

METHODE D'EVALUATION DES EFFETS DES PROJETS ROUTIERS SUR LES ECOSYSTEMES POUR LE DEVELOPEMENT D'UN OUTIL DE PLANIFICATION

F. MALLARD & A. FARGIER

Département Infrastructure et Mobilité, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, France

FANNY.MALLARD@IFSTTAR.FR
AMANDINE.FARGIER@IFSTTAR.FR

RÉSUMÉ

Certaines modifications majeures des milieux naturels sont liées à la construction de routes, leur utilisation et leur gestion. Malgré le système juridique de protection, des espaces naturels continuent à être dégradés. En France, les évaluations environnementales interviennent relativement tard dans le processus de décision des projets routiers et leur contenu est basé sur des données qualitatives prenant encore peu en compte la notion d'écosystème. Ceci peut s'expliquer par l'absence d'outil d'évaluation synécologique par le manque d'indicateurs écosystémiques quantitatifs utilisables au stade opportunité des projets. À l'image des logiciels technico-économiques, un tel outil pourrait devenir un référentiel de planification et d'aménagement du territoire... La compréhension exhaustive des sources de perturbation, des modifications des conditions locales induites et des effets des projets routiers sur les milieux naturels est une étape préliminaire nécessaire pour développer des indicateurs écosystémiques pertinents. Une méthode d'évaluation synécologique des projets est conduite dans cet article, pour quatre types de milieux naturels : *Forêts ; Prairies et pelouses ; Lieux humides et rivages ; Cultures, champs et haies bocagères*. Les dysfonctionnements majeurs sont identifiés et fournissent des pistes pour la recherche d'indicateurs quantitatifs pertinents quant aux fonctions écologiques clés impactées. Un exemple est développé concernant la phase de construction.

1. INTRODUCTION

Presque tous les écosystèmes terrestres ont été et continuent à être bouleversés de façon considérable par les activités humaines [1]. Certaines modifications majeures sont liées à la construction des infrastructures routières, à leur utilisation et à leur maintenance. Les projets routiers affectent la structure, la dynamique du fonctionnement de l'écosystème, et ont des effets directs sur ses composantes, y compris en espèces animales et végétales. L'attention croissante des scientifiques sur les effets écologiques des routes a entraîné l'émergence d'une science : « l'écologie des routes » [2].

En France, la conduite de projet de construction routière (conception, réalisation) est encadrée par un processus juridique complexe impliquant des évaluations environnementales (études d'impacts, documents d'incidence Natura 2000 et au titre de la Loi sur l'eau). Les évaluations ont permis des progrès en matière de protection, mais elles n'ont pas suffi à enrayer la dégradation globale des milieux naturels. Dans les faits, elles abordent l'environnement les préoccupations anthropiques, ce qui signifie en priorité les impacts sur l'air et la santé, les nuisances sonores, les vibrations et le paysage. La partie concernant spécifiquement les milieux naturels est basée uniquement sur le système juridique de protection (sites Natura 2000, arrêtés de biotope,...) établis principalement sur la présence d'espèces rares.

En 2004, les sites naturels faisant l'objet de protections réglementaires représentaient 11,5 % du territoire mondial [3]. Ces zones apparaissent comme des îlots isolés dans une

« matrice » constituée d'autres écosystèmes, abritant un grand nombre d'espèces communes [4]. Un nombre croissant d'études souligne le rôle essentiel de ces dernières dans le fonctionnement des écosystèmes [5]. Des variations d'abondance des espèces communes peuvent conduire à des conséquences importantes [6]. Ainsi, ces protections juridiques ne sont pas nécessairement indicatrices d'un intérêt écologique majeur des sites. De plus, les évaluations se basant seulement sur des inventaires de faune et flore spécialisés, ne tiennent pas compte de la complexité des systèmes écologiques. Elles sont donc par essence incomplètes.

L'aménagement des infrastructures et la préservation de la biodiversité, doivent donc se penser en cohérence et de manière précoce dans le processus de décision afin que toutes les alternatives soient encore discutables. Le maintien de la biodiversité passe par une protection qui ne se limite pas seulement aux populations menacées mais qui considère le système dans sa totalité, c'est-à-dire un ensemble interactif d'organismes vivants exploitant un habitat naturel. Les raisons de l'insuffisance des évaluations sont entre autre un manque de compétences techniques, d'accessibilité des notions d'écosystèmes, liées à l'absence d'outils pratiques d'aide à la décision.

Des logiciels d'évaluation technico-économique sont disponibles au niveau international pour décider de l'opportunité des projets routiers, comme le logiciel HDM-4 [7]. À ce stade, il n'existe pas d'outil comparable concernant l'ensemble des enjeux environnementaux. Seuls des éco-comparateurs basés sur l'analyse du cycle de vie, tel le logiciel Eco-COMparateur Routes Construction Entretien (ECORCE) sont développés [8] mais sans intégrer les impacts sur les milieux naturels.

Les écosystèmes sont des systèmes complexes. La compréhension de l'ensemble des effets des projets routiers sur les milieux naturels est donc une étape indispensable pour développer un outil d'évaluation. Cet outil doit s'appuyer sur des indicateurs quantitatifs pertinents vis à vis des fonctions écologiques clés. Or, à ce jour, il n'existe pas d'études prenant en compte la totalité des effets durant les différentes phases d'un projet routier sur l'ensemble des cibles écosystémiques.

Cet article présente une méthode d'évaluation des dysfonctionnements écosystémiques majeurs induits par les projets routiers afin d'identifier les indicateurs quantitatifs nécessaires à l'outil d'évaluation. Elle est appliquée à quatre types de milieux naturels courants. Les résultats servent à identifier des pistes pour le développement d'indicateurs de sensibilité écologique. Une des pistes est exploitée jusqu'à un exemple d'indicateur.

2. MÉTHODE

2.1. Principe de l'outil d'évaluation

Pour tout projet de liaison routière entre les points X et Y, différents types de milieux naturels, présentant des sensibilités différentes aux perturbations générées par le projet d'infrastructure routière, sont susceptibles d'être traversés (par exemple, les milieux A, B, C et D sur la Figure 1).

Afin d'évaluer de façon quantitative les effets d'un projet donné, l'aire d'étude doit être divisée en cellules élémentaires (maillage). La sensibilité des différents types de milieux naturels est fonction de leur vulnérabilité et de leur rareté [9]. Le coût écologique total (TEC) d'un projet donné est fourni par la formule :

$$TEC = \sum_{i=1}^n c_i S e_i$$

Dans laquelle $S e_i$ est l'indicateur de sensibilité du milieu i et c_i est le nombre de cellules du milieu i traversées par le tracé du projet (estimation de la longueur parcourue dans le milieu i par un Système d'Information Géographique).

Les TEC des variantes de tracé plus ou moins respectueuses des milieux les plus sensibles (Se_i) et plus ou moins longues (c_i) peuvent être comparés (trait plein, tireté, pointillé sur la Figure 1).

Le TEC n'est pas une monétarisation. Il est défini comme étant la valeur estimée de la sensibilité du fonctionnement des différents types d'écosystèmes, fondée sur la comparaison entre son état pré et post projet d'infrastructure de transport terrestre.

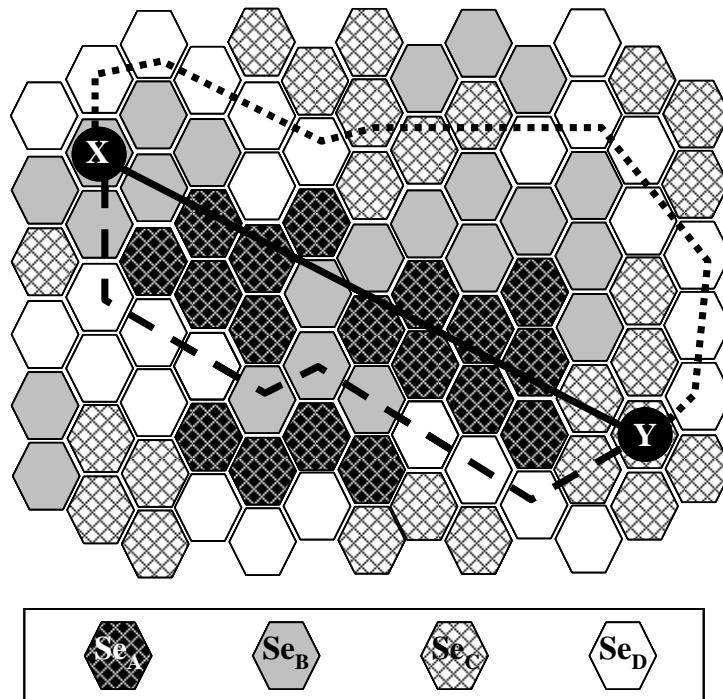


Figure 1. Variantes de tracés entre X et Y dans une aire d'étude maillée.

2.2. Approche Pression-État-Réponse

La méthode d'évaluation synécologique développée dans cette étude est une première étape pour la création d'un outil permettant de choisir un tracé de route à moindre coût écologique au stade d'étude d'opportunité des projets.

La démarche s'inscrit dans le modèle PER [10] dans lequel les indicateurs sont répartis en trois catégories : pression (P) – état (E) – réponse (R) (Figure 2). Les activités des phases, sources de perturbation engendrent des pressions sur l'environnement local dont l'état est modifié. En réponse, les acteurs (réalisateurs, financeurs, gestionnaires) réagissent en intervenant sur les perturbations pour modifier les pressions sur le milieu.

Les indicateurs de sensibilité doivent permettre de représenter les dysfonctionnements écosystémiques majeurs. Ils permettront de rechercher des indicateurs quantifiables pertinents pour évaluer ces dysfonctionnements. Les indicateurs de réponse permettront de déterminer les mesures d'insertion les plus adaptées, notamment, les mesures préventives agissant directement sur les sources de perturbation. Ces mesures sont les plus pertinentes car il est plus difficile de restaurer un milieu naturel que de continuer à le conserver.

Les effets observés sur les milieux naturels sont généralement complexes et résultent d'une combinaison de perturbations. À chaque stade de vie de la route, ceci implique donc d'identifier de façon exhaustive les sources de perturbations de diverses natures produisant des effets spécifiques sur le fonctionnement des écosystèmes.

Pour chaque milieu naturel, un croisement est réalisé entre les phases de vie d'un projet routier type et les caractéristiques d'un milieu naturel afin d'analyser les effets potentiels de la route sur ce milieu. Il s'agit d'analyser les effets des sources de perturbations sur

chaque cible écosystémique : *micro-climat, eaux superficielles, souterraines, sol, flore, faune du sol et faune terrestre* (Figure 2).

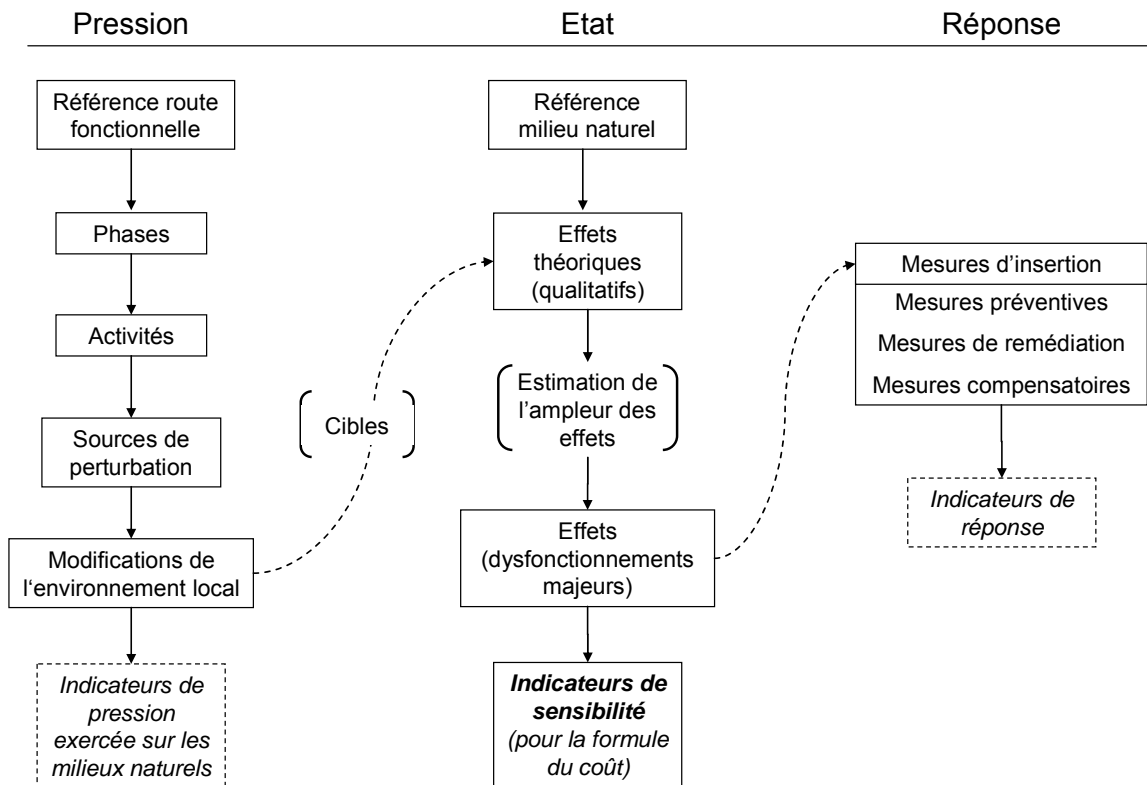


Figure 2. Méthode d'analyse des effets de la route et de recherche d'indicateurs.

La référence milieu naturel est déterminée par un bon état écologique avec un maximum d'attributs vitaux, une grande surface, un paysage à dénivelé topographique et non affecté par des perturbations anthropiques autres que celles de la route.

La référence route est déterminée par les opérations minimales pour obtenir une route fonctionnelle excluant les aménagements de compensation actuellement intégrés aux infrastructures routières (revégétalisation, clôtures et passages à faune,...). Ceci donne ainsi l'opportunité de repenser complètement les mesures d'insertion et donne l'opportunité d'innovation.

Les dimensions des effets sont ensuite considérées avec les variables Dt , Ds , Dv , Di :

- Dt la dimension temporelle établie en lien avec l'évolution des successions végétales après perturbation jusqu'au climax. Le climax désigne un groupement vers lequel tend la végétation d'un milieu dans des conditions naturelles constantes, en l'absence d'intervention anthropique : par exemple, au bout de 5 ans un sol nu de pré de fauche est recouvert par une friche, à 20 ans par une lande et à 50 ans par une forêt [11].
- Ds la dimension spatiale, propagation de l'effet sur une surface elliptique,
- Dv le degré de vraisemblance ou degré d'occurrence, probabilité de la réalisation de l'effet,
- Di le niveau d'intensité de l'effet, par exemple le niveau sonore subi.

L'agrégation des variables Dt , Ds , Dv , Di normé par leurs valeurs maximales représente un indice représentatif de l'ampleur (An) de chaque effet. L'ampleur des dysfonctionnements de l'écosystème inscrite entre 0 et 1, permet de hiérarchiser les effets majeurs et de déterminer par la suite des « indicateurs de sensibilité ».

2.3. Milieux naturels étudiés

Les milieux naturels terrestres sont définis par des unités typologiques de parenté physiologique de groupements végétaux, et par les éléments du paysage facilement identifiables [12].

A l'échelle de la climatologie mondiale, la France métropolitaine est découpée en 3 grandes zones de climat : climat méditerranéen, océanique et montagnard. A l'échelle nationale, la France est subdivisée par des zones climatiques plus fines correspondant aux domaines biogéographiques définis dans la base de données Natura 2000. Cette multitude de climat associée à la diversité des reliefs et de types de sols de la France métropolitaine se caractérise par une grande richesse botanique et donc une grande richesse d'habitats retrouvables à travers le monde : des lichens et des mousses de type arctique et alpin à des espèces semi-tropicales comme les oliviers et les orangers,....

La typologie des milieux terrestres adoptée dans cette étude est une compilation de données de Corine Biotopes [13] et du guide des milieux naturels de Suisse [12]. Parmi ces milieux, quatre d'entre eux ont été analysés dans notre étude : 1) Forêts, 2) Rivages et lieux humides, 3) Pelouses et prairies et 4) Champs, cultures, haies bocagères.

Les forêts regroupent les forêts inondables, de feuillus, de conifères et de tourbières. Les rivages et lieux humides rassemblent la végétation de rivages, les bas marais, les prairies humides, les tourbières. Les pelouses et prairies sont constituées par la végétation naturelle et artificielle de pelouses sèches, prairies grasses et friches à graminées. Les champs, cultures, haies bocagères sont l'association de tous les types de cultures en passant des plantes ligneuses aux plantes herbacées jusqu'aux haies entourant ces agrosystèmes.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Inventaire des modifications

Chaque phase de vie de la route, soit la construction (*P1*), l'exploitation (*P2*) et la maintenance (*P3*), est décrite par une série d'actions (nommées activités), permettant son accomplissement (*A1* à *A8*). Chaque activité peut être source de perturbation (*S1* à *S18*), de modification des conditions de l'environnement local (*M1* à *M93*) (Tableau I à III).

3.1.1. Phase de Construction

La phase de construction se caractérise par un enchaînement de 4 activités générant 12 sources de perturbation des conditions locales d'environnement. Ceci est à l'origine d'une série de 65 modifications potentielles de l'environnement local. La production de bruit et vibrations, l'émission de poussières et particules, le risque de fuites d'hydrocarbures, les déplacements de véhicules, sont des modifications typiques de la préparation des terrains. Il en est de même pour l'activité suivante, auquel s'ajoute notamment la pollution lumineuse due aux aires de vie et bases techniques. Les travaux de terrassement introduisent en particulier des perturbations liées aux modifications topographiques et au traitement éventuel des sols. La mise en place de la structure de chaussée induit des modifications potentielles liées aux émissions de produits hydrocarbonés (liquides et gazeux) dues aux matériaux et aux engins. Enfin, le nouvel ouvrage routier induit des modifications de perméabilité, d'absorption du rayonnement solaire et d'occupation du sol, du fait du changement d'affectation de cette portion du territoire.

Tableau I. Activités, sources de perturbation et modifications en phase construction.

Activités	Sources	Modifications de l'environnement local
A1 Préparation du terrain pour l'infrastructure	S1 Rabattement de la nappe phréatique à l'aide de pompe	M1 Assèchement des sols M2 Bruit et vibrations par les engins de forage et de pompage M3 Fuites d'hydrocarbures (engins de forage et de pompage) M4 Émissions de particules fines (principalement métaux lourds) par les engins M5 Engins de forage et de pompage mobiles (vitesse lente)
	S2 Evacuation des eaux superficielles par des drains verticaux	M6 Assèchement des sols M7 Bruit et vibrations par les pelles (création de tranchées) M8 Fuites d'hydrocarbures par les pelles M9 Émissions de particules fines (principalement métaux lourds) par les pelles M10 Pelles mobiles (vitesse lente)
	S3 Déboisement Défrichage	M11 Destruction linéaire des arbres et arbustes M12 Copeaux de bois issus de la coupe M13 Bruit et vibrations par les engins de coupe M14 Poussières par les engins de coupe M15 Fuites d'hydrocarbures par les engins de coupe M16 Émissions de particules fines (principalement métaux lourds) par les engins de coupe M17 Engins de coupe mobiles (vitesse moyenne)
	S4 Décapage de la terre végétale	M18 Mise à nu du sol (décapage des couches riches en matière organique) M19 Bruit et vibrations par les engins de décapage M20 Poussières par les engins de décapage M21 Fuites d'hydrocarbures par les engins de décapage M22 Émissions de particules fines (principalement métaux lourds) par les engins de décapage M23 Engins de décapage mobiles (vitesse moyenne)
A2 Installation de l'aire de vie et de la base de chantier sur environ 1 ha (après réalisation de A1)	S5 Gravillonnage, bétonnage et géomembranes	M24 Couverture artificielle de la surface du sol M25 Bruit et vibrations par les engins d'installation de la base de chantier M26 Poussières par les engins d'installation de la base de chantier M27 Fuites d'hydrocarbures par les engins d'installation de la base de chantier M28 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins d'installation de la base de chantier M29 Engins d'installation de la base de chantier mobiles (vitesse moyenne)
	S6 Fonctionnement de l'aire de vie et de base de chantier	M30 Lumière artificielle des projecteurs et cycle jour/nuit modifié M31 Eaux usées (eaux grises, eaux noires) M32 Rejets de déchets solides : emballages putrescibles (plastiques, cartons, métal, verre,...) M33 Risque de fuites de produits nocifs : rejets d'hydrocarbures (huiles et essences), de solvants, de liants (béton et ciment),...
A3 Terrassement	S7 Déblais	M34 Modification de la topographie : abaissement des courbes de niveau M35 Bruit et vibrations par les engins d'extraction des matériaux M36 Poussières dues au fonctionnement des engins M37 Fuites d'hydrocarbures par les engins d'extraction M38 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins d'extraction M39 Bruit et vibrations issus de l'utilisation d'explosifs M40 Poussières issues de l'utilisation d'explosifs M41 Particules grossières issues de l'utilisation d'explosifs
	S8 Remblais	M42 Modification de la topographie : relèvement des courbes de niveau M43 Bruit et vibrations par les engins de remblais M44 Poussières issues du fonctionnement des engins

Activités	Sources	Modifications de l'environnement local
		M45 Fuites d'hydrocarbures par les engins de remblais M46 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins de remblais
	S9 Circulation d'engins entre les ateliers	M47 Bruit et vibrations par les engins de transport M48 Poussières par les engins de transport M49 Fuites d'hydrocarbures par les engins de transport M50 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins de transport M51 Engins de transport mobiles (vitesse moyenne)
	S10 Traitements des sols (ciment, chaux)	M52 Apport de particules fines réactives (liants) M53 Bruit et vibrations par les engins de traitements M54 Poussières par les engins de traitements M55 Fuites d'hydrocarbures par les engins de traitements M56 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins de traitements M57 Engins de traitements mobiles (vitesse moyenne)
A4 Installation de la chaussée	S11 Dépôt d'une couche de bitume	M58 Émissions liquides d'hydrocarbures par le bitume M59 Émissions de gaz légers (hydrocarbure, HAP,...) M60 Bruit et vibrations par les engins de chaussée M61 Fuites d'hydrocarbures par les engins de chaussée M62 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins de chaussée
	S12 Chaussée en place	M63 Imperméabilité de la surface de la couche de roulement M64 Absorption du rayonnement solaire par le corps noir de la couche de roulement M65 Occupation du sol par l'infrastructure

3.1.2. Phase d'exploitation

Cette phase ne se caractérise que par deux sources de perturbation (S13 et S14) et 9 modifications potentielles des conditions locales d'environnement. Il s'agit notamment du déversement des produits divers à partir des véhicules en circulation, par des risques nouveaux de départs de feu, des véhicules eux-mêmes en déplacement à grande vitesse, et la production de bruit, vibrations, pollution lumineuse associées.

Tableau II. Activités, sources de perturbation et modifications en phase exploitation.

Activités	Sources	Modifications de l'environnement local
A5 Trafic routier par les usagers	S13 Passage de véhicule	M66 Véhicule mobile (vitesse rapide) M67 Véhicules mobiles lumineux en phase nocturne M68 Bruit et vibrations des véhicules M69 Fuites d'hydrocarbures et résidus d'usures de pneus des véhicules M70 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds des véhicules M71 Déchets solides jetés par les usagers de la route
	S14 Accidents	M72 Déversement de produits dangereux transportés M73 Déversement d'hydrocarbures (chargement des camions) M74 Incendie accidentel

3.1.3. Phase de maintenance

Cette phase ne se caractérise que par trois activités (A6 à A8), quatre sources de perturbation et 19 modifications potentielles des conditions locales. Celles-ci consistent en particulier en la réduction des végétaux par des moyens mécaniques ou chimiques et les nuisances connexes que ces opérations produisent. L'entretien hivernal induit des modifications liées au déneigement, à l'emploi de produits déverglaçants ou abrasifs, et aux perturbations liées au fonctionnement des machines. Les modifications liées à

l'entretien de la couche de roulement sont de même nature que celles liées à sa mise en place (A4).

Tableau III. Activités, sources de perturbation et modifications en phase maintenance.

Activités	Sources	Modifications de l'environnement local
A6 Entretien des dépendances vertes	S15 Entretien mécanique : Coupe (tonte, élagage)	M75 Réduction de la taille des végétaux M76 Bruit par les engins de taille M77 Engins de taille mobiles (vitesse moyenne) sur les talus
	S16 Entretien chimique : Herbicide et inhibiteurs de croissance	M78 Apport de molécules chimiques d'herbicides M79 Apport de molécules chimiques d'inhibition de la croissance végétale M80 Engins de traitements chimiques mobiles à vitesse lente sur les talus
A7 Entretien hivernal de la chaussée	S17 Déneigement et déverglçage	M81 Apport de sel (référence NaCl) M82 Apport de sable M83 Déneigement M84 Bruit et vibrations des chasses neige M85 Fuites d'hydrocarbures des chasses neige M86 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds des chasses neige M87 Chasses neige mobiles (moyenne vitesse)
A8 Entretien structurel	S18 Entretien de la couche de roulement (fraisage)	M88 Émissions liquides d'hydrocarbures par l'enrobé neuf M89 Émissions de gaz d'hydrocarbures légers par l'enrobé neuf M90 Bruit et vibrations liés au fraisage M91 Fuites d'hydrocarbures par les engins de fraisage M92 Émissions de particules fines principalement de métaux lourds par les engins de fraisage M93 Lumière artificielle des projecteurs en travail de nuit

3.2. Inventaire des effets

Milieu par milieu, les effets de la route sont analysés de manière déductive à partir du fonctionnement écosystémique, en s'appuyant sur les connaissances publiées disponibles en écologie fondamentale et appliquée.

3.2.1. Distribution des effets selon les milieux naturels

La répartition de la fréquence relative des valeurs de An (avec un pas de 0,1) montre l'exhaustivité de la méthode (Figure 3). La méthode prend bien en compte tout le panel des effets de la route sur les milieux naturels allant jusqu'aux plus petits effets. Ces effets minimes peuvent s'accumuler au cours du temps et entraîner des conséquences sur les écosystèmes : par exemple, à un certain seuil critique, les hydrocarbures ne peuvent plus être auto-épurés par le milieu naturel. Il est important de les considérer dans la recherche d'indicateurs.

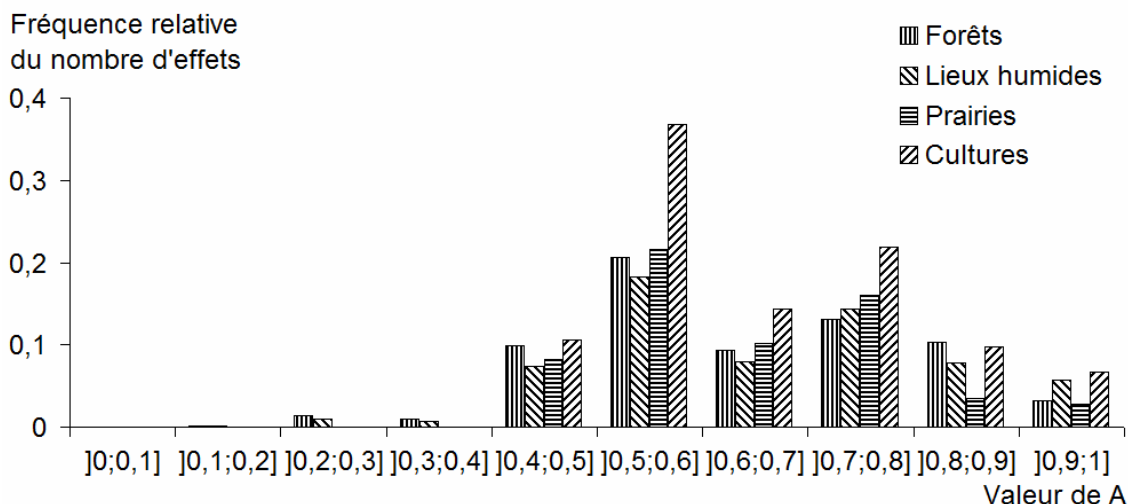


Figure 3. Fréquence relative du nombre d'effets selon les classes *An* et par milieu naturel.

3.2.2. Similarité de sensibilité entre les milieux naturels

Sur le graphique de l'Analyse en Composantes Principales (fig. 4a), les variables (milieux naturels) sont projetées sur un plan factoriel vers le bord du cercle de rayon unité : elles sont bien représentées. Le cercle représente la corrélation entre les valeurs *An* des milieux naturels. L'axe F1 est représenté par la variable Forêts (contribution 27%) et l'axe F2 par Prairies (contribution de 35%). Les variables *Cultures* et *Prairies* forment un groupe de corrélation ($\rho = 0,72$), *Lieux humides* et *Forêts* un autre groupe ($\rho = 0,75$) confirmé par la classification ascendante hiérarchique (fig. 4b).

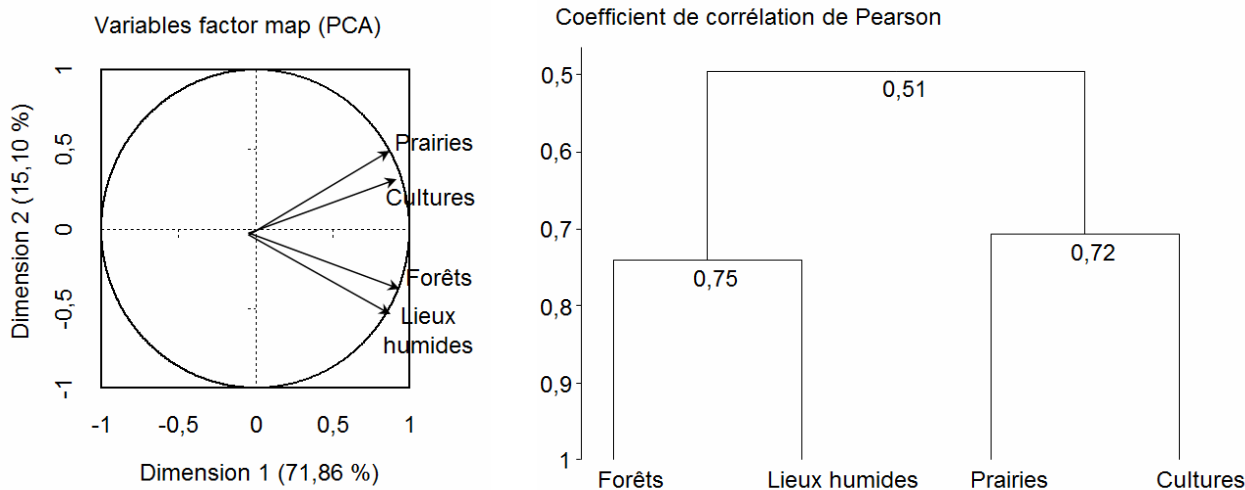


Figure 4. Projection des variables « milieux naturels » sur le cercle de corrélation de l'ACP (fig. 4a) et Classification à ascendante hiérarchique (fig. 4b).

3.2.3. Répartition des effets par phases

Les graphiques en radar représentent la distribution des valeurs de *An* par phases dans le sens chronologique du déroulement des projets routiers. La phase *construction* correspond au secteur en blanc, la phase *exploitation* secteur en gris clair et la phase *entretien* en gris foncé (Figure 5).

D'un point de vue général, les forêts et les lieux humides se distinguent par un plus grand nombre de dysfonctionnements réparti dans les trois phases de vie de la route (*Forêts* 8%, *Lieux humides* 5,9%, *Prairies* 3,4%, *Cultures* 3,9%). La visualisation de la répartition des effets au cours des phases confirment les groupes de similarité des dysfonctionnements

Forêts-Lieux humides et Prairies-Cultures. Les graphiques en radar permettent d'analyser en détails ces groupes de similarité (Figure 5).

Les valeurs de An des sources de perturbation $S1$ *Rabattement de la nappe phréatique et* $S2$ *Evacuation des eaux superficielles* ne sont pas opérantes vis-à-vis des milieux naturels prairies et les cultures, expliqué par le choix de la typologie des milieux naturels (Figure 5).

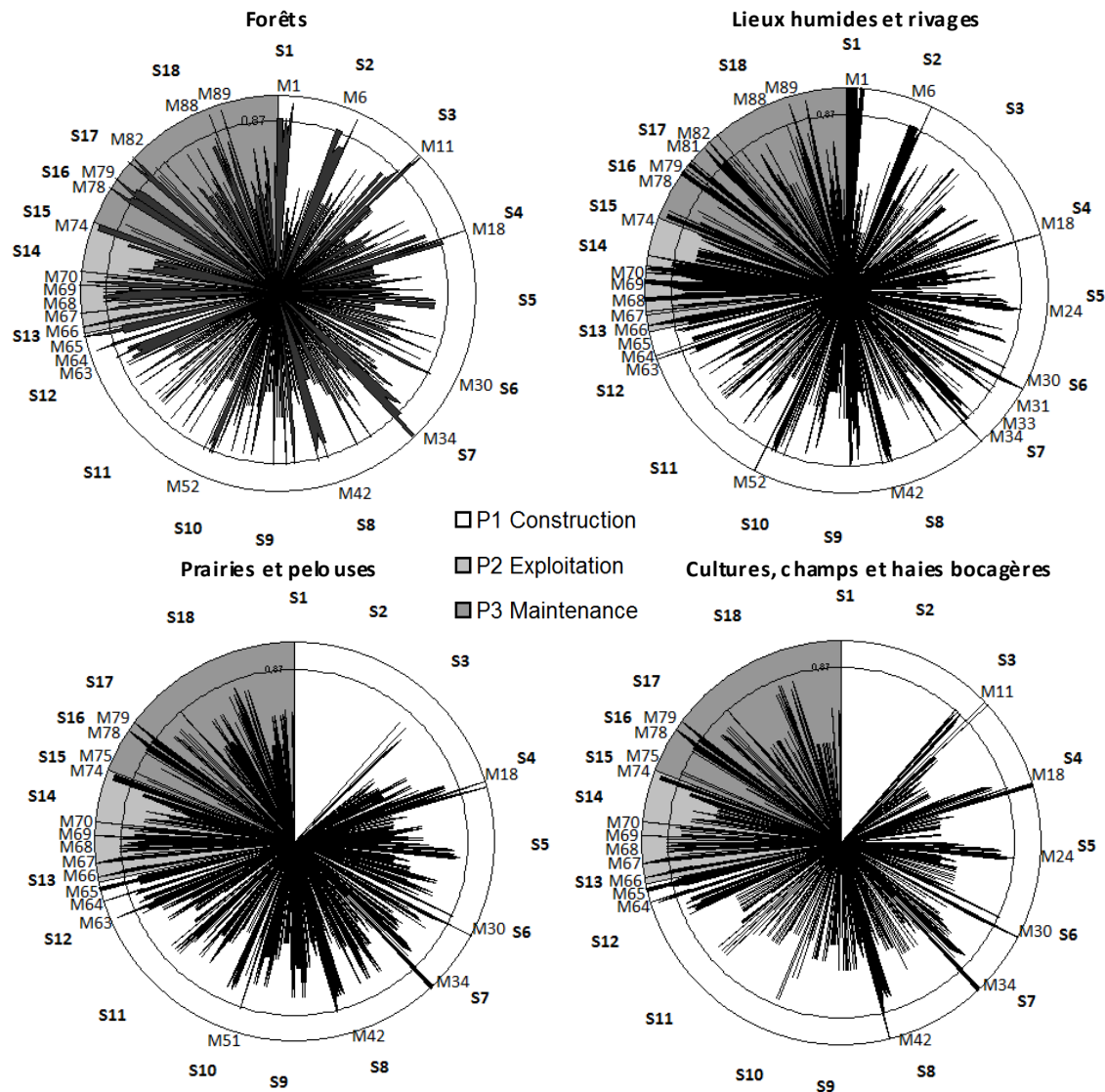


Figure 5. Graphiques radar présentant les valeurs de An en fonction des 817 effets par milieu naturel.

3.3. Identification des effets majeurs

Le seuil des dysfonctionnements écosystémiques majeurs est déterminé par les valeurs de $An \geq 0,87$. Ce seuil est déterminé pour extraire environ 10% de la totalité des effets et pour exclure les valeurs faibles des variables Dt , Dv , Ds , Di .

Les $An \geq 0,87$ sont associées aux grandes phases, aux sources de perturbation de la route (S_i) et aux modifications des conditions environnementales (M_i) (Figure 6).

3.3.1. Phase de Construction

Durant la préparation du terrain, parmi les dysfonctionnements majeurs, les sources de perturbation *rabattement de la nappe phréatique* ($S1$) et *évacuation des eaux superficielles* ($S2$) peuvent affecter la plupart des cibles écosystémiques des lieux humides (pics épais). Si l'écosystème est entièrement atteint cela peut conduire à la destruction quasi-totale du milieu naturel. Le constat en forêts est assez semblable. Le

déboisement et défrichage (S3) atteint spécifiquement les cultures et forêts. Le *décapage de la terre végétale* (S4) touche les quatre milieux. Le sol technique de l'aire de vie et de la base de chantier (S5 M24) affecte les lieux humides et les cultures en détruisant des connexions biologiques. Le *fonctionnement de la base de chantier* (S6) produit des pollutions provenant des déversements d'eau usée (M31), et induit des risques de fuites de produits nocifs (M33) affectant principalement les lieux humides. Durant le terrassement (déblais S7 et remblais S8) des dysfonctionnements apparaissent dans les quatre milieux. La *circulation des engins* (S9), vecteur d'espèces végétales exogènes, modifie les lieux humides et les prairies. Le *traitement des sols à la chaux ou ciment* (S10) atteint les lieux humides et forêts. *L'infrastructure seule* (S12) modifie la température (M64) et l'occupation du sol (M65) dans les quatre milieux. Pour S12, les forêts et lieux humides se distinguent par une autre modification : l'imperméabilité de la couche de roulement (M63).

3.3.2. Phase d'exploitation

Les sources de perturbation du *trafic routier* (S13 et S14) touchent les quatre milieux, sans distinctions de modifications spécifiques entre eux.

3.3.3. Phase de Maintenance

Les entretiens chimiques par herbicides et inhibiteurs de croissances (S16) perturbent tous les milieux. *L'entretien mécanique par coupe* (S15) atteint les prairies et les cultures. *L'entretien hivernal* (S17) affecte nettement les milieux forêts et lieux humides. L'enrobé neuf (S18) est source d'hydrocarbures (M88-89) pouvant se propager à travers la chaîne alimentaire des écosystèmes humides et forestiers.

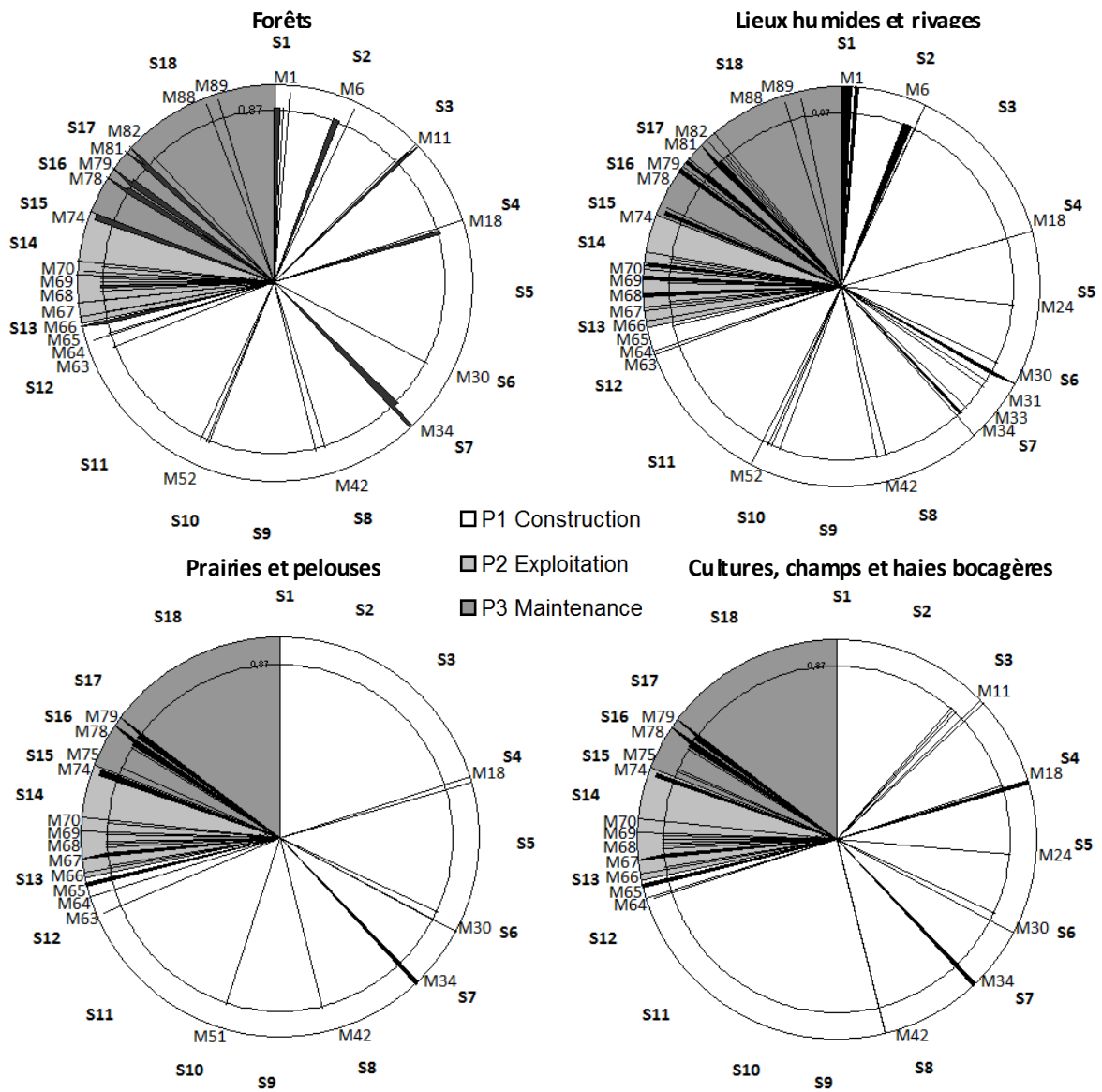


Figure 6. Graphiques radar présentant les valeurs de $An \geq 0,87$ en fonction des effets par milieu naturel.

3.4. Cibles potentielles

Le Tableau IV représente, pour chaque type de cible (microclimat – Mc ; eaux superficielles – E> ; eaux souterraines – E< ; sol – Sol ; flore – Flo ; faune du sol – Fs ; faune terrestre – Ft) et pour chacun des 4 types de milieux naturels étudiés, le nombre d'effets identifiés dont l'ampleur (An) est supérieure à 0,87. La colonne de gauche indique quelle modification (M) est à l'origine de ces effets. Ces modifications sont classées par ordre du déroulement des projets routiers dans les trois grandes phases (construction, exploitation, maintenance).

Tableau IV. Recensement des effets majeurs sur les cibles selon les milieux.

Modifications	Forêts							Lieux humides							Prairies							Cultures						
	Mc	E>	E<	Sol	Flo	Fs	Ft	Mc	E>	E<	Sol	Flo	Fs	Ft	Mc	E>	E<	Sol	Flo	Fs	Ft	Mc	E>	E<	Sol	Flo	Fs	Ft
M1	2	1	1	1	2		1	2	1	1	2	2		3														
M6	2	1	1	1			1	2	1	1	2	2		3														
M11					1		3													1	1		1			2		
M18						1	2																	1		2		
M24														1												1		
M30							2	1					2	1								2	1			2		
M31												1		1														
M33														1														
M34			1	2	1	1	1				1	2	1	1								1	1			1		
M42			1				1				1			1								1	1			1		
M51												1									1							
M52				1	1		1				1	1		1														
M63							1				1			1							1							
M64							2							1												2		
M65							2							2												3		
M66				1			1				1			1								1				1		
M67							2	1					2	1								2	1			2		
M68							1	1					1	1								1	1			1		
M69		1	1	1	1	1	1			1	1	1		1							1	1	1	1	1	1		
M70			1		1	1	1			1	1	1	1	1							1	1	1	1	1	1		
M74				2	1	1	2				2	1		1							2	1	1	2		1		
M75																								1		1		
M78		1	1	1	1	1				1	1	1	1	1						1	1	1	1	1	1	1		
M79		1	1	1	1	1				1	1	1	1	1						1	1	1	1	1	1	1		
M81		1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1														
M82							1			1		1		1														
M88							1							1														
M89							1							1														
Total/cible	4	6	9	11	12	8	29	7	8	9	15	15	1	33	3	3	0	5	6	8	19	4	4	0	6	7	7	24
Total				79							88							44								52		

Ces résultats montrent qu'une modification peut entraîner 2 voire 3 effets sur la même cible (ex. : M1, M6, M11,...). Les milieux Forêts et Lieux humides montrent globalement un plus grand nombre d'effets potentiels majeurs que les milieux Prairies et Cultures (respectivement, 79, 88, 44 et 52).

Certaines modifications ont un effet majeur (au moins) sur les 4 milieux (ex. M18 : Mise à nu du sol ; M34 : modification de la topographie...), tandis qu'à l'inverse, d'autres ne touchent que deux (ex., M11 – Destruction des arbres et arbustes vis-à-vis des Forêts et Cultures ; M 51 – Mouvement des engins entre ateliers vis-à-vis des Lieux humides et des Prairies) voire qu'un seul milieu (ex., M33 – Fuite de produits nocifs de l'aire de vie / Lieux humides). Certaines modifications ont des effets majeurs sur de nombreuses cibles d'un milieu alors qu'elles n'en ont aucun sur d'autres milieux (ex., M1 et M6 – Assèchement des sols ; M81 – Apport de sel).

Quel que soit le type de milieu naturel, la cible Faune terrestre apparaît plus fréquemment affectée que les autres. A l'inverse, les eaux souterraines (E<) ne subissent pas d'effet majeurs dans les milieux Prairies et Cultures, de même que la faune du sol (Fs) dans les Lieux humides.

Cette visualisation de la nature exacte des cibles touchées par les modifications fournit des pistes pour la recherche des indicateurs de sensibilité à développer pour le futur outil d'évaluation.

3.5. Discussion sur les effets majeurs répertoriés

D'après l'analyse écosystémique, les phases de vie de la route peuvent affecter négativement de manière directe et indirecte la structure, la composition, et la dynamique du fonctionnement des écosystèmes. Les lieux humides et les forêts sont les plus vulnérables. Cette analyse synécologique basée sur la déduction des effets est cohérente avec les études scientifiques dans lesquelles certains des effets répertoriés ont été étudiés. Les dysfonctionnements majeurs répertoriés par notre méthode sont soutenus par quelques exemples d'études.

3.5.1. Effets sur cibles abiotiques

Le réseau routier modifie les éléments abiotiques des écosystèmes affectant le biotique. Le bruit induit par les véhicules [2] peut perturber la perception des signaux de communication acoustique des populations animales en les masquant et agir sur leurs comportements (exemple des rainettes, [14]). La lumière artificielle près des routes induit une gêne de la faune nocturne [15]. La végétation inflammable des bords de route représente un risque de dissémination des incendies vers les milieux adjacents [16]. Lors de la construction de la route, l'assèchement mécanique des sols entraîne des impacts sur les sols, l'hydrologie, sur la végétation [15] allant jusqu'à la destruction des milieux humides. Le traitement à la chaux perturbe de nombreuses populations animales [17]. Près des routes, la qualité des eaux est dégradée par l'introduction de polluants chimiques [18]. Ces polluants proviennent entre autre des véhicules [19]. Ils sont toxiques, persistent dans l'environnement [2] et agissent négativement sur les communautés animales [15] par bioaccumulation dans les chaînes alimentaires [20]. Le salage des routes dégrade la qualité des eaux souterraines [21]. Cette pollution chimique est notamment impliquée dans le déclin des populations d'amphibiens : l'augmentation de la concentration en sel induit sur les têtards une réduction du poids et des performances locomotrices [22], une augmentation des anomalies physiques et donc une survie faible [23].

3.5.2. Effets sur cibles biotiques

Le réseau routier affecte aussi les éléments biotiques des écosystèmes. La fragmentation causée par les réseaux routiers réduit et isole les écosystèmes. Leur capacité à maintenir leur biodiversité originelle est alors réduite [9]. Les populations ne pouvant accéder aux ressources du système situé de l'autre côté de la route sont subdivisées dans des habitats isolés [24]. L'effet bordure ou l'évitement par la faune des lisières des bords de route contribue à la création d'obstacles à la migration et au flux génétique [15, 25, 26]. Certaines espèces subissent une forte mortalité par collisions avec les véhicules [24] et par l'augmentation de la prédation à cause de la mise à découvert. Si de tels effets sont suffisamment forts, la route peut contribuer à des extinctions locales d'espèces comme par exemple les amphibiens qui entreprennent des mouvements de masse pendant les averses [15]. Les véhicules sont aussi des vecteurs de dispersion d'espèces végétales exogènes [28], voire exotiques [18]. Les bords de routes entretenus sont envahis et deviennent des conduits pour les espèces exogènes vers les écosystèmes adjacents [29]. Même les conditions intérieures des forêts mûres ne limitent pas ces invasions [30].

3.6. Identification des cibles pertinentes pour les indicateurs

3.6.1. *Modèle de fonctionnement d'un écosystème simplifié*

La hiérarchisation des effets majeurs permet de dégager des pistes pour la recherche d'« indicateurs de sensibilité ». Les valeurs de An sont retranscrites suivant une pyramide d'écosystème simplifié (Tableau V). Chaque milieu naturel, forêts (F), lieux humides (H), prairies (P), cultures (C), inclut un écosystème, un ensemble d'organismes vivants exploitant un milieu déterminé, intégrant l'interaction des espèces entre-elles et avec leur milieu de vie. Les écosystèmes sont des entités écologiques caractérisés par [11] :

- un biotope, une aire géographique soumise à des facteurs abiotiques homogènes, et renfermant des ressources suffisantes pour assurer le maintien de la vie (microclimat, eau et sol et strates herbacées),
- une biocénose, un groupement d'êtres vivants en relation dans un réseau trophique autonome, et dépendant du biotope (flèches droites noires, Tableau V).

Le réseau trophique (flèches droites blanches) est constitué d'organismes capables d'intégrer l'énergie dans le système (Producteurs), des organismes qui tirent leur énergie d'autres espèces (consommateurs primaires ou $C1^{aire}$ ou herbivores, CII^{aire} ou prédateurs,

CIII^{aire} ou super-prédateurs), et des organismes qui dégradent l'organique (Décomposeurs).

Les flèches courbées indiquent les chaînes de conséquences majeures sur les cibles (cib.): Micro-climat (Mc), eaux superficielles (E>), eaux souterraines (E<), Flore (Flo), Faune du sol (Fs), Faune terrestre (Ft).

Tableau V. Exemple de chaîne de conséquences des effets majeurs inter-milieux.

La pyramide représente l'écosystème. Les flèches indiquent les chaînes de conséquences majeures. Abréviations : Cib.= cibles. Les valeurs en gras représentent les $An \geq 0,87$.

Modifications des conditions	Chaînes de causalité	Cib.	F	LH	P	C
M1 A Abaissement du niveau de la nappe phréatique affleurant le sol → B Diminution des eaux superficielles → C Assèchement des sols → D Destruction de la flore hygrophile → E Destruction des conditions microclimatiques humides → F Destruction → et G Perte de niche de la faune hydrophile → création d'un milieu banalisé		Mc	0,87	1	0	0
		E>	0,87	1	0	0
		E<	0,87	1	0	0
		Sol	0,87	1	0	0
			0,76	1	0	0
		Flo	0,87	1	0	0
		Fs	0,80	0,80	0	0
Ft	0,80	1	0	0		
	0,80	1	0	0		
		0,96	1	0	0	

3.6.2. Recherche appliquée d'indicateur de sensibilité

A partir des dysfonctionnements écosystémiques majeurs, des indicateurs quantitatifs sont recherchés. Une illustration est fournie (Tableau V) par l'analyse des relations entre les différentes cibles touchées par la modification M1-Assèchement des sols. Cette modification peut impacter fortement les milieux Forêts et Lieux humides. Quasiment toutes les cibles de ces milieux sont touchées. L'enchaînement des cibles impactées peut être classé de la manière suivante : 1° eaux souterraines et superficielles, 2° sol, 3° micro-climat, 4° flore, 5° faune. Les premières cibles de la chaîne de conséquence touchées sont abiotiques. Dans cet ordre, les cibles sont analysées pour déterminer celles permettant d'identifier des indicateurs facilement mesurables, interprétables, non redondants, et intégrateurs des effets répertoriés précédemment sur l'ensemble des cibles touchées. Les indicateurs choisis représentent aussi les caractéristiques fondamentales des milieux naturels : structure, composition et fonctionnement écosystémique.

Etablir un indicateur à partir de l'abaissement de la nappe phréatique et l'évacuation des eaux superficielles du milieu nécessiterait une modélisation informatique qui peut s'avérer onéreuse et requiert des compétences spécifiques.

La cible sol semble plus appropriée et accessible. L'analyse de l'assèchement des sols peut s'effectuer à partir de la mesure de l'intensité de l'hydromorphie du sol. Les traces d'hydromorphie sont échantillonnées en carotte de sol à l'aide d'une tarière et observées pour déterminer les tâches d'oxydo-réduction, les horizons redoxique et reductique. Le bon niveau d'hydromorphie du sol constitue un élément indispensable au bon fonctionnement des écosystèmes humides et forestiers.

4. CONCLUSION

A partir des dysfonctionnements écosystémiques majeurs, des indicateurs quantitatifs seront recherchés. Les indicateurs choisis représenteront les caractéristiques fondamentales des milieux naturels : structure, composition et fonctionnement écosystémique. Ces indicateurs ont pour finalité d'être applicables dans tous les pays au stade amont du processus décisionnel, même là où les sources documentaires et inventaires des milieux naturels sont limités. Les indicateurs utilisés seront ainsi facilement mesurables, interprétables, non redondants, et intégrateurs des effets répertoriés par la méthode développée. Les indicateurs futurs devront ainsi majoritairement être des mesures sur des cibles abiotiques (microclimat, eau superficielle, sol...). Les cibles biotiques étant dépendantes de ces cibles, ils permettront ainsi de synthétiser les phénomènes complexes observés sur la flore et la faune.

Les indicateurs devront ensuite être agrégés en un nombre le plus réduit possible d'indices tel une « empreinte ». Les indicateurs sont à intégrer dans un logiciel pour que tous les aspects environnementaux, milieux naturels et analyse du cycle de vie, soient pris en compte dans l'évaluation. Ils devront aussi être intégrés dans un outil de Système d'Information Géographique (SIG), ce qui permettra de spatialiser les données et de proposer différentes variantes de tracés.

En France, en phase amont du processus de décision d'un projet routier, les études de faisabilité et d'opportunité contiennent des évaluations environnementales très succinctes... L'outil synécologique s'intégrerait ainsi à cette étape afin que toutes les alternatives soient encore discutables pour obtenir un tracé à moindre coût écologique (TEC). Il pourrait aussi être utilisé pour les étapes suivantes, études préliminaires, avant-projet sommaire et suivi environnemental. L'expertise écologique du projet avec cet outil pourrait être plus indépendante et objective.

La méthode d'évaluation synécologique développée dans cette étude est une étape initiale à la création d'un outil d'évaluation des impacts des projets routiers sur les écosystèmes. Il conviendrait de l'étendre à d'autres types de milieux naturels tels que les cours d'eau, les landes,... et aux interactions inter-milieux. Les mesures post-projet des indicateurs devront être modélisées en définissant les références de seuils critiques sur lesquels se baser. Enfin, l'outil devra aussi prendre en compte le mode de transport rail, afin de répondre au besoin de comparaison actuel entre les deux types d'infrastructures de transport du point de vue de leur bilan environnemental. L'objectif serait de formuler des propositions applicables pour parvenir à une meilleure gestion du territoire et de la protection des espaces naturels.

RÉFÉRENCES

1. Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. Washington, DC, E.-U.A., Island Press.
2. Coffin A. W. (2007). From roadkill to road ecology : A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography* 15 : 396-406.
3. Cans C. et F. Clap (2008). Typologie des procédures de protection des espaces naturels. *JurisClasseur Environnement et Développement Durable*, Fasc. 4530.
4. Franklin J. F. (1993). Preserving Biodiversity: Species, Ecosystems, or Landscapes? *Ecological Applications*, 3(2) : 202-205.
5. Gaston K. J. et R. A. Fuller (2008). Commonness, population depletion and conservation biology. *Trends in Ecology & Evolution* 23 : 14-19.
6. Gaston, K. J. et Fuller, R. A. (2007). Biodiversity and extinction: losing the common and the widespread. *Progress in Physical Geography*, 31(2) : 213-225.
7. Kerala H.G.R. (2000). HDM-4 Highway Development and Management, Volume 1- Overview of HDM-4. The highway development and management series, AIPCR, Paris.

8. Sayagh S., Ventura A., Hoang T., François D. et A. Jullien (2009). Sensitivity of the LCA allocation procedure of BFS recycled into pavement structures. *Resources Conservation and Recycling* 54 : 348-358.
9. Genelletti D. (2003). Biodiversity Impact Assessment of roads : an approach based on ecosystem rarity. *Environmental Impact Assessment Review* 23 : 343-365.
10. OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique) (1993). Jeu de base d'indicateurs de l'OCDE pour l'étude de performance environnementale. OECD Environment Monographs 83.
11. Fischesser B. et M.-F. Duipuis-Tate (1996). Guide illustré de l'écologie. Ed. de La Martinière – Cemagref Editions. 319 p.
12. Delarze R. et Y. Gonseth (2008). Guide des milieux naturels de Suisse. Rossoli, 2ème édition revue et corrigée, Bussigny, 425 p.
13. Bissardon M. et L. Guibal (1997). Corine biotopes, version originale types d'habitats français. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts et GIP Atelier Technique des espaces naturels, 175 p.
14. Bee M. A et E. M. Swanson (2007). Auditory masking of anuran advertisement calls by road traffic noise. *Animal Behaviour* 74 : 1765-1776.
15. Laurance W. L., Goosem M. et S. G.W. Laurance (2009). Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution* 24 : 659-669.
16. Curt T. et P. Delcros (2010). Managing road corridors to limit fire hazard. A simulation approach in southern France. *Ecological Engineering* 36 : 457-465.
17. Buckton S. T. et S. J. Ormerod (1998). Effects of liming on the Coleoptera, Hemiptera, Araneae and Opiliones of catchment wetlands in Wales. *Biological Conservation* 79 : 43-57.
18. 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., T. Turrentine et T.C. Winter (2003). *Road Ecology: Science and Solutions*, Island Press, Washington.
19. Pagotto (1999). Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. Université de Poitiers, Ecole des Mines de Nantes, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Thèse : chimie et microbiologie de l'eau, 252 p.
20. Mariño F., Ligeró A. et D. J. D. Cosin (1992). Heavy metals and earthworms on the border of a road next to Santiago (galicia, northwest of Spain). initial results. *Soil Biology and Biochemistry* 24 : 1705-1709.
21. Meriano M., Eyles N. et K. W.F. Howard (2009). Hydrogeological impacts of road salt from Canada's busiest highway on a Lake Ontario watershed (Frenchman's Bay) and lagoon, City of Pickering. *Journal of Contaminant Hydrology* 107 : 66-81.
22. Denoël M., Bichot M., Ficetola G. F., Delcourt J., Ylief M., Kestemont P. et P. Poncin (2010). Cumulative effects of road de-icing salt on amphibian behavior. *Aquatic Toxicology* 99 : 275-280.
23. Sanzoa D. et S. J. Hecnar (2006). Effects of road de-icing salt (NaCl) on larval wood frogs (*Rana sylvatica*). *Environmental Pollution* 140 : 247-256.
24. Jaeger J. A. G., J. Bowman, Brennan J., Fahrig L., Bert D., Bouchard J., Charbonneau N., Frank K., Gruber B. et K. Tluk von Toschanowitz (2005). Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modelling* 185 : 329-348.
25. Delgado J. D., Arroyo N. L., Arévalo J. R., et J. M. Fernández-Palacios (2007). Edge effects of roads on temperature, light, canopy cover, and canopy height in laurel and pine forests (Tenerife, Canary Islands). *Landscape and Urban Planning* 81 : 328-340.
26. Andrews A. (1990). Fragmentation of habitat by roads and utility corridors: a review. *Australian Zoologist* 23 : 130-141.
27. Benítez-López A., Alkemade R. et P. A. Verweij (2010). The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations : A meta-analysis. *Biological Conservation* 143 : 1307-1316.
28. Zwaenepoel A., Roovers P. et M. Hermy (2006). Motor vehicles as vectors of plant species from road verges in a suburban environment. *Basic and Applied Ecology* 7 : 83-93.
29. Gelbard J. L. et J. Belnap (2003). Roads as conduits for exotic plant invasions in a semiarid landscape. *Conservation Biology* 17 : 420-432.
30. Flory S. L. et K. Clay (2009). Effects of roads and forest successional age on experimental plant invasions. *Biological Conservation* 142 : 2531-2537.