

Impact des routes forestières sur la biodiversité floristique : synthèse de trois études menées en forêt de plaine

Laurent Bergès, C. Avon, Richard Chevalier, Yann Dumas

▶ **To cite this version:**

Laurent Bergès, C. Avon, Richard Chevalier, Yann Dumas. Impact des routes forestières sur la biodiversité floristique : synthèse de trois études menées en forêt de plaine. Revue forestière française, 2012, 64 (4), p. 447 - p. 466. hal-00856929

HAL Id: hal-00856929
https://hal.science/hal-00856929

Submitted on 2 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Impact des routes forestières sur la biodiversité floristique : synthèse de trois études menées en forêt de plaine

Laurent BERGÈS[1,2], Catherine AVON[2], Richard CHEVALIER[1], Yann DUMAS[1]

[1] Irstea, UR EFNO, Domaine des Barres, 45 290 Nogent-sur-Vernisson

[2] Irstea, UR EMAX, 3275 Route de Cézanne CS 40061, 13182 Aix-en-Provence

Résumé

Trois études dans deux forêts domaniales de plaine ont mis en évidence les rôles multiples joués par les routes forestières sur la biodiversité floristique : elles hébergent une flore de milieu ouvert mais sont défavorables à certaines espèces forestières. Des plantes patrimoniales et néophytes y sont rencontrées simultanément. Deux points préoccupants sont soulignés : (1) les cloisonnements d'exploitation créés à l'occasion des coupes de régénération et la circulation des engins accentuent la portée de l'effet route jusqu'à 60 m en facilitant l'introduction d'espèces non forestières au cœur des parcelles et en repoussant des espèces forestières loin de la route ; (2) l'apport de matériaux calcaires pour stabiliser les routes dans un environnement de sols acides augmente le pH du sol et nuit aux espèces acidiphiles. Nous recommandons de raisonner la densité des routes forestières et des cloisonnements et d'employer des matériaux de stabilisation neutres vis-à-vis du pH des sols environnants.

Summary

Three studies located in two State forests (Orléans and Montargis) have emphasized the multiple roles played by forest roads on plant biodiversity: roadsides were habitats for non-forest species but were detrimental to some forest species. Protected species and neophytes were also found on roadsides. Two areas of concern are highlighted: (1) the forest paths opened for regeneration felling and harvesting machine traffic increased the depth of road effect up to 60 m by facilitating introductions of non-forest species in the interior of forest stands and pushing away forest species far from the road; (2) the use of limestone gravel for road improvement in a native nutrient-poor environment increased soil pH and was detrimental to acidophilous species. To protect forest soil and plant biodiversity, we recommend reconsidering the density of forest roads and forest paths and using road material that do not modify the pH of the surrounding forest soils.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

1. Contexte et objectifs

Les routes peuvent avoir des impacts multiples sur les animaux, les plantes et le fonctionnement des écosystèmes, et sont désormais reconnues comme des éléments importants du paysage (Spellerberg, 1998 ; Forman et Alexander, 1998 ; Trombulak et Frissell, 2000 ; Forman *et al.*, 2003 ; Coffin, 2007 ; Benítez-López *et al.*, 2010). Les routes modifient les structures spatiales de la forêt en la découpant en morceaux (Reed *et al.*, 1996; Tinker *et al.*, 1998), créant ainsi des barrières pour certaines espèces. De plus, ce réseau constitue un ensemble de milieux ouverts particuliers maintenus dans une phase de début de succession (talus, fossés, accotements). Les routes peuvent constituer des corridors ou des conduits de dispersion préférentiels pour certaines plantes, notamment les exotiques et les invasives (Parendes et Jones, 2000 ; Watkins *et al.*, 2003 ; Flory et Clay, 2006, 2009 ; Sera, 2010). Mais dans le même temps, elles peuvent aussi aider à la dispersion de plantes forestières. L'influence des routes peut varier selon leur largeur, leur fréquentation, leur orientation ou le type de matériau utilisé (Forman *et al.*, 2003).

Plusieurs synthèses sur les impacts écologiques des infrastructures de transport ont été publiées, mais peu portent sur les espèces végétales (Spellerberg, 1998 ; Coffin, 2007 ; Fahrig et Rytwinski, 2009). Une méta-analyse récente (Benítez-López *et al.*, 2010) conclut à un effet globalement très négatif de la proximité de la route sur les oiseaux et les mammifères. Cette méta-analyse évalue que la portée de l'effet de la route, c'est-à-dire la distance jusqu'à laquelle on observe des différences significatives à l'intérieur de la parcelle, peut aller jusqu'à plus de 1 km pour les oiseaux et 5 km pour les mammifères, avec une portée moindre en forêt que dans les milieux ouverts, sans doute à cause d'une visibilité réduite de l'ouvrage pour les animaux en forêt. Benítez-López *et al.* (2010) soulignent aussi le besoin de synthèse globale pour la flore.

En France, deux synthèses traitant des impacts des infrastructures linéaires de transport (ILT) sur la biodiversité ont aussi été rédigées : une note d'information du Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes – SETRA (Saussol et Pineau, 2007) et le Guide 3 rédigé par le Comité Opérationnel Trames Verte et Bleue (Vanpeene *et al.*, 2009). Mais peu d'études se sont intéressées jusqu'ici à l'impact des routes forestières sur la flore.

Pourtant, au cours des dernières décennies, une augmentation de la densité de routes forestières a été observée dans les forêts gérées en France, où les routes servent depuis longtemps pour la récolte du bois et les travaux sylvicoles. Selon les chiffres de l'IFN, la superficie de forêt située à plus de 500 m d'un chemin d'exploitation est passée de 27 à 22 % entre 1985 et 1998. De même, le bilan patrimonial de l'ONF indique que la longueur des routes en forêt domaniale métropolitaine a augmenté de 4,3 % entre 1999 et 2005

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

(30 160 km de voirie), soit un rythme moyen d'augmentation annuelle de 0,6 % (Bouillie, 2006). En parallèle, le recours à la mécanisation est devenu de plus en plus courant pour l'exploitation des bois en forêt depuis une cinquantaine d'années (Pischedda, 2010), de même que pour l'entretien des accotements de route. Or, les engins forestiers sont un vecteur de transport des graines le long des routes et depuis la route vers la parcelle forestière (Zwaenepoel et al., 2007 ; Ebrecht et Schmidt, 2008), notamment dans le cas des invasives (Von der Lippe et Kowarik, 2007 ; Veldman et Putz, 2010).

De plus, la longueur totale de routes en terrain naturel en forêt domaniale métropolitaine a diminué entre 1999 et 2006 (- 2,8 %) au profit des routes empierrées et revêtues, et le mode d'entretien des routes a changé avec l'usage courant de matériaux de stabilisation venant de l'extérieur de la forêt (granulats de carrières, alluvions, gravats).

Ces phénomènes vont se poursuivre puisqu'il est prévu dans le cadre du Grenelle de l'environnement et des mesures en faveur du "produire plus" de bois[1] une amélioration du réseau actuel de desserte forestière et leur densification dans les zones jugées sous-équipées.

L'objectif général de nos travaux est de mieux connaître les différents rôles écologiques joués par les routes forestières sur la biodiversité de la flore dans un contexte de forêts gérées de plaine. Dans le cadre d'une thèse (Avon, 2010) financée par Irstea (ex-Cemagref) et la région Centre (2006-2010) et d'un projet de recherche financé par la convention cadre 2009-2011 MEDDTL-Irstea (Avon *et al.*, sous presse ; Bergès *et al.*, sous presse), nous avons cherché à répondre aux cinq questions suivantes :

- Quelles sont les contributions – positives et négatives – des bords de routes forestières à la biodiversité floristique du massif forestier ?
- Le type de matériau utilisé pour stabiliser la route forestière a-t-il un effet sur la biodiversité du bord de route et du peuplement adjacent ?
- Jusqu'où l'effet de la route pénètre-t-il à l'intérieur de la parcelle forestière ?
- L'effet de la route dépend-il de l'âge du peuplement adjacent ?
- La présence de cloisonnements dans la parcelle influe-t-elle sur la réponse de la flore à la distance à la route ?

En se basant sur les résultats connus surtout pour les espèces exotiques, nos hypothèses de départ étaient les suivantes :

- Les bords de routes hébergent une flore riche et diversifiée composée d'un mélange d'espèces forestières et non forestières.

[1] Objectif d'une hausse de 20 millions de m^3 entre 2010 et 2020.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

- Dans un contexte de sols acides, les changements de composition floristique induits par la route (sur la route et dans le peuplement adjacent) sont plus forts lorsque la route est stabilisée par apport de matériaux alcalins que lorsque la route est en terrain naturel (Godefroid et Koedam, 2004 ; Mullerova *et al.*, 2011).
- Une forte densité de routes et une part élevée de milieux ouverts (coupes) en forêt favorisent la pénétration d'espèces non forestières au sein des massifs forestiers, notamment par le biais des engins forestiers (Ebrecht et Schmidt, 2008).
- L'effet de la route entraîne un recul des espèces forestières vers l'intérieur de la parcelle.
- La portée de l'effet route dépend du type de peuplement adjacent à la route, avec une portée plus forte dans les parcelles en régénération et dans les peuplements jeunes.
- Les effets de la route sont accentués par la présence de cloisonnements dans la parcelle.
- Les risques de banalisation des communautés végétales sont à modérer par le fait que les espèces colonisatrices rencontrent des barrières écologiques en forêt en raison de la très forte concurrence des arbres dès que le couvert arboré se referme (Honnay *et al.*, 2002).

2. Méthodes

Pour répondre à ces questions, nous avons installé trois dispositifs complémentaires entre 2007 et 2011 en forêt de Montargis et en forêt d'Orléans (massifs d'Ingrannes et de Lorris) dans le Loiret (photo 1). Les modalités d'échantillonnage variaient en fonction des objectifs de chaque étude (tableau 1).

L'étude 1 avait pour objectif de déterminer la portée de l'effet de routes empierrées dans le peuplement forestier et d'analyser comment l'effet route variait selon l'âge du peuplement adjacent, avec deux types de peuplement échantillonnés : des futaies de chêne sessile au stade gaulis-perchis (40-60 ans) et au stade futaie adulte (90 ans ou plus).

L'étude 2 visait à quantifier l'effet route dans des futaies à base de chêne sessile au stade coupe de régénération ou fourré-gaulis et à tester si les cloisonnements sylvicoles accentuaient la portée de l'effet route dans la parcelle.

Dans les études 1 et 2, nous avons cherché à échantillonner un gradient de distance à la route : des transects ont été installés perpendiculairement à l'axe de la route et plusieurs positions ont été définies le long de ce transect (figure 1) : la première position était la banquette de la route, c'est-à-dire la zone aplanie de largeur variable adjacente à la bande de roulement ; la seconde correspondait à la limite exacte entre la route et le peuplement, définie comme le pied des arbres de lisière (cette lisière était toujours située sur le talus de la

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

route) ; les positions suivantes variaient selon l'étude : trois distances dans l'étude 1 (5, 30 et 100 m) et six dans l'étude 2 (5, 10, 15, 20, 30 et 60 m). Les relevés de végétation portaient sur des bandes de 2 m de large sur 50 m de long dans l'étude 1 et sur des carrés de 2 m de côté dans l'étude 2.

Les objectifs de l'étude 3 étaient d'évaluer la contribution de la route forestière à la diversité floristique du massif, de comparer l'effet du type de matériau utilisé pour stabiliser la route et d'analyser comment l'âge du peuplement adjacent modulait la flore sur la route et agissait sur les échanges d'espèces entre la route et le peuplement au cours de la succession. Nous avons échantillonné deux types de routes – des routes calcarisées[2] et des routes en terrain naturel – et trois classes d'âge en futaie de pin sylvestre ou pin laricio – jeune (hauteur entre 1 et 6 m), moyen (9 à 15 m) et adulte (supérieure à 20 m).

Dans cette troisième étude, nous avons installé un relevé de largeur variable afin de couvrir l'emprise totale de la route (talus droit, fossé droit, banquette droite, bande de roulement, banquette gauche, fossé gauche et talus gauche) et de longueur ajustée à cette largeur pour couvrir une surface de 2000 m² (photo 2). Un relevé de mêmes dimensions a été positionné à 30 m à l'intérieur du peuplement forestier.

Pour chaque étude, la réponse de la biodiversité floristique à l'effet de la route a été analysée selon trois approches complémentaires : à l'échelle de la communauté (richesse spécifique, composition floristique), à l'échelle de l'espèce et selon les traits de vie des espèces (forme biologique, habitats préférentiels, mode de dispersion,…). La richesse spécifique correspond au nombre d'espèces dans un relevé ou un ensemble de relevés regroupés selon les modalités des facteurs du plan d'échantillonnage (distance à la route, type de route forestière, âge du peuplement adjacent, position par rapport au cloisonnement). La composition floristique des relevés a été analysée par analyse canonique des correspondances (ACC) utilisant les facteurs du plan d'échantillonnage comme variables instrumentales[3]. Les variations de présence ou d'abondance de chaque espèce ont été analysées par des modèles de régression logistique ou linéaire multiples utilisant comme variables explicatives les facteurs du plan d'échantillonnage. Enfin, les variations de richesse spécifique par trait de vie, c'est-à-dire le nombre d'espèces contenues dans le relevé par catégorie de trait de vie, ont été analysées par des modèles linéaires à effets mixtes utilisant comme variables explicatives les facteurs du plan d'échantillonnage. Des analyses non

[2] Nous qualifions ainsi les routes où un apport de matériau calcaire important a été opéré en vue d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'infrastructure.

[3] Cette analyse permet de tester si les gradients de composition floristique mis en évidence sont expliqués significativement par ces facteurs.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

détaillées ici permettent de détecter la portée de l'effet route, c'est-à-dire la distance moyenne de pénétration de l'effet à l'intérieur des parcelles.

3. Résultats

3.1. Contribution des routes forestières à la biodiversité floristique du massif forestier

Dans les trois études, les cortèges floristiques sont extrêmement différents entre le bord de route et le peuplement adjacent. Quels que soient l'environnement stationnel ou sylvicole et le type de matériau de la route, la flore de bord de route est toujours plus riche que celle du peuplement adjacent, avec en moyenne un nombre total d'espèces toujours plus élevé sur les bords de route (entre 1,3 et 6,2 fois plus d'espèces selon les études). Ainsi, la richesse alpha[4] est en moyenne de 53,9 espèces sur la banquette dans l'étude 1 contre 32,2 espèces dans le peuplement forestier. Une autre étude en forêt domaniale de Tronçais a aussi confirmé ces résultats (Baltzinger *et al.*, 2011). De plus, la richesse gamma[5] dans cette étude se décompose en 67 espèces propres à la banquette, c'est-à-dire inventoriées sur la banquette mais pas dans les autres positions, 39 espèces propres au peuplement forestier et enfin 110 espèces communes, c'est-à-dire rencontrées au moins une fois dans les deux types d'habitats. Des différences entre études ont aussi été observées et s'expliquent par les différences méthodologiques (méthode d'échantillonnage, surface des relevés, surface totale prospectée dans l'étude, types de peuplements, types de stations et types de routes échantillonnés).

La flore de la banquette est composée d'espèces typiquement forestières auxquelles s'ajoutent des espèces périforestières, d'ourlets pré-forestiers, de prairies, pelouses et tonsures et des rudérales. En général, ces espèces ont une stratégie compétitrice ou rudérale, sont héliophiles, nitrophiles et sont adaptées aux perturbations fréquentes par la fauche ou le tassement du sol par les engins. À l'inverse, le peuplement forestier héberge des espèces forestières tolérantes au stress, sciaphiles, à plus faible capacité de dispersion et de nombreuses bryophytes. Lorsque la forêt est située sur des stations acidiclines à acidiphiles, le peuplement héberge aussi des espèces acidiphiles.

[4] La richesse alpha correspond au nombre d'espèces présentes dans un relevé de l'étude (ex : 100 m² pour l'étude 1).

[5] La richesse gamma correspond au nombre total d'espèces rencontrées dans un ensemble de relevés (ex : 100 relevés pour l'étude 1).

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Un autre point important est que les routes forestières (étude 3) peuvent héberger des espèces patrimoniales (*Ajuga occidentalis, Arnica montana, Genista germanica, Oreoselinum nigrum, Osmunda regalis, Nardus stricta, Simethis mattiazzi*, photo 3), mais aussi des espèces potentiellement invasives (*Conyza canadensis, Juncus tenuis, Erigeron annuus* (photo 3), *Matricaria discoidea*), espèces qui n'ont jamais été rencontrées dans les témoins forestiers à proximité (30 m).

Nous n'avons inventorié aucune espèce patrimoniale dans les deux autres études. Nous avons relevé dans l'étude 2 une bryophyte invasive (*Campylopus introflexus*) et trois néophytes (*Conyza canadensis*, *Epilobium ciliatum* et *Orthodontium lineare*), toutes les quatre rencontrées uniquement à l'intérieur du peuplement. Aucune néophyte ou invasive n'a été détectée à Montargis (étude 1). Ces différences de résultats sont certainement liées à la fois aux différences de pression d'échantillonnage, d'âge des peuplements et de contexte stationnel entre études, et d'un contexte historique différent (paysage, gestion, fréquentation). De plus, cette faible occurrence de néophytes peut être expliquée par la localisation des études, au cœur de grands massifs forestiers constitués de forêts anciennes, c'est-à-dire de zones restées à l'état forestier depuis le début du XIX^{e} siècle et moins soumises à la fréquentation humaine et aux perturbations que les périphéries de massifs (Gavier-Pizarro *et al.*, 2010) ou que les forêts sur anciens sols agricoles (Kuhman *et al.*, 2001).

3.2. Rôle du type de matériau employé pour stabiliser la route

En forêt d'Orléans, nous avons noté des différences importantes de composition floristique entre routes calcarisées et non calcarisées (figure 2, étude 3). Les routes en terrain naturel sont plus favorables à une partie de la flore acidiphile forestière et de milieu ouvert alors que les routes calcarisées sont favorables à la biodiversité ordinaire[6], dont une partie à composante forestière. Nous avons comptabilisé 35 espèces significativement plus abondantes sur route en terrain naturel contre 53 plus abondantes sur route calcarisée. En revanche, les deux types de routes ne se distinguent pas sur le plan de la fréquence des espèces patrimoniales ou des espèces néophytes.

La dynamique de végétation de bord de route évolue avec la fermeture des peuplements mais cette évolution varie en partie selon le type de route (figure 2, étude 3) : les routes en terrain naturel qui traversent les peuplements jeunes sont plus riches en espèces des tonsures et en espèces acidiphiles, ces deux indices étant les plus en

[6] C'est-à-dire l'ensemble des espèces qui n'ont pas de statut de protection particulier.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

adéquation avec le maintien du fond floristique local ; logiquement, la flore spécialisée des milieux ouverts acidiphiles s'étiole avec un fort couvert latéral et vertical.

3.3. Portée de l'effet route

La diminution de la fréquence des espèces non forestières est forte et rapide au-delà du talus de la lisière alors que la décroissance de la fréquence des péri-forestières est plus progressive (figures 3 et 4, études 1 et 2) ; en revanche, la richesse en espèces forestières augmente sensiblement avec la distance à la route. Cependant, la portée de l'effet route varie en fonction de l'âge du peuplement adjacent à la route (figures 3 et 4, *cf.* ci-dessous). Les analyses canoniques des correspondances (ACC) indiquent que la portée de l'effet lisière s'arrête à 5 m de la lisière à Montargis (étude 1), mais va au moins jusqu'à 20 m à Orléans (étude 2). De plus, plusieurs espèces non forestières parviennent à pénétrer bien au-delà et peuvent aller jusqu'à 60 ou 100 m. Certaines herbacées forestières et des bryophytes ont un profil de réponse opposé indiquant un évitement de la route pouvant aller jusqu'à 30 m dans l'étude 2. Les talus marqués rencontrés systématiquement à Montargis en bord de route (étude 1) constituent un habitat optimal pour plusieurs bryophytes, dans la mesure où l'éclairement et la topographie du talus (maintien du sol nu) sont favorables aux bryophytes pionnières (Avon *et al.*, 2010). Ce résultat n'a pas été retrouvé dans l'Orléanais en raison de l'absence de talus marqués.

3.4. Rôle de l'âge du peuplement

La combinaison des études 1 et 3 en chênaie a permis de mettre en évidence une dynamique de colonisation des espèces allant dans les deux sens au cours de la succession forestière : de la route vers le peuplement adjacent et depuis le peuplement vers la route (figure 5). Le mécanisme est le suivant : lors de la phase de régénération, les routes contribuent à alimenter la parcelle adjacente en espèces péri et non forestières car les conditions de milieu dans la parcelle sont favorables à leur installation pendant quelques années (ouverture, perturbations de la litière et du sol, fréquentation accrue par les animaux). C'est ce que nous montre le gradient de composition depuis la route. L'effet « source de graines » de la route s'estompe une fois le peuplement refermé, et la longueur du cycle actuel en chênaie (jusqu'à une prochaine ouverture forte de la canopée) limite fortement le maintien des espèces non forestières dans la parcelle. A l'inverse, certaines espèces forestières, chassées loin du bord de la route au moment de la coupe de régénération, se retirent à l'intérieur de la parcelle, puis recolonisent peu à peu la banquette lorsque l'ombrage des arbres augmente en bord de route et que les perturbations diminuent (baisse de la fréquence de fauche des bords de route), c'est-à-dire que le milieu ressemble

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

plus à l'intérieur forestier (figure 5). La réponse est cependant légèrement modulée par le type de matériau de la route.

3.5. Rôle des cloisonnements en peuplement jeune

L'effet de la route est plus fort sur le cloisonnement qu'en dehors du cloisonnement puisqu'il porte jusqu'à 20 voire 60 m pour certaines espèces (figure 4, étude 2) alors qu'il s'arrête à 10 m hors cloisonnement. Les cloisonnements sont identifiés comme une voie de pénétration préférentielle pour les espèces de milieux ouverts et non forestières, la route jouant le rôle de source de graines. Sur les cloisonnements, l'entretien régulier, les perturbations et le tassement du sol par les engins maintiennent des conditions d'habitat favorables à une végétation de début de succession ayant des similarités avec la végétation présente en bord de route et la circulation des engins contribue à disperser les espèces dans la parcelle à partir de la route (phénomène d'agéstochorie[7]).

La banquette de la route et le cloisonnement hébergent des espèces qui partagent un ensemble de traits qui sont largement dominants sur la banquette et très majoritaires sur le cloisonnement (figure 4) : espèces non forestières, héliophiles et basophiles, annuelles, à stratégie plus rudérale, barochores, épizoochores, à graines légères et courtes. Au contraire, l'intérieur de la parcelle hors cloisonnement héberge des espèces peu fréquentes ou absentes de la banquette et qui peuvent se retrouver en cloisonnement, en particulier pour les distances les plus éloignées de la route (figure 4) : espèces forestières, sciaphiles et acidiphiles, bryophytes, chaméphytes, phanérophytes et endozoochores.

Les réponses au niveau espèce sont parfois plus marquées (figure 6) : *Prunella vulgaris, Carex flacca* et *Plantago major* pénètrent largement dans la parcelle par le biais du cloisonnement. À l'inverse, *Agrostis canina* évite le bord de route mais reste favorisée par le cloisonnement, alors qu'*Hypnum cupressiforme*, une bryophyte forestière, a un comportement d'espèce d'intérieur forestier, puisque sa fréquence est maximale entre 20 et 60 m hors cloisonnement.

4. Discussion et recommandations de gestion

Nous avons mis en évidence des rôles multiples joués par les routes forestières, difficilement dissociables : les avantages et inconvénients pour la biodiversité floristique des sites étudiés ont été synthétisés dans le tableau 2 en distinguant les bords de routes et les effets induits sur le peuplement adjacent.

[7] Dispersion involontaire des graines par les véhicules (Ebrecht et Schmidt, 2008).

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

4.1. Suivi de la composition floristique des bords de route

Au regard de la forte biodiversité floristique liée aux routes forestières, nous invitons les gestionnaires à poursuivre l'attention portée à ces milieux ouverts intraforestiers. Ainsi, suite à des inventaires réalisés en forêt d'Orléans (Olivereau, 1999), l'ONF a déjà pris des mesures visant à préserver la biodiversité des bords de routes forestières en réalisant notamment une fauche annuelle tardive. Il est possible que la biodiversité floristique très élevée observée en bord de route soit en partie liée à ce mode de gestion des banquettes, mais ce facteur de variation n'a pas été étudié dans notre projet. Si l'on se trouve dans un contexte paysager d'agriculture intensive, les bords de routes forestières peuvent constituer un habitat refuge intéressant pour la flore typique de milieux ouverts menacée par les pratiques agricoles (Peterken et Francis, 1999).

4.2. Densité des routes forestières et des cloisonnements

La portée de l'effet route s'arrête à une distance de 5 m dans la parcelle dans le cas de peuplements d'âge moyen et adultes (Montargis), ce qui semble à première vue rassurant. Mais en s'intéressant aux stades plus jeunes (coupes de régénération et fourrés) et aux cloisonnements, nous avons mis en évidence une portée d'effet route beaucoup plus importante. En effet, la présence de cloisonnements qui compartimentent la parcelle facilite l'introduction d'espèces non forestières puisque certaines espèces de bord de route présentent un gradient de pénétration jusqu'à 60 m, uniquement dans le cloisonnement. De plus, certaines herbacées forestières et les bryophytes sont repoussées loin de la route.

Ces rôles combinés des coupes, des entretiens sylvicoles et du passage des engins vis-à-vis de la biodiversité floristique réclament donc une attention particulière. Mener une régénération en forêt de plaine sans route à proximité de la parcelle n'est pas viable économiquement mais il est important de s'interroger sur une hausse générale de la densité de routes dans un massif. En effet, l'accroissement programmé des prélèvements de bois dans la forêt française conduira à une hausse du pourcentage de coupes et à une intensification de l'utilisation des routes et des cloisonnements.

Le bilan patrimonial de l'ONF annonce une densité de routes en forêt domaniale tous types de routes confondus en 2005 de 1,8 km pour 100 ha de forêt. Le CRPF d'Île-de-France et du Centre préconise en 2005 pour 100 ha un taux d'équipement de piste de débardage de 2,5 km, 1 km de route accessible aux grumiers et une distance maximale de débardage de 500 m. Les *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines pour 2010* (Collectif, 2011) fournissent un indicateur indirect des surfaces forestières par niveau d'accessibilité (facile à très difficile), l'exploitabilité étant basée uniquement sur des critères physiques de l'environnement direct des peuplements : existence ou possibilité de création

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

d'un itinéraire de débardage, distance de débardage, portance du terrain, classe d'aspérité du terrain et classe de pente de débardage. Un total de 33 % de la surface est indiqué comme difficile à exploiter[8], ce qui laisse des marges en termes d'équipement routier.

Nous avons calculé la surface de peuplement forestier influencée par la route forestière en prenant un paysage théorique composé d'un carré de forêt de 1 km de côté (100 ha) parcourue par 1,5 km de routes (densité moyenne en forêt domaniale selon Bouillie, 2006) avec le schéma suivant : deux routes perpendiculaires dont l'une traverse le carré et l'autre la moitié du carré pour se rejoindre au centre. En prenant 15 m d'emprise, les routes couvrent 2,2 ha. Si l'on ajoute une zone d'influence de 10 m de part et d'autre de la route, la surface totale atteint 5,2 ha et monte à 19,5 ha pour une zone d'influence de 60 m. Même si la surface totale d'influence dépend de la forme du réseau routier, ce simple calcul illustre bien que la surface d'influence des routes forestières est loin d'être négligeable. Certains travaux ont cherché à optimiser la densité de routes pour minimiser le coût d'exploitation du bois en fonction de différentes techniques d'exploitation (Ghaffariyan *et al.*, 2010), mais peu de recherches proposent une approche coût-bénéfices intégrant les impacts environnementaux, à l'exception de Gumus *et al.* (2010). Or, il convient de considérer aussi la route forestière pour ses impacts sur la biodiversité.

Dans le cas des cloisonnements, plusieurs travaux soulignent l'importance de bien respecter la circulation des engins sur un réseau de chemins de débardage au moment des coupes plutôt que de diluer de manière anarchique leur circulation dans toute la parcelle (Zenner *et al.*, 2008 ; Pischedda, 2010). Cette recommandation est motivée par deux arguments importants : l'intérêt de laisser des zones non perturbées de grande taille au sein de la parcelle et le fait qu'en faisant expérimentalement varier le nombre de passages, les modifications du sol et de la flore suite au passage d'engins s'observent au cours des tous premiers passages mais ne s'accentuent guère au-delà. Certaines études suggèrent toutefois que la résilience des sols perturbés est très faible et que les effets perdurent plusieurs décennies après.

Le réseau de cloisonnements observé en forêt d'Orléans est déjà dense puisqu'il couvre plus de 10 % de la surface des parcelles étudiées (un cloisonnement de 3 m tous les 25 m). Les recommandations se situent entre 16 et 30 m d'espacement d'axe en axe et à 4 m de largeur (Cacot, 2008b). Il faut donc revoir la densité des cloisonnements et la fréquence de leur entretien de manière à limiter les impacts négatifs sur les sols et la biodiversité floristique forestière sans réduire de manière nette le service offert ni augmenter

[8] Ce qui correspond selon la clé à des peuplements sans pistes ou avec piste de débardage éloignée de plus de 2000 m ou avec une pente de débardage supérieure ou égale à 30 %.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

les coûts d'exploitation. L'observatoire des impacts de l'exploitation forestière (Cacot, 2008a) indique que la surface parcourue par les engins se situe en moyenne à 34 % mais varie de 8 à 60 % selon les types de chantiers (feuillus, résineux, coupe rase, éclaircie). L'observatoire a aussi montré qu'un pas de cloisonnement de 50 m n'était pas compatible avec la majorité des moyens d'exploitation existants et que dans ce cas, les engins étaient amenés à circuler en dehors des cloisonnements (Cacot, 2008b). Allant dans le même sens que le guide du FCBA et de l'ONF *Pour une exploitation respectueuse des sols et de la forêt* (programme PROSOL), la petite mécanisation (cheval, cheval de fer, mini-débardeur) et le débardage par câble-mât en plaine peuvent être des solutions viables à promouvoir pour réduire sensiblement la densité des cloisonnements et abaisser la surface totale de circulation des engins dans la parcelle (Pischedda, 2008), sans nécessairement accroître les coûts directs et indirects d'exploitation (Bruciamacchie *et al.*, 2008).

4.3. Choix des matériaux de stabilisation de la route

En augmentant le pH du sol, l'apport de matériaux alcalins sur la route a un impact négatif sur la flore acidiphile forestière et sur la flore acidiphile des tonsures, ce qui est en accord avec d'autres travaux (Godefroid et Koedam, 2004 ; Mullerova *et al.*, 2011). Ce point est préoccupant dans un contexte de sols acides comme en Orléanais, déjà souligné sur ce massif par Grandjean (2006) à la suite de l'apparition d'orchidées en bord de routes empierrées avec des granulats calcaires. Toutefois, les niveaux de richesse atteints en espèces patrimoniales et la fréquence d'espèces invasives ne sont pas différents entre les deux types de routes.

Cependant, le recours à des granulats calcaires ne remonte qu'à une vingtaine d'années et laisse la possibilité de futurs changements de végétation. En effet, des recherches menées sur l'impact écologique de la poussière calcaire diffusée lors des passages de véhicules, notamment en période sèche, soulignent des effets cumulatifs pouvant aller à plusieurs centaines de mètres sur le sol et la végétation, notamment dans les milieux acides comme les tourbières et les landes (Farmer, 1993). La lixiviation des éléments alcalins de la route vers les milieux adjacents serait selon d'autres travaux le principal mécanisme à l'origine des changements observés (Mullerova *et al.*, 2011). Les conséquences sur la végétation forestière s'apparentent d'ailleurs à celles engendrées par la fertilisation par amendements calcaires en sol acide (Misson *et al.*, 2001).

Nous conseillons donc d'utiliser dans la mesure du possible pour l'entretien et la réfection des chaussées des matériaux endogènes ne modifiant pas le pH du sol. Ceci évitera d'étendre la part des stations calcicoles dans les milieux acides et de nuire au fond floristique forestier local. Nous invitons donc le gestionnaire à réfléchir à d'autres moyens de

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

stabiliser les routes, comme par exemple l'utilisation de liants hydrauliques pour la réhabilitation des routes (Geldreich, 2006), sous réserve que ces liants n'aient pas d'impact environnemental. Bien entendu, les choix doivent être raisonnés au regard du surcoût éventuel de revêtements alternatifs. La restriction de la circulation sur les routes forestières par règlementation pourrait d'ailleurs constituer une aide à la réduction du besoin de stabilisation, tout en réduisant la diffusion de poussière calcaire dans l'air et l'apport de graines transportées par les véhicules.

Dans le cas de la forêt d'Orléans, l'apport de matériaux alcalins sur des routes forestières actuellement acides est impérativement à proscrire dans les zones hébergeant une flore patrimoniale typique des milieux acides et tout particulièrement sur les sols les plus humides. Une cartographie et un suivi de ces routes est à prévoir à l'échelle du massif d'Orléans. En effet, il ne faut pas exclure que certains habitats hébergeant une flore patrimoniale acide ne soient pas définitivement dégradés suite à l'emploi de ces matériaux.

De plus, à la suite de quelques observations ponctuelles sur le terrain, nous attirons l'attention sur le fait que substituer à l'emploi de matériaux calcaires des gravats rudéraux (souvent issus de démolition de bâtiments et mélangés à de la terre) serait une très mauvaise solution, dans la mesure où ce type de substrat a visiblement l'inconvénient d'introduire un cortège d'espèces rudérales (apport de graines dans la terre) peu présentes sur la zone d'étude.

5. Conclusions

Ces trois études se sont intéressées à la flore vasculaire et aux bryophytes terricoles, deux groupes taxonomiques plus faciles à étudier que d'autres groupes comme les invertébrés. Même si nos résultats ne doivent pas être généralisés à l'ensemble de la biodiversité sans s'intéresser à la réponse d'autres taxons, ils mettent en évidence que les rôles des routes forestières sont multiples, antagonistes et indissociables. Nous soulignons particulièrement deux points importants auxquels les gestionnaires doivent porter attention : (1) l'accentuation des effets de la route par la gestion forestière au moment de la régénération des peuplements et (2) l'importance du type de matériau employé pour stabiliser la route. Nous recommandons aux gestionnaires d'une part la mise en place de suivis de la flore des bords de routes et d'autre part une adaptation raisonnée et concertée des pratiques de gestion. Sur le plan scientifique, une attention devrait être portée au rôle joué par l'agéstochorie dans la dissémination de nouvelles plantes en forêt, un phénomène discret jusqu'ici peu étudié.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Remerciements à l'ONF (direction territoriale ONF Centre-Ouest-Auvergne-Limousin et l'agence interdépartementale Centre - Val-de-Loire) qui nous a permis de travailler dans les forêts domaniales de Montargis et d'Orléans et nous a fourni les renseignements sur la gestion de ces deux forêts.

6. Bibliographie

AVON (C.). - Influences de la composition et de la structure actuelles de la mosaïque paysagère sur la diversité floristique en forêt. - Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, spécialité Ecologie, 2010. - 279 p.

AVON (C.), BERGÈS (L.), DUMAS (Y.), DUPOUEY (J. L.). - Does the effect of forest roads extend a few meters or more into the adjacent forest? A study on understory plant diversity in managed oak stands. - *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n°8, 2010, pp. 1546-1555.

AVON (C.), DUMAS (Y.). BERGÈS (L.) - Management practices increase the impact of roads on plant communities in forests. *Biological Conservation*, sous presse, DOI: 10.1016/j.biocon.2012.10.008.

BALTZINGER (M.), ARCHAUX (F.), GOSSELIN (M.), CHEVALIER (R.). - Contribution of forest management artefacts to plant diversity at a forest scale. - *Annals of Forest Science*, vol. 68, n°2, 2011, pp. 395-406.

BENITEZ-LOPEZ (A.), ALKEMADE (R.), VERWEIJ (P.A.). - The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis. - *Biological Conservation*, vol. 143, n°6, 2010, pp. 1307-1316.

BERGÈS (L.), CHEVALIER (R.), AVON (C.) - Infuence of forest road, road surfacing material and stand age on floristic diversity and composition in a nutrient-poor environment. *Applied Vegetation Science*, sous presse, DOI: 10.1111/avsc.12019.

BOUILLIE (J.). - Etat du réseau routier en forêt domaniale. - *RDV Techniques de l'ONF*, n°13, 2006, pp. 53-55.

BRUCIAMACCHIE (M.), COSTA (S.), IBANEZ (L.). - Analyse économique des coûts d'exploitation d'un chantier. - *RenDez-Vous Techniques*, n°19, 2008, pp. 43-49.

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

CACOT (E.). - Organisation des chantiers d'exploitation forestière "traditionnels". - *RenDez-Vous Techniques*, n°19, 2008b, pp. 30-33.

COFFIN (A. W.). - From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. - *Journal of Transport Geography*, vol. 15, n°5, 2007, pp. 396-406.

COLLECTIF. - Les Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, Edition 2010. – MAAPRAT, IFN, 2011. - 200 p.

EBRECHT (L.), SCHMIDT (W.). - Impact of soil seed bank and diaspore transportation by forest machines on the development of vegetation along skid trails. - *Forstarchiv*, vol. 79, 2008, pp. 91-105.

ELLENBERG (H.), WEBER (H. E.), DÜLL (R.), WIRTH (V.), WERNER (W.), PAULIfIEN (D.). - Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. - *Scripta geobotanica*, vol. 18, 1992, pp. 1-258.

FAHRIG (L.), RYTWINSKI (T.). - Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. - *Ecology and Society*, vol. 14, n°1, 2009, 20 p. [online] http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art21/

FARMER (A. M.). - The effects of dust on vegetation - a review. - *Environmental Pollution*, vol. 79, n°1, 1993, pp. 63-75.

FLORY (S. L.), CLAY (K.). - Invasive shrub distribution varies with distance to roads and stand age in eastern deciduous forests in Indiana, USA. - *Plant Ecology*, vol. 184, n°1, 2006, pp. 131-141.

FLORY (S. L.), CLAY (K.). - Effects of roads and forest successional age on experimental plant invasions. - *Biological Conservation*, vol. 142, n°11, 2009, pp. 2531-2537.

FORMAN (R. T. T.), ALEXANDER (L. E.). - Roads and their major ecological effects. - *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 29, 1998, pp. 207-231.

FORMAN (R. T. T.), SPERLING (D.), BISSONETTE J.A., CLEVENGER A.P., CUTSHALL C.D., DALE V.H., FAHRIG (L.), FRANCE (R.), GOLDMAN (C. R.), HEANUE (K.), JONES (J. A.), SWANSON (F. J.), TURRENTINE (T.), WINTER (T. C.). - Road ecology: science and solutions. - Washington : Island Press, 2003. - 424 p.

GAVIER-PIZARRO (G. I.), RADELOFF (V. C.), STEWART (S. I.), HUEBNER (C. D.), KEULER (N. S.). - Rural housing is related to plant invasions in forests of southern Wisconsin, USA. - *Landscape Ecology*, vol. 25, n°10, 2010, pp. 1505-1518.

GÉGOUT (J. C.), COUDUN (C.), BAILLY (G.), JABIOL (B.). - EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables. - *Journal of Vegetation Science*, vol. 16, n°2, 2005, pp. 257-260.

GELDREICH (P.) - Le traitement des chaussées au liant hydraulique : performance technique et environnementale. - *RenDez-Vous Techniques*, n°13, 2006, pp. 74-77.

GHAFFARIYAN (M. R.), STAMPFER (K.), SESSIONS (J.). - Optimal road spacing of cable yarding using a tower yarder in Southern Austria. - *European Journal of Forest Research*, vol. 129, n°3, 2010, pp. 409-416.

GODEFROID (S.), KOEDAM (N.) - The impact of forest paths upon adjacent vegetation: effects of the path surfacing material on the species composition and soil compaction - *Biological Conservation*, vol. 119,n°3, 2004, pp. 405-419.

GRANDJEAN (D.) - La conception de la desserte d'un massif dans le cadre de l'aménagement forestier. - *RenDez-Vous Techniques*, n°13, 2006, pp. 32-36.

GUMUS (S.), ACAR (H. H.), TOKSOY (D.). - Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting. - *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 142, n°1-3, 2008, pp. 109-116.

HONNAY (O.), VERHEYEN (K.), HERMY (M.). - Permeability of ancient forest edges for weedy plant species invasion. - *Forest Ecology and Management*, vol. 161, n°1-3, 2002, pp. 109-122.

JULVE (P.). - Baseflor. - http://perso.orange.fr/philippe.julve/catminat.htm. - 2011.

KUHMAN (T. R.), PEARSON (S. M.), TURNER (M. G.). - Agricultural land-use history increases non-native plant invasion in a southern Appalachian forest a century after abandonment. - *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestière*, vol. 41, n°5, 2011, pp. 920-929.

KÜHN (I.), DURKA (W.), KLOTZ (S.). - BiolFlor - a new plant-trait database as a tool for plant invasion ecology. - *Diversity and Distributions*, vol. 10, n°5-6, 2004, pp. 363-365.

MISSON (L.), DU BUS DE WARNAFFE (G.), JONARD (M.). - Effects of fertilization on the vascular ground vegetation of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Lieb.) stands. - *Annals of Forest Science*, vol. 58, n°8, 2001, pp. 829-842.

MULLEROVA (J.), VITKOVA (M.), VITEK (O.). - The impacts of road and walking trails upon adjacent vegetation: Effects of road building materials on species composition in a nutrient poor environment. - *Science of the Total Environment*, vol. 409, n°19, 2011, pp. 3839-3849.

OLIVEREAU (F.). - Le point sur l'inventaire floristique de la forêt d'Orléans. - *Recherches Naturalistes en Région Centre*, n°6, 1999, pp. 3-15.

PARENDES (L. A.), JONES (J. A.). - Role of light availability and dispersal in exotic plant invasion along roads and streams in the H. J. Andrews Experimental Forest, Oregon. - *Conservation Biology*, vol. 14, n°1, 2000, pp. 64-75.

PETERKEN (G. F.), FRANCIS (J. L.). - Open spaces as habitats for vascular ground flora species in the woods of central Lincolnshire, UK. - *Biological Conservation*, vol. 91, n°1, 1999, pp. 55-72.

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

PISCHEDDA (D.). - Evolution de l'exploitation forestière et actions de l'ONF. - *RenDez-Vous Techniques*, n°27-28, 2010, pp. 63-70.

PISCHEDDA (D.), BARTOLI (M.), CHANGON (J. L.). - Pour une exploitation respectueuse des sols, des systèmes complémentaires existent. - *RenDez-Vous Techniques*, n°19, 2008, pp. 34-42.

REED (R. A.), JOHNSON-BARNARD (J.), BAKER (W. L.). - Contribution of roads to forest fragmentation in the Rocky Mountains. - *Conservation Biology*, vol. 10, n°4, 1996, pp. 1098-1106.

SAUSSOL (J. N.), PINEAU (C.). - Biodiversité et infrastructures de transport terrestres. Service d'Etudes Techniques des routes et Autoroutes (SETRA), 2007. - 14 p.

SERA (B.). - Road-side herbaceous vegetation: life history groups and habitat preferences. - *Polish Journal of Ecology*, vol. 58, n°1, 2010, pp. 69-79.

SPELLERBERG (I. F.). - Ecological effects of roads and traffic: a literature review. - *Global Ecology and Biogeography*, vol. 7, n°5, 1998, pp. 317-333.

TINKER (D. B.), RESOR (C. A. C.), BEAUVAIS (G. P.), KIPFMUELLER (K. F.), FERNANDES (C. I.), BAKER (W. L.). - Watershed analysis of forest fragmentation by clearcuts and roads in a Wyoming forest. - *Landscape Ecology*, vol. 13, n°3, 1998, pp. 149-165.

TROMBULAK (S. C.), FRISSELL (C. A.). - Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. - *Conservation Biology*, vol. 14, n°1, 2000, pp. 18-30.

VANPEENE (S.), BIELSA (S.), BOMMEL (A.), GIGLEUX (M.). - Guide 3 : Prise en compte de la TVB dans les infrastructures linéaires de transport (ILT). Volet 1 : Orientations nationales concernant les projets nouveaux et la mise à niveau des infrastructures existantes. - Cemagref, SETRA, 2009 – 69 p.

VELDMAN (J. W.), PUTZ (F. E.). - Long-distance dispersal of invasive grasses by logging vehicles in a tropical dry forest. - *Biotropica*, vol. 42, n°6, 2010, pp. 697-703.

VON DER LIPPE (M.), KOWARIK (I.). - Long-distance dispersal of plants by vehicles as a driver of plant invasions. - *Conservation Biology*, vol. 21, n°4, 2007, pp. 986-996.

WATKINS (R. Z.), CHEN (J. Q.), PICKENS (J.), BROSOFSKE (K. D.). - Effects of forest roads on understory plants in a managed hardwood landscape. - *Conservation Biology*, vol. 17, n°2, 2003, pp. 411-419.

ZENNER (E.K.), BERGER (A.L.). - Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota, USA. - *Forest Ecology and Management*, vol. 256, n°10, 2008, pp. 1785-1794.

ZWAENEPOEL (A.), ROOVERS (P.), HERMY (M.). - Motor vehicles as vectors of plant species from road verges in a suburban environment. - *Basic and Applied Ecology*, vol. 7, n°1, 2006, pp. 83-93.

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

7. Tableaux

Tableau 1. Description détaillée des trois dispositifs expérimentaux.

	Étude 1	Étude 2	Étude 3
Publication	Avon *et al.* (2010)	Avon *et al.* (sous presse)	Bergès et al. (sous presse)
Date des relevés	2007	2010	2011
Zone d'étude	FD Montargis	FD Orléans (Ingrannes)	FD Orléans (Lorris)
Type de routes	Routes forestières empierrées avec réparation très ponctuelle en matériau calcaire	Routes forestières stabilisées avec des matériaux calcaires	Routes forestières stabilisées avec des matériaux calcaires ou en terrain naturel
Effets étudiés	- Distance à la route - Age du peuplement	- Distance à la route - Cloisonnement	- Route - Type de matériau de la route - Age du peuplement
Plan d'échantillonnage	20 transects perpendiculaires à la route, de 0 à 100 m, avec 5 distances à la route : banquette, 0, 5, 30 et 100 m	14 couples de transects perpendiculaires à la route, de 0 à 60 m, avec 8 distances : banquette, 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 60 m, sur et hors cloisonnement	30 couples route vs. forêt (situé à 30 m de la route)
Types de station	Luvisols : sols limoneux moyennement acides sur argiles à silex	Brunisols, planosols et luvisols : sols limono-sableux acides à très acides sur argiles sableuses à engorgement temporaire marqué	Luvisols : sols sablo-limoneux acides à très acides sur argiles sableuses à engorgement temporaire marqué
Types de peuplement	Chênaie sessiliflore avec sous-étage de charme : stade adulte (ancien taillis sous-futaie ou jeune futaie, > 90 ans) et stade gaulis-perchis (40-60 ans)	Futaie régulière de chêne sessile avec pin sylvestre en mélange (0-25 %) allant du stade régénération au stade fourré-gaulis (hauteur < 6 m)	Futaie de pin sylvestre ou pin laricio de hauteur comprise entre 1 et 6 m (jeune), 9 et 15 m (moyen) et > 20 m (âgé)
Nombre de placettes	100	224	60
Surface des relevés floristiques	100 m²	4 m²	2000 m²
Surface totale prospectée	1 ha	896 m²	12 ha
Flore inventoriée	Vasculaires et bryophytes terricoles	Vasculaires et bryophytes terricoles	Vasculaires
Nb total d'espèces	216	209	292

Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

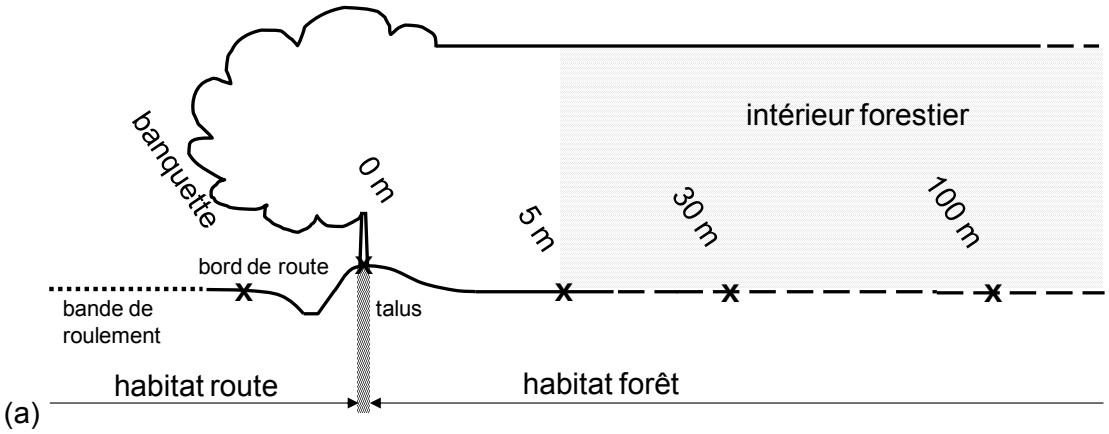
Tableau 2. Avantages et inconvénients des routes forestières pour la biodiversité floristique des bords de routes et des peuplements adjacents.

	Points positifs	Points négatifs
A- Bord de route		
Contribution à la biodiversité globale	- Richesse beaucoup plus élevée en bord de route - Présence d'espèces patrimoniales - Habitat refuge pour les cortèges d'espèces de prairie, de pelouses et de tonsures	- Présence d'espèces exotiques et potentiellement invasives - Baisse des bryophytes et de certaines forestières
Utilisation de calcaire pour la route	- Apport d'espèces basophiles, dont des espèces forestières	- Modification du pH du sol posant problème en contexte stationnel acide - Baisse des acidiphiles de milieu ouvert et acidiphiles forestières
B- Effet adjacent		
Contribution globale	-	- Diffusion des espèces non forestières en forêt - Repousse entre 5 et 20 m les espèces peu tolérantes aux perturbations fréquentes (forestières, sciaphiles, bryophytes)
Rôle de l'âge du peuplement	- Refuge - Source d'espèces forestières en peuplement âgé ou très âgé	- Effets ci-dessus plus forts dans les coupes de régénération et les stades jeunes
Rôle du cloisonnement	-	- Favorise la pénétration des cortèges d'espèces non forestières en forêt (20 à 60 m) - Chasse les forestières, les bryophytes et les acidiphiles (20 à 60 m)
Utilisation de calcaire pour la route	-	- Modification du pH du sol jusqu'à 5 m en contexte stationnel acide - Repousse les espèces forestières acidiphiles dans le peuplement

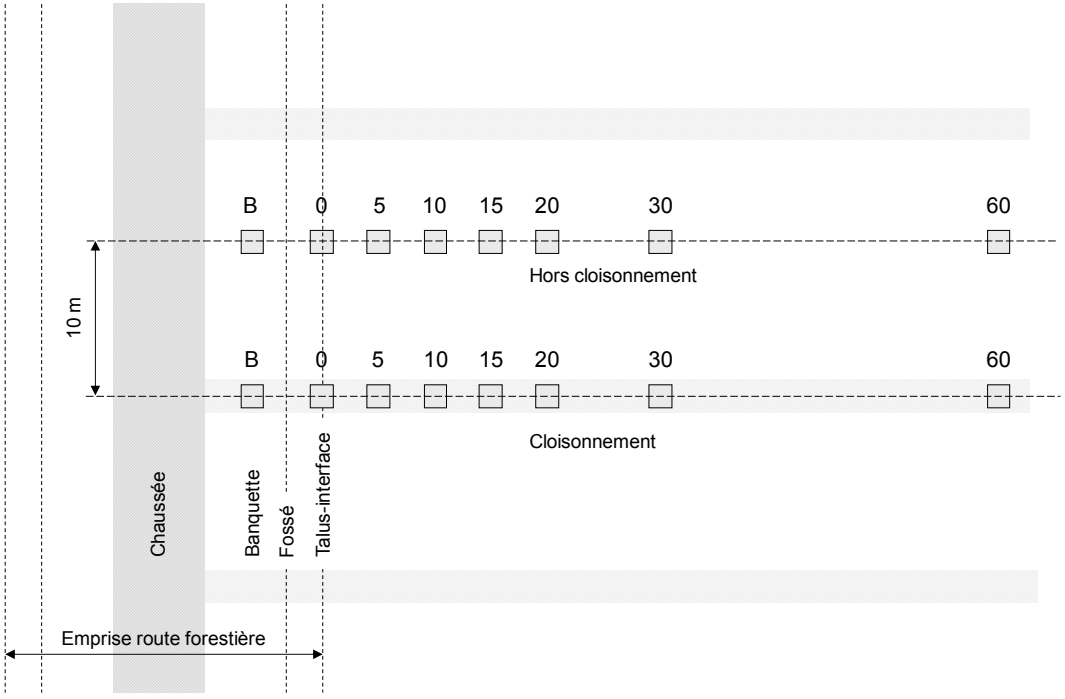
Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

8. Figures

Figure 1. Illustration des plans d'échantillonnage mis en place dans les études 1 et 2. (a) Étude 1 : transect perpendiculaire à la route depuis la route vers l'intérieur du peuplement avec localisation des 5 positions (banquette, 0, 5, 30 et 100 m), disposé en peuplements jeunes et âgés. La position "0 m" correspond à la lisière entre la route et le peuplement forestier. (b) Étude 2 : transects perpendiculaires à la route depuis la route vers l'intérieur du peuplement avec localisation des 8 relevés (banquette, 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 60 m) ; deux transects parallèles distants de 10 m ont été installés, l'un sur cloisonnement, l'autre hors cloisonnement.



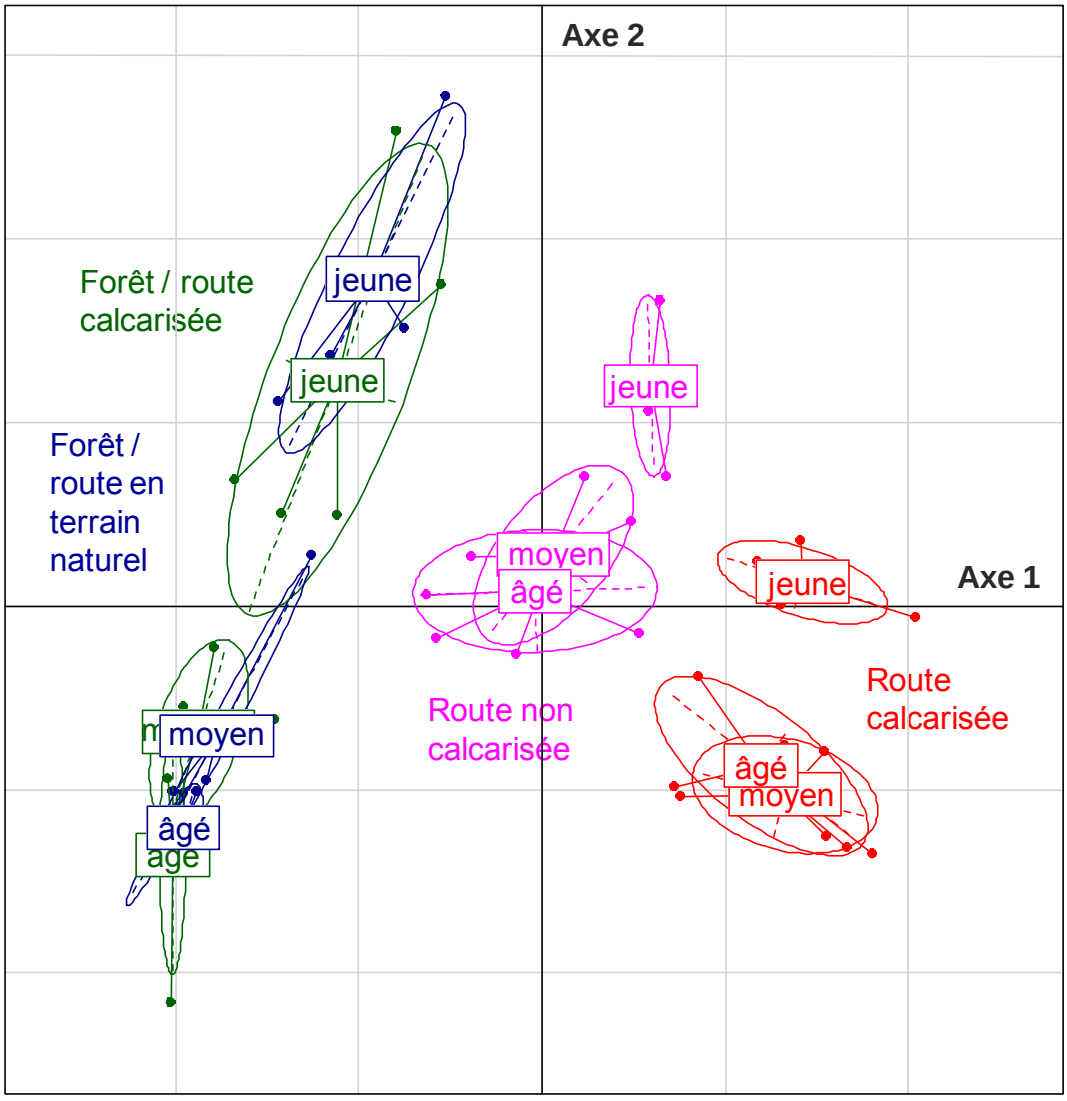
(a)



(b)

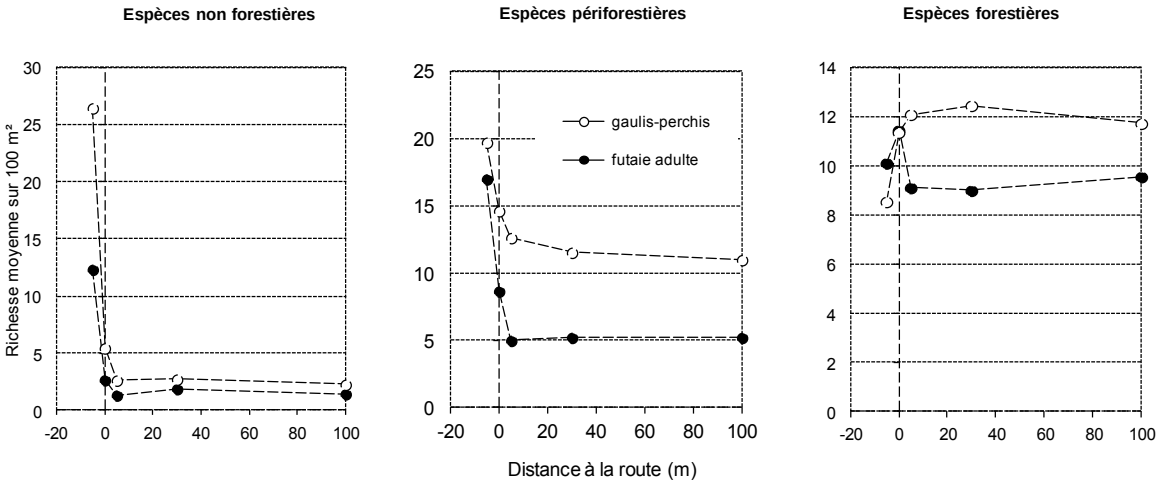
Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Figure 2. Graphe des relevés (étude 3) dans le plan factoriel (1,2) de l'ACC du tableau floristique en abondance-dominance (60 relevés x 182 espèces) répartis en 12 catégories croisant position par rapport à la route, type de substrat de la route et âge du peuplement forestier. Le premier axe oppose les bords de routes calcarisées à droite et les forêts à gauche, les routes en terrain naturel étant en position intermédiaire. Le second axe oppose les jeunes peuplements (route ou forêt) en haut et les peuplements moyens ou âgés en bas.



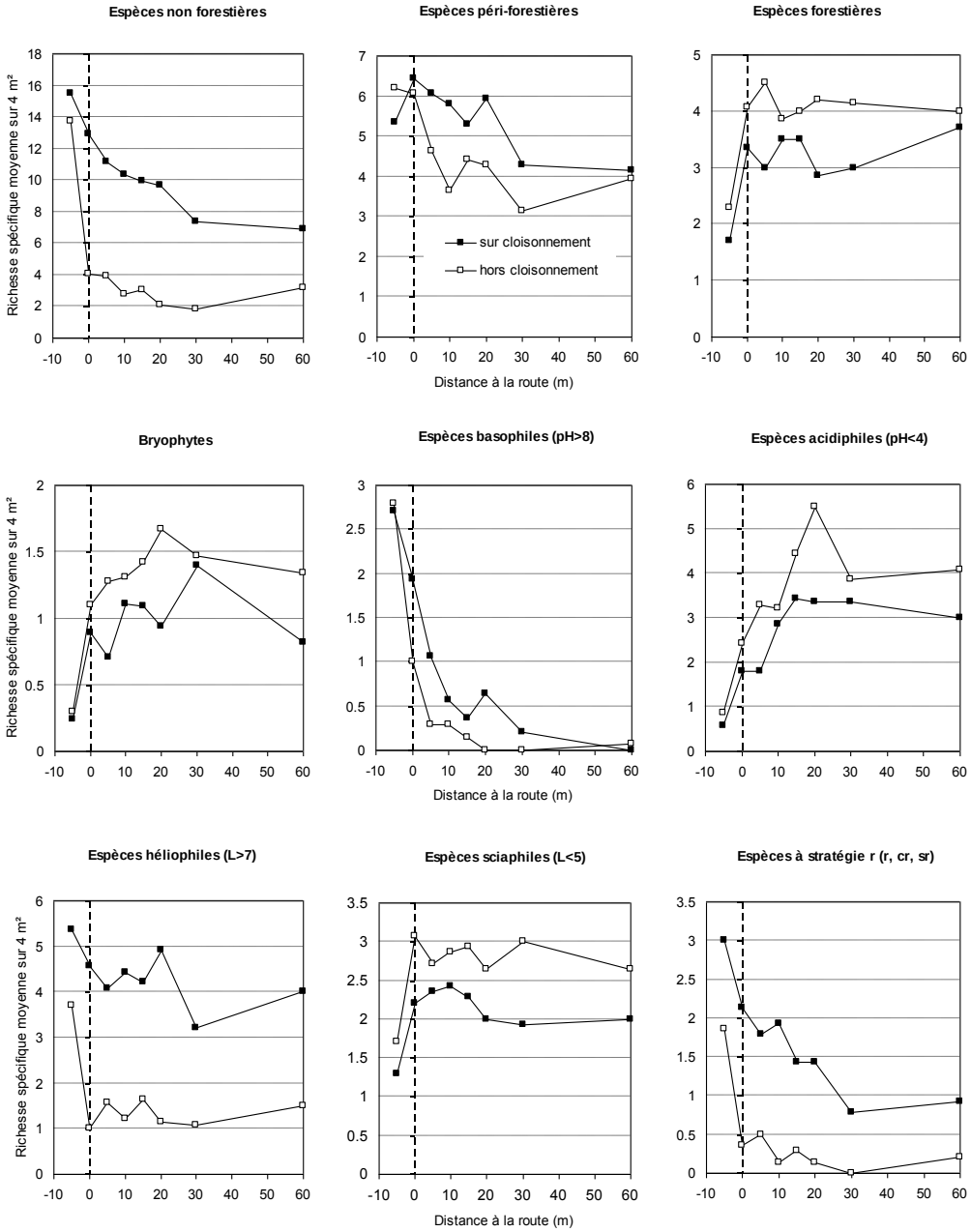
Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Figure 3. Variations de la richesse spécifique moyenne sur 100 m² des espèces non forestières, périforestières et forestières en fonction de la distance à la route forestière et de l'âge du peuplement en chênaie sessiliflore (étude 1). Les préférences d'habitats des plantes vasculaires sont basées sur Julve (2011). La distance 0 m correspond à la lisière entre l'emprise de la route et le peuplement forestier.



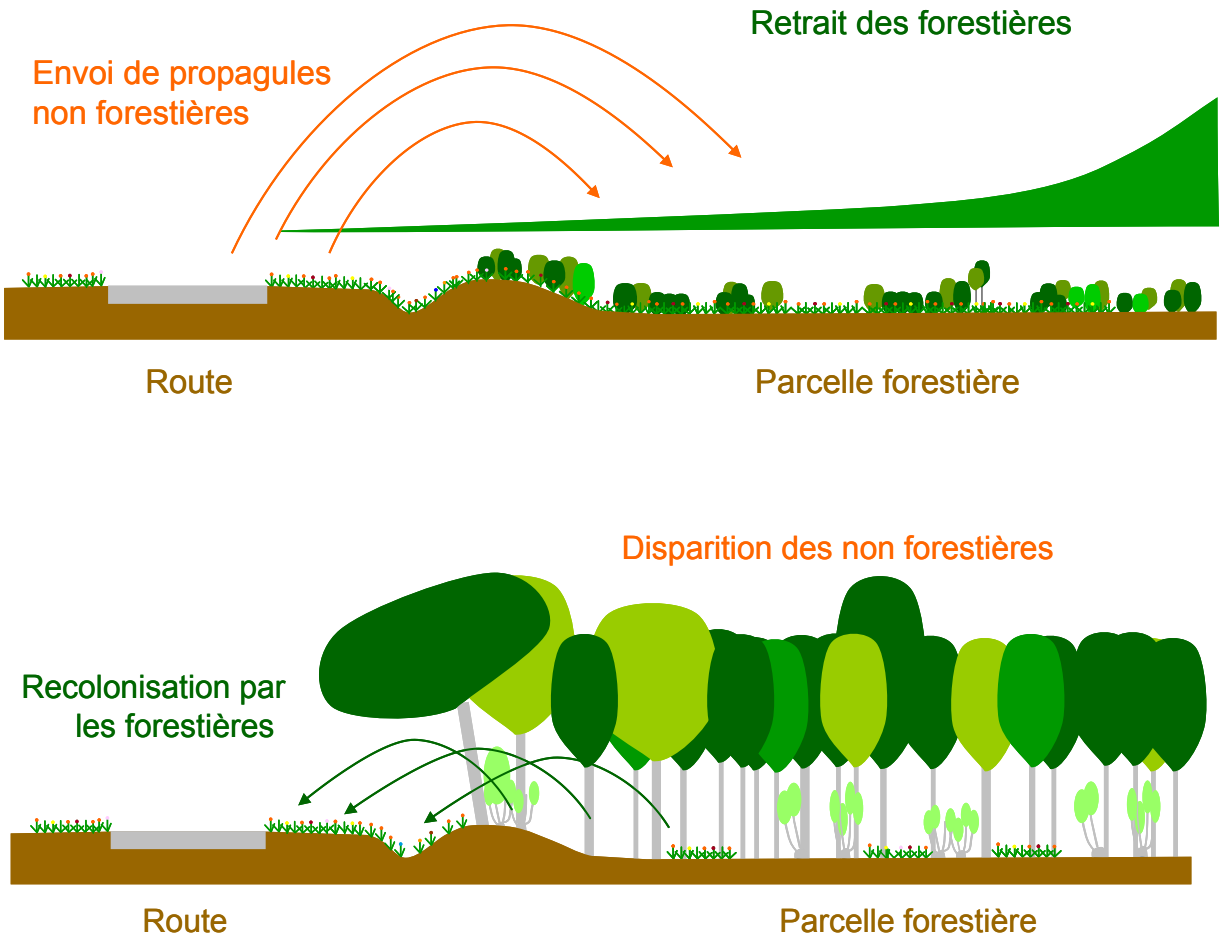
Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Figure 4. Variations de la richesse spécifique moyenne sur 4 m² pour neuf groupes fonctionnels en fonction de la distance à la route forestière et de la position par rapport au cloisonnement en chênaie sessiliflore de moins de 6 m de haut (étude 2) : espèces non forestières, périforestières, forestières (vasculaires uniquement), bryophytes, espèces basophiles, acidiphiles, héliophiles, sciaphiles et à stratégie de Grime de type r (rudéral). Les préférences d'habitat des espèces sont basées sur Julve (2011), l'exigence écologique sur les valeurs indicatrices d'Ellenberg ou d'Ecoplant (Gégout *et al.*, 2005) et la stratégie adaptative de Grime sur Biolflor (Kühn *et al.*, 2004). La distance 0 m correspond à la lisière entre l'emprise de la route et le peuplement forestier.



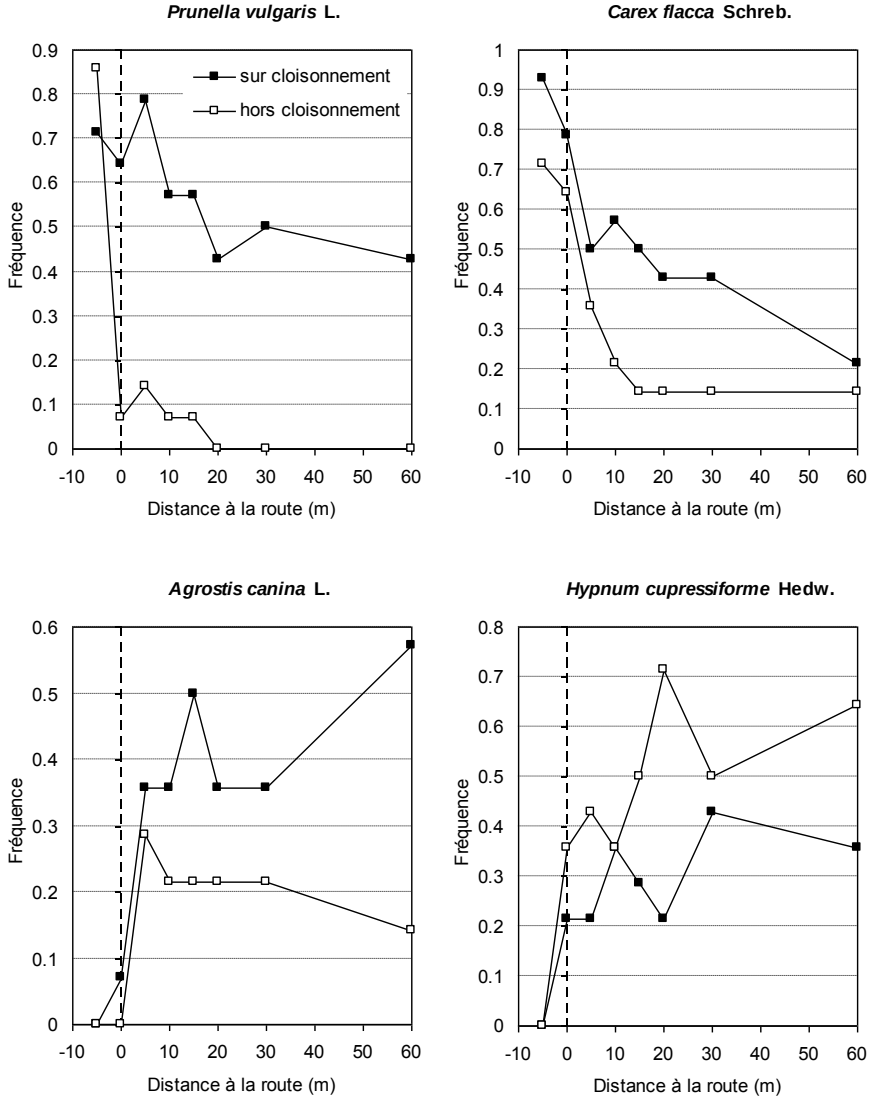
Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Figure 5. Dynamique de colonisation des espèces allant dans deux sens au cours du cycle sylvicole : de la route vers le peuplement adjacent pour les non forestières et du peuplement vers la route pour les forestières.



Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Figure 6. Profil de réponse de quatre espèces (fréquence) en fonction de la distance à la route forestière et de la position par rapport au cloisonnement en chênaie sessiliflore de moins de 6 m de haut (étude 2) : *Prunella vulgaris* L. et *Carex flacca* Schreb. montrent un gradient de pénétration depuis la route dans la parcelle et sont plus fréquentes sur le cloisonnement ; *Agrostis canina* L. évite la route et est plus fréquente sur cloisonnement et *Hypnum cupressiforme* Hedw. évite la route et est moins fréquente sur le cloisonnement.



Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

9. Photographies

Photo 1. Exemples de routes forestières échantillonnées : (a) route en terrain naturel en forêt domaniale de Montargis (photo : C. Avon) ; (b) route en terrain naturel en forêt domaniale d'Orléans (photo : R. Chevalier) et (c) route stabilisée avec des matériaux calcaires en forêt domaniale d'Orléans (photo : R. Chevalier).

(a)



(b)

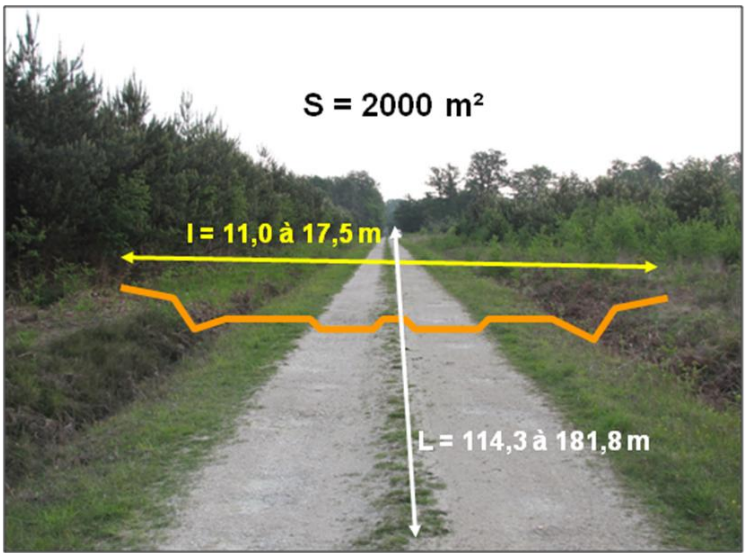


(c)



Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Photo 2. Localisation du relevé de végétation sur la route effectuée dans l'étude 3 (photo : R. Chevalier).



Author-produced version of the article published in Revue Forestière Francaise, 2012, 64, 4, 447-466.
Original publication available at http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752

Photo 3. Exemples d'espèces patrimoniales et néophytes rencontrées sur les routes forestières en forêt domaniale d'Orléans : (a) le Bugle de l'ouest (*Ajuga occidentalis*) est une espèce protégée et vulnérable en région Centre, inventoriée sur plusieurs emprises de routes forestières ; (b) Le Genêt d'Allemagne (*Genista germanica*) est une espèce protégée, en danger critique d'extinction en région Centre, rencontré sur deux routes non calcarisées ; (c) La Vergerette annuelle (*Erigeron annuus*) est une néophyte potentiellement invasive rencontrée sur une route calcarisée (photos : R. Chevalier).

(a) 

(b) 

(c) 