laricio avec cloiso. exploitation	2,8 m	1 600	5
	Pin laricio sans cloiso. exploitation	2,5 m	1 600	5
	Pin maritime	4,0 m	1 250	3

Tab. 3 : nombre seuil de dégagements à réaliser dans l'itinéraire avec préparation minimale, au delà duquel l'itinéraire avec Scarificateur réversible est plus intéressant économiquement

ONF Ile-de-France Nord-Ouest et de données communiquées par les Pépinières Crété à Guibermesnil (80).

Ces deux itinéraires sont appliqués pour différents schémas de plantation recommandés dans les guides sylvicoles de plaine (tableau 3). Les coûts totaux des itinéraires varient selon le nombre et la densité des plants installés. Dans les principaux contextes de plantation de chênes et de pins, les simulations de coûts montrent que l'itinéraire avec Scarificateur est plus économique que l'itinéraire sans aucune préparation s'il permet d'éviter au moins 3 à 6 dégagements selon le schéma de plantation.

Cette cible est tout à fait réaliste. En effet, le suivi du développement de la végétation dans les différentes modalités du site expérimental de Bord-Louviers a permis d'effectuer des diagnostics quant aux besoins en dégagements de la fougère, au cours des trois années après la plantation. Dans la modalité Scarificateur, aucun dégagement ne s'est avéré nécessaire. En revanche, si la fougère n'est pas contrôlée au départ, il est impératif de réaliser deux dégagements par an après la plantation, pour assurer le bon développement des plants. L'itinéraire avec Scarificateur a donc permis d'éviter six dégagements au cours des trois premières années.

Cette technique a également pour conséquence de réduire le coût de mise en place des plants (tableau 2).

Dans une station sur sol limono-sableux où la fougère est très compétitive, comme dans le dispositif de Bord-Louviers, les itinéraires de préparation à l'aide d'un Scarificateur réversible peuvent donc s'avérer économiquement intéressants.

Une approche à poursuivre, avec l'amélioration des outils

Le modèle de Scarificateur réversible® utilisé à Bord-Louviers était un prototype. Des modifications techniques, qui améliorent son efficacité et son coût de mise en œuvre, ont été apportées depuis.

Par ailleurs, la méthode 3B, qui a été testée à Bord-Louviers en combinaison avec le Scarificateur réversible mais qui est plus particulièrement adaptée à des stations à hydromorphie temporaire, donne également de bons résultats sur ces stations (observations issues des autres sites du réseau ALTER). L'évaluation de l'intérêt économique de la méthode 3B nécessite l'acquisition de données supplémentaires sur la croissance des plants dans ces contextes stationnels. Comme pour le Scarificateur, l'outil (Sous-soleur multifonction®) testé dans le réseau ALTER a été perfectionné depuis. D'autres innovations techniques ont également vu le jour : dans le cadre d'une convention de partenariat de R&D entre la société Grenier-Franco et l'ONF, un nouvel outil tracté constitué d'une dent de sous-solage associée à des disques pour créer un billon a été développé, le Culti-3B® (voir Ulrich *et al.*, dans ce numéro). Cet outil permet de réduire significativement le temps de travail par rapport au Sous-soleur multifonction® utilisé pour la méthode 3B). L'étude de ces nouveaux outils et de leur efficacité est l'objet du projet PILOTE (encadré 3).

3 - Projet PILOTE : les travaux préparatoires à la plantation Installation d'un réseau de chantiers pilotes pour développer et promouvoir des outils innovants

Le projet PILOTE a été construit dans la continuité du projet ALTER, qu'il complète sur les points suivants :

- Test d'une gamme plus large d'outils mécaniques, notamment des outils tractés montés sur tracteur forestier et de nouveaux outils montés sur mini-pelle. Tous ces outils sont des outils nouvellement développés et actuellement en cours d'évaluation. Des techniques de contrôle de la végétation par amendement minéral seront également étudiées.
- Mise en œuvre des outils sur une gamme plus large de conditions stationnelles (type de sol, type de végétation dominante), permettant de définir le domaine d'application des outils testés.
- Évaluation de la productivité horaire des différents outils, permettant une estimation de leur coût de mise en œuvre.
- Suivi des plantations et identification des interventions nécessaires pendant les 10 années qui suivent la plantation, permettant une intégration des différents outils dans des itinéraires techniques complets.

Le projet PILOTE se base sur la mise en place d'un réseau national de chantiers de plantation, initié en 2013. Les sites choisis correspondent à des situations (conditions stationnelles et historique de gestion) constituant des enjeux au niveau national : elles représentent des surfaces importantes et elles sont reconnues comme contextes difficiles pour les plantations (taux d'échec important ou coûts d'installation élevés). Dans chaque site, plusieurs méthodes adaptées aux conditions locales sont testées et comparées.

Le projet PILOTE, porté par l'équipe MGVF de l'INRA de Nancy, est conduit en partenariat avec des équipes de l'ONF (pôles R&D de Boigny, Compiègne, Dôle et Fontainebleau), la Société Forestière de la CDC, du FCBA, de la Forêt Privée Française, et d'Alliance-Forêts Bois. Le projet reçoit actuellement le soutien financier de l'ONF, du MAAF, du RMT AFORCE et de l'INRA.

En résumé, et pour conclure

Le Scarificateur réversible® est un outil efficace pour contrôler la fougère aigle à près de 100 % pendant les trois années qui suivent la plantation. Ce type de préparation a conduit à des inversions de flore au profit de la ronce et des graminées, moins gênantes que la fougère pour les jeunes plants mais dont il faudra maîtriser le développement ultérieur. Ces résultats sur le contrôle de la fougère ont été observés sur tous les sites du réseau ALTER. La reprise des plants répond différemment aux interventions testées, selon les sites d'étude. De nombreux facteurs qu'il conviendra d'étudier entrent en effet en jeu (sécheresse, ennoyage, herbivorie). La mise en œuvre de la méthode 3B et du Scarificateur réversible® a permis une amélioration

significative de la croissance des plants après 2 ans à Bord-Louviers. Les autres sites du réseau ALTER sont d'installation trop récente pour fournir des résultats sur la croissance des plants.

Des fiches techniques présentant les outils, leur mise en œuvre leur contexte d'utilisation sont disponibles auprès des auteurs. Par ailleurs, la formation des opérateurs à l'application de ces nouvelles méthodes est un point crucial de leur mise en œuvre.

D'un point de vue économique, l'utilisation du Scarificateur réversible permet, dans le cas de Bord-Louviers, d'éviter au moins six dégagements. Cette réduction du nombre d'interventions s'avère économiquement intéressante. Une évaluation technico-économique de différents

outils, intégrés dans des itinéraires techniques complets, permettra de mieux déterminer les conditions dans lesquelles chaque outil ou technique est pertinent. C'est l'objectif du futur projet PILOTE qui servira à consolider ces premiers résultats et mettra à disposition des gestionnaires des sites de démonstration et de vulgarisation de ces itinéraires.

Xavier AUZURET
INRA, UMR1092 LERFoB,
54280 Champenoux

Gwénaëlle GIBAUD
Jérôme PIAT

ONF, Département R&D
Pôle de Compiègne
prenom.nom@onf.fr

Catherine COLLET
Léon WEHRLÉN
INRA, UMR1092 LERFoB,
54280 Champenoux
prenom.nom@nancy.inra.fr

Claudine RICHTER
Quentin GIRARD
ONF, Département R&D
Pôles Fontainebleau, Boigny

Jean-Yves FRAYSSE
FCBA, Station Sud-Ouest

Remerciements

Les équipes remercient l'ensemble des personnels de terrain pour leur appui à l'installation des dispositifs et leur contribution active au suivi des sites. Le projet ALTER a bénéficié du soutien financier de l'ONF (Conventions cadre de R&D ONF-INRA), du Ministère en charge de l'Agriculture (conventions E30/07, E13/2010, E16/2011) et de la Région Alsace (convention 871-10-C1).

Bibliographie

Auzuret X., Wehrén L., 2012. Lutte contre la fougère aigle : l'Asulame disparaît... ! Forêt Entreprise, n° 204, pp.46-49

Brethes A., 1984. Catalogue des stations forestières du Nord de la Haute-Normandie, 433 p.

Dolling A.H.U., 1996. Interference of bracken (*Pteridium aquilinum* L. Kuhn) with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) seedling establishment. Forest Ecology and Management, vol. 88, n° 3, pp. 227-235

Dumas Y., 2002. Que savons-nous de la Fougère aigle ? Revue Forestière Française, vol. 54, n° 4, pp. 357-374

Gama A. et al., 2006. Utilisation des herbicides en forêt et gestion durable. Éditions QUAE, 319 p.

Gaudio N., 2010. Interactions pour la lumière au sein d'un écosystème forestier entre les arbres adultes, les jeunes arbres et la végétation du sous-bois. Application à la régénération du pin sylvestre en peuplement mélangé chêne sessile – pin sylvestre. Thèse Université d'Orléans, 194 p.

Gaudio N., Balandier P., Dumas Y., Ginisty C., 2011. Régénération naturelle du pin sylvestre sous couvert : contrainte de la végétation monopolistique du sous-bois en milieu acide. Rendez-Vous Techniques, n° 33-34, pp. 18-24

Martin Y., 1991. Utilisation des phytocides dans les reboisements feuillus en forêt domaniale de Lyons. Bulletin Technique de l'ONF, n° 21, pp. 177-189

Piat J., 2012. Comparaison de types de préparation de terrain à la plantation de Chêne sessile, compte-rendu final d'expérimentation. ONF, pôle R&D Compiègne, 14 p.

Wehrén L., 2009. Mieux planter ! La technique « 3B » élimine la végétation et décompacte le sol en une seule opération. Rendez-Vous Techniques, n° 25, pp.7-12



Ligne de chênes 2 ans après passage du Scarificateur Réversible

Équipe MGVF, INRA

Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle

Le tassement est un processus inquiétant de dégradation physique des sols en Europe, qui pourrait menacer la durabilité des écosystèmes cultivés et forestiers. Chercheurs et forestiers sont donc mobilisés sur ce thème depuis des années, mais les effets à long terme et les processus de restauration restent méconnus. Deux sites de tassement contrôlé ont été installés en 2007 et 2008 en forêt lorraine, avec un fort soutien de l'ONF, comme base de divers projets de recherche : un investissement pour l'avenir.

L'impact à court terme de la circulation d'engins sur les sols a fait l'objet de nombreuses recherches et, entre autres, de deux dossiers dans les *RenDez-Vous techniques* (n° 8 en 2005 et n° 19 en 2008). Des chercheurs allemands ont montré que les contraintes verticales mesurées lors d'opérations forestières sont toujours supérieures à la portance de la majorité des sols forestiers humides, conduisant à un risque élevé de dégradation physique des sols (Horn et al., 2007). Cette dégradation physique des sols entraîne généralement une diminution du volume de sol prospectable par les racines (sol plus compact, défauts d'aération et d'infiltration de l'eau), augmentant le risque de stress hydrique et nutritif des arbres et pouvant conduire à des pertes de productivité et de résilience des peuplements forestiers face aux événements extrêmes (tempêtes, sécheresse...).

Les processus et la durée nécessaires à un retour à des conditions de sol non perturbées sont mal connus, surtout en l'absence d'intervention humaine (Ranger et al., 2005). Connaître ces processus et la vitesse de restauration naturelle du sol après tassement est fondamental pour prévoir l'impact à long terme de la

circulation d'engins dans un contexte donné et décider des actions *ad hoc* pour assister cette restauration. De plus, certains sols à texture très grossière (sableuse) peuvent être peu déformables sous la pression exercée par les engins et avoir une activité biologique trop faible (sol acide) pour permettre la régénération de leur structure dégradée. L'appréciation de la sensibilité d'un sol au tassement devrait prendre en compte son caractère déformable mais aussi sa capacité à se restaurer naturellement.

C'est pourquoi deux sites expérimentaux ont été mis en place en Lorraine dans l'objectif d'observer à court et à long terme les processus de dégradation et de restauration de sols sensibles au tassement suite à la circulation d'un porteur forestier. Le tassement y a été contrôlé (type et poids de l'engin, type et pression de gonflage des pneumatiques, état initial du sol) de façon à permettre de mieux comprendre les liens de cause à effet des processus de dégradation et de restauration d'un sol. Les deux sites font l'objet d'un suivi multicritère afin d'identifier la réaction du sol dans toutes ses composantes (biologie, chimie et physique). Cet article fait le point

sur les résultats et observations issus des quatre premières années du suivi réalisé sur ces sites.

La mise en place de deux sites expérimentaux de suivi du tassement : une première en Europe

Un projet de recherche intitulé *Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement* (DST) a permis l'installation, avec le soutien financier de l'ONF, des deux premiers sites expérimentaux de suivi du tassement des sols forestiers en Europe.

Le premier site mis en place est situé en forêt domaniale des Hauts-Bois, sur la commune d'Azerailles (54). La circulation d'un porteur forestier (Valmet 840, pneumatiques [600/55×26,5] gonflés à 360 kPa) y a eu lieu en mai 2007 et la plantation de chênes sessiles (1600 tiges ha⁻¹) à l'automne 2007. Le second site se trouve en forêt domaniale de Grand Pays, sur la commune de Clermont en Argonne (55); le même porteur a été utilisé en mars 2008 et la plantation de chênes sessiles (même densité) a eu lieu à l'automne 2008. Dans les deux cas, la déformation du sol causée par le passage du porteur a été contrôlée

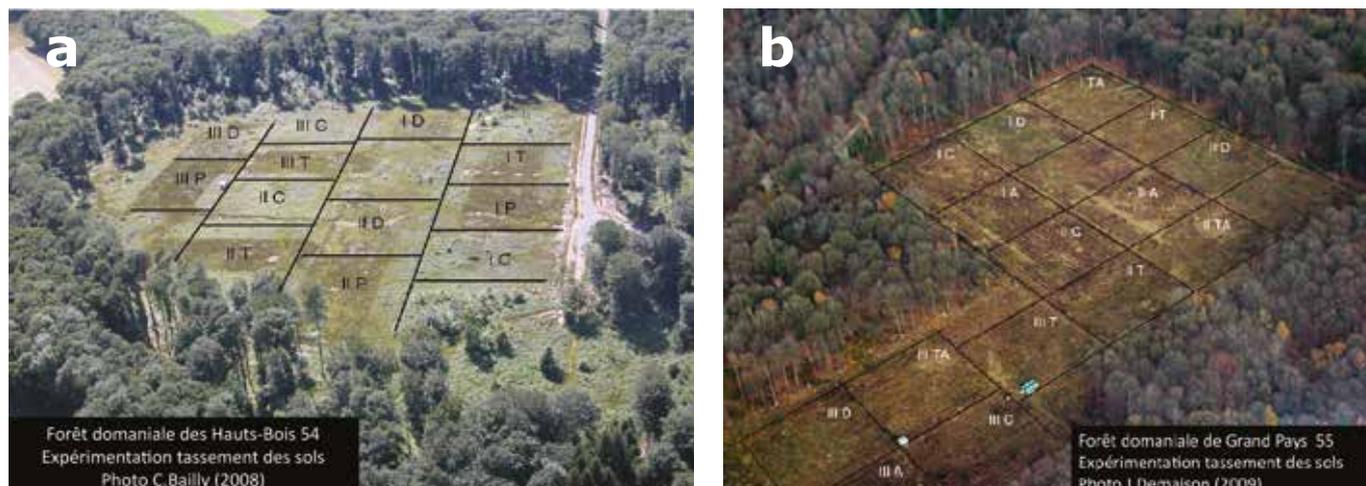


Fig. 1 : vues aériennes des sites d'Azerailles (a) et Clermont en Argonne (b) prises en 2008 (a) et 2009 (b), quelques mois après le passage du porteur forestier

Les indications donnent le numéro du bloc (I, II ou III) suivi de l'abréviation du traitement (C pour témoin/control, T pour tassé/trafficked, D pour tassé et décompacté par cover crop, P pour tassé et décompacté par potet, A pour témoin amendé, et TA pour tassé amendé). Sur la photo a, les zones vert foncé sont à fort recouvrement de jonc et les zones vert clair à fort recouvrement de ronce.

afin d'être la plus identique possible entre les deux sites. Le débardage des deux peuplements précédents a été réalisé par câble-mât permettant de limiter les impacts au sol autres que ceux prévus par le protocole. De plus, au moment du passage de l'engin, l'humidité du sol a été mesurée et le poids de l'engin a été adapté (23 t en FD des Hauts-Bois et 17 t en FD de Grand Pays) pour occasionner le même impact sur les deux sites (vérification visuelle de l'orniérage, puis vérification par des mesures de masse volumique et par modélisation; Goutal, 2012). L'objectif était de compacter le sol (diminution du volume à masse constante) sans trop l'orniérer. Cet objectif a été globalement atteint avec une contraction moyenne de 5cm du niveau du sol, calculée à partir des données de masse volumique des sols (sur la mesure de l'enfoncement, voir aussi l'encadré). Toutefois, un orniérage plus intense peut être observé par endroits, selon la variabilité des conditions d'humidité au moment du passage du porteur et en liaison avec la présence d'obstacles (souches).

Les sols des deux sites ont des morphologies similaires, avec une couche limoneuse acide d'une cinquantaine de cm reposant sur une altérite argi-

leuse plus riche (issue d'une marne pour le site d'Azerailles et d'une gaize pour le site de Clermont en Argonne). Le sol du site de Clermont en Argonne est cependant plus limoneux, plus acide que celui d'Azerailles et contient des argiles minéralogiquement différentes (argiles gonflantes). La plus forte acidité du sol sur le site de Clermont en Argonne a motivé l'installation de deux modalités supplémentaires faisant l'objet d'un amendement calco-magnésien (1,3 t ha⁻¹ de dolomie composée de 36 % de CaO et 24 % de MgO, associée à 400 kg ha⁻¹ de sulfate de potassium composé de 50 % de K₂O et 17 % de S) en vue de stimuler l'activité de la faune du sol, en particulier des vers fousseurs, et ainsi accélérer potentiellement la régénération biologique de la structure du sol.

Les dispositifs expérimentaux (figure 1) consistent chacun en 3 blocs répétant les différents traitements (4 à Azerailles et 5 à Clermont en Argonne) à savoir :

- tassé (passage du porteur), témoin (absence de circulation), décompacté (tassé puis décompacté par cover crop) sur les deux sites;
- potet (tassé puis décompacté par potet au profit des plants) à Azerailles;

- amendé (absence de circulation et amendement calco-magnésien,) et tassé amendé (passage du porteur et amendement calco-magnésien) sur le site de Clermont en Argonne.

L'emprise totale de chaque dispositif est comprise entre 5 et 6 ha, chaque traitement fait 0,25ha.

Les objectifs associés au suivi de ces deux sites se déclinent de la manière suivante :

1. identifier les modifications du fonctionnement physique, chimique et biologiques des deux sols soumis à des contraintes de compaction similaires;
2. identifier la dynamique de régénération de la structure et du fonctionnement biologique et géochimique des sols;
3. étudier l'intérêt d'une assistance physique (en plein discage, ou locale, potet) ou chimique (amendement) sur la dynamique de régénération des propriétés du sol.

Des premiers éléments de réponse à court et moyen terme (jusqu'à 4 ans après tassement) ont été apportés par une thèse financée par l'ONF (Goutal, 2012); les sites continuent à faire l'objet d'un suivi multi-critère par l'Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers de l'INRA de Nancy.

Sites de suivi du tassement : évaluation du lidar pour quantifier l'enfoncement des sols

Le survol du site de suivi du tassement de la FD de Grand Pays, à Clermont en Argonne, a été réalisé en 2010 (2 ans après le passage du porteur) par la société Sintégra avec un avion équipé d'un lidar. Le lidar est une technique de télédétection qui émet des ondes laser à très haute fréquence. Le capteur embarqué dans l'avion enregistre le temps de retour de l'onde laser. Le prestataire calcule ensuite la position en 3 dimensions (x, y, z) de chaque retour, en tenant compte de la trajectoire de l'avion (pour le détail de la technique voir RDVT n° 20, p 16 - 2009). La précision annoncée par le prestataire en plein découvert est de l'ordre du décimètre et la précision altimétrique de l'ordre du centimètre. Une comparaison avec des levés de géomètre réalisés sur le terrain, sur 9 transects, indique une très bonne corrélation entre l'altitude lidar et celle des levés de géomètre. L'erreur altimétrique entre ces deux sources de données peut être estimée à 4,5 cm en moyenne. Avec les points classés « sol » par le prestataire, on peut construire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à très haute résolution puisque la densité de points « sol » est très élevée (6 à 7 points par m² en moyenne).

L'objectif de cette campagne Lidar consiste ici à quantifier le tassement sur les différentes modalités par une mesure d'un volume « d'enfoncement » du sol. Pour cela, on crée un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de référence réalisé avec l'altitude des 5 % des points sol les plus hauts, sur des cellules assez larges de 1x1m. On considère que ce MNT de référence modélise le niveau supérieur de la surface du sol tel qu'il aurait été s'il n'avait pas été tassé. Cette hypothèse semble raisonnable dans des cas où l'effet de la pente est négligeable (moins de 4 % de pente sur le dispositif de suivi du tassement de Clermont-en-Argonne).

Pour rendre compte du niveau « d'enfoncement » du terrain, on calcule alors la différence d'altitude (ΔH) entre le MNT de référence et l'altitude des points sol les plus bas. Ces points sol « bas » sont supposés être « au fond » des ornières laissées après le passage du porteur. La figure A montre le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) qui a été calculé par interpolation des valeurs

de ΔH . Ce MNH permet ainsi d'évaluer et de localiser « l'enfoncement » sur toute la zone (découpée en cellules de 0,5 x 0,5 m).

Le cumul de ces enfoncements du niveau du sol apparaît comme un indicateur du degré de tassement de chacune des modalités (figure B). On constate qu'il existe un niveau « d'enfoncement » résiduel dans les zones non tassées (modalités A, C ou sur les bandes de témoin relatif des modalités tassées) qui est assez stable et qui peut être évalué à environ 14 cm (figure B). Il peut être dû en partie à d'anciennes traces d'exploitation ou à la présence de trous (fosses, trous de bombe, chablis...). En revanche, dans les zones nouvellement tassées, ce volume d'enfoncement est significativement plus élevé et atteint 16 à 18 cm.

Par différence du niveau d'enfoncement de la zone compactée par rapport à la zone de témoin relatif de la même modalité, il est possible de calculer un niveau moyen d'enfoncement des surfaces tassées qui est de 2,5 cm (+/- 0,7 cm). Cette valeur n'est pas trop éloignée de la contraction moyenne de 4,7 cm du niveau du sol calculée à partir des mesures de densité apparente du sol.

Les niveaux d'enfoncement évalués grâce au lidar et par des mesures indépendantes de contraction de sol semblent donc converger. Le lidar présente l'avantage de pouvoir, par des mesures non destructives, évaluer non seulement le niveau de tassement d'une zone mais aussi de localiser précisément ces zones tassées. Ces résultats sont valables dans le contexte particulier du site de suivi du tassement de Clermont-en-Argonne qui, en 2010, n'avait pour végétation que des herbacées et des ligneux de moins d'un mètre de haut. Cependant, on constate des niveaux d'enfoncement similaires dans les zones forestières bordant le dispositif où l'on dispose de données lidar à haute densité de points, avec des acquisitions réalisées hors feuille (figure A). Si ces résultats se confirmaient dans d'autres situations, le lidar serait alors un outil très prometteur pour diagnostiquer le tassement de certains sols forestiers et ainsi aider le gestionnaire dans l'implantation des réseaux de cloisonnements.

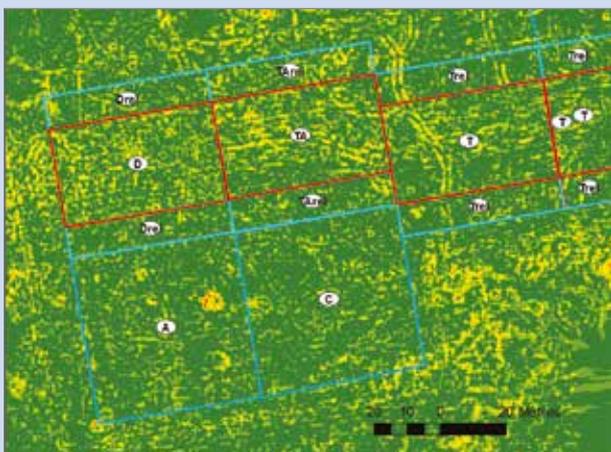


Fig. A : différence de hauteur entre un MNT de référence (sol non tassé) et les points bas du sol (tassé) ; modèle numérique de hauteur calculé pour le site de Clermont en Argonne. En rouge et en jaune apparaissent les zones fortement enfoncées.

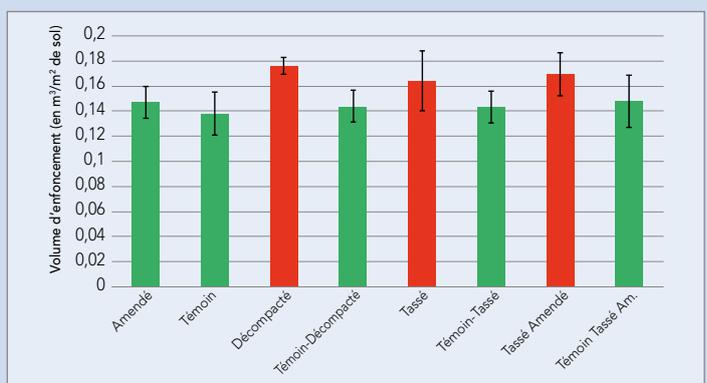


Fig. B : évaluation du niveau d'enfoncement moyen des différentes modalités du site de suivi du tassement de Clermont-en-Argonne à l'aide du lidar. L'enfoncement est calculé par différence entre un raster à basse résolution (1 m), correspondant aux points sol lidar les plus hauts supposés non tassés, et un raster à haute résolution (25 cm) correspondant aux points sol lidar les plus bas.

Le fonctionnement des sols est fortement modifié suite au passage du porteur

Les zones tassées ont vu la densité apparente, la résistance à la pénétration de leur sol augmenter, la conductivité hydraulique à saturation et la perméabilité aux gaz de leur sol diminuer quand on les compare au témoin. Ces modifications ont conduit à une augmentation de l'intensité et de la fréquence de l'engorgement temporaire des horizons de surface des sols (généralement entre 0 et 30 cm de profondeur). Morphologiquement, on constate une intensification des traces de l'hydromorphie (taches ou zone grisâtres et concrétions ferromanganiques, témoins de la mobilité du fer lors de période d'anoxie). Cependant cette intensification de l'hydromorphie n'est pas toujours très visible sur le site de Clermont en Argonne, où les sols sont plus acides et plus pauvres en oxydes de fer.

Le suivi de la concentration en O₂ et CO₂ dans l'atmosphère du sol confirme, pour les deux sites, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des périodes où le sol et les racines subissent un déficit d'aération dans le traitement tassé. Pendant la première année après tassement, ce déficit d'aération est systématiquement observable, quelles que soient la saison et/ou les conditions d'humidité (même quand le sol tassé n'est pas engorgé). La zone plus dense qui concerne les 25 premiers centimètres du sol agit comme une couche imperméable à l'eau et au gaz, laissant les horizons profonds plus secs et cependant moins aérés que dans le traitement témoin.

La flore est immédiatement modifiée suite à la circulation de l'engin, les traitements tassés comportant plus de joncs et les traitements témoins plus de ronces. Ce changement de recouvrement de la ronce et du jonc en fonction du traitement est particulièrement visible sur le site d'Azerailles (figure 1). Sur le site d'Azerailles, la mortalité initiale des plants de chêne est plus élevée dans le traitement tassé (25 %) par rapport au traitement témoin (6,9 %). Sur le site de Clermont en Argonne, il n'y a pas de différence flagrante de taux de mortalité initiale entre les traitements tassé (7,2 %) et témoin (7,7 %). Cependant, il est important de noter la différence d'une année concernant l'application des traitements et la plantation des chênes entre les deux sites : la première saison de végétation vécue par les chênes d'Azerailles

a été très humide (printemps 2008) alors que celle vécue par les chênes de Clermont en Argonne l'a été beaucoup moins (printemps 2009). À Azerailles, l'amélioration du taux de reprise par les modalités de restauration assistée mécaniquement (cover crop et potet) est très variable selon le bloc (figure 2a) (Fatré, 2012), les techniques de travail du sol ayant plus de succès sur les blocs II et III. Ces deux blocs ont une pente légère mais plus forte que le bloc I et une teneur en éléments grossiers plus élevée que le bloc I ; les sols des blocs II et III sont ainsi plus drainants que ceux du bloc I.

À Clermont en Argonne, la variabilité initiale des propriétés du sol est plus faible qu'à Azerailles et l'effet des traitements sur le taux de mortalité des chênes est également beaucoup moins variable (figure 2 b).

La restauration du fonctionnement du sol, un processus difficile à mettre en évidence...

Les propriétés des sols présentent une forte hétérogénéité spatiale qui complique l'interprétation des tendances observées dans le temps, l'échantillonnage à un instant donné

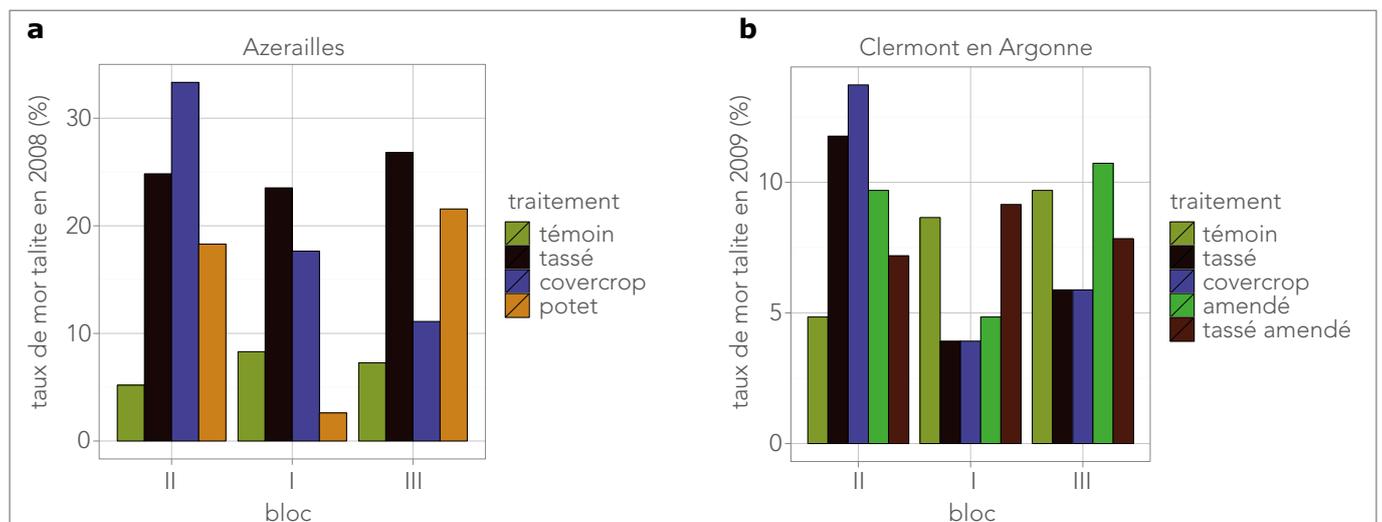


Fig. 2 : taux de mortalité des chênes sessiles plantés (densité initiale 1600 t ha⁻¹) sur le site d'Azerailles (a) et sur le site de Clermont en Argonne (b); moyennes par bloc et traitement. Noter la différence d'échelle de l'axe des y entre les deux sites pour mettre en exergue les différences entre blocs et traitements.

étant généralement destructif. De plus, le tassement induit des différences fortes de teneur en eau entre traitements, ce qui empêche une comparaison directe des propriétés physiques entre traitements, celles-ci étant toujours dépendantes de l'humidité. Les différences d'humidité entre traitements et entre année de mesure empêchent ainsi de dégager des dynamiques de propriétés liées uniquement au traitement et à son évolution, sauf à normaliser la mesure par rapport à l'humidité du sol. La figure 3 illustre ce constat ; en effet la différence entre les traitements tassé et témoin en terme de résistance à la pénétration du sol semble augmenter avec le temps alors que cette augmentation d'impact n'est liée qu'à l'humidité du sol au moment de la mesure.

... mais un processus en cours sur les deux sites

Les processus responsables de la régénération de la structure du sol peuvent être classés en processus physiques de gel/dégel et humectation/dessiccation et en processus biologiques liés essentiellement à l'activité de la faune du sol. Ces processus agissent souvent de concert et mènent à des résultantes complexes de l'état physique, chimique et biologique apparent du sol à différentes échelles. Par conséquent, il est nécessaire de coupler les approches tout en s'assurant d'avoir assez de mesures pour pouvoir normaliser par rapport aux effets parasites (constituants et humidité).

Ce préalable étant acquis, on constate sur les deux sites un changement notable du fonctionnement du sol tassé en surface. Cette évolution est essentiellement le fait de processus physiques qui ont permis un retour à une masse volumique du sol similaire au sol témoin entre 0 et 10 cm de profondeur à Clermont en Argonne. À Azerailles, la masse volumique du sol tassé diminue également en surface sans atteindre le

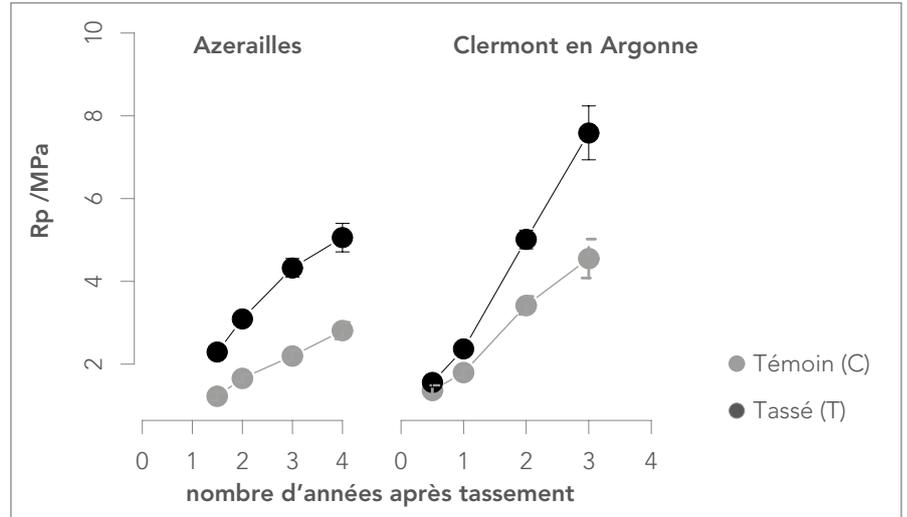


Fig. 3 : évolution de la résistance à la pénétration des sols (R_p) de 5 à 10 cm de profondeur dans les traitements témoin et tassé des sites d'Azerailles et Clermont en Argonne ; moyenne et erreur standard avant normalisation par rapport à l'humidité du sol au moment de la mesure. L'humidité des sols n'étant pas identique entre traitements pour une campagne de mesure donnée et entre campagnes pour un traitement donné, l'effet du traitement et du temps depuis le passage du porteur est masqué par l'effet très significatif de la teneur en eau sur la résistance à la pénétration.

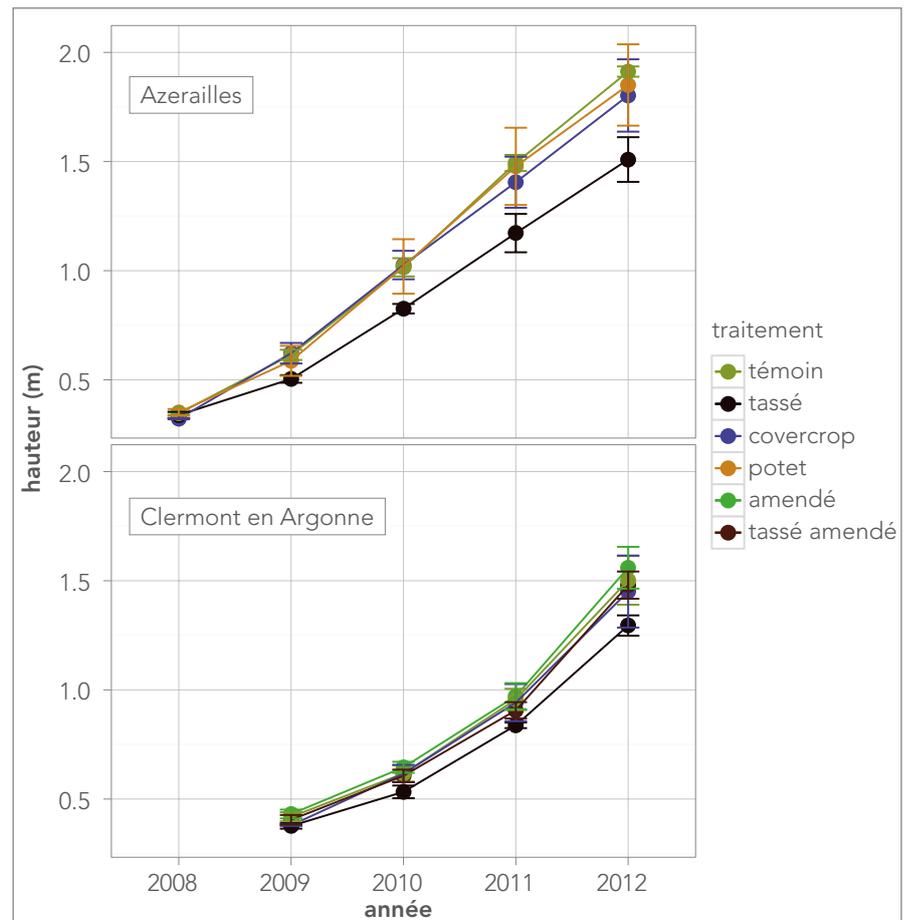


Fig. 4 : moyenne et erreur standard ($n=3$) par traitement de la hauteur des chênes sessiles plantés sur le site d'Azerailles et celui de Clermont en Argonne

niveau avant tassement, 4 ans après la perturbation. La masse volumique du traitement tassé diminue sur les deux sites, mais la distribution de la porosité reste affectée (Bottinelli *et al.*, 2014). Les processus physiques ont préférentiellement créé des fissures qui permettent de meilleurs échanges gazeux entre l'atmosphère extérieure et celle du sol, mais qui ne correspondent pas aux conditions non perturbées en terme de régime hydrique et de résistance à la pénétration. De plus, même si la couche tassée en surface semble à nouveau permettre les échanges gazeux 3 à 4 ans après le tassement, l'atmosphère du sol en profondeur est toujours impactée du fait de la plus forte humidité et de la plus faible porosité du sol tassé. Ainsi, lors de fortes pluies, l'atmosphère du sol tassé présente toujours des phases d'hypoxie (faible teneur en O₂).

Le fait que le sol ait commencé à se restructurer en surface ne semble pas atténuer l'impact du tassement sur la croissance en hauteur des chênes sessiles sur les deux sites (figure 4). La morphologie des systèmes racinaires a été étudiée à Azerailles en 2011 (4 ans après tassement), montrant que la profondeur de sol prospecté par le système racinaire est moindre, les racines de structure sont moins nombreuses et plus petites en diamètre, et le pivot est absent dans le traitement tassé par rapport au traitement témoin (Fatré, 2012).

De plus, l'effet positif du travail par cover crop sur la croissance en hauteur semble diminuer avec le temps. Il en est de même pour le travail par potet, même si l'effet positif semble décroître plus tardivement. L'effet de l'amendement sur les paramètres physiques (résistance à la pénétration, masse volumique) des sols tassés et témoins n'est pour l'instant pas significatif alors qu'il est très positif sur la croissance en hauteur des chênes (figure 4) et sur la chimie des sols. Ces tendances restent, bien entendu à être observées sur le long terme.

Deux sols de morphologie similaire mais des divergences de comportement

Les sols des deux sites présentent des morphologies similaires (limon sur argile lourde); pourtant des différences essentiellement liées à la quantité et à la minéralogie des argiles ainsi qu'à l'acidité ont occasionné des divergences notables de leur comportement en déformation et en restauration.

Le site le plus acide et le plus pauvre en argile (Clermont en Argonne) a une agrégation initiale (avant tassement) peu stable et peu développée, probablement à cause de la faible diversité et activité de la faune du sol et/ou à cause de la présence d'argiles gonflantes. La circulation du porteur dégrade cette structure mais la différence entre état initial et état après tassement est moins forte que sur le site plus riche d'Azerailles. Le site de Clermont en Argonne est pourtant réputé plus sensible au tassement que celui d'Azerailles (teneur en limon plus élevée). De plus, à Clermont l'effet du tassement varie fortement en fonction de l'humidité du sol au moment de la mesure. Ainsi, six mois après tassement, en novembre 2008 (sols humides), aucune différence significative de résistance à la pénétration entre les traitements tassé et témoin n'a pu être mise en évidence entre 0 et 70 cm de profondeur alors qu'un an après, en juin 2009, des différences fortes et significatives ont pu être observées (figure 3). Ceci démontre que sur le site d'Argonne, l'effet du tassement existe même si les observations ne le montrent pas directement, au moins dans certaines conditions d'humidité du sol (effet apparent vs effet réel).

On constate également que les processus physiques de restauration ont eu un impact différent sur la structure du sol selon le site en lien étroit avec la quantité d'argile et leur minéralogie qui peut également avoir des conséquences sur la chimie du

sol (rétention en Ca en particulier). À Clermont en Argonne, les processus de régénération de la structure semblent avoir surtout agi au niveau de la microporosité en lien également avec l'absence d'activité biologique fousseuse (sol acide), alors qu'à Azerailles ils auraient agi sur tout le spectre de taille des pores. Ceci aura pour conséquence probable une restauration du fonctionnement du sol plus efficace à Azerailles qu'à Clermont en Argonne, les pores de grandes et petites tailles ayant chacun des fonctions bien spécifiques et complémentaires. Le suivi à long terme des sites devrait permettre de tester l'hypothèse d'une divergence des comportements en restauration des deux sites, selon leur richesse chimique et biologique spécifique.

Applications concrètes des résultats acquis : créer et entretenir des cloisonnements

Le dispositif des sites d'Azerailles et de Clermont en Argonne doit être suivi à plus long terme et fera considérablement progresser la connaissance des dynamiques de restructuration naturelle et assistée de sols forestiers tassés. Mais le suivi à court terme s'est déjà montré riche en enseignements et nous permet d'en tirer quelques recommandations concernant la gestion durable des sols forestiers.

Malgré un orniérage très modéré, les impacts de la circulation du porteur sur le fonctionnement du sol et les peuplements de chêne sont importants. Ces effets concourent à limiter les potentialités d'enracinement des arbres, ce qui peut s'exprimer sur la croissance de manière variable selon le climat mais, sur le long terme, crée un risque fort de mauvaise adaptation face aux événements climatiques extrêmes. Trois à quatre ans après tassement, les techniques de restauration assistée de la qualité physique des sols (cover crop, potet, et amendement) ne semblent pas suffisantes pour contrer les im-

pacts négatifs du tassement sur les sols et peuplements. Ces résultats soulignent la nécessité d'utiliser un réseau de passage obligatoire en forêt (cloisonnements) pour éviter que les conséquences détaillées dans cet article se manifestent sur l'ensemble de la parcelle.

Cependant, d'après les suivis d'humidité du sol après tassement, il est certain que ce réseau de cloisonnements sera plus humide plus souvent et plus longtemps que la parcelle environnante. De plus, la restauration qui aura lieu entre deux passages successifs ne concernera que les horizons de surface et ne sera probablement pas suffisante pour améliorer le drainage des cloisonnements (surtout en sol acide où les pores de grandes tailles tardent à se reformer après destruction par tassement). Les passages suivants auront ainsi lieu sur des cloisonnements incomplètement restaurés, plus humides que l'ensemble de la parcelle. Par conséquent, s'il est important de restreindre la circulation des engins aux seuls cloisonnements, il est également important de les dégrader le moins possible : circuler sur sol « sec » ou gelé, protéger les cloisonnements à l'aide des rémanents d'exploitation disponibles... (voir la Fiche technique n°7 de l'ONF, dans RDVT n° 36-37 pp. 96-80). C'est ainsi que les engins pourront continuer à les utiliser sur le long terme.

Noémie GOUTAL-POUSSE
ONF, pôle R&D de Nancy
noemie.pousse@onf.fr

Jérôme BOCK
ONF, pôle R&D de Chambéry

Jacques RANGER
INRA Centre de Nancy
Unité Biogéochimie des
Ecosystèmes Forestiers

Remerciements

Ont également participé les collaborateurs suivants : Dominique Gelhaye puis Pascal Bonnaud pour la responsabilité technique des sites, Catherine Pasquier pour les levés topographiques, Jérôme Demaison pour la maintenance du matériel, Gilles Nourrisson pour les analyses, Alain Brêthes pour les relevés de flore, Pascal George et Nicolas Gomez pour l'entretien et le suivi des sites.

Les auteurs tiennent à remercier tous les financeurs des sites ateliers tassement : ONF, projet DST Gessol MEDD (2581A), projet ANR-ADD volet 4 (2631A), MAP (007B), DRAF Lorraine – SERFOB (12000076B), Ademe, Feder, Lhoist, Gip Ecofor, CNRS, et INRA. Ces sites sont labellisés dans le SOERE F-ORE-T et le Labex ARBRE.

Bibliographie

Bottinelli N., Hallaire V., Goutal N., Bonnaud P., Ranger J., 2014. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: initial effect and short-term recovery. *Geoderma* n° 217-218, pp. 10-17

Fatré B., 2012. Suivi de plantations de chêne sessile après dégradation de sols sensibles suite au passage d'un engin de débardage et effets de restauration mécanique et chimique, observations réalisées sur deux sites expérimentaux en Lorraine. Mémoire de BTS de Gestion Forestière. Mirecourt : 33 p.

Goutal N., 2012. Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. Thèse soutenue le 27/03/2012, Nancy : 223p. (<http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00737884>)

Horn R., Vossbrink J., Peth S., Becker S., 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* n° 248, pp. 56-63

Ranger J., Lamandé M., Lefèvre Y., 2005. Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème. *RDV techniques* n° 8, pp. 27-35



N. Pousse, ONF

L'opération de tassement sur le site d'Azerailles

Le réseau lorrain d'observation de la reconstitution après tempête en forêts publiques Premier bilan sur la régénération

14 ans après la tempête Lothar, le réseau d'observation de la reconstitution des peuplements dévastés en région Lorraine permet de faire un point d'étape d'après les premières analyses. On ne revient pas ici sur les aspects de faisabilité technique et coût des différents modes de remise en état des parcelles. On cherche plutôt à savoir si, ensuite, les peuplements peuvent se reconstituer de façon satisfaisante; au-delà, on cherche aussi comment sauvegarder en hêtraie une certaine diversité d'essences pour l'avenir.

Suite aux tempêtes Lothar et Martin des 26 et 27 décembre 1999, les forestiers ont dû faire face à une problématique sans précédent au niveau national : comment commercialiser et/ou déblayer la quantité considérable de bois tombés en quelques heures (près de 30 millions de m³ en Lorraine représentant près de 9 fois la récolte annuelle)? Dans le nord-est de la France, de multiples itinéraires techniques ont été adoptés pour la remise en état et la reconstitution des parcelles rasées par la tempête. Mis en œuvre dans l'urgence, ces travaux ont suscité de nombreuses interrogations concernant notamment la conciliation entre contraintes de commercialisation des bois et respect des sols et des semis éventuellement présents pour favoriser la reconstitution des peuplements par régénération naturelle.

C'est dans ce contexte que le pôle R&D ONF de Nancy, en coordination avec la direction territoriale de Lorraine, a mis en place en 2001-2002 un **réseau de placettes d'observation de la reconstitution** de peuplements dévastés. Il s'agissait :

- à l'installation des sites, d'évaluer la faisabilité technique et le coût

- de différents modes de déblaiement des bois (= remise en état des parcelles);

- à moyen terme, d'acquérir des références locales concernant la reconstitution : (I) dynamique d'installation et nature du recrû obtenu (essences-objectif, ligneux d'accompagnement), en lien avec le mode de déblaiement; (II) situations éventuelles de concurrence ou de blocage (herbacées, semi-ligneux); (III) rythme de dégradation des rémanents, des souches, des andains;

- à plus long terme, de permettre une analyse globale et critique des itinéraires retenus (qualité des jeunes peuplements obtenus, coût, facilité de gestion...) de façon à en tirer des enseignements pour l'avenir.

Les objectifs sont donc différents de ceux de l'*Observatoire national des dynamiques naturelles de végétation après tempête* (sans intervention) mis en place à l'échelle nationale entre 2002 et 2005, et dont il a été question par ailleurs dans les RenDez-Vous techniques (Legay *et al.*, 2004; Lacombe et Van Couwenberghe, 2010).

Le suivi réalisé à ce jour sur ce réseau « reconstitution » peut se résumer en

deux périodes distinctes :

- de 2000 à 2005 : observation de l'effet de différentes modalités de déblaiement (plus ou moins interventionniste) sur la **reconstitution** des peuplements;

- à partir de 2005 : pour les placettes régénérées en hêtre sur plateau calcaire, modification du protocole pour constituer un observatoire de la **qualité** des jeunes peuplements, selon des modalités tranchées de travaux sylvicoles du plus intensif (travail en plein) au plus extensif (travaux ciblés).

Cet article ne fait qu'un point d'étape succinct, focalisé sur ces deux aspects : d'abord un résumé des résultats concernant la reconstitution, au sens de la difficulté ou non d'acquisition de la régénération; ensuite, un premier constat intéressant sur l'évolution des peuplements de hêtraie faisant l'objet de travaux ciblés, même si la comparaison des différentes modalités sylvicoles n'est pas encore réalisable. Le lecteur intéressé par les résultats détaillés des différents sites pourra se reporter aux comptes rendus correspondants (Gomez *et al.*, 2012 et 2013).

Présentation du réseau « reconstitution » lorrain

Compte tenu des moyens disponibles, c'est un ensemble de **huit sites d'observation** (dans 7 forêts publiques) qui a été implanté en 2000-2001, représentatif des principales essences forestières (hêtre, chêne, sapin) et des principaux contextes biogéographiques rencontrés en Lorraine (figure 1). Les sites sélectionnés sont des peuplements sinistrés à plus de 80 % sur de grandes arasées de plus de 10 ha, et dont le plus gros des chablis (bois d'œuvre de valeur) a été sorti précipitamment, en général sans cloisonnement d'exploitation (sauf une partie de la FD de Haye).

Les **modalités de reconstitution** (déblaiement) testées sur chaque site ont été les suivantes :

- *Témoin* : sortie du bois d'œuvre résiduel uniquement - la surface est laissée en l'état après la réouverture si besoin des cloisonnements à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'une pince. La largeur du cloisonnement est d'environ 3 m avec un entre axe de 24 m.
- *Bois d'industrie* : après la réouverture des cloisonnements, sortie du bois d'œuvre résiduel et du bois d'industrie.
- *Andainage* : après la réouverture des cloisonnements, sortie du bois d'œuvre résiduel et mise en andains des rémanents.

Chaque site comporte plusieurs placettes pouvant correspondre à différentes modalités de reconstitution. La répartition des modalités en fonction des sites se trouve dans le tableau 1, au total 25 placettes ont été installées. Sur chaque placette, d'une surface d'un hectare, ont été répartis de façon systématique 16 à 20 placeaux de mesures d'une surface unitaire de 25 m² (figure 2), pour le suivi de la végétation, et les notations de l'état du sol et de l'encombrement.

Mesures pour l'observation de la reconstitution

Les variables mesurées lors de deux campagnes de mesures, en 2002 et 2005 (il n'y a pas eu de mesure à l'installation du réseau), ont permis l'analyse de différents points.

■ **L'état du sol** : l'observation (appréciation visuelle) de l'encombrement et de l'état du sol des placeaux permet de juger de façon qualitative les obstacles à la mise en place de la régénération et les difficultés de la réalisation des travaux sylvicoles.

■ **La régénération et la concurrence présentes** : l'analyse des essences présentes et de leurs densités permet de juger la qualité de l'installation de la régénération ainsi que la concurrence ligneuse présente.

■ **Les espèces végétales présentes** : la notation des espèces et de leur abondance permet la qualification de la concurrence herbacée envers la régénération ainsi que d'apporter une information sur la richesse spécifique des sites.

■ **La hauteur des essences présentes** : l'analyse des hauteurs maximales par essences permet d'avoir une vision globale de la dynamique de la végétation au sein de chaque modalité, mais présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte les effets essence et station.

Utilisation du réseau pour l'évaluation des itinéraires de travaux sylvicoles en hêtraie

En 2005, suite au chantier de réflexion lorrain sur les évolutions sylvicoles (notamment les enjeux de réduction des coûts de travaux) il a été décidé d'utiliser le réseau « Reconstitution » comme support pour l'installation de placettes de référence en hêtraies sur l'impact des travaux ciblés (itinéraires de travaux dits « extensifs ») sur la qualité de la régénération.

Différents **types de dégagement** ont été réalisés avec le même objectif : maintenir un potentiel d'essences précieuses pour la sortie de phase de qualification dans une matrice de hêtre. Les trois modalités mises en place sont les suivantes.

■ **Travaux ciblés** : il s'agit, dans une logique arbre, de travaux très ponctuels (éventuellement de type cassage) réalisés au profit de quelques tiges de feuillus précieux supervitaux (tiges très vigoureuses et bien conformées) seulement si le développement de la partie sommitale du houppier est gêné par d'autres tiges. Ce type de dégagement ne concerne pas plus de 100 arbres à l'hectare, mais le nombre d'arbres travaillés dépend de l'effectif des feuillus précieux supervitaux nécessitant un travail ; s'ils ne sont que 10 il n'y aura que 10 tiges dégagées.

■ **Travail en plein** : dans une logique peuplement, c'est le dégagement « classique » où l'ensemble de la surface est travaillée au profit des précieux et divers.

■ **Travaux par points d'appui** : il s'agit d'une logique intermédiaire de travaux ponctuels réalisés tous les 4 à 5 pas de part et d'autre du cloisonnement (points d'appui), et ciblés sur des feuillus précieux¹.

Le protocole de suivi a donc été modifié, la validité de l'itinéraire sylvicole devant être jugée sur la qualité de la régénération obtenue à la sortie de la phase de qualification. La seule variable suivie est le nombre de supervitaux (c'est-à-dire des tiges très vigoureuses et bien conformées) par placette. Pour les travaux ciblés un dénombrement des supervitaux est fait à chaque intervention, mais pour les itinéraires connus et maîtrisés en gestion (en plein ou par point d'appui) le bilan sera fait à la première éclaircie.

¹ Il s'agit ici des feuillus précieux divers, autres que le hêtre

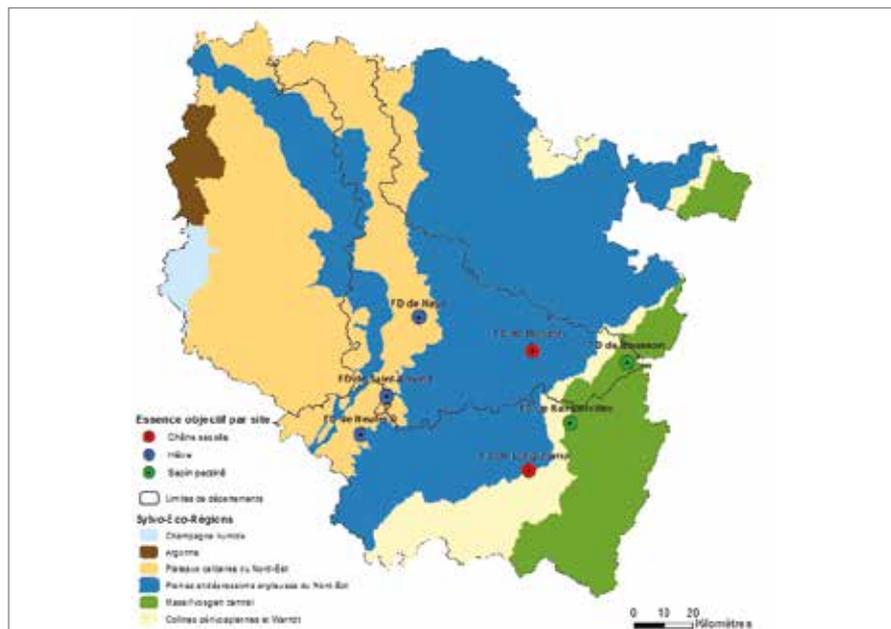


Fig. 1 : plan des sites d'étude, installés en Lorraine, avec les essences objectif initiales

NB : les plaines et dépressions argileuses du Nord-Est correspondent à ce qu'on appelle le plateau lorrain

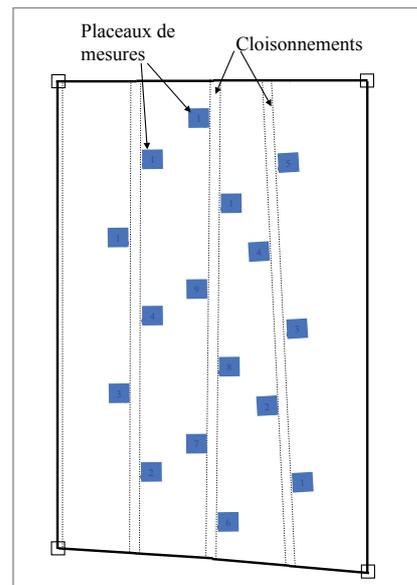


Fig. 2 : exemple de placette d'observation de la reconstitution (1 ha), avec répartition des placeaux de mesure (modalité « témoin » en FD de Mondon)

Sites		Modalités de reconstitution	Modalités de Travaux	Essences objectif
Plateaux calcaires	Haye	Bois d'industrie	Travaux ciblés	Hêtre
		C-Bois d'industrie	Travaux ciblés	
		C-Bois d'industrie	Témoin	
		C-Bois d'industrie	Travaux par points d'appuis	
		C-Bois d'industrie	Travail en plein	
	Saint Amond 83	Témoin	Travaux ciblés	Hêtre
		Andainage	Travail en plein	
		Andainage	Travaux par points d'appuis	
Saint Amond 87	Témoin	Travaux ciblés	Hêtre	
	Bois d'industrie	Travail en plein		
Neufeys	Andainage	Travaux par points d'appuis	Hêtre	
	Témoin	Travaux ciblés		
Plateau lorrain	Mondon	Témoin	Travaux ciblés	Chêne sessile
		Bois d'industrie	Travaux par points d'appuis	
	Andainage	Travail en plein		
	Longchamp	Témoin	Travaux par points d'appuis	
		Bois d'industrie	Travaux par points d'appuis	
Bois d'industrie	Travail en plein			
Vosges gréseuses	Bousson	Andainage	Plantation par dosses de CHS	Sapin puis Chêne sessile
		Andainage	Rendu à la gestion	
		Témoin	Témoin	
	Rambervillers	Andainage	Plantation par dosses de CHS	Sapin puis Chêne sessile
		Témoin	Témoin	
		Andainage	Rendu à la gestion	
Témoin	Rendu à la gestion			

Tab. 1 : tableau des modalités de reconstitution et de travaux testées par site d'étude ; 25 placettes installées sur 8 sites (7 forêts)

Sur le site de la FD de Haye, la mention « C » signifie que le cloisonnement préexistait à l'exploitation des chablis

Acquisition de la régénération (observations sur la période 2000/2005)

La figure 3 montre un exemple de synthèse des mesures faites sur le terrain, pour donner une idée des analyses réalisées mais qu'on ne détaillera pas ici.

En ce qui concerne l'état du sol, on constate cinq ans après la tempête que l'évolution de l'encombrement est peu marquée entre les deux campagnes de mesure. Les dégradations du sol (orniérage, perturbation et compactage du sol) apparaissent moins marquées sur plateau calcaire où les sols sont plus portants. Sur toutes les modalités, le pourcentage de sol perturbé est en diminution entre 2002 et 2005 : diminution de l'ordre de quelques points (moins de 15), sauf pour la modalité andainage du site de Rambervillers (Vosges gréseuses) où on passe de 70 à 30 %. En 2005, aucun site ne montre un pourcentage de sol perturbé supérieur à 30 %. Ce résultat est sans doute à attribuer à l'ouverture systématique des cloisonnements

Ceci étant, quelle que soit la modalité de reconstitution, les densités mesurées par essence montrent que la régénération naturelle est bien acquise, sauf dans les 2 sites des Vosges gréseuses où le sapin a souffert de dégâts de gibier. Plus précisément :

■ **Sur plateau calcaire, la régénération du hêtre est une réussite**, il est présent, très souvent en densité suffisante (supérieure à 1200 tiges par hectare) sur la quasi-totalité des placettes. Son principal concurrent est le frêne essence nomade par excellence, souvent hors station et à l'avenir plus qu'incertain. Du point de vue de la diversité spécifique, la régénération naturelle montre des résultats satisfaisants. Il y a entre 8 et 12 essences par placette, avec un pool d'essences précieuses ou semi-précieuses, adaptées à la station,

permettant un travail à leur profit pour diversifier les ressources ligneuses.

■ **Sur plateau lorrain, la régénération naturelle en chênes semble acquise** (chênes sessile et pédonculé indifférenciés) même si elle semble soumise à une forte concurrence. Les chênes sont présents dans la majorité des placettes avec des densités supérieures à 1 200 tiges par ha. Mais ces semis sont fortement concurrencés par le hêtre, le charme et le bouleau, ce qui implique un suivi assidu en travaux pour pérenniser la régénération.

■ **Dans les Vosges gréseuses, un fort abrutissement du sapin pectiné** par le gibier met la régénération en échec. Le potentiel en essence objectif a même baissé entre 2002 et 2005. On note aussi une faible diversité d'espèces ligneuses. Dans ce contexte, les recommandations stationnelles ainsi que le souci de l'adaptation de ces peuplements de basse altitude aux changements climatiques ont conduit à choisir le chêne sessile comme essence de plantation.

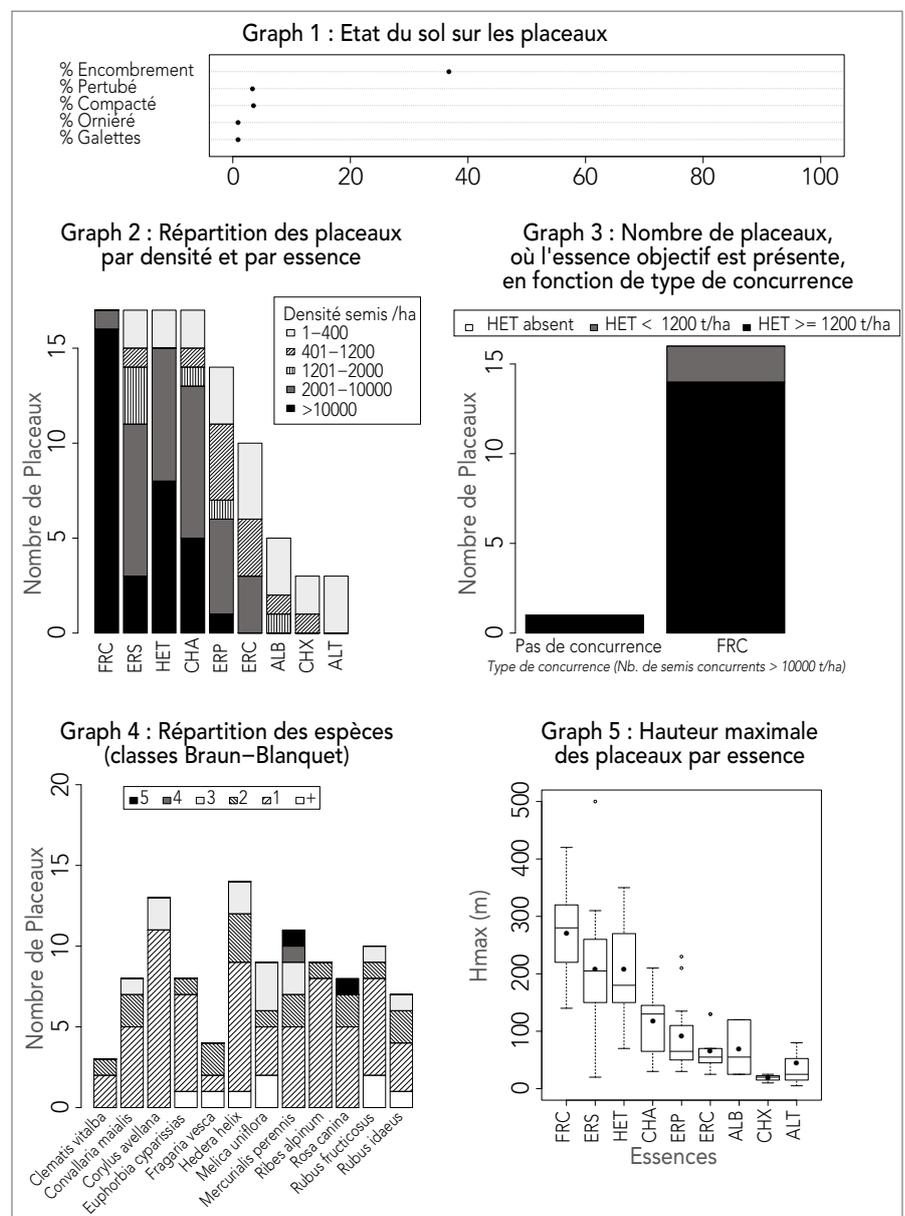


Fig. 3 : exemple de synthèse des résultats : mesures 2005 sur la modalité témoin du site Saint Amond 83 (17 placeaux)

Les espèces végétales présentes (canches et ronces notamment) n'ont pas été un frein à l'installation et à la croissance de la régénération sur ces types de stations forestières. Cela semble confirmer les résultats constatés par ailleurs sur les dispositifs lorrains de l'*Observatoire national des dynamiques naturelles de végétation après tempête* (Lacombe et Van Couwenberghe, 2010).

Enfin, la hauteur des semis semble souvent moins importante sur les modalités « bois d'industrie » que dans les modalités où seul le bois d'œuvre est exporté. Cependant pour juger complètement de la qualité de la régénération il faudrait prendre en compte la forme du semis. En effet, les rémanents laissés sur place à défaut d'exploitation en BIBE² vont souvent engendrer des déformations à la base du semis (crosse); or rien n'est prévu dans le protocole de suivi pour qualifier cette variable.

Travaux sylvicoles et qualité du mélange dans les hêtraies sur plateau calcaire (observations depuis 2005)

Après ces premiers constats, l'observatoire a permis en 2005 la mise en place d'un dispositif de comparaison d'itinéraires sylvicoles contrastés (travaux de régénération) dans les parcelles à objectif hêtre.

Problématique sylvicole : le mélange d'essences

Dans la continuité des itinéraires de déblaiement, des modalités d'intervention sylvicole plus ou moins intensives (et coûteuses) ont été testées, allant de l'intervention en plein à des travaux ciblés. La problématique sylvicole est ici de conserver la diversité du mélange. Face à la tendance hégémonique du hêtre, on cherche à favoriser d'autres essences adaptées à la station pour obtenir des peuplements plus résilients vis-à-vis des aléas climatiques ou des agresseurs biotiques; sans oublier l'intérêt économique potentiel. Il s'agit là des

seules références installées, suivies et quantifiées en Lorraine, comme support d'évaluation de ces travaux.

Les mesures effectuées permettront de comparer, lors de la sortie de phase de qualification, les différents types d'itinéraires testés et de vérifier que la qualité de la régénération, notamment en densité d'essences précieuses et semi-précieuses, réponde aux normes sylvicoles actuelles.

Une attente particulière pour les travaux ciblés

Mais il paraissait important de vérifier dès les premières interventions si les travaux ciblés, encore peu documentés, permettent de préserver le mélange. Des mesures spécifiques ont donc été effectuées sur les placettes de cette modalité, notamment le comptage des « supervitaux », c'est-à-dire des tiges très vigoureuses et bien conformées. Le nombre des supervitaux est en effet la variable essentielle dont l'évolution permet de suivre le maintien (ou non) du potentiel de mélange.

Rappelons cependant qu'il s'agit d'un réseau d'observation et non d'expérimentation. Il n'y a pas de répétition ou de facteur contrôlé; en outre, les mesures et les interventions sur les trois campagnes (2006-2009-2012) n'ont pas été homogènes. Par exemple, en 2006 le hêtre a pu figurer parmi les supervitaux pris en compte sur le site de Saint Amond (« anomalie » qui ne s'est pas reproduite ensuite); en 2009 il semble y avoir eu une forte variabilité dans l'intensité des interventions selon les opérateurs, dont l'expérience en matière de travaux ciblés était très hétérogène. Or, pour être pertinents et efficaces, ces travaux dits extensifs et/ou ciblés supposent une certaine anticipation sur la base de bonnes connaissances biologiques du fonctionnement et des facteurs de croissance des jeunes peuplements. Il ne peut donc y avoir d'analyse statistique valide sur ces sites; néanmoins certains enseignements peuvent être mis en valeur.

Des résultats provisoires assez prometteurs

Treize ans après la tempête Lothar et après 3 interventions successives (2006, 2009, 2012) la hauteur des peuplements est de 5 m pour le site de Saint Amond et 7-8 m pour les sites de Haye et Neufeys. La différence s'explique par la faible profondeur du sol à Saint Amond, ce qui réduit la fertilité et donc la dynamique de croissance.

Les principaux résultats concernant le **potentiel de mélange dans le cas des travaux ciblés** sont récapitulés dans la figure 4. On constate en premier lieu une diminution constante de la densité des supervitaux en essences précieuses et semi-précieuses (autres que le hêtre), laquelle passe globalement de 145,4 tiges/ha en 2006 à 109 t/ha en 2009 puis 92,2 t/ha en 2012.

Cette érosion (perte de 25 % du potentiel des tiges super vitales entre 2006 et 2009) s'explique par le fait que beaucoup d'érable sycamore et de charme choisis en 2006 étaient crossés au pied. La visibilité au sol très mauvaise en 2006 n'avait pas permis ce constat. En 2009, ces tiges ont naturellement été exclues du potentiel d'avenir. Entre 2009 et 2012 la diminution n'est que de 15 %. Pour certaines essences rares (merisier, alisier torminal, poirier, pommier et érable champêtre) la densité en supervitaux se maintient entre 2006 et 2012.

Cependant, même s'il est délicat de conclure avant la fin de la phase de qualification, on constate que les travaux ciblés ont permis, dans une matrice de hêtre ordinairement étouffante, de limiter l'érosion naturelle du mélange et de maintenir un potentiel de supervitaux, notamment en essences rares, cohérent avec les objectifs du guide lorrain de sylviculture du hêtre (ONF, 2005). Le guide préconise en effet de désigner 15 à 20 tiges/ha d'essences précieuses diverses bien réparties sur le peuplement,

² BIBE = bois d'industrie ou bois énergie

de manière à pouvoir orienter les éclaircies à leur profit (tiges objectif). Or on admet empiriquement que pour pouvoir désigner 15 à 20 tiges/ha, il faut disposer d'une ressource « désignable » de l'ordre de :

- 5 fois cette densité de tiges objectif, en début de phase de qualification (Ho = 4 m),
- 3 fois la densité des tiges objectif, en fin de phase de qualification (Ho = 14 m).

Avec une densité moyenne de 92 supervitaux à l'hectare fin 2012, c'est-à-dire en début de phase de qualification, cette condition est satisfaite; seule une placette (Saint-Amond 83), avec 77 supervitaux par hectare, semble être en dessous des objectifs.

En conclusion

Au final, cinq ans après la tempête, on constate sur ce réseau représentatif des principales stations forestières de Lorraine que l'obtention d'une régénération naturelle satisfaisante

ne semble pas vraiment problématique, quelle que soit la modalité de déblaiement; seul le gibier peut être un obstacle à son installation. Ce résultat est sans doute à attribuer à la bonne organisation à l'amont des chantiers, à des conditions favorables de sols portants lors des travaux de déblaiement ainsi qu'à l'ouverture et l'utilisation systématique des cloisonnements.

■ En ce qui concerne les itinéraires de travaux sylvicoles, les premiers résultats permettent d'être optimiste quant à la capacité des travaux ciblés à maintenir un bon potentiel de tiges précieuses et semi-précieuses dans une matrice de hêtre pendant la phase de qualification; avec l'intérêt du moindre coût par rapport à des travaux en plein.

■ Afin de confirmer ce diagnostic, le suivi en mesures et en interventions (tous les quatre ans) doit continuer. En sortie de phase de qualification, et puisque nous n'avons pas de

bilan initial pour chaque modalité, il faudra comparer le résultat de cet itinéraire de travaux ciblés avec ceux des itinéraires de travaux en plein et par points d'appui, et avec le « témoin » sans travaux de la FD de Haye (tableau 1).

Nicolas GOMEZ
ONF, pôle R&D de Nancy
nicolas.gomez@onf.fr

Bibliographie

Gomez N., Piboule A., 2012. Le réseau d'observations d'itinéraires techniques pour la reconstitution, en Lorraine, des parcelles rasées par la tempête du 26 décembre 1999 -. Compte rendu des résultats concernant la remise en état des parcelles - Période d'étude : 1999-2005. 58 p. (disponible auprès de l'auteur)

Gomez N., 2013. Le réseau d'observations d'itinéraires techniques pour la reconstitution, en Lorraine, des parcelles rasées par la tempête du 26 décembre 1999 - Compte rendu des résultats concernant les travaux de régénération - Période d'étude : 2005-2012. (en rédaction)

Lacombe E., Van Couwenberghe R., 2010. Observatoire des dynamiques naturelles de végétation après tempête : premiers constats et conséquences sylvicoles. ONF. Rendez-vous techniques n° 29-30, pp. 8-16

Legay M., Martin H., Quiñones-Nadler C., Gonin P., 2010. L'observatoire national des dynamiques naturelles de la végétation après tempête. ONF. Rendez-vous techniques n° 3, pp. 7-10

ONF - DT Lorraine, 2005. Le hêtre en Lorraine. Nancy : ONF. Direction territoriale Lorraine. Guide des sylvicultures, 88 p.

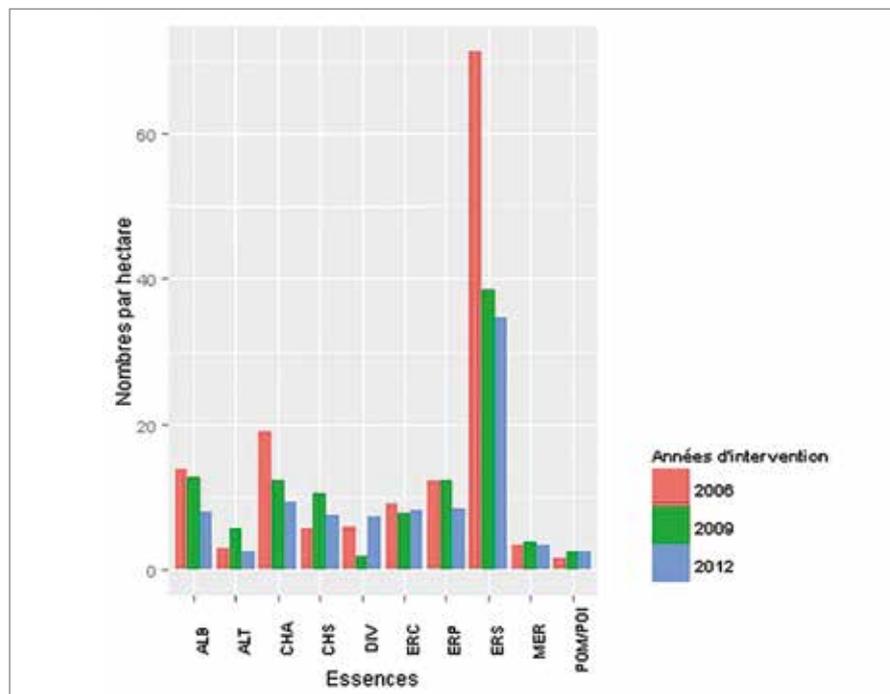


Fig. 4 : évolution de la densité des supervitaux entre 2006 et 2012, normalisée à l'hectare (tous sites confondus) dans les modalités travaux ciblés

ALB = alisier blanc, ALT = alisier torminal, CHA = charme, CHS = chêne sessile, DIV = orme, aubépine, ERS = érable sycomore, ERP = érable plane, ERC = érable champêtre, MER = merisier, POM/POI = pommier et poirier.

HABITATS : décrire et cartographier la diversité des forêts de Guyane

En 2009, l'ONF s'associait à l'ONCFS, au Parc Amazonien de Guyane, à l'UMR EcoFoG et à l'Herbier de Cayenne, dans un vaste programme de recherche, intitulé HABITATS. Son objectif : étudier les relations entre sol, végétation et grande faune pour définir une typologie des habitats forestiers de terre ferme, qui couvrent plus de 80 % du territoire. Retour sur le programme et ses acquis.

Quand l'arbre cache la forêt

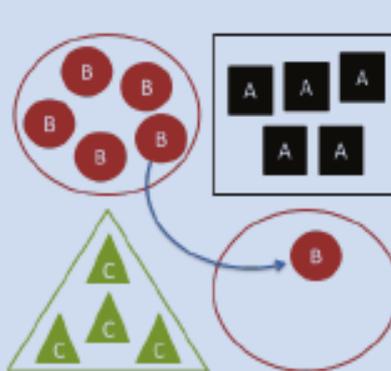
La richesse floristique et faunistique de la Guyane est aujourd'hui relativement bien connue grâce à la multiplication des inventaires naturalistes et des études d'impact qui produisent régulièrement des listes interminables d'espèces animales et végétales par localité. On dénombre par exemple à ce jour sur l'ensemble du département au moins 1581 espèces d'arbres (Molino *et al.* 2009). Ces nombreuses espèces ont-elles des préférences vis-à-vis de leur environnement et s'assemblent-elles dans des communautés particulières pour définir des habitats forestiers, comme le suppose la théorie des niches, ou se répartissent-elles par le simple hasard de la dispersion comme l'envisage la théorie neutre souvent invoquée pour expliquer l'hyper-diversité des forêts tropicales (voir encadré 1)? Du fait de l'extrême diversité locale (150 à 200 espèces par hectare) et de la rareté de la plupart des espèces, ces questions portant sur la distribution géographique, l'écologie et la phytosociologie restent non résolues. En quelque sorte c'est [la diversité de] l'arbre qui cache [la diversité de] la forêt. Ces connaissances sont pourtant essentielles aux gestionnaires forestiers pour garantir la bonne conservation et la valorisation durable de cette biodiversité. C'est donc dans le but de définir et de cartographier précisément les habitats forestiers de Guyane que

1 - Comment s'explique l'hyper-diversité des forêts tropicales

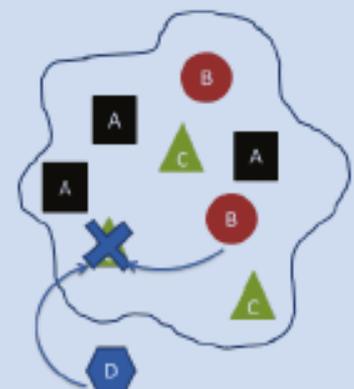
Plusieurs hypothèses sont actuellement discutées pour expliquer la forte diversité des forêts tropicales humides :

1) la théorie de la *diversification des niches*, émise par Hutchinson en 1957, donne le rôle principal aux mécanismes de **filtres environnementaux** : la variabilité des conditions stationnelles (sols, méso-climat, ...) et micro-stationnelles (ouverture de la canopée, micro-topographie...) entraîne une hétérogénéité dans l'accès aux ressources et à l'énergie. Aucune espèce n'étant capable d'être la meilleure compétitrice dans tous les domaines, du fait de spécialisations adaptatives, cette hétérogénéité du milieu favorise la coexistence de nombreuses espèces.

2) La *théorie neutre*, proposée par Hubbel en 2001, considère que les mécanismes de **spéciation** (apparition d'une nouvelle espèce) et de **dispersion limitée** (vitesse de migration des espèces) suffisent à expliquer la forte diversité observée dans les milieux hyper-diversifiés, sans même tenir compte d'une quelconque adaptation spécifique (chaque individu a la même probabilité de survie quelle que soit l'espèce). La diversité résulterait des aléas de migration ou d'apparition d'une nouvelle espèce à la faveur de chaque disparition d'individu laissant un espace disponible dans la communauté.



Théorie des niches : les espèces colonisatrices d'un milieu vacant sont filtrées par l'environnement en fonction de leur spécialisation adaptative



Théorie neutre : chaque individu a les mêmes capacités de survie - chaque mortalité peut laisser la place à une nouvelle espèce à l'occasion de migration ou de spéciation

l'ONF et ses partenaires se sont lancés dans un ambitieux programme de caractérisation de la diversité (programme ECOTROP 2006-2009 et HABITATS 2010-2012).

Une stratégie d'échantillonnage multi-échelle et multidisciplinaire

Définir une typologie d'habitats forestiers pertinente en forêt tropicale nécessite d'aborder plusieurs questions fondamentales, qui peuvent paraître évidentes dans un contexte tempéré mais qui sont loin d'être triviales en forêt hyper-diversifiée :

■ premier point : est-on capable de détecter des assemblages d'espèces stables caractéristiques d'associations végétales ? en d'autres termes, les espèces se distribuent-elles de façon organisée ou aléatoirement sans interrelation évidente ?

■ deuxième point : à quelle échelle doit-on définir les habitats forestiers et quelle est la surface d'échantillonnage efficace pour représenter un habitat ? Les habitats découlent-ils d'effets ponctuels prédominants ou principalement d'influences à large échelle ?

■ troisième point : quelles sont les variables environnementales les plus influentes vis-à-vis de la composition des peuplements ? Les effets de la topographie, du drainage, ou de la géomorphologie déjà mis en évidence antérieurement sur quelques sites d'études situés sur la zone littorale (Couteron *et al.* 2003 ; Morneau 2007 ; Freycon *et al.* 2003) sont-ils généralisables à l'ensemble du territoire ou observe-t-on des mécanismes localement variables et plus complexes ?

■ enfin : les différents compartiments définissant les habitats (flore, faune, sol) subissent-ils les mêmes influences et évoluent-ils conjointement ? Peut-on en déduire une clef d'entrée simple pour une typologie d'habitats efficace ?

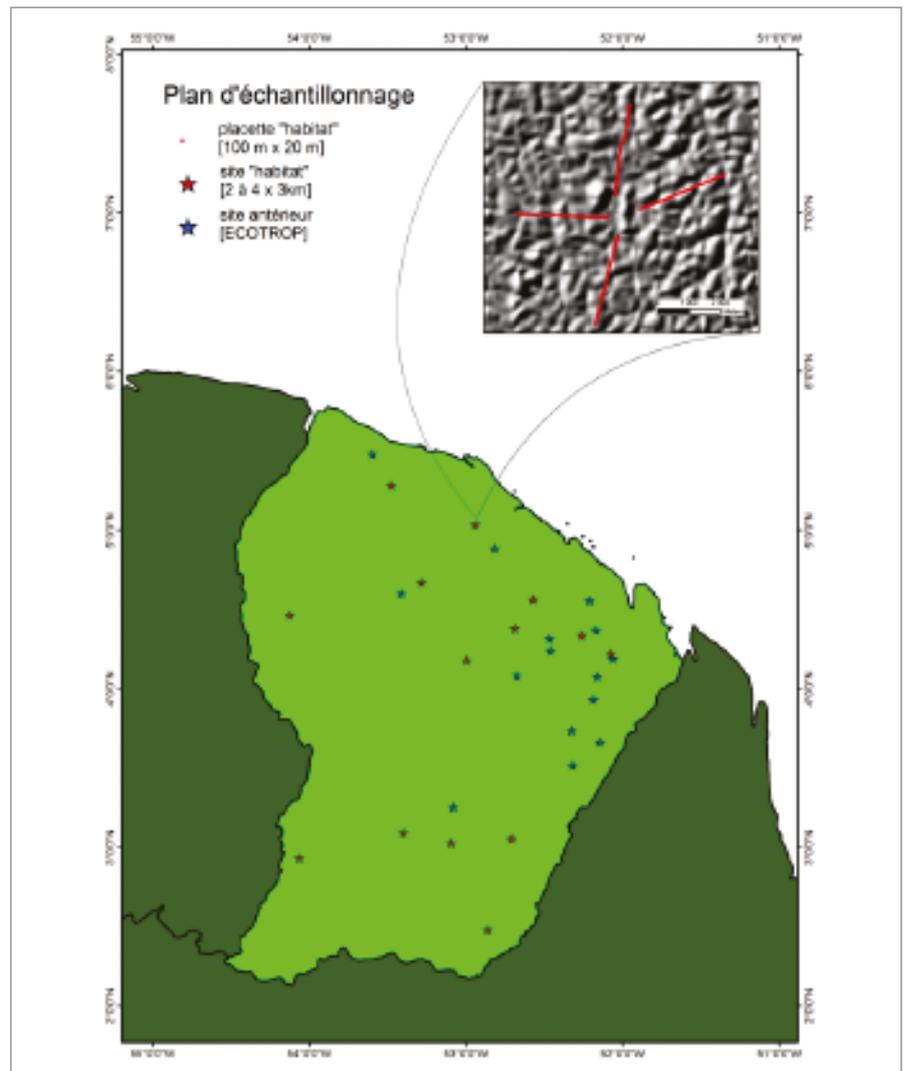


Fig. 1 : plan de situation régional et design local de l'échantillonnage utilisé pour assurer la représentation de la diversité des habitats forestiers

Pour répondre à ces questions, une stratégie d'échantillonnage originale a été adoptée, basée sur les échelles emboîtées. Vingt-six sites ont été sélectionnés sur l'ensemble du territoire afin de représenter au mieux la variabilité des conditions géologique, climatique et géomorphologique. Sur chacun d'eux plusieurs transects de 20 m de large sur 3 km de long, divisés en placettes de 100 m, ont été installés et répétés 2 à 4 fois afin de couvrir la variabilité topographique locale (figure 1). Ces transects ont été précisément décrits du point de vue floristique (arbres et palmiers de la canopée, flore du sous-bois), faunistique (grands mammifères et oiseaux chassés) et pédologique par

différentes équipes de spécialistes. Les bases de données ainsi constituées rassemblent près de 110 000 arbres inventoriés sur 2 750 placettes de 0,20 ha, 9 361 relevés de plantes de sous-bois sur 304 placettes de 25 m², 408 sondages pédologiques et 30 comptages de grandes faunes (dont 22 sur sites non chassés).

Les acquis du programme

Diversité de composition des communautés forestières

On observe sur l'ensemble des relevés de fortes corrélations entre les abondances de certaines familles et essences d'arbres forestiers qui apparaissent nettement sur des analyses

multi-variées de type ANSC^a. Elles permettent de distinguer quatre grands faciès forestiers : (1) les forêts dominées par les *Lecythidaceae* et *Eperua falcata* (Wapa); (2) les forêts dominées par les *Caesalpinioideae* (autres que le Wapa) accompagnées de *Lecythidaceae*; (3) les forêts à *Burseraceae* (*Protium* spp. *Moni* et *Tetragastris* spp. *Sali*) et à *Mimosoideae*; (4) et les forêts à *Chrysobalanaceae* (Koko) et *Sapotaceae* (figure 2abc). Ces tendances statistiquement significatives ne laissent pas place au hasard et confirment que plusieurs unités de végétation existent. On ne parle plus de LA forêt guyanaise mais DES forêts guyanaises.

Les analyses d'ordination de type AFC^b révèlent des communautés plus originales qui sortent du lot commun décrit par l'ANSC et correspondant à l'association d'espèces habituellement rares dont les abondances explosent localement (figure 2d). Ce sont :

- des forêts sur sable blanc caractérisées par la présence d'espèces endémiques (*Swartzia bannia*, *Macrolobium guianensis*...) dont bon nombre de légumineuses fixatrices d'azote favorisées par ce sol totalement appauvri (figure 3a);
 - des forêts dominées par l'association de quelques espèces originales telles Malobi (*Ecclinusa* sp.), Baaka koko (*Licania membranacea*)... caractérisées par une canopée ouverte (figure 3c) et installée sur des sols à djougoun-pétés, micro-dépressions symptôme d'un lessivage latéral fort (figure 3b);
 - quelques placettes dominées par le *Spirotropis longifolia* (figure 3d).
- Les deux premières communautés originales couvrent tout au plus quelques milliers d'hectares et ne se rencontrent que dans des conditions édaphiques d'oligotrophie liées à un sol totalement lessivé par podzolisation (cas des sables blanc sur la localité de Mana) ou en cours d'appauvrissement par un drainage

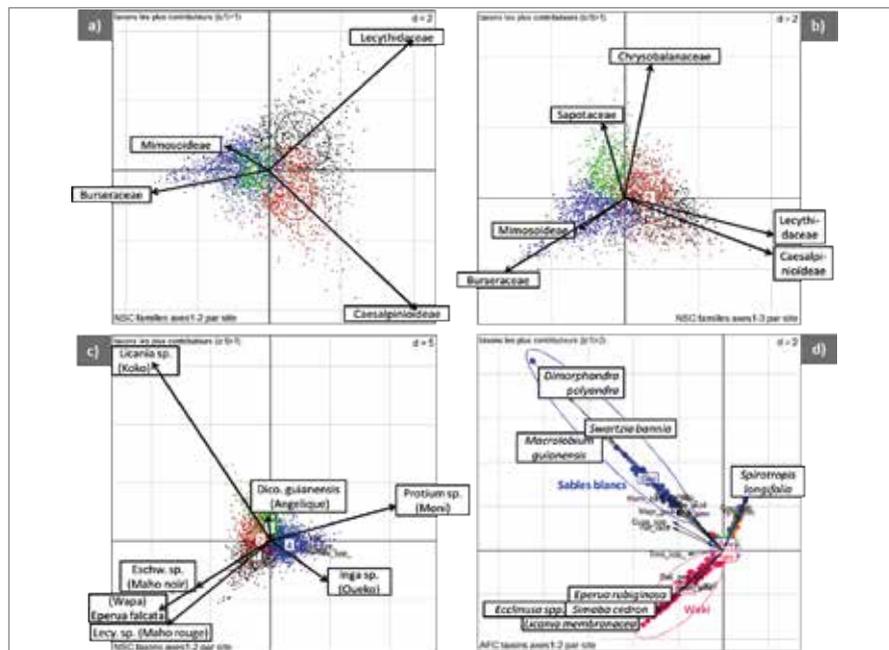


Fig. 2 : projection des relevés en fonction de leur composition sur les différents plans d'analyses multi-variées

Les figures a et b [axes 1-2 et 1-3 de l'ANSC par familles] montrent que les relevés se regroupent en 4 faciès (figurés par les couleurs) en fonction de l'abondance relative des six principales familles (encadrées); la figure c [axes 1-2 de l'ANSC par essences] montre que ces faciès reflètent aussi les grandes tendances dans l'abondance des principales essences (encadrées); la figure d [axes 1-2 de l'AFC par essences] met en évidence l'originalité des compositions des forêts sur sable blanc (en bleu) et des forêts du bassin de la Waki (en rose) ainsi que les essences qui leur sont propres (encadrées)



Fig. 3 : quelques photographies illustrant les communautés forestières les plus originales

a) une lisière de forêt basse sur sable blanc; b) des djougoun-pétés, cuvettes de quelques décimètres de profondeur et de diamètre (ici entourées de jaune) parsèment le sol du bassin de la Waki à la manière de trous d'obus; c) vue aérienne de la canopée basse ouverte des forêts sur djougoun-pété avec, parmi les arbres émergents les plus reconnaissables, une forte abondance de Tachigali (défeuillés) et de Parinari (au feuillage grisâtre); d) la fleur du *Spirotropis longifolia*, une des seules espèces d'arbre pouvant former des peuplements mono-dominants en forêt guyanaise)

^a Analyse Non-Symétrique des Correspondances : analyse multi-variée permettant de discriminer les relevés en fonction de leur composition ; cette méthode d'ordination donne plus de poids aux essences abondantes

^b Analyse Factorielle des Correspondances : autre type d'analyse multi-variée permettant de classer simultanément les relevés (en fonction de leur composition) et les essences (en fonction de leur affinité) ; cette méthode est plus sensible aux espèces rares (voir note précédente).

latéral intense (cas des djougounpétés rencontrés dans la vallée de la Waki; voir figure 3c). Le troisième cas semble essentiellement lié à une dynamique de population inhabituelle et très agressive, sans lien avec des conditions de milieu particulières, permettant au *Spirotropis* de constituer ci et là des peuplements mono-dominants de faible surface (Fonty et al. 2011).

Une diversité organisée à large échelle...

Déterminer l'échelle de perception optimale des habitats est une question centrale qui était jusque-là restée sans réponse en Guyane. En zone tempérée, cette échelle est facilement déterminable par l'aire minimale (surface d'un seul tenant à partir de laquelle on ne rencontre plus de nouvelle espèce dans un relevé sur un milieu homogène) mais cette surface n'est jamais atteinte en milieu hyper-diversifié. La forêt guyanaise est-elle une simple juxtaposition de petits habitats créés par des effets locaux ayant le même fonctionnement sur tout le territoire (mosaïque d'éco-unités) ou montre-t-elle d'autres niveaux d'organisation supérieurs avec des tendances plus lourdes? Cette problématique revient à rechercher l'existence de motifs spatiaux cohérents d'un point de vue de leur composition et à déterminer leur taille ou échelle (voir encadré 2).

Grâce à notre échantillonnage multi-échelle emboîté et à diverses méthodes de décomposition de la diversité^c (voir les variogrammes et scalogrammes, figure 4), nous avons pu mettre en évidence une forte autocorrélation spatiale de la composition des forêts sur de longues distances (50 à 100 km). De fait, la diversité observée dessine des structures régionales dont les compositions sont bien plus contrastées que les variations observées à une échelle locale. Une des expressions de cette organisation à large échelle

2 - Quelle échelle de perception des habitats

Dans les deux exemples suivants, la diversité totale (= 3 espèces) semble se distribuer aléatoirement mais des regroupements font apparaître des motifs répétés et structurés d'association d'espèces par effet d'échelle : la diversité peut alors se décomposer en une diversité locale ou alpha-diversité (diversité intra-communauté ici égale à 2) et une bêta-diversité (inter-communautés ici égale à 1). La meilleure échelle de perception sera celle permettant de révéler un maximum de bêta-diversité tout en optimisant la cohérence spatiale des regroupements

La forêt guyanaise est elle-même constituée d'une multitude d'espèces étroitement mêlées à la manière des tâches colorées d'un tableau impressionniste. Chaque recoin du tableau est une œuvre à part entière du fait de sa richesse picturale de la même façon que chaque hectare de forêt révèle une diversité impressionnante. Seule une vue plus large permet de saisir la cohérence du tableau et il en va de même de cette forêt hyper-diversifiée. Cependant, une vue trop globale peut aussi cacher des structures importantes qui font l'originalité ou la valeur de l'œuvre.

Détails du tableau des Nymphéas de Monet avec une vue de plus en plus globale : certaines structures qui paraissent importantes à certaines échelles peuvent se révéler secondaires à une échelle plus grande (A et C) ou au contraire globalement très structurantes (B)

se retrouve dans la distribution des quatre faciès forestiers précédemment décrits avec (1) des forêts à *Lecythidaceae* essentiellement au nord de la Guyane; (2) des forêts à *Caesalpinioideae* plus fréquentes dans le Nord et l'Est; (3) des forêts à *Burseraceae* et à *Mimosoideae* concentrées au Sud-Est; (4) et des forêts à *Chrysobalanaceae* et *Sapotaceae* mieux réparties sur l'ensemble du département avec quelques concentrations locales. Ces résultats révèlent une structuration de la diversité régionale bien plus complexe que celle imaginée jusqu'à présent (Sabatier et Prévost,

1990), qui se limitait à l'opposition entre une forêt à *Caesalpinioideae* au Nord et une forêt à *Burseraceae* au Sud. Ce gradient latitudinal est bien confirmé mais il implique un nombre de familles et d'essences plus important. S'y superposent en outre des structures subrégionales plus complexes liées à l'autocorrélation des compositions.

... expliquée par les paysages géomorphologiques

L'intégration de différentes variables environnementales dans les analyses d'ordination et les analyses spatiales précédentes a permis de révéler les

^c Décomposition de la diversité selon des variables instrumentales (NSCAIV et pNSCAIV dans Pelissier et Couteron, 2007), selon des classes de distances (variogrammes dans Couteron et Ollier, 2005), ou selon les échelles (scalogrammes dans Dray et al., 2012)

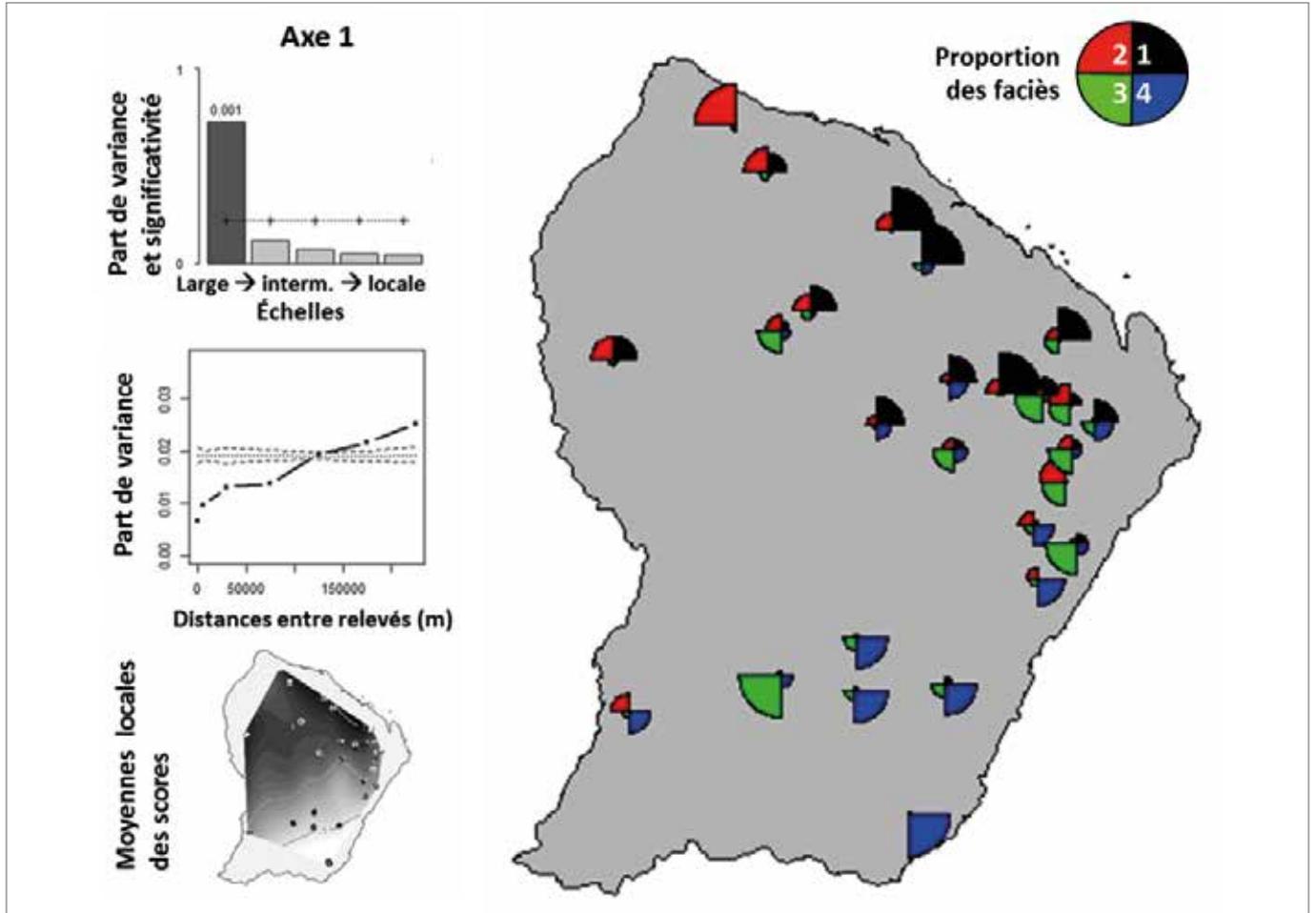


Fig. 4 : mise en évidence de structures dans la répartition spatiale des faciès forestiers (illustration des analyses pour le premier axe de l'ANSC famille)

- En haut, le scalogramme indique quelle part de diversité est expliquée par chaque échelle (hauteur des barres) et si cette part est significativement structurée (couleur de la barre et statistique au-dessus)- ici la diversité des relevés est majoritairement corrélée à des structures larges (échelle régionale);
- au centre gauche, le variogramme indique le degré de dis-similarité des relevés (part de variance en ordonnée) en fonction de leur éloignement (distance en abscisse) et décrit ainsi la forme des structures précédemment détectées à large échelle - ici on observe un gradient traduit par une augmentation continue de la dis -similarité de 0 à 250 km;
- en bas, la cartographie des scores de l'ANSC montre que ce gradient est orienté sud-est – nord-ouest. Il correspond à une diminution de la fréquence relative du faciès 4 (Burseracées + Mimosacées) corrélée à une augmentation de la fréquence des faciès 1 et 2 (Lécythidacées et Césalpiniacées) visible sur la carte de distribution des faciès par site (à droite).

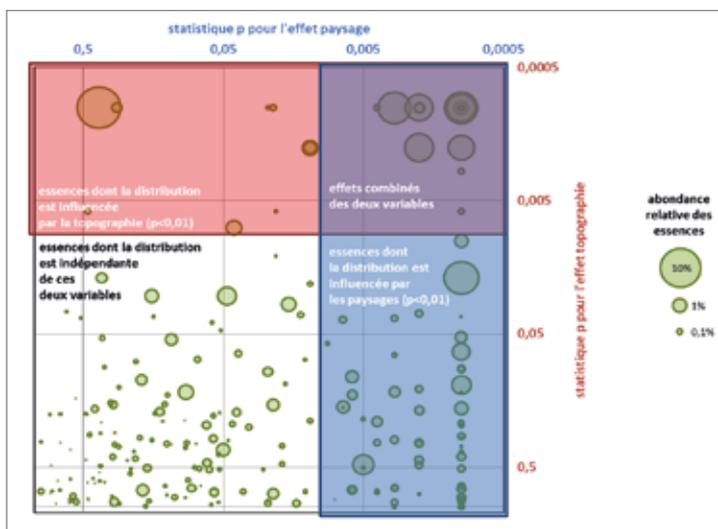


Fig. 5 : tests des effets des paysages géomorphologiques et de la topographie sur l'abondance des essences forestières au seuil de 99 %

Les paysages influencent la distribution de 74 essences (zone bleue) contre 21 essences pour la topographie (zone rouge) dont 12 communes. Les effets significatifs concernent des essences très abondantes comme des essences moins fréquentes (figuré par la grosseur des ronds), soit plus de 3/4 des tiges.

facteurs écologiques les plus influents et de comparer leur capacité à expliquer les variations de composition observées. De façon surprenante, la pluviométrie (principal facteur climatique supposé) et la géologie (souvent mise en avant dans les études concernant la biodiversité) montrent une influence limitée sur la diversité forestière de Guyane, contrairement aux paysages géomorphologiques (ou types de reliefs) qui expliquent quantitativement la plus grande part de diversité (figure 5) et permettent d'expliquer qualitativement l'existence des gradients de composition et la majeure partie du phénomène d'autocorrélation spatiale. La topographie quant à elle n'a qu'un pouvoir prédictif limité mais elle apporte une information complémentaire aux paysages géomorphologiques en expliquant une part de variabilité spatialement non-organisée. Cet effet topographique s'exprime essentiellement par l'opposition entre les formations des bas-fonds hydromorphes et celles situées sur les autres positions topographiques généralement bien drainées. L'extrême variabilité des formes de bas-fond pourrait expliquer l'absence de structure spatiale nette à l'échelle locale associée à cet effet topographique.

Au final, les paysages géomorphologiques influencent l'abondance de 74 essences forestières sur les 210 reconnues (soit 35 % des essences pour 62 % des tiges) et permettent ainsi d'expliquer une bonne part de la composition forestière, mais ils apparaissent aussi déterminants pour expliquer la répartition des sols guyanais ainsi que les cortèges faunistiques dans les zones non chassées (voir tableau 1 ; des publications sont à venir sur ce sujet). Cette variable fournit ainsi une clef d'entrée capitale pour définir des types d'habitats forestiers ayant certainement des dynamiques propres auxquelles la gestion forestière doit s'adapter.

De nouveaux outils pour les aménagistes

Suite à l'adoption d'un code forestier pour la Guyane en 2008, les 2,4 millions d'hectares du domaine forestier permanent doivent être intégralement aménagés à court terme. Les résultats obtenus dans cette étude viennent conforter l'approche adoptée par l'ONF en aménagement forestier, consistant à aborder la biodiversité via la diversité géomorphologique (Brunaux et Demenois, 2003). Elle vient aussi corriger les méthodes employées par les aménagistes : une cartographie moins détaillée et à plus large échelle est suffisante pour aborder la diversité des habitats sans aller trop loin dans le zonage d'une forêt dont la composition est de toute façon très fortement auto-corrélée sur plusieurs dizaines de kilomètres. La numérisation manuelle et minutieuse des cartes topographiques de l'IGN qui était auparavant effectuée peut avantageusement être remplacée par la cartographie numérique des paysages géomorphologiques et des positions topographiques générée lors de cette étude (voir RDVT n° 31, pp. 62-68). L'interprétation de photos aériennes et d'images satellite peut ensuite fournir les informations complémentaires concernant la localisation des formations non forestières les plus remarquables (savanes, inselbergs, falaises...).

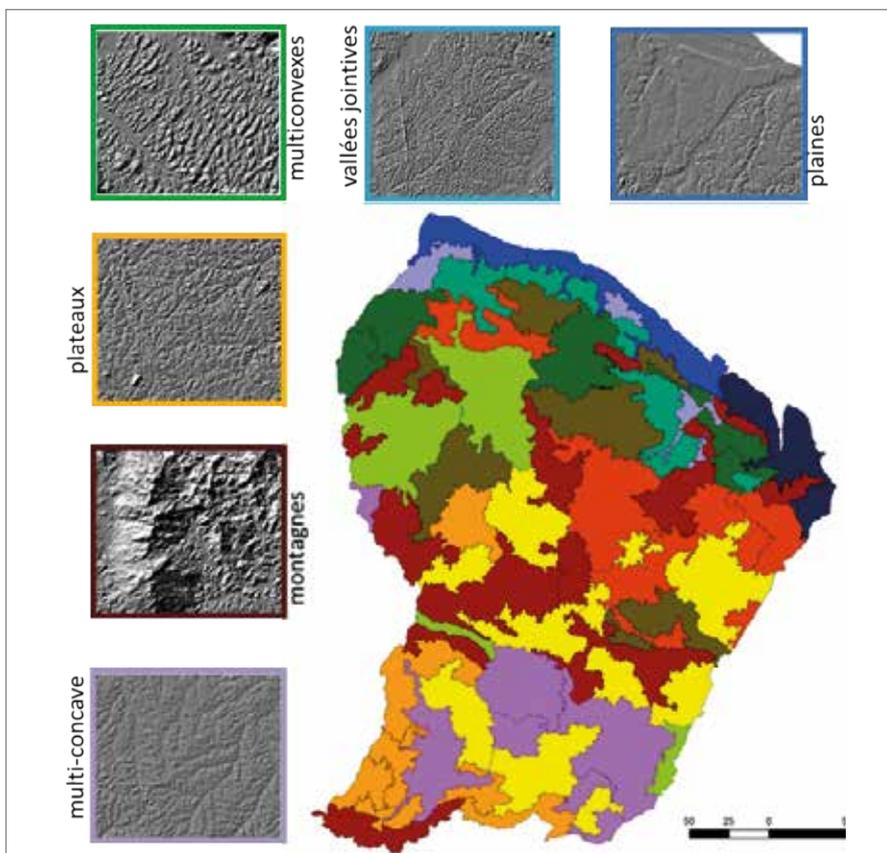
La typologie résultant de ce travail vient par ailleurs expliciter les relations géomorphologie-végétation-faune. Ainsi, si l'on supposait auparavant par exemple que les forêts des collines de faibles amplitudes étaient différentes de celles des larges plateaux, aucun élément descriptif ne venait étayer ces hypothèses. Difficile de défendre la valeur biologique d'un secteur forestier par rapport à un autre dans ces conditions. Suite à ce programme, **13 types d'habitats forestiers** ont pu être définis et précisément décrits sous forme de fiches rassemblées en un catalogue

qui sera prochainement publié avec la DEAL (tableau 1). À ces différents types d'habitats correspondent des valeurs commerciales très variables (gros bois et abondance des essences commerciales majeures) ce qui peut permettre d'orienter la gestion des futurs massifs d'exploitation sur le long terme. L'influence de la variabilité de ces habitats vis-à-vis des autres fonctions forestières, notamment l'évaluation des stocks de carbone ou de la richesse spécifique, est en cours d'étude. Certains habitats semblent notamment plus fragiles face à la pression de chasse du fait de la présence d'espèces protégées et/ou de l'abondance d'espèces faunistiques très sensibles.

Les forêts guyanaises d'aujourd'hui, images tenaces du passé ?

Reste à savoir quelle est l'origine de cette différenciation des communautés forestières au sein d'un massif à première vue aussi homogène que celui de Guyane. Il serait sans doute trop simpliste de considérer qu'à chaque paysage géomorphologique correspondent des conditions stationnelles spécifiques à la base d'un subtil effet de niche, même si la distribution hétérogène des types de sols entre les paysages semble aller dans ce sens. La profondeur historique contenue dans cette variable géomorphologique permet de représenter des mécanismes beaucoup plus riches que le simple filtre environnemental. En effet, ces paysages résultent d'une longue évolution du substrat géologique façonné par l'érosion sous les effets combinés des fluctuations climatiques subies (favorisant plus ou moins l'altération chimique selon la quantité de précipitation), des mouvements tectoniques (favorisant la sédimentation ou l'érosion physique) et des transgressions marines (qui modifient la morphologie et renouvellent les sols). On peut donc émettre l'hypothèse qu'à chaque paysage a pu correspondre une succession de

4A. Forêts marécageuses, forêts galeries ou ripicoles sur sols hydromorphes	
46.41 Forêts hautes de terre ferme sur sols épais et non hydromorphes	
46.411 Forêts hautes des reliefs multiconvexes et vallées à Lecythydaceae et Caesalpinioideae (sur acrisols et arenosols - à capucins noirs et agoutis)	
46.411C	Forêts des vallées fluviales du Nord de la Guyane à Wapa (<i>Eperua falcata</i>) et Lecythydaceae
46.411B	Forêts des reliefs complexes à collines irrégulières du sillon Nord guyanais à Maho noir (<i>Eschweilera</i> spp.) et Amarante (<i>Peltogyne</i> spp.)
46.411Bm	faciès à monodominante de <i>Spirotropis longifolia</i>
46.411I	Forêts des reliefs complexes à collines surbaissées à grands palmiers (<i>Arecaceae</i>)
46.411J	Forêts des reliefs découpés à collines régulières à <i>Faboideae</i>
46.411Jm	faciès à monodominante de <i>Spirotropis longifolia</i>
46.412 Forêts hautes des plateaux à <i>Burseraceae</i> - <i>Mimosoideae</i> et <i>Caesalpinioideae</i> (sur ferralsols - à biches et pécaris)	
46.412E	Forêts des plateaux rabottés à <i>Protium</i> spp., <i>Goupia glabra</i> et palmiers
46.412F	Forêts des plateaux irréguliers à <i>Dicorynia guianensis</i> et <i>Tetragastris</i> spp.
46.412G	Forêts des plateaux disséqués à <i>Mimosoideae</i>
46.413 Forêts hautes des haut-reliefs à <i>Mimosoideae</i> - <i>Burseraceae</i> (sur ferralsols et plinthosols - à hoccas et singes atèles)	
46.413H	Forêts des hauts-reliefs de basse altitude (<500m) à <i>Burseraceae</i> et <i>Vochysiaceae</i>
46.413M	Forêts sub-montagnardes (>500m) à <i>Mimosoideae</i> et <i>Lauraceae</i>
46.414 Forêts hautes des reliefs multi-concaves à <i>Burseraceae</i> et <i>Mimosoideae</i> (sur acrisols et arenosols - à Saïmiris, Marails et Saki à face pâle)	
46.414D	Forêt fermée à <i>Burseraceae</i> - <i>Mimosoideae</i> et <i>Myristicaceae</i>
46.414W	Forêt ouverte à <i>Ecclinusa</i> spp. et <i>Parinari</i> spp. sur djougoun-pété (de la Waki)
46.415 Forêts hautes de la plaine côtière sur sols récents et diversifiés (sur sols diversifiés - à Saïmiris, Marails et Tapirs)	
46.415P	Forêts du littoral et de la plaine côtière récente
46.415A	Forêts sub-côtière de la plaine côtière ancienne
46.42 Forêts basses sur sols amincis ou appauvris	
46.421 : Forêts basses sur cuirasse	
46.422 : Forêts basses sur sable blanc	
46.423 : Forêts basses sur inselbergs et savane-roche	
46.424 : Forêts basses sur saprolite	



Tab. 1 : nouvelle typologie des habitats forestiers de Guyane basée sur les paysages géomorphologiques (intitulés provisoires)

Fig. 6 : carte des paysages géomorphologiques et imagerie (25x25 km) illustrant le relief pour chaque grand type de paysages (modèle numérique de terrain tiré du SRTM 30m)

conditions environnementales dont les effets de filtres se cumulent dans le temps et ont abouti à sélectionner et/ou favoriser le développement de certaines espèces parmi celles du pool régional présentes. Par ailleurs, certains paysages ont probablement pu jouer un rôle de refuges lors des transgressions marines ou lors des épisodes climatiques les plus secs (comme les reliefs de montagnes ou les paysages de plateaux couverts de sols ferrallitiques épais, symptomatiques d'une grande stabilité environnementale) alors que les paysages multiconvexes (de collines) ont subi des transformations récentes par reprise de l'érosion, expliquant leur relief très découpé. Les paysages géomorphologiques seraient donc les témoins d'une histoire mouvementée qui aurait façonné concomitamment la géodiversité et la biodiversité régionale. L'étude en cours de la diversité phylogénétique de ces communautés permettra certainement d'apporter des éléments pour étayer ces hypothèses qui ne sont pas sans conséquence en termes de stratégie de gestion de la biodiversité.

Stéphane Guitet

Interface INRA-ONF
INRA, UMR AMAP, Montpellier

Olivier Brunaux

ONF, pôle R&D Cayenne

Gaëlle Jaouen

AgroParisTech, UMR EcoFoG
Cayenne

Cécile Richard-Hansen

ONCFS, Direction étude
et recherche Guyane
Kourou

Sophie Gonzalez

Daniel Sabatier

Raphaël Pelissier

IRD, UMR AMAP
Montpellier et Cayenne

Nicolas Surugue

Parc Amazonien de Guyane,
Responsable R&D

Remerciements

Ce programme a bénéficié des financements PO-FEDER de l'Union Européenne (programme Habitats), du Ministère de l'Environnement (programme ECOTROP) et des fonds FEDD de l'ONF. Un grand merci à tous les ouvriers prospecteurs, agents et techniciens ONF et PAG ayant participé aux inventaires de terrain notamment les très fidèles Atidong Nano, Vincent Bézard et Jean-Pierre Simonnet.

Bibliographie

Brunaux O., Demenois J., 2003. Aménagement forestier et exploitation en forêt tropicale humide de Guyane. *Revue Forestière Française*, vol. 55(Numéro Spécial) : pp. 260-272

Couteron, P., et al., 2003. Drawing ecological insights from a management-oriented forest inventory in French Guiana. *Forest Ecology and Management*, vol. 172 n° 1, pp. 89-108

Fonty E. et al., 2011. A new case of neotropical monodominant forest: *Spirotropis longifolia* (Leguminosae-Papilionoideae) in French Guiana. *Journal of Tropical Ecology* vol. 27 pp. 641-644

Freycon V. et al., 2003. Influence du sol sur la végétation arborescente en forêt guyanaise : état des connaissances. *Revue Forestière Française*, 55(Numéro Spécial), pp. 60-73.

Molino J.F., et al., 2009. Établissement d'une liste des espèces d'arbres de la Guyane Française. Cayenne, Montpellier : IRD. 59 p.

Morneau F., 2007. Effet d'un gradient d'engorgement hydrique sur la structure et la dynamique d'une forêt tropicale humide (Paracou, Guyane française). Nancy : École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts. 256 p.

Sabatier D., Prévost M.-F., 1990. Quelques données sur la composition floristique et la diversité des peuplements forestiers. *Bois et Forêts des Tropiques* vol.219 : pp. 31-55



O. Brunaux, ONF

Forêts hautes des hauts reliefs

Le positionnement par satellite : les nouveaux récepteurs améliorent-ils les performances sous couvert forestier ?

Depuis son apparition à l'ONF dans les années 1990, le positionnement par satellite a pris une place de plus en plus importante au sein de l'établissement.

Les agents patrimoniaux l'utilisent pour le positionnement de points correspondant, par exemple, à la localisation de sites/stations remarquables ou à des coordonnées d'accès aux parcelles forestières devant passer en coupe ; ils y recourent aussi pour « naviguer » vers des points d'inventaire prédéfinis. Pour ce type de besoins, une précision de l'ordre de 10 m semble suffisante et on se contente de récepteurs « grand public » dont sont dotés les personnels de terrain (ex. récepteurs Garmin ou TDS Motorola).

Les services spécialisés (bureau d'étude, service SIG, R&D) ont souvent besoin de plus de précision, et ils peuvent aussi avoir à réaliser des levés sur de grandes emprises. Il s'agit par exemple d'effectuer l'inventaire de la desserte forestière d'un massif, de positionner précisément une placette d'inventaire ou de calibration... Pour ces différents usages, nécessitant de relever des positions et du linéaire, l'ONF utilise des récepteurs de la gamme « SIG/Cartographie » de marque Trimble.

En 1997 et 2003, des tests de précision en milieu forestier avaient été réalisés par l'ONF. Mais depuis cette date les récepteurs ont évolué avec l'apparition de nouvelles technologies et de nouvelles constellations satellitaires. Aujourd'hui le système GPS (Global Positioning System) américain par-

tage l'espace avec d'autres systèmes de positionnement comme le système russe GLONASS et bientôt le système Européen GALILEO. La constellation GNSS (Global Navigation Satellite System) ainsi complétée permet aux utilisateurs de bénéficier d'un nombre plus important de satellites.

Dans cet article nous ferons donc un point sur différents types de récepteurs GNSS disponibles, afin d'évaluer leur intérêt, l'apport des nouvelles technologies et l'adéquation à nos besoins. L'enjeu pratique consiste à identifier les méthodes et les matériels de positionnement les plus adaptés au milieu forestier et à l'ONF. Pour ce faire, un certain nombre de récepteurs GNSS ont été soumis à des tests poussés, sous couvert forestier.

Rappel de quelques notions du positionnement par GNSS utilisées dans cet article

Avant d'entrer dans le vif du sujet, rappelons qu'on peut distinguer trois gammes de récepteurs GNSS selon le niveau de précision qu'on en attend.

■ Les récepteurs « grand public » ont pour but de fournir un positionnement quelles que soient les conditions et sans recherche de précision. D'un faible coût et d'une utilisation simple, ils sont à réserver aux utilisations pour lesquelles une précision de 10 à 15 m est suffisante.

■ Les récepteurs « SIG/cartographie » sont dédiés aux acteurs ayant besoin d'une précision métrique ou sub-métrique. Leur utilisation nécessite une formation sur la préparation des missions de levés et le traitement des données collectées.

■ Les récepteurs géodésiques, employés par les professionnels de la topographie, sont réservés aux applications centimétriques. Ces matériels haut de gamme ont un coût important et leur utilisation requiert une grande technicité. De plus leur technologie est peu adaptée au milieu forestier.

Principe du positionnement par satellite

Le principe du positionnement par satellite est basé sur la mesure de distance entre les satellites et le récepteur GNSS. Chaque mesure de distance définit une sphère dont le centre est le satellite et sur laquelle se trouve le récepteur. La position est calculée par la triangulation de ces sphères (figure 1). Pour calculer les distances entre le récepteur et les satellites, deux méthodes sont utilisées, basées sur le calcul de temps de propagation du signal :

■ la mesure sur le code (ou pseudo distance), par un calcul simple de la différence entre le temps d'émission et le temps de réception du signal ;

■ la mesure sur la phase, par la décomposition de la distance en un nombre de longueurs d'onde du signal ; elle est plus précise mais nécessite un temps de mesure plus long et sans aucune interruption du signal satellitaire (ce qui est souvent difficile en forêt).

Les récepteurs géodésiques (utilisés par les géomètres) utilisent la mesure sur la phase et peuvent atteindre une précision proche du centimètre en zone découverte. Certains récepteurs de la gamme « SIG/Cartographie » peuvent aussi utiliser cette technique, l'enjeu est donc de savoir si elle est utilisable sous couvert forestier et si elle améliore les mesures.

La correction différentielle

La technique de correction différentielle consiste à enregistrer les erreurs des mesures sur des stations de référence fixes et dont la position est connue précisément. Ces informations sont appliquées au récepteur mobile (qui réalise le levé) pour lui permettre de corriger une partie de ses erreurs de mesure. La correction différentielle peut être réalisée en temps réel (les corrections sont transmises par radio, téléphone ou par un satellite géostationnaire) ou en différé, après retour au bureau (méthode utilisée à l'ONF). Les récepteurs de la gamme « SIG/ Cartographie » utilisent cette technique, ce qui améliore leur précision par rapport aux récepteurs « grand public » qui en sont dépourvus et restent donc limités en précision.

Filtres et configuration des récepteurs

Sur la plupart des récepteurs GNSS il est possible de configurer des filtres de réception satellitaire afin de s'assurer de l'arrêt de l'enregistrement d'une position en cas de dépassement des limites définies, et s'assurer ainsi d'une certaine qualité de positionnement. Il est possible de fixer les limites de PDOP (Position Dilution Of Precision), qui qualifie la qualité de la constellation, de SNR (Signal to Noise Ratio), qui qualifie la qualité du signal reçu, etc. Jusqu'à présent il était nécessaire de configurer des filtres relativement restrictifs pour s'assurer d'un positionnement acceptable. Il était alors fréquent de devoir attendre de longues minutes ou même des heures afin d'obtenir une constellation convenable. Aujourd'hui les nouvelles technologies (ex. Delta Phase) permettent d'utiliser des filtres plus ouverts tout en conservant une bonne qualité de positionnement.

Les erreurs de multi-trajets

Les multi-trajets sont le résultat d'une réflexion du signal GNSS dans un environnement proche du récepteur (ex. un bâtiment, des arbres). La conséquence

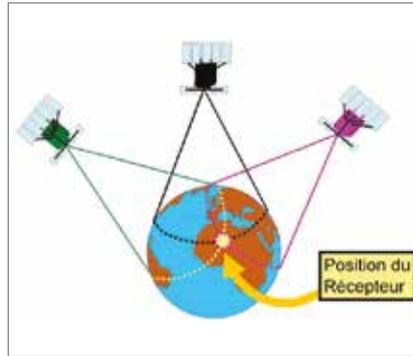


Fig. 1 : principe de positionnement par satellite
Chaque mesure de distance récepteur/satellite définit une sphère dont le centre est le satellite et sur laquelle se trouve le récepteur GNSS. La position est calculée par la triangulation des différentes sphères.

va être de fausser le positionnement en allongeant le temps mis par le signal pour arriver au récepteur (figure 2). Ce phénomène, très présent en forêt, a tendance à dégrader la précision des mesures.

Levé en mode statique ou cinématique

Le mode statique (ou mode point) est utilisé pour lever une position ponctuelle, correspondant par exemple à une borne, au centre d'une placette... Un ensemble d'enregistrements est pris sur la même position, la mesure finale est calculée à partir du nuage ainsi obtenu. Il est possible de choisir le nombre d'enregistrements et le pas de temps souhaités (ex. 30 enregistrements à raison de 1 par seconde) ce qui définit un temps d'observation plus ou moins long (ici 30 secondes s'il n'y a pas d'interruption du signal).

Le mode cinématique (ou mode ligne) est utilisé pour lever un linéaire correspondant par exemple à une limite de parcelle, l'axe d'une route... Les mesures sont faites au cours du déplacement par saisie automatique des signaux selon une période définie en temps ou en distance (ex. une position toutes les 5 secondes ou tous les 5 m). La ligne est obtenue en joignant les points ainsi relevés. Avec cette technique il n'est pas nécessaire de stationner à l'emplacement de

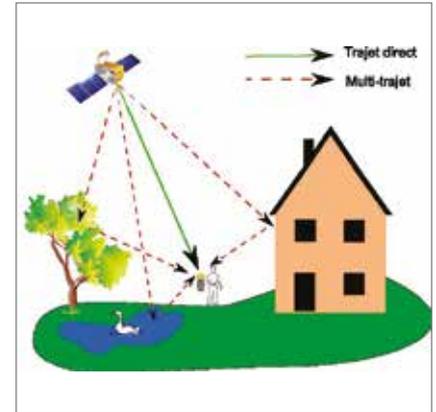


Fig. 2 : les erreurs de multi-trajet
Lorsque le signal d'un satellite n'arrive pas directement au récepteur, l'allongement du temps de parcours du signal fausse le positionnement.

chaque changement de direction, mais il est indispensable d'adapter l'intervalle des mesures à sa vitesse de déplacement et à la sinuosité du tracé à relever. Par exemple, si l'on veut bien suivre les courbes d'une route au cours d'un levé à bord d'un véhicule, il faudra choisir un intervalle de temps entre les mesures beaucoup plus faible que lors d'un levé à pied. Le choix d'un intervalle de mesure en distance permet de s'affranchir de cette contrainte.

Les récepteurs GNSS testés

C'est la gamme des récepteurs « SIG/ cartographie » qui sera ici étudiée en priorité. En effet, elle a connu ces dernières années des évolutions techniques importantes et elle correspond à un réel besoin pour les forestiers : le positionnement métrique ou sub-métrique. Depuis les premiers tests en 1997, la marque Trimble a montré un réel intérêt et de bonnes qualités technologiques pour les mesures sous couvert forestier, ce qui nous a naturellement conduit à sélectionner des modèles de cette marque pour notre test. Nous avons donc testé cinq récepteurs GNSS de la gamme « SIG/cartographie » de marque Trimble mis à disposition par la société américaine. Il nous a également paru opportun de rajouter à l'analyse un récepteur GNSS grand

public, le TDS Motorola, qui équipe désormais une grande partie des forestiers de terrain (figure 3).

Trimble GeoExplorer XT 3000 série 2008

Deux récepteurs de la gamme XT 3000 ont été testés : ils diffèrent par leur version du logiciel de saisie Terrasync, avec ou sans Delta Phase. La technologie Delta Phase permet de rendre les filtres de réception satellitaires beaucoup plus souples tout en conservant une bonne qualité de positionnement. Elle permet aussi de réaliser des mesures sur le code ou la phase. L'objet des tests est ici de savoir si le Delta Phase peut apporter une plus-value en termes d'exactitude et de productivité.

Trimble GeoExplorer XT série 6000

De même, deux récepteurs de la gamme XT 6000 ont été testés : avec ou sans Floodlight. La technologie Floodlight permet de réaliser des mesures sur les signaux des satellites GLONASS (satellites russes) en plus des satellites GPS américains. Les XT 6000 représentent la nouvelle gamme Trimble, succédant aux XT 3000 et intégrant systématiquement le Delta Phase. Les tests doivent donc en vérifier les améliorations et notamment l'intérêt de l'utilisation de la constellation GLONASS.

Trimble GeoExplorer XH série 6000

Le XH 6000 qui intègre toutes les dernières technologies, représente le haut de gamme des GNSS SIG Trimble. Il est doté de la technologie Floodlight et d'une nouvelle technologie « H star », basée sur des mesures utilisant la phase et permettant selon le constructeur un gain de précision. L'intérêt des tests est ici de savoir si sa technologie « H star » a un intérêt sous couvert forestier.

Motorola TDS MC-55

Le TDS Motorola fait partie des récepteurs « grand public ». Il ne peut réaliser des mesures que sur

les satellites GPS, uniquement sur le code et sans possibilité d'appliquer des corrections différentielles. Il constitue l'équipement classique du personnel terrain ONF et a été inclus dans les tests afin d'évaluer ses limites et de mettre en évidence la différence de catégorie avec les récepteurs GNSS de type « SIG/cartographie ».

Modalités des tests effectués

Le site retenu pour cette étude est une forêt située dans le massif des Bauges (73) et appartenant au Conseil général de Savoie : la forêt de la Combe d'Aillon, qui a fait l'objet d'une mission aérienne Lidar en 2011, ce qui nous a aidés au choix des types de peuplements à tester ainsi qu'au positionnement des dessertes de référence.

Les tests en mode statique (levé de position)

L'objectif principal est de déterminer l'exactitude (écart entre la position GNSS et la position de référence) des différents récepteurs GNSS testés. À cet objectif principal, viennent s'ajouter des questions complémentaires :

- quelle est l'influence du couvert forestier, ou du temps d'observation sur la qualité de mesure d'une position ?
- quelle est la productivité du matériel (les nouvelles technologies GNSS peuvent-elles apporter un gain de temps lors de la prise des mesures) ?

Des points de référence ont été implantés avec une méthode bien plus précise que les appareils testés sur 4 sites forestiers et un site en milieu ouvert (tableau 1). Pour cela nous avons tout d'abord mesuré des points d'une précision centimétrique dans de vastes clairières à l'aide d'un récepteur GNSS géodésique, puis réalisé des cheminements avec un tachéomètre laser pour déterminer les coordonnées des sites de test. Après l'analyse des erreurs de positionnement et des cheminements, nous avons pu estimer la précision des points de référence à moins de 10 cm en planimétrie. Le site « RBF_101 » en milieu totalement dégagé nous a permis de tester les récepteurs dans des conditions optimales. Au contraire, le site « GPS_A_4 » composé d'un peuplement résineux très dense représente des conditions très difficiles (figure 4).



A. Rostaud, ONF

Fig. 3 : exemples de récepteurs GNSS testés
De gauche à droite : le Motorola TDS MC-55, deux récepteurs Trimble GeoExplorer XT 3000 (avec et sans Delta Phase), un Trimble GeoExplorer XT 6000 et un Trimble GeoExplorer XH 6000.

Afin d'analyser l'influence de la durée d'acquisition, nous avons réalisé sur chaque site des levés avec différents nombres d'enregistrements, à une période de 1 enregistrement par seconde (tableau 2). Enfin, lors de chaque mesure, le temps réel nécessaire pour effectuer le nombre d'enregistrements requis (c'est-à-dire tenant compte d'éventuelles interruptions du signal satellitaire) a été chronométré pour nous permettre d'étudier la productivité des appareils.

Pour chaque matériel, la configuration optimale prévue par le constructeur a été utilisée (tableau 3) et, avant chaque levé, le temps d'initialisation nécessaire au récepteur a été respecté. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un support fixe (figure 5) permettant de positionner parfaitement le centre de l'antenne sur le point à relever et assurant une bonne stabilité lors des mesures avec

des temps d'acquisition longs (> 300 enregistrements soit au moins 5 mn). Les mesures terrain ont été post-traitées (correction différentielles) à l'aide du logiciel Pathfinder Office en utilisant la base du RGP (Réseau GNSS Permanent) la plus proche. Ainsi un total de 500 positions a été relevé sur l'ensemble des sites (tableau 1).

Les tests en mode cinématique (levé de ligne)

Deux dessertes forestières de référence, avec différents niveaux de couverts (figure 6), ont été positionnées avec une précision de l'ordre de 1 m (sources données Lidar aéroporté ©CG73) puis des levés de ces linéaires ont été réalisés afin de comparer l'exactitude (différence entre la position mesurée et la position de référence). Les levés ont été réalisés en mode ligne (cinématique) avec une fréquence d'acquisition de 1 enregistrement tous les 3 m. Le choix

d'une fréquence d'acquisition définie en distance, et non en temps, permet de s'affranchir de la vitesse de déplacement lors des mesures et rend ainsi les comparaisons des différents levés plus faciles. Comme pour les mesures ponctuelles, le temps d'initialisation nécessaire au récepteur GNSS a été respecté et les données prises sur le terrain ont été post-traitées.

Résultats des tests pour les levés de positions

Erreur planimétrique en milieu ouvert

En milieu totalement dégagé, le XH 6000 est nettement le plus performant : il atteint une exactitude proche de 10 cm dès 30 sec d'acquisition. Cette qualité de positionnement peut s'expliquer par la technologie H Star qui lui permet d'effectuer un traitement sur la phase très rapidement. Les autres récepteurs utilisant la phase (les deux XT 6000 et le

Code site	Type peuplement	Essences	Densité tot. (D ≥ 7.5 cm)	% perche (7.5 ≥ D < 17.5 cm)	Surf. terrière (D ≥ 7.5 cm)	% feuillus	Nombre de mesures
RBF_101	Aucun	x	x	x	x	x	3 x 5 tps x 5 GNSS
GPS_A_3	Taillis feuillus	Hêtre et divers	1471	87%	34.1	97%	3 x 5 tps x 5 GNSS
GPS_A_4	Résineuse très dense	Epicéa et sapin	2080	46%	64.5	27%	3 x 5 tps x 5 GNSS
GPS_A_7	Résineux à gros bois	Sapin	424	30%	56.5	23%	3 x 5 tps x 5 GNSS
GPS_A_8	Irrégulière mixte	Sapin et hêtre	226	25%	38.6	44%	8 x 5 tps x 5 GNSS
							500

* les mesures ont été réalisées avec les 5 récepteurs GNSS (5 GNSS), en testant 5 nombres d'enregistrements (5 enr) pour chaque appareil, le tout répété 3 fois (3 rep)

Tab. 1 : caractéristiques des sites tests pour les mesures de positions (mode point)



Fig. 4 : exemples de sites tests pour les mesures de positions fixes (mode point)

À gauche le site « RBF101 », situé en milieu totalement dégagé, permet de tester les récepteurs dans des conditions optimales. À droite le site « GPS_A_4 », plantation résineuse très dense, représente des conditions de mesure GNSS difficiles.

XT 3000 avec Delta Phase) atteignent une exactitude de 10 cm, à partir de 600 enregistrements (soit au moins 10 mn), lorsque le temps d'acquisition est suffisamment long pour réaliser un traitement sur la phase (tableau 4).

Le TDS Motorola, auquel on ne peut appliquer aucune correction différentielle, reste à un écart moyen d'environ 1,30 m et, contrairement aux autres récepteurs, la durée de mesure ne semble pas apporter d'amélioration du positionnement.

Erreur planimétrique en milieu forestier

En milieu forestier, l'exactitude moyenne (tous récepteurs Trimble confondus) est de 1,96 m, soit un écart à la référence 9 fois plus élevé qu'en milieu ouvert. Cette diminution importante de l'exactitude peut être expliquée en grande partie par le phénomène de multi-trajets (figure 2).

Pour tous les récepteurs Trimble, on note une amélioration du positionnement avec le temps d'acquisition (tableau 5) : une amélioration de la moyenne, mais surtout une diminution des écarts maximums. C'est le récepteur XT 3000 avec Delta Phase qui possède la meilleure exactitude avec une faible dispersion des données même pour des temps d'acquisition courts (< 300 enregistrements). Pour des mesures avec plus de 300 enregistrements (soit au moins 5 mn), le XT 6000 avec Floodlight est aussi très performant (écart moyen de 1,50 m avec un maximum de 2,80 m). Le XH 6000, adapté en milieu ouvert, n'a pas de meilleure performance que les autres récepteurs en milieu forestier avec même des écarts importants pour des temps d'acquisition courts (jusqu'à 13 m pour les mesures avec moins de 120 enregistrements).

Le TDS Motorola reste là encore très éloigné des récepteurs Trimble avec des erreurs de positionnement importantes : 8,20 m en moyenne et des écarts maximums pouvant atteindre 40 m !

Nombre d'enregistrements pour obtenir une position	Temps d'acquisition théorique à 1 enregistrement / seconde *
30	30 sec
60	1 mn
120	2 mn
300	5 mn
600	10 mn

* correspond au temps nécessaire pour obtenir le nombre d'enregistrements requis s'il n'y a pas d'interruption du signal satellitaire

Tab. 2 : différents nombres d'enregistrements testés pour les mesures de positions

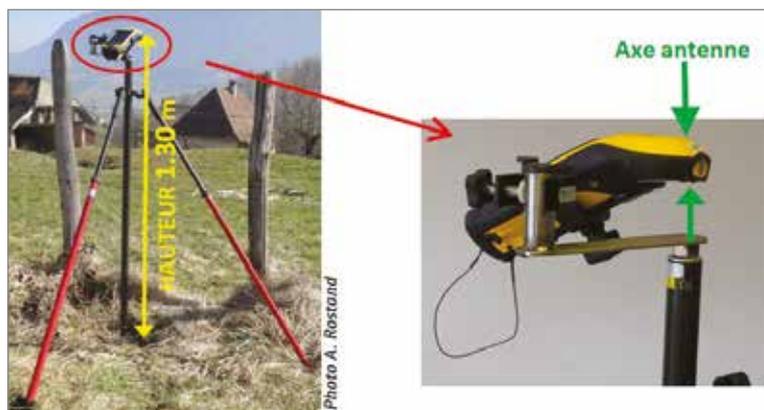


Fig. 5 : support de mesure utilisé lors des levés de positions

Récepteur GNSS	PDOP max	SNR min (Db)	Élévation min	Version Terrasync
XT3000 ss DP	9	35	15°	4
XT3000 av DP	20	33	5°	5,01
XT6000 ss FL	99	12	5°	5,2
XT6000 av FL	99	12	5°	5,2
XH6000	99	12	5°	5,2
TDS Motorola	8	/	/	/

Tab. 3 : configuration des récepteurs GNSS



Fig. 6 : dessertes forestières de référence pour les tests de mesure de linéaires

À gauche, une route forestière avec une emprise de 5,5 m représente des conditions de levé plutôt favorables. À droite un chemin d'exploitation avec un couvert fermé représente des conditions difficiles.

Récepteur GNSS	Ecart planimétrique (xy)				Ecart altimétrique (z)			
	≤ 300 enr. (5 mn)		= 600 enr. (10 mn)		≤ 300 enr. (5 mn)		= 600 enr. (10 mn)	
	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.
XH6000	0.05 m	0.11 m	0.05 m	0.06 m	0.08 m	0.23 m	0.02 m	0.04 m
XT3000 av DP	0.33 m	0.5 m	0.04 m	0.08 m	0.46 m	0.79 m	0.02 m	0.04 m
XT3000 ss DP	0.38 m	0.59 m	0.28 m	0.31 m	0.41 m	0.92 m	0.78 m	1.23 m
XT6000 av FL	0.20 m	0.48 m	0.05 m	0.08 m	0.27 m	0.58 m	0.02 m	0.02 m
XT6000 ss FL	0.23 m	0.34 m	0.07 m	0.07 m	0.19 m	0.40 m	0.08 m	0.13 m
TDS Motorola	1.27 m	1.65 m	1.19 m	1.53 m	non testé		non testé	

Tab. 4 : écarts entre la position GNSS et la position de référence en milieu ouvert (site « RBF_101 ») en fonction du nombre d'enregistrements

Récepteur GNSS	Ecart planimétrique				Ecart altimétrique			
	≤ 120 enr. (2 mn)		≥ 300 enr. (5 mn)		≤ 300 enr. (5 mn)		= 600 enr. (10 mn)	
	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.
XH6000	2.57 m	13.00 m	1.39 m	4.12 m	5.58 m	23.22 m	2.85 m	6.64 m
XT3000 av DP	1.67 m	3.80 m	1.28 m	3.70 m	2.95 m	9.87 m	3.06 m	5.68 m
XT3000 ss DP	2.51 m	13.10 m	1.90 m	6.89 m	4.05 m	18.14 m	3.42 m	11.40 m
XT6000 av FL	2.37 m	7.79 m	1.56 m	2.79 m	6.03 m	40.33 m	4.18 m	9.07 m
XT6000 ss FL	1.91 m	8.76 m	1.80 m	4.91 m	4.73 m	16.87 m	3.94 m	10.31 m
TDS Motorola	8.79 m	40.22 m	7.33 m	22.38 m	non testé		non testé	

Tab. 5 : écarts entre la position GNSS et de la position de référence sur les sites forestiers en fonction du nombre d'enregistrements

Récepteur GNSS	Ecart de position				Ecart de longueur				Dist. entre 2 points successifs (théorique 3 m) *			
	Route forestière		Chemin exploit.		Route forestière		Chemin exploit.		Route forestière		Chemin exploit.	
	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.
XH6000	0.7 m	2.9 m	1.0 m	3.3 m	0,8%	1%	4%	5%	3.7 m	6.2 m	3.8 m	8.1 m
XT3000 av DP	0.8 m	4.5 m	2.3 m	14.2 m	2,6%	4%	51%	72%	3.1 m	14.7 m	11.6 m	52.1 m
XT3000 ss DP	0.9 m	4.3 m	1.3 m	4.5 m	1,5%	2%	11%	30%	3.8 m	34.7 m	8.2 m	47.0 m
XT6000 av FL	0.6 m	2.8 m	1.0 m	3.6 m	0,6%	1%	4%	9%	3.7 m	7.5 m	3.7 m	14.9 m
XT6000 ss FL	0.8 m	4.7 m	1.1 m	6.4 m	1,2%	2%	55%	100%	3.8 m	12.3 m	7.6 m	156.0 m

* : l'écart entre deux positions successives devrait être identique à l'intervalle d'enregistrement défini à 3 m

Tab. 6 : écarts de position et de longueur entre le linéaire GNSS et le linéaire de référence, distance entre deux positions successives

Erreur altimétrique

En milieu ouvert, l'erreur altimétrique est proche de l'erreur planimétrique (tableau 4), alors qu'en milieu forestier elle est plus de 2 fois supérieure (tableau 5). Dans tous les cas on retrouve les mêmes comportements que pour l'erreur planimétrique avec un XH 6000 très performant en milieu ouvert et une amélioration du positionnement avec la durée d'acquisition.

Productivité des matériels

La productivité correspond au dépassement du temps de mesure d'une position : différence entre le temps d'acquisition théorique (ex. 30 sec pour une position nécessitant 30 enregistrements) et le temps d'acquisition réel chronométré sur le terrain. En milieu forestier le XT 3000 sans Delta Phase a des dépassements de temps de mesure importants pouvant atteindre 150 % notamment sur les sites au couvert les plus fermés. Pour le XH 6000 et les XT 6000, l'utilisation de la technologie Floodlight (permettant d'utiliser la constellation GLONASS) et/ou l'ouverture maximale des filtres (Delta Phase) permet d'augmenter la productivité, et, aucun dépassement du temps de mesure n'a été relevé.

Résultats des tests lors des levés de lignes

Sur l'ensemble des récepteurs testés, l'exactitude et la productivité diminuent de façon significative entre le milieu le plus ouvert (route forestière) et le plus fermé (chemin d'exploitation) (tableau 6).

Les récepteurs utilisant la constellation GLONASS (le XH 6000 et le XT 6000 avec Floodlight) donnent de très bons résultats puisqu'ils ont de faibles écarts de positionnement et respectent bien les longueurs, quel que soit le milieu. Ils donnent une représentation fidèle du linéaire relevé (figure 7). Pour les autres récepteurs les écarts peuvent être importants, surtout en milieu fermé. Par exemple, pour le XT 6000 sans Floodlight, les erreurs sur la distance mesurée peuvent atteindre 100 % et l'écart entre deux positions successives peut atteindre 156 m au lieu des 3 m théoriques correspondant à l'intervalle d'enregistrement (tableau 6). Ceci s'explique par une faible productivité des matériels qui perdent une partie des signaux satellitaires nécessaires à l'enregistrement des positions.

Conclusion des tests pour les usages en forêt

Synthèse des performances

Cette étude nous a permis de montrer que les nouveautés technologiques de la gamme Trimble 6000 n'apportent pas de gain significatif d'exactitude en milieu forestier. Par contre, l'utilisation de la constellation GLONASS, permet d'augmenter nettement la productivité, surtout lors de levés de linéaire sous couvert forestier dense (tableau 7).

Le XH 6000, très performant en milieu ouvert, n'a pas d'intérêt particulier en milieu forestier. Sa technologie basée sur le traitement de la phase induit même des écarts importants lors des mesures sur des temps d'acquisition courts. Il vaut mieux alors lui préférer le XT 6000 avec Floodlight qui représente le meilleur compromis entre précision et productivité. Pour les XT 3000, la technologie Delta Phase apporte un gain significatif, en exactitude et productivité, lors des levés de points.

Par ailleurs il se confirme que le TDS Motorola, avec sa faible exactitude et des écarts maximums très importants, n'est à utiliser que pour des mesures de gestion courante, n'exigeant pas une grande précision.

Guide de bonnes pratiques

- Planifier la constellation satellitaire ? Les récepteurs utilisant la constellation GLONASS ont suffisamment de satellites pour réaliser les mesures, ce qui permet de se soustraire à la contrainte de prévisions de sortie. Cette planification reste nécessaire pour les XT 3000.
- Respecter l'initialisation des récepteurs : avant chaque mesure attendre la stabilisation des signaux des satellites.
- Préférer une configuration de 300 enregistrements pour les levés de points : les tests ont mis en évidence une amélioration de l'exactitude avec

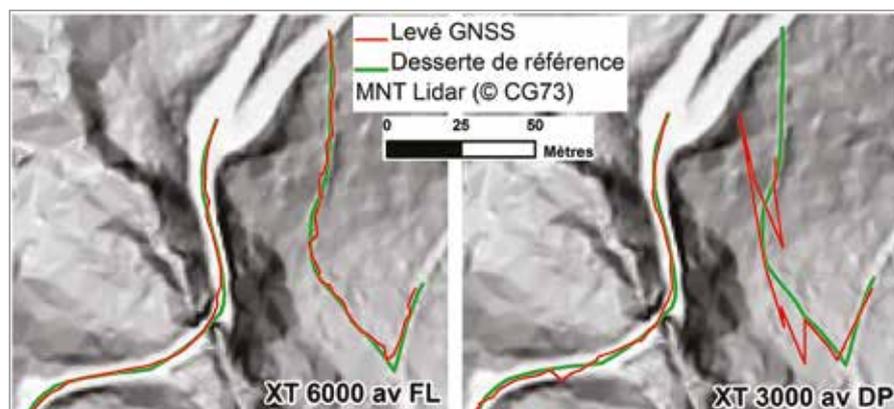


Fig. 7 : exemples de levés de linéaires

À gauche, le XT 6000 avec Floodlight, utilisant la constellation GLONASS, donne une représentation fidèle du linéaire relevé. À droite, le XT 3000, qui n'utilise que la constellation GPS, a des écarts beaucoup plus importants.

Récepteur GNSS	LEVE DE POINT				LEVE DE LIGNE				SYNTHESE				
	Ecart de position ≤ 120 enr. (2mn)		Ecart de position ≤ 300 enr. (5mn)		Ecart de position		Ecart de longueur		Position		Linéaire		Commentaire
	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Exactitude	Productivité	Exactitude	Productivité	
XH 6000	2.6 m	13.0 m	1.4 m	4.1 m	0.8 m	3.3 m	3%	5%	+	++	+	++	
XT 3000 avec Delta Phase	1.7 m	3.8 m	1.3 m	3.7 m	0.9 m	14.2 m	27%	72%	++	≈	--	--	Possède la meilleure exactitude pour des levés de points. Productivité limitée (notamment lors de levés de linéaires sous couvert)
XT 3000 sans Delta Phase	2.5 m	13.1 m	1.9 m	6.9 m	0.9 m	4.5 m	7%	31%	-	--	-	--	Exactitude assez faible et productivité très limitée
XT 6000 avec Floodlight	2.4 m	7.8 m	1.6 m	2.8 m	0.7 m	3.6 m	2%	9%	+	++	++	++	Meilleur compromis entre exactitude et productivité. Recommandé pour les mesures sous couvert dense et les levés de linéaires
XT 6000 sans Floodlight	1.9 m	8.8 m	1.8 m	4.9 m	0.9 m	6.4 m	28%	100%	≈	+	--	--	Exactitude assez bonne (avec des écarts parfois importants) en levé de points. Lors de levés de linéaires, exactitude et productivité très limitées
TDS Motorola	8.8 m	40.2 m	7.3 m	22.4 m	Non testé				--	+	Non testé		Faible exactitude

++ Très bon + Bon ≈ Moyen - Mauvais -- Très mauvais

Tab. 7 : synthèse des performances des récepteurs GNSS testés en milieu forestier

	Récepteur seul	Option Floodlight	TerraSync		Pathfinder Office	Observation
			Standard	Pro		
XT 6000	4390	1230	390	1290	1690 / 1160*	* remise avec l'achat de TerraSync Pro
XH 6000	6990	inclus	390	1290	1690 / 1160*	* remise avec l'achat de TerraSync Pro
XT 3000	plus commercialisé			560*		* il s'agit d'une mise à jour vers la version 5 pour bénéficier du DeltaPhase

Tab. 8 : prix publics (HT) 2013 des récepteurs GNSS Trimble

La différence essentielle entre les versions de TerraSync, est la possibilité d'intégrer des fonds de plans SIG. L'achat de Pathfinder Office n'est pas nécessaire car l'ONF possède un serveur de licence national.

la durée d'acquisition. Ainsi, lors de levés de point, il est préférable d'utiliser une configuration de 300 enregistrements (5 mn à 1/sec) afin d'obtenir un meilleur positionnement et surtout limiter le risque d'écarts importants. L'utilisation d'un support est alors recommandée (figure 5).

■ Positionner le récepteur à une certaine hauteur et le plus loin possible des obstacles : les experts s'accordent à dire que les risques de multi-trajets sont plus importants lorsque le récepteur est proche du sol ou d'un obstacle. Même si nos tests n'ont pas étudié ces effets, il est recommandé de positionner le récepteur à environ 1,30 m du sol et d'éviter de s'approcher trop près des arbres ou autres obstacles. Il ne faut donc jamais poser le récepteur au sol ou le positionner contre un arbre lors de la mesure.

Recommandations pour l'ONF

Pour les besoins de positionnement sub-métrique en forêt, le matériel recommandé est le Géoexplorer XT 6000 équipé de l'option Floodlight.

Plus onéreux que le XT 6000 sans Floodlight (surcoût de 1230 HT – tableau 8) ou que les anciens XT 3000, il apporte cependant une réelle plus-value en terme de productivité : il est maintenant possible de travailler une journée entière sous couvert forestier.

Le XH 6000, avec un surcoût de 1370 HT (valeur 2013) par rapport au XT 6000 avec Floodlight, et une complexité d'utilisation plus importante, ne répond pas aux besoins classiques de l'ONF. Et *a contrario*, pour les rares projets pour lesquels l'ONF a besoin d'une grande précision de positionnement, les performances du XH 6000 en milieu ouvert ne sont pas toujours suffisantes.

Pour les XT 3000, bien qu'ils ne soient plus commercialisés, il est possible de mettre à jour les vieilles versions de TerraSync afin d'avoir accès à la technologie Delta Phase et gagner ainsi en productivité.

Alain MUNOZ
ONF, R&D Chambéry

Pour obtenir des conseils lors de l'achat d'un matériel GNSS ou pour des besoins très spécifiques, il est possible de contacter le responsable SIG national Pascal Audureau (pascal.audureau@onf.fr).

Les documents regroupant le bilan de l'ensemble des tests réalisés sont disponibles sur demande à A. Munoz (alain.munoz@onf.fr) au pôle R&D ONF de Chambéry.

Bibliographie

Leclerc D., Perrotte G., Rigondaud C., 1997, Global positioning system : le GPS, mode d'emploi, Arborescences, n° 66, p. 2 à 11

Piedallu C., Gégout JC., 2002, Étude de la précision du système GPS en milieu forestier, Revue Forestière Française, n° 5, p. 429 à 442

Drogue D., 2003, Système GPS - Localisation sous couvert forestier, Interne ONF (disponible auprès de l'auteur)



A. Munoz, ONF

Fiche technique - Paysage

Intervenir sur un monument historique classé ou inscrit

Contexte général

Un monument historique est un immeuble ou un objet ayant un intérêt historique ou artistique et bénéficiant d'une protection juridique, pouvant concerner en forêt :

- un **bâtiment** (maison forestière, chapelle, château, ruines...);
- un **mégalithe** (vestige préhistorique);
- un **terrain** (parc, jardin, site archéologique...).

La réglementation prévoit deux régimes reconnaissant leur valeur : le **classement** et l'**inscription**. Cette réglementation peut concerner tout ou partie du monument : intérieurs, extérieurs et abords. Elle impose aussi un **périmètre de protection** autour de tout monument historique.



Le prieuré de Grosbois, fondé au XII^e siècle, est inscrit monument historique depuis 1929. Il abrite actuellement des bureaux de l'ONF ainsi qu'un écomusée forestier.

Photo : C.Dardignac / ONF

La réglementation relative à la protection des **monuments historiques** fait l'objet des articles L621-1 et suivants et R621-1 et suivants du code du patrimoine (loi du 31 décembre 1913). Elle est distincte de la réglementation des **sites et monuments naturels** (traitée dans la fiche technique n° 9), faisant l'objet des articles L341-1 et suivants et R341-1 et suivants du code de l'environnement (loi du 2 mai 1930). **Ces deux réglementations peuvent se superposer en un même lieu.**

Contexte pour l'ONF

Conformité réglementaire

De nombreux monuments historiques (classés ou inscrits) sont situés en forêt ou à proximité. Leur prise en compte s'effectue :

- au titre du processus IMM* pour les bâtiments immatriculés à l'inventaire physique du patrimoine bâti (7 classés et 10 inscrits actuellement);
- au titre des processus SAM* et EAM* pour les autres ouvrages.

Tous les travaux réalisés sur un monument historique sont soumis à **autorisation** s'il est classé ou à **déclaration** s'il est inscrit.

Certains travaux réalisés dans le périmètre de protection sont soumis à **autorisation**.

Cependant les coupes et travaux prévus par l'aménagement peuvent être dispensés en bloc de ces procédures en appliquant le 2° de l'article L122-7 du code forestier lors de l'approbation de l'aménagement par le Ministre chargé des forêts.

Politique environnementale

L'ONF, certifié ISO 14001, s'est fixé comme objectif dans sa politique environnementale d'amplifier la prise en compte du paysage dans les aménagements et les travaux.

Les **DNAG*** et **ONAG*** prévoient que, lors de l'élaboration des aménagements, la présence d'un monument historique (classé ou inscrit) intervient dans l'évaluation des enjeux liés à la fonction sociale de la forêt.

Conformément au **RNEF*** et au **RNTSF***, des **prescriptions spécifiques** sont intégrées afin que tout intervenant en forêt respecte l'intégrité de tout monument historique.

La présente fiche technique propose une mise en œuvre de cette réglementation au regard des enjeux de gestion en forêt publique. Elle n'a pas valeur de guide juridique.

Les DT et DR précisent si besoin les modalités d'application de ces dispositions compte tenu des pratiques en cours.

Les termes suivis de * sont définis dans le glossaire en page 6.



Méthodes et savoir-faire

Cadre réglementaire

« Les immeubles dont la conservation présente, au point de vue de l'histoire ou de l'art, un intérêt public sont classés comme monuments historiques en totalité ou en partie par les soins de l'autorité administrative. Sont notamment compris parmi les immeubles susceptibles d'être classés :

a) Les monuments mégalithiques, les terrains qui renferment des stations ou gisements préhistoriques ;
 b) Les immeubles dont le classement est nécessaire pour isoler, dégager, assainir ou mettre en valeur un immeuble classé ».
 (Art. L621-1 du code du patrimoine)

« Le propriétaire ou l'affectataire domanial a la responsabilité de la conservation du monument historique classé ou inscrit qui lui appartient ou lui est affecté ».

(Art. L621-29-1 du code du patrimoine)

Exigence de conservation des bâtiments gérés par l'ONF

Pour un bâtiment immatriculé à l'inventaire du bâti : à réaliser au titre du processus IMM

L'ONF doit assurer l'entretien et la conservation (au sens de l'article

L621-29-1 du code du patrimoine) des monuments historiques classés

ou inscrits, immatriculés à l'inventaire du bâti.

Prise en compte dans les aménagements forestiers

Pour un terrain, un mégalithe ou un bâtiment : à réaliser au titre du processus EAM

L'annexe 1 des **DNAG** et des **ONAG** fournit la **grille de classement des niveaux d'enjeu** des fonctions principales de la forêt. La présence d'un monument historique (classé ou inscrit) ou de son périmètre de protection intervient dans l'évaluation du niveau d'enjeu social de la forêt.

Conformément au plan type, l'aménagement forestier standard doit contenir :

1°) Dans sa partie « Analyses » : en cas d'enjeu moyen ou fort, la carte des statuts réglementaires à caractère paysager, d'accueil ou culturel ;
 2°) Dans sa partie « Programme d'actions » :
 - l'état des lieux, la carte (facultative) et le programme d'actions pour les richesses culturelles (voir § 2.5.4.F du plan type) ;
 - le programme d'actions en faveur de l'accueil et du paysage ;

- les principes paysagers et clauses techniques applicables aux actions forestières (coupes et travaux) ;
 - les documents techniques de référence.

En pratique, à l'ONF

Lors de la révision d'un aménagement, solliciter l'avis du STAP*, notamment en présence d'un périmètre de protection d'un monument historique (classé ou inscrit).

Le Ministère chargé de la culture a mis en place un site Internet pour consulter et télécharger les données SIG relatives aux monuments historiques (classés, inscrits) et à leurs périmètres de protection (voir lien en page 6).

> Quand et comment appliquer le 2° de l'article L122-7 du code forestier ?

Le 2° de l'article L122-7 du code forestier permet de faire approuver en amont un aménagement au titre de la réglementation des monuments historiques, afin d'être dispensé des procédures au coup par coup pour chacune des interventions prévues dans l'aménagement.

L'aménagement est alors soumis à l'avis du STAP, qui dispose d'un délai de 4 mois pour répondre, l'absence de réponse dans ce délai valant refus.

Si cet avis est favorable, le Ministre chargé des forêts accorde la dis-

pense prévue par le 2° de l'article L122-7 du code forestier.

En pratique, à l'ONF

Cette procédure, qui ne peut concerner un monument bâti ou sans composante végétale, est à utiliser uniquement en cas de :
 - monument historique surfacique (parc, site archéologique) ;
 - superposition de périmètres concernant plusieurs monuments historiques ponctuels ;

- nombreuses interventions prévues par l'aménagement dans le périmètre de protection.

Solliciter au préalable l'avis du STAP pour apprécier l'opportunité de cette procédure par rapport à des demandes d'autorisation (si monument classé) ou des déclarations (si monument inscrit) à réaliser au coup par coup.

Méthodes et savoir-faire

Intervenir sur un monument historique classé ou inscrit

Intervenir sur un monument historique classé

Le classement au titre des monuments historiques s'applique aux édifices présentant un intérêt majeur. Il est proposé par le Préfet de région et décidé par le Ministre chargé de la culture.

« L'immeuble classé au titre des monuments historiques ne peut être détruit ou déplacé, même en partie, ni être l'objet d'un travail de restauration, de réparation ou de modification quelconque, sans autorisation de l'autorité administrative ».
(Art. L621-9 du code du patrimoine)

Seuls les travaux de réparation et d'entretien sur un monument historique inscrit sont dispensés de formalités.

En pratique, à l'ONF

Pour un **terrain** : solliciter l'avis du STAP, coupes et travaux forestiers n'étant pas considérés comme des travaux d'entretien dans le cadre de cette réglementation.
Pour un **bâtiment** : l'autorisation est à demander par l'ONF s'il est immatriculé à l'inventaire du bâti.

> Quand et comment demander une autorisation ?

Pour un bâtiment immatriculé à l'inventaire du bâti : à réaliser au titre du processus IMM

Pour un terrain : à réaliser au titre du processus SAM, sauf si la procédure prévue par l'article L122-7 du code forestier a été mise en œuvre (voir page 2).

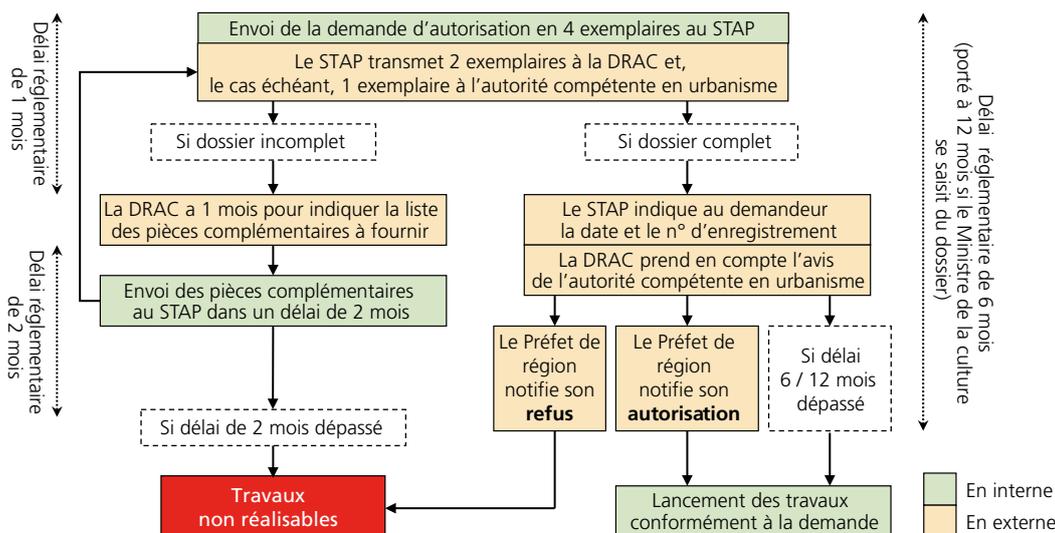
La demande d'autorisation dispense le demandeur de toute formalité au titre du code de l'urbanisme (déclaration préalable ou demande de permis).

Cas général

Une autorisation du Préfet de région est obligatoire en cas de :
- travaux de restauration, construction, aménagement, mise en valeur sur un bâtiment classé ;

- travaux forestiers sur un terrain classé.
La demande d'autorisation est à adresser au STAP en utilisant le formulaire **Cerfa 13585*01**, qui stipule la liste des pièces à joindre.

Le schéma ci-dessous synthétise la procédure à respecter.



Cas particulier

Une autorisation de travaux peut aussi être nécessaire en cas de :
- mise en place d'installations ou de constructions temporaires sur un

immeuble classé (utiliser le formulaire **Cerfa 13587*01**) ;
- travaux sur un immeuble adossé à un immeuble classé (utiliser le formulaire **Cerfa 13586*01**).

Chacun de ces formulaires détaille la procédure à respecter.

Méthodes et savoir-faire

Intervenir sur un monument historique inscrit

L'inscription au titre des monuments historiques protège les immeubles présentant un intérêt régional. Elle est décidée par le Préfet de région.

« L'inscription au titre des monuments historiques est notifiée aux propriétaires et entraînera pour eux l'obligation de ne procéder à aucune modification de l'immeuble ou partie de l'immeuble inscrit, sans avoir, quatre mois auparavant, avisé l'autorité

administrative de leur intention et indiqué les travaux qu'ils se proposent de réaliser.

L'autorité administrative ne peut s'opposer à ces travaux qu'en engageant la procédure de classement ».
(Art. L621-27 du code du patrimoine)

Seuls les travaux de réparation et d'entretien sur un monument historique inscrit sont dispensés de formalités.

En pratique, à l'ONF

Pour un **terrain** : prendre au préalable l'avis du STAP dans tous les cas.

Pour un **bâtiment** : la déclaration est à réaliser par l'ONF s'il est immatriculé à l'inventaire du bâti.

> Quand et comment effectuer une **déclaration** ?

Cas 1 : Travaux non soumis à une formalité en matière d'urbanisme

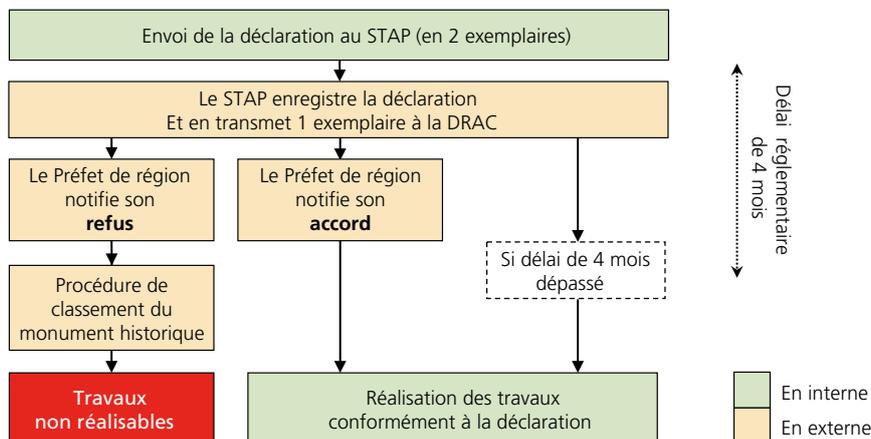
Pour un bâtiment immatriculé à l'inventaire du bâti : à réaliser au titre du processus IMM

Pour un terrain : à réaliser au titre du processus SAM, sauf si la procédure prévue par l'article L122-7 du code forestier a été mise en œuvre (voir page 2).

Une déclaration (aucun formulaire Cerfa actuellement) doit être déposée au STAP 4 mois avant le début des travaux (article R621-12 du code du patrimoine) et comporter :

- le programme décrivant et justifiant les travaux prévus ;
- l'avant-projet définitif contenant un rapport de présentation ;
- le descriptif quantitatif détaillé ;

- les documents graphiques et photographiques permettant de comprendre les travaux prévus.



Cas 2 : Travaux soumis à une formalité en matière d'urbanisme

Pour un bâtiment immatriculé à l'inventaire du bâti : à réaliser au titre du processus IMM

Si les travaux sur un bâtiment inscrit sont soumis à une formalité en matière d'urbanisme (permis de construire, de démolir, d'aménager...), quelle que soit cette formalité, une **demande de permis de construire** doit être adressée en

4 exemplaires au Maire de la commune concernée (article R421-16 du code de l'urbanisme), en utilisant le formulaire **Cerfa 13409*02**, qui précise la liste des pièces à joindre.

Le délai d'instruction est alors de 6 mois à compter de la date de réception du dossier complet en mairie (article R423-28 du code de l'urbanisme).

Intervenir dans les abords d'un monument classé ou inscrit

« Est considéré comme étant situé dans le **champ de visibilité** d'un immeuble classé ou inscrit tout autre immeuble, nu ou bâti, visible du premier ou visible en même temps que lui et situé dans un périmètre de 500 mètres ».

(Art. L621-30-1 du code du patrimoine)

« Lorsqu'un immeuble est situé dans le champ de visibilité d'un édifice classé au titre des monuments historiques ou inscrit, il ne peut faire l'objet d'aucune construction nouvelle, d'aucune démolition, d'aucun déboisement, d'aucune transformation ou

modification de nature à en modifier l'aspect, sans une **autorisation** préalable ».

(Art. L621-31 du code du patrimoine)

« Lorsqu'un immeuble non protégé au titre des monuments historiques fait l'objet d'une procédure d'inscription ou de classement ou d'une instance de classement, l'ABF* peut proposer au préfet, en fonction de la nature de l'immeuble et de son environnement, un **périmètre de protection** adapté ».

(Art. R621-93 du code du patrimoine)

Une **servitude** de protection des abords est appliquée dès qu'un édifice est classé ou inscrit. Dès qu'elle est prévue dans le périmètre réglementé, toute modification de l'aspect extérieur de ces abords doit être autorisée par l'ABF. Si le rayon de ce périmètre peut être adapté ou modifié, la servitude qui lui est liée est inamovible.

En pratique, à l'ONF

Pour un **terrain** : prendre au préalable l'avis du STAP si une autorisation est nécessaire ou en cas de doute.

Pour un **bâtiment géré par l'ONF** : l'autorisation est à demander par l'ONF.

> Quand et comment demander une autorisation ?

Cas 1 : Travaux non soumis à une formalité en matière d'urbanisme

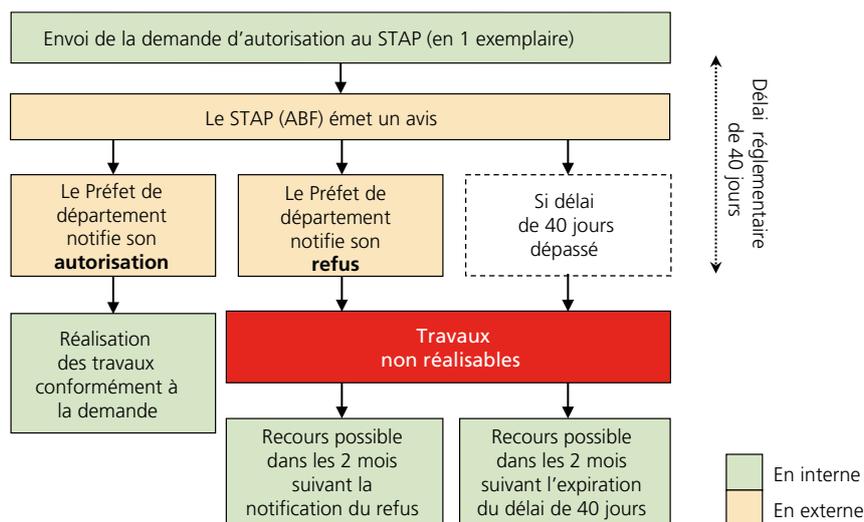
Pour un bâtiment immatriculé à l'inventaire du bâti : à réaliser au titre du processus IMM

Pour un terrain : à réaliser au titre du processus SAM, sauf si la procédure prévue par l'article L122-7 du code forestier a été mise en œuvre (voir page 2).

Le dossier doit être adressé au STAP et comporter les mêmes pièces que pour les

travaux non soumis à une formalité en matière d'urbanisme sur des monuments

historiques inscrits (voir page 4 : cas 1).



Cas 2 : Travaux soumis à une formalité en matière d'urbanisme

Pour un bâtiment immatriculé à l'inventaire du bâti : à réaliser au titre du processus IMM

Le dossier doit être adressé au Maire en 4 exemplaires et comporter les mêmes pièces que pour les travaux soumis à une formalité en matière d'urbanisme sur des

monuments inscrits (voir page 4 : cas 2). Si les travaux ont lieu dans le champ de visibilité, le Maire ne peut délivrer l'autorisation que si l'avis de l'ABF est favorable.

Si les travaux ont lieu dans le périmètre de protection sans être dans le champ de visibilité, le Maire n'est pas tenu de suivre l'avis de l'ABF.

Intervenir sur un monument historique classé ou inscrit

Plus d'informations

Sources externes

- > **Code du patrimoine** : articles L621-1 et suivants, R621-1 et suivants
- > **Code forestier** : articles L122-7 et suivants, D122-22 et suivants
- > Site du Ministère chargé de la culture (lien vers les sites des DRAC*)
www.culturecommunication.gouv.fr
- > Accès cartographique du Ministère chargé de la culture (mais les données ne sont pas toutes disponibles ou à jour)
<http://atlas.patrimoines.culture.fr/atlas/trunk/>
- > Site Service public (téléchargement des formulaires Cerfa)
www.service-public.fr

Sources internes

- > **Le droit de l'urbanisme et du patrimoine culturel** - Guide juridique (Département juridique) : 9200-11-GUI-JUR-005
- > **Règlement national d'exploitation forestière (RNEF)** : 9200-08-RN-BOI-004 téléchargeable sur le site Internet de l'ONF en tapant +ec3 dans le moteur de recherche
- > **Règlement national des travaux et services forestiers (RNTSF)** : 9200-10-RN-SAM-001 téléchargeable sur le site Internet de l'ONF en tapant +1147 dans le moteur de recherche
- > **NDS-13-G-1833** : Élaboration des aménagements forestiers - Adaptation aux enjeux
- > **Plan-type et cahier des charges de l'aménagement forestier standard** : 9200-09-MOP-EAM-001
- > **Bilan patrimonial des forêts domaniales 2011**
- > **Intraforêt** :
- page 12932 : Paysage et gestion forestière
- page 2efdc : Politique environnementale et certification ISO 14001

Contact

Au Siège

cecile.dardignac@onf.fr
christele.gernigon@onf.fr
anne-marie.granet@onf.fr
regis.bibiano@onf.fr

Dans les territoires

- > Aspects techniques : Spécialistes du réseau Archéologie (patrimoine historique) ou du réseau Paysage (périmètre du monument ou parc historique)
- > Aspects réglementaires : Référents juridiques

Cette fiche est éditée grâce au FEDD, conformément au plan d'action de la politique environnementale (SPE : action H10).

Direction de la publication

ONF – DFRN/DCOM

Rédaction

Jean-Michel MOUREY
Cécile DARDIGNAC
Régis BIBIANO
Claude FETY

Hiver 2014

Glossaire

ABF : Architecte des bâtiments de France
Chargé de gestion du patrimoine monumental et du patrimoine rural, de protection et de mise en valeur du patrimoine architectural, urbain et paysager et de promotion de la qualité de l'architecture et de l'urbanisme, il délivre des avis pour tous les projets apportant des modifications dans les espaces protégés, dont les abords des monuments historiques.

CRMH : Conservation régionale des monuments historiques
Service de la DRAC chargé de protection, conservation, contrôle, restauration et mise en valeur des monuments historiques, avec le concours des Architectes en chef des monuments historiques et des ABF.

DNAG : Directives nationales d'aménagement et de gestion.

DRAC : Direction régionale des affaires culturelles.

EAM : Élaborer les aménagements.

IMM : Gérer le parc immobilier.

ONAG : Orientations nationales d'aménagement et de gestion.

RNTSF : Règlement national des travaux et services forestiers.

RNEF : Règlement national d'exploitation forestière.

SAM : Mettre en œuvre les aménagements.

STAP : Service territorial de l'architecture et du patrimoine
Implanté dans chaque département avec les ABF et placé sous l'autorité du préfet mais rattaché à la DRAC. Il est chargé de promouvoir une architecture et un urbanisme de qualité et assure des missions de conseil, contrôle et conservation ainsi que la maîtrise d'œuvre de travaux d'entretien.



Direction Générale
2, avenue de Saint-Mandé
75570 Paris Cedex 12
Tél. 01 40 19 58 00
www.onf.fr

Certifié ISO 9001 et ISO 14001

à suivre

Prochain numéro :

Nous reviendrons à la formule ordinaire avec un dossier en bonne et due forme : suite et fin du dossier EMERGE ouvert dans le n° 39-40. Toutes nos excuses aux lecteurs attentifs qui avaient noté l'annonce de ce dossier pour la présente édition !

Retrouvez RenDez-Vous techniques en ligne

Sur intraforêt : pour les personnels ONF, tous les articles sont accessibles au format pdf dans le portail de la direction technique et commerciale bois (Recherche et développement / La documentation technique) ; pour un article particulier, utiliser le moteur de recherche de la base documentaire.

Sur internet : [http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques))

La revue **RenDez-Vous techniques** est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à d'autres lecteurs (étudiants, établissements de recherche forestière, etc.). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires que sont les guides et autres instructions de gestion. Son esprit est celui de la gestion durable et multifonctionnelle qui, face aux défis des changements globaux, a abouti à l'accord conclu en 2007 avec France nature environnement : « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique.

Sous l'autorité du directeur de publication assisté d'un comité directeur ad hoc, la rédaction commande des articles, suscite des projets, collecte les propositions, organise la sélection des textes et assure la relation avec les auteurs. N.B. : certaines propositions, parfaitement légitimes en soi, ne se justifient pas forcément dans RDV techniques et méritent d'être orientées vers d'autres revues forestières. Enfin le comité éditorial, siégeant une fois par an, est informé de cette activité et émet ses avis, critiques ou suggestions.

**Si vous désirez nous soumettre des articles
prenez contact avec :**

ONF - Département recherche
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 47
Courriel : rdvt@onf.fr

