

CIRFE – Cumul d’infrastructures linéaires de transports terrestres et relations écologiques fonctionnelles

LIVRABLE I

SYNTHÈSE DU PROGRAMME CIRFE ET GUIDE D’AIDE À LA DÉCISION SUR LES MÉTHODES DE MODÉLISATION APPLIQUÉES AUX ILT

Catherine de Roince, Jérémie Cornuau, et Sylvain Moulherat



Contenu

Résumé du programme CIRFE	3
I. Contexte et objectifs	3
II. Le site et espèces étudiés	7
III. Potentiel des méthodes empiriques pour l'analyse du cumul des ILT.....	8
1. <i>Apport des outils de capture-marquage-recapture</i>	8
2. <i>Apport de la génétique du paysage</i>	10
IV. Potentiel des outils de modélisation pour l'analyse des effets des ILT et de leur cumul	13
V. Analyse économique de l'intégration de la modélisation dans les études environnementales	17
Guide d'aide à la décision sur l'exploitation des outils de modélisation dans les études portant sur les ILT	19
I. Choix des espèces.....	19
1. <i>Prise en compte des exigences de la procédure environnementale et autres réglementations</i>	19
2. <i>Critères de choix dans le cas de l'étude des réseaux écologiques</i>	20
a. Modélisation centrée sur des espèces ou sur des guildes d'espèces.....	20
b. Aide à la décision pour le choix des espèces lorsque celui-ci n'est pas clairement défini par la procédure environnementale	21
3. <i>Conclusion sur le choix des espèces</i> :	23
II. Recommandations sur Les cartes d'occupation du sol	23
III. Recommandations sur les informations de paramétrage à faire figurer dans les études	24
IV. Tableau comparatif des outils de modélisation	25
1. <i>Sélection des outils de modélisation</i>	25
2. <i>Les critères de comparaison</i>	25

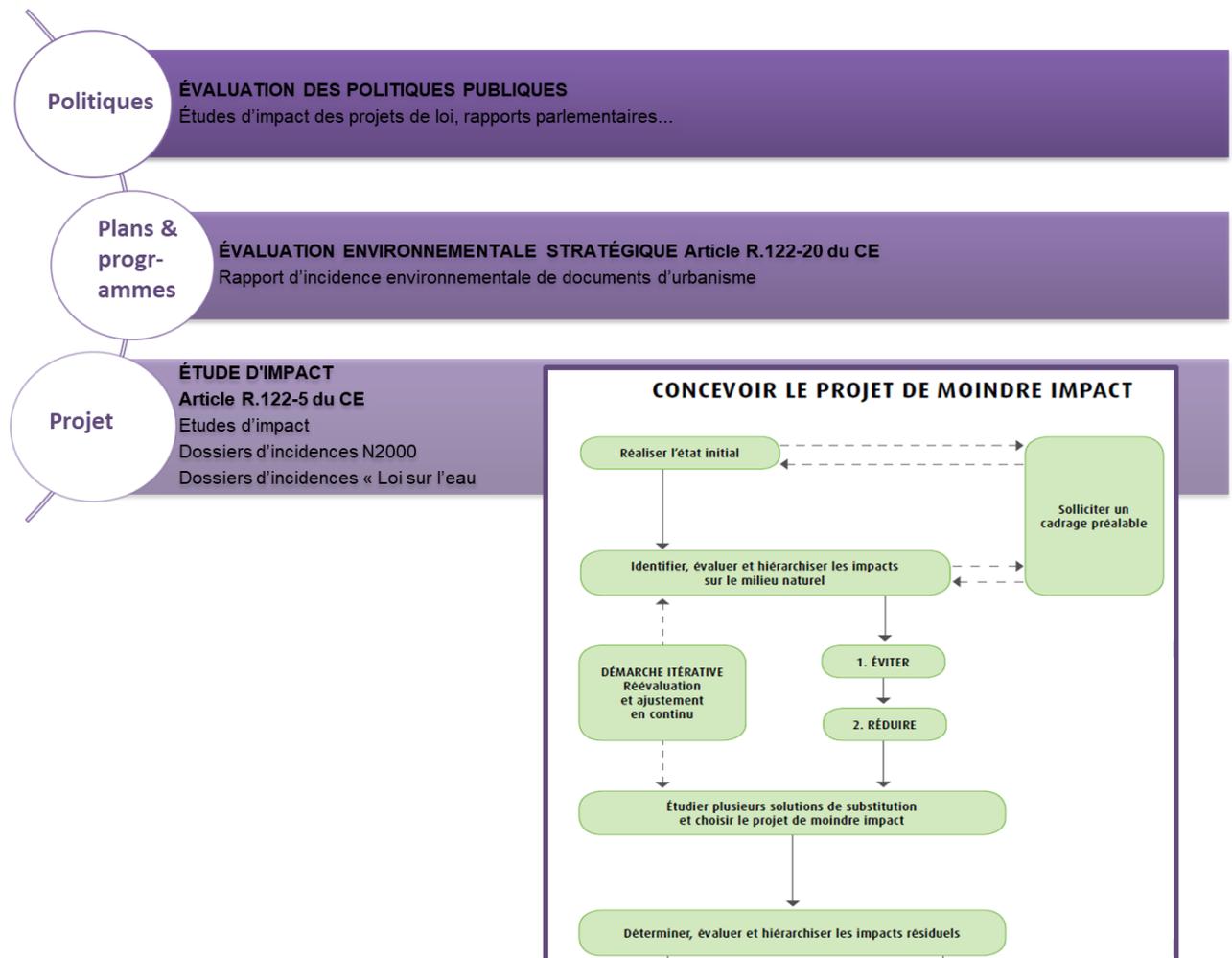
RÉSUMÉ DU PROGRAMME CIRFE

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les infrastructures linéaires de transports (ILT) peuvent avoir un impact positif ou négatif sur la biodiversité. Par exemple, l’ouverture créée par une ILT à travers une forêt peut contribuer à améliorer la circulation des espèces inféodées aux milieux ouverts. Cependant, cette même ouverture peut potentiellement devenir une barrière et amener une perte d’habitat pour les espèces forestières : on parle alors d’**effet fragmentant** des ILT sur la biodiversité susceptible de menacer ainsi leur **viabilité**.

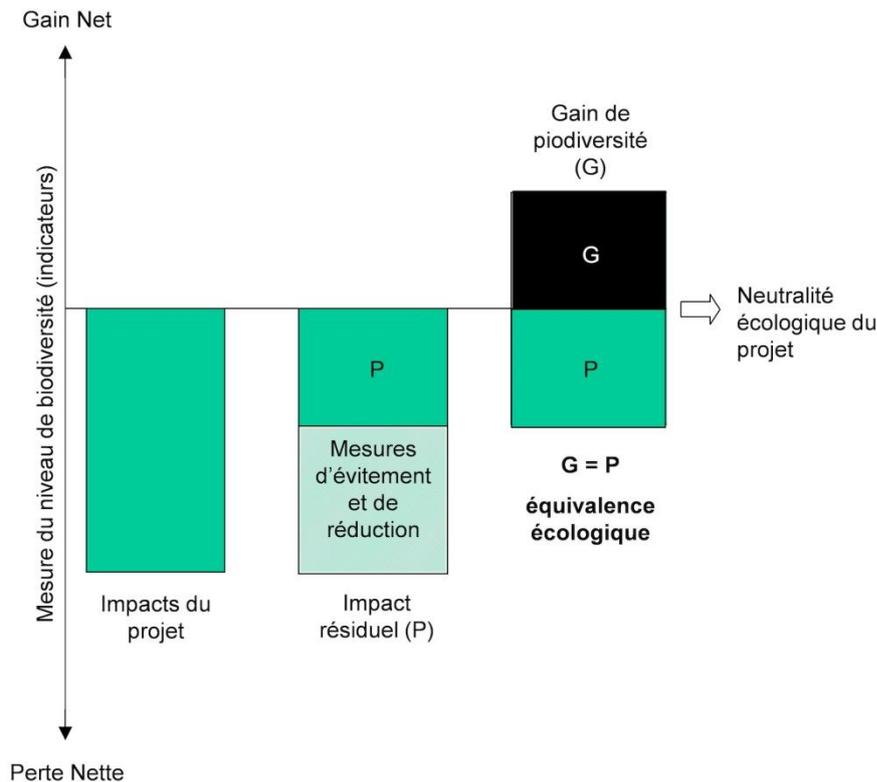
Le cadre législatif français a récemment évolué en réponse aux enjeux de la perte d’habitat et de la fragmentation du paysage pour la biodiversité (Loi pour la reconquête de la biodiversité du 8 août 2016).

Figure 1: Cadre juridique et emboîtement d’échelle des procédures d’évaluation environnementale s’appliquant en France



Ainsi, les procédures d'évaluation environnementale (Figure 1) actuellement appliquées imposent de quantifier les impacts des ILT sur la **viabilité des populations** et sur la **fonctionnalité des réseaux écologiques**. À cela s'ajoute la nécessité d'étudier les effets cumulés des nouveaux ILT sur la biodiversité par rapport aux aménagements existants. Le but est d'aboutir à une absence de perte pour la biodiversité (objectif de « *no net loss* », Figure 2), à travers la mise en œuvre de la séquence Éviter Réduire Compenser (ERC). En définitive, cette loi impose une obligation de résultat de la séquence ERC aux aménageurs.

Figure 2: Principe de la séquence Éviter- Réduire-Compenser appliquée à la biodiversité



Source : <https://www.sfecologie.org/regard/r34-f-quetier/>

Dans ce contexte, les pratiques actuelles et leurs méthodologies doivent évoluer pour permettre une meilleure quantification des impacts sur la **viabilité des populations** (maintien des effectifs et du pool génétique, probabilité d'extinction nulle) et sur la **fonctionnalité des réseaux écologiques** (maintien des populations, des flux d'individus et de gènes entre les populations).

Pour répondre à ce défi important, il est possible de se tourner vers de nouvelles méthodologies développées par la communauté scientifique : les suivis par capture-marquage-recapture (CMR), la génétique du paysage et la modélisation. Cependant, ces deux dernières méthodes n'ont été ni validées ni appliquées à des problématiques concrètes d'aménagement, en particulier celles des effets cumulés qui doivent être pris en compte sur plusieurs espèces. Ce manque constitue un frein majeur à leur diffusion au sein des praticiens et aménageurs des ILT.

ENCADRÉ 1 : PRINCIPE DES MÉTHODES DE CAPTURE-MARQUAGE RECAPTURE ET DE GÉNÉTIQUE DU PAYSAGE

Des méthodes de terrain pour l'analyse de la connectivité fonctionnelle permettent d'estimer quantitativement les flux d'individus au sein d'une structure paysagère. Il s'agit du suivi par capture-marquage-recapture (CMR) et de l'utilisation de la génétique du paysage. Ces deux méthodes génèrent une métrique quantitative de flux de dispersants, c'est-à-dire du nombre d'individus ayant réussi à se déplacer d'une zone A à une zone B.

Protocole des méthodes de

Génétique du paysage.



Capture-Marquage-Recapture



Les **outils de CMR** permettent d'estimer les tailles de populations ainsi que les flux d'individus entre différents secteurs (probabilité individuelle de passage). Ces estimations sont produites à partir d'informations, géolocalisées ou non, d'observations d'individus différenciés. Les données nécessaires à l'évaluation sont donc l'identité de chaque individu (ex : son code) et les dates de recapture (éventuellement ses géolocalisations suivant les besoins, méthode de télémétries). L'utilisation de photo-pièges peut sous certaines conditions permettre ce type de suivi ce qui requiert le stockage des images produites.

Les **outils de la génétique du paysage** permettent d'évaluer la connectivité d'un paysage en estimant des flux de gènes entre populations identifiées, et plus récemment à partir d'individus isolés. Ils exploitent des marqueurs génétiques (ex. microsatellites) qui permettent de différencier les populations/individus prélevés.

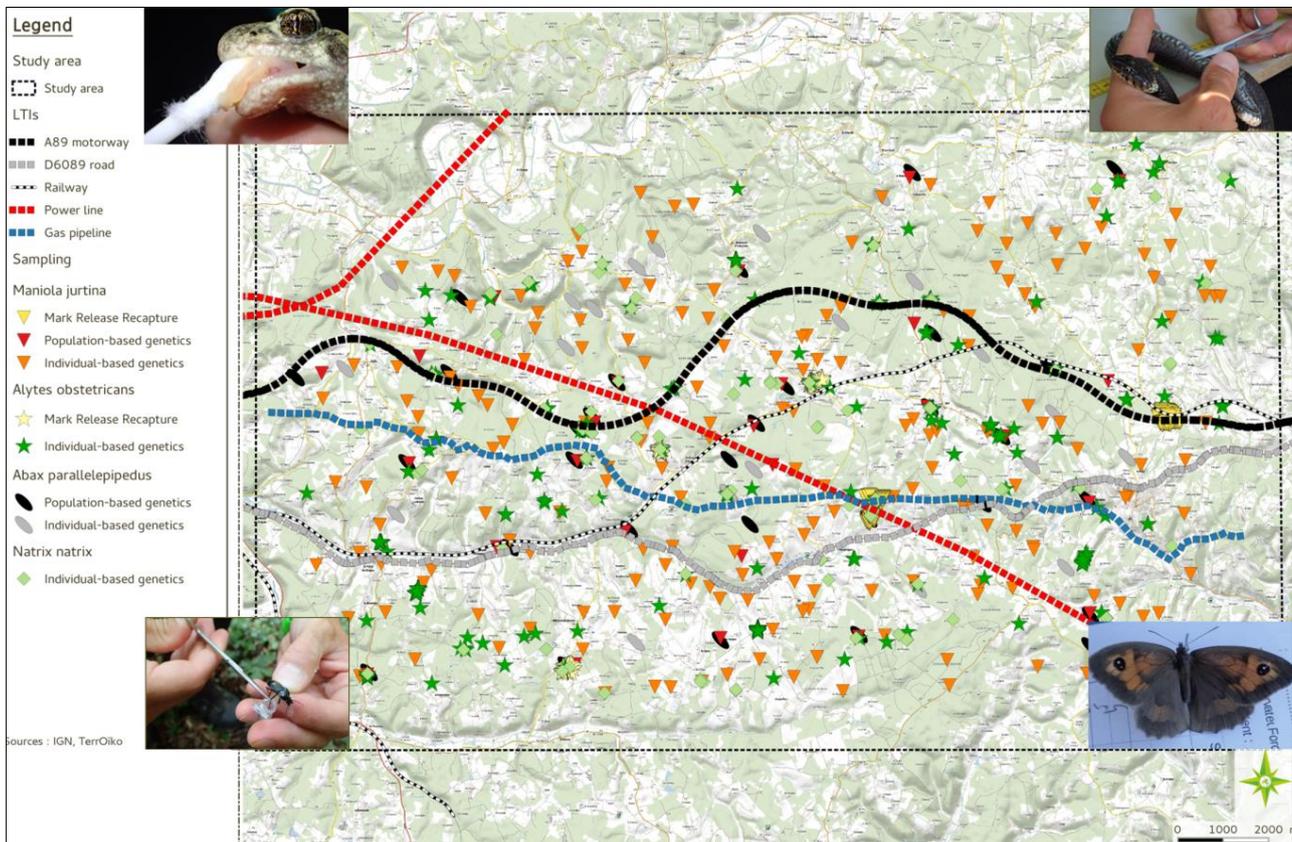
TerrOiko, la Station d'Écologie Théorique et Expérimentale (SETE-CNRS) et SETEC International ont associé leurs compétences pluridisciplinaires pour proposer le programme CIRFE-ITTECOP. L'objectif est de tester en conditions opérationnelles réelles, différentes méthodologies scientifiques récentes dans le cadre de l'évaluation des effets propres et cumulés d'infrastructures linéaires de transport terrestre.

II. LE SITE ET ESPÈCES ÉTUDIÉS

Le site d'étude se situe en Dordogne entre Périgueux et Brive. Les 3 méthodologies ont été testées sur 4 espèces représentatives de la biodiversité et des enjeux d'évaluation environnementale, le tout dans une matrice paysagère complexe de Dordogne présentant un cumul d'ILT. Une analyse économique complète l'étude afin de rendre compte de la relation coût-réalisme de la modélisation appliquée à l'évaluation environnementale comparée aux pratiques actuelles.

Les 4 espèces étudiées sont donc le myrtil (*Maniola jurtina*, papillon commun des milieux ouverts), la féronie noire (*Abax parallelepipedus*, coléoptère commun des forêts), la couleuvre à collier (*Natrix natrix*, serpent protégé des milieux humides) et l'alyte accoucheur (*Alytes obstetricans*, amphibien protégé des milieux humides). Les ILT étudiées sont les réseaux de route, d'autoroute, de gaz, d'électricité et de chemin de fer.

Figure 3: Présentation des espèces, du site d'étude et des ILT étudiées dans le cadre de CIRFE.



III. POTENTIEL DES MÉTHODES EMPIRIQUES POUR L'ANALYSE DU CUMUL DES ILT

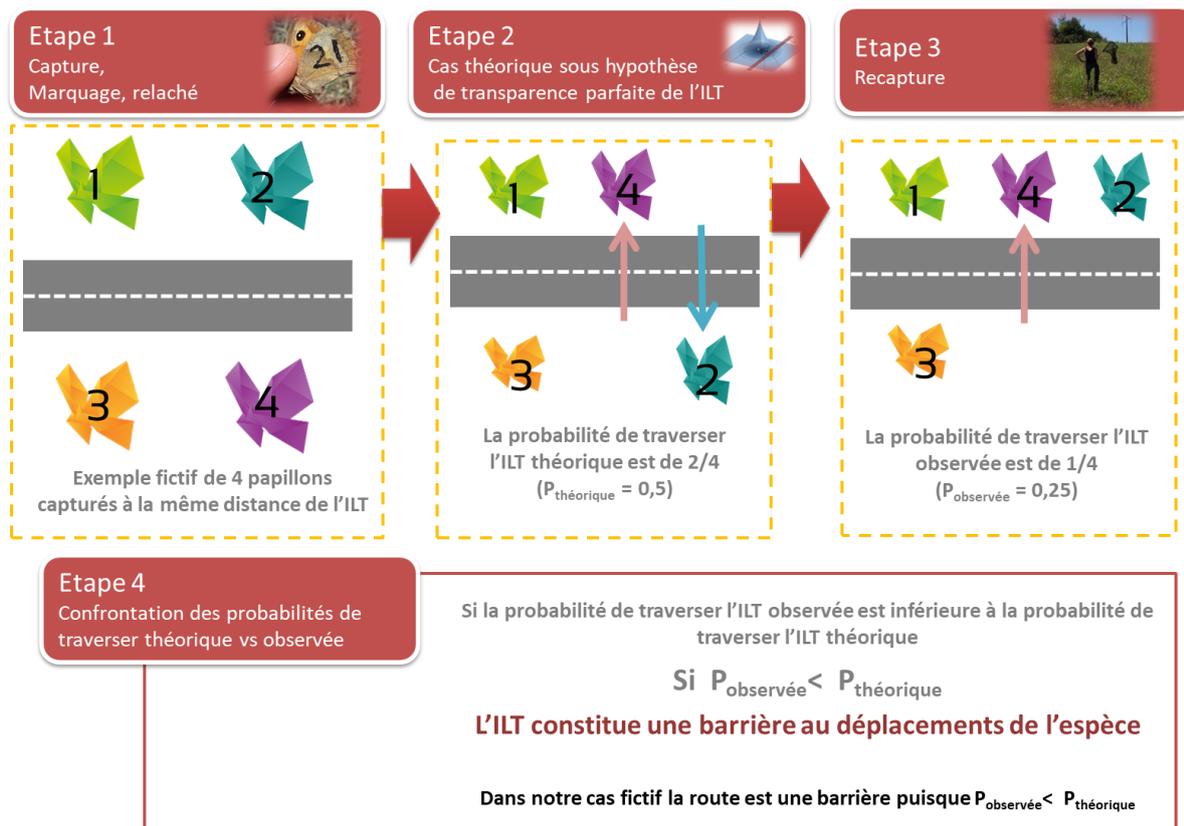
1. APPORT DES OUTILS DE CAPTURE-MARQUAGE-RECAPTURE

Les résultats de cette section sont présentés dans livrable II « Méthodes et résultats du programme CIRFE » de la page 53 à 66.

Les outils de capture-marquage-recapture (CMR, voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 1) apportent des connaissances sur des paramètres essentiels à l'analyse de **la viabilité des populations** (survie, taille des populations, taux de croissance des populations). Par exemple, l'utilisation de la CMR dans CIRFE a permis d'estimer, pour la première fois, la survie et le taux de croissance de trois populations d'alytes accoucheurs. En outre, un avantage non négligeable de la CMR est de permettre l'observation directe des espèces.

La CMR permet également de **mesurer finement l'effet fragmentant des ILT**. Le projet CIRFE a permis de mettre en place une méthode innovante de CMR pour quantifier l'impact des ILT sur les déplacements des espèces en termes de comportement de franchissement (Figure 4).

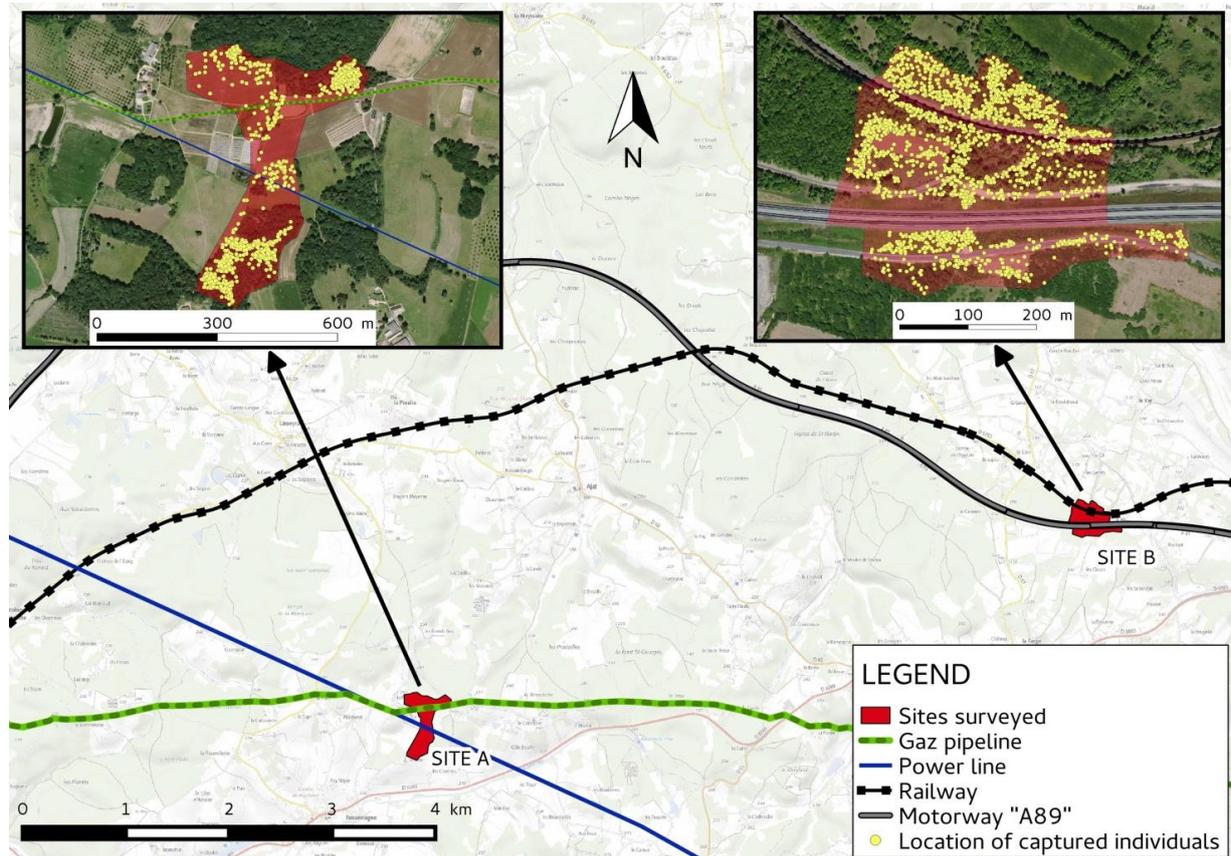
Figure 4: Principe de la méthode d'évaluation du comportement de franchissement d'une infrastructure linéaire de transport



Dans le cadre du projet CIRFE, cette méthode a été appliquée avec succès sur le myrtil au sein de deux sites d'étude (Figure 5), en contexte de cumul d'ILT afin de l'expérimenter. Le site A présentait un cumul de gazoduc et de ligne électrique, le site B un cumul d'autoroute et de ligne ferroviaire. Sa mise en œuvre a nécessité 12 jours de suivi pour le site A et 18 jours de suivi pour le site B. La méthode employée a permis de détecter que le myrtil évitait de franchir l'autoroute,

contrairement aux autres ILT. Enfin, les conditions d'application de la méthode sur d'autres espèces ont été précisées dans le cadre du projet. La méthode n'est valable que si le ratio de la largeur de l'ILT (ou du cumul) sur la distance moyenne de dispersion est inférieur 0,7 (par exemple pour une espèce ayant une distance de dispersion moyenne de 100 m, la largeur d'ILT pouvant être étudiée par cette méthode est de 70 m au maximum).

Figure 5: Sites d'études du myrtil par Capture-Marquage-Recapture – évaluation du comportement de franchissement



La CMR apparaît donc comme très séduisante. Cependant, elle comporte **trop de contraintes dans le cadre opérationnel** de l'évaluation environnementale:

- La CMR est particulièrement chronophage pour des résultats très limités. À titre d'exemple, la CMR sur l'alyte accoucheur et la couleuvre à collier pour CIRFE a duré 3 ans et les résultats obtenus ne permettent pas de répondre pleinement aux exigences réglementaires.
- Pour entrer dans une enveloppe budgétaire des pratiques actuelles de l'évaluation environnementale, seuls des éléments ponctuels des ILT (<1km) peuvent être étudiés (passage à faune, etc.).
- La réussite de la mise en œuvre d'un protocole de CMR dépend grandement de l'espèce étudiée (abondance locale, capturabilité, accessibilité des habitats de vie, et distance de dispersion)

La **CMR ne peut donc être recommandée en routine** dans le cadre des procédures réglementaires. Elle trouve néanmoins **son utilité pour combler une connaissance lacunaire sur une espèce** qui empêcherait de pouvoir statuer sur l'impact d'une ILT. Par exemple, l'absence de connaissance sur la franchissabilité d'une ILT ou l'efficacité d'un ouvrage de

transparence pour une espèce pourrait justifier d'employer la méthode développée dans le cadre du projet (Figure 4) sur un cas d'étude référent afin de pouvoir justifier des conclusions de l'évaluation environnementale sur d'autres sites.

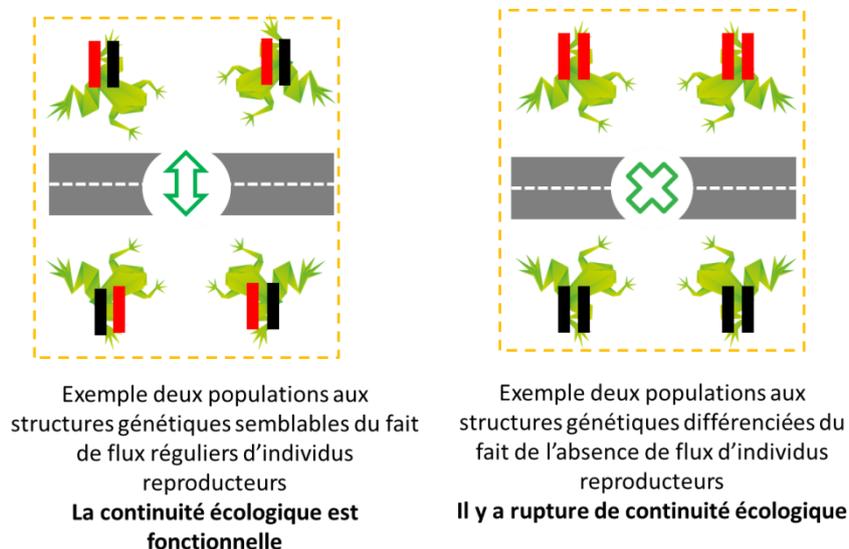
2. APPORT DE LA GÉNÉTIQUE DU PAYSAGE

Les résultats de cette section sont présentés dans livrable II « Méthodes et résultats du programme CIRFE » de la page 38 à 52.

La génétique du paysage a pu être utilisée sur les 4 espèces, pour analyser toutes les ILT et sur la totalité de l'aire d'étude. La méthode présente donc **l'avantage d'être utilisable à large échelle (> 1km linéaire d'ILT) et dans l'ensemble des contextes d'ILT (dont le cumul d'ILT).**

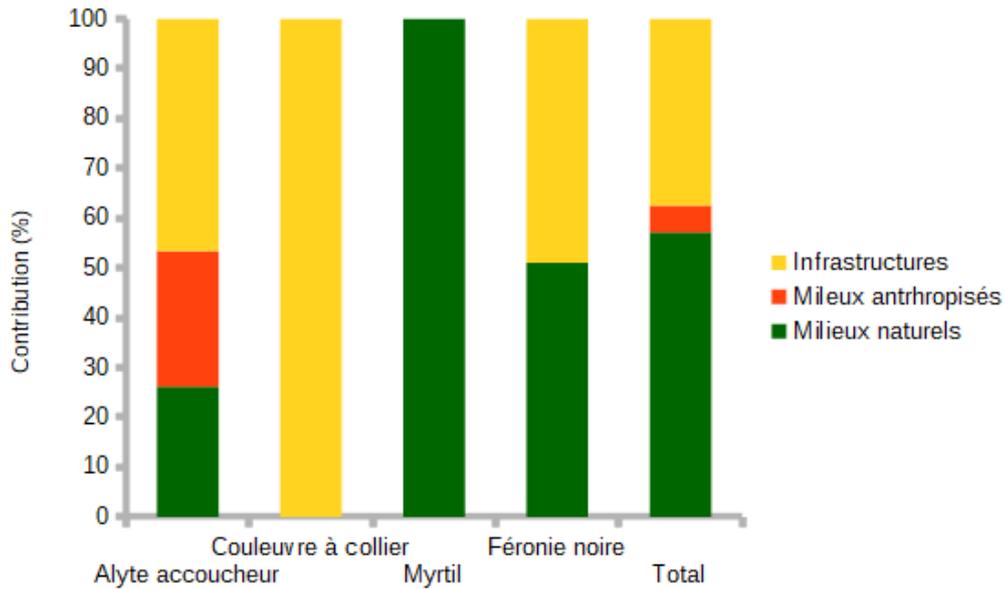
Le projet CIRFE a utilisé la génétique du paysage pour quantifier la contribution de chaque élément du paysage, dont les ILT, à la structuration génétique des populations des quatre espèces étudiées. La structuration génétique permet d'estimer le degré d'isolement d'une population en termes d'intensité des flux d'individus reproducteurs. En conséquence, plus une population est isolée, moins d'échanges génétiques sont possibles et plus sa structure génétique est différente des populations aux alentours. Le calcul de la contribution d'un élément paysager repose sur des analyses statistiques de commonalité présentées en détail dans le livrable II. Néanmoins, la figure ci-dessous (Figure 6), schématise le fonctionnement de cet indicateur : dans le cas de gauche, la contribution de la route à la structuration génétique est nulle (voire positive si elle agit comme corridor), et dans le cas de droite, la contribution de la route est maximale.

Figure 6: Lien entre structuration génétique de populations et fonctionnalité des continuités écologiques



De manière intéressante, dans le cadre du projet CIRFE, les ILT contribuent à la totalité de la structuration génétique de la couleuvre à collier, à presque la moitié pour l'alyte accoucheur et la féronie noire. En revanche, les ILT n'influencent pas la structuration génétique des populations de myrtil (Figure 7).

Figure 7: Contribution des différentes catégories de milieux à la structuration génétique des populations d’alyte accoucheur, couleuvre à collier, myrtil, et féronie noire.



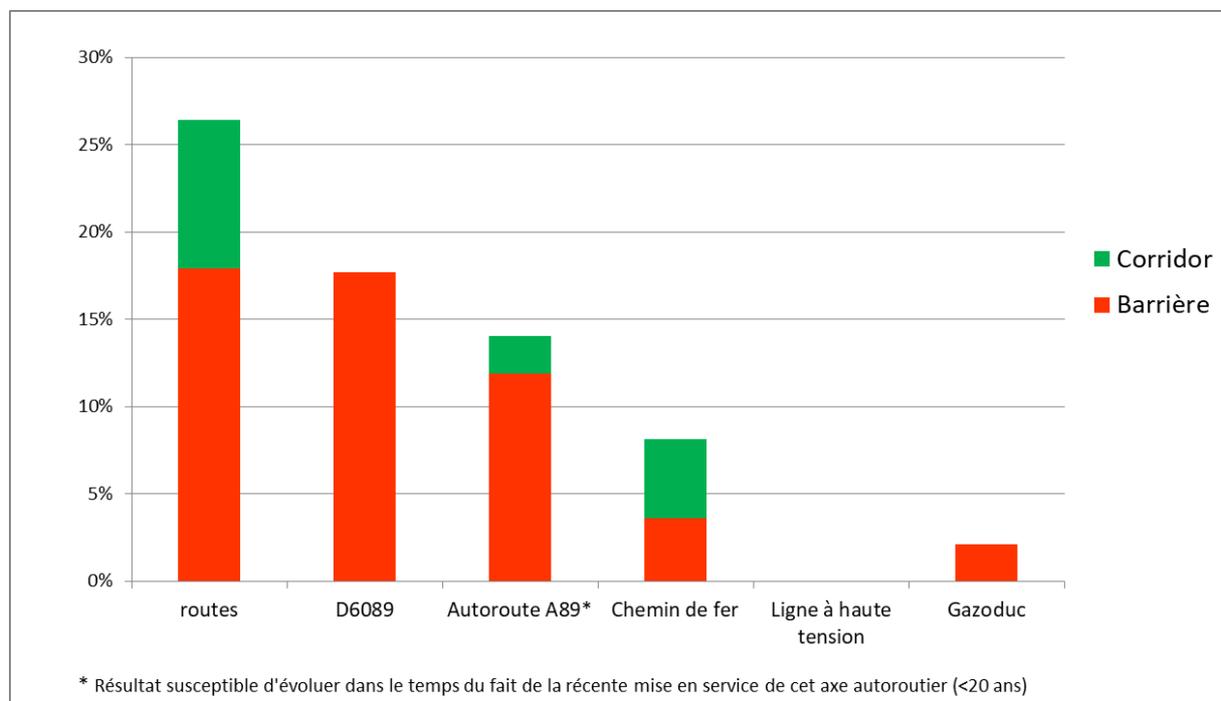
Les travaux de CIRFE ont mis en avant l’intérêt de la génétique du paysage **comme outil d’évaluation de l’effet corridor ou barrière de chaque ILT individuellement ou en situation de cumul**. Le tableau ci-dessous (Tableau 1) synthétise les effets de chaque ILT détectés par génétique du paysage. Il est à remarquer que la génétique du paysage permet, même en contexte de cumul d’ILT, de dissocier les effets de chaque ILT séparément.

Tableau 1: Effet des ILT détecté par génétique du paysage sur les 4 espèces du projet CIRFE

	Autoroute	Chemin de fer	gazoduc	Ligne à haute tension	Routes
Alyte accoucheur	Corridor	Barrière	Aucun effet	Aucun effet	Barrière
Couleuvre à collier	Barrière	Corridor	Aucun effet	Aucun effet	Corridor
Féronie noire	Aucun effet	Aucun effet	Barrière	Aucun effet	Barrière
Myrtil	Aucun effet				

Enfin, les travaux de CIRFE ont exploité **cet outil de génétique du paysage dans une approche globale plurispécifique**, étudiant la fonctionnalité des continuités écologiques pour la biodiversité « ordinaire » et permettant de rendre compte de l’effet barrière ou corridor de l’ILT pour l’ensemble des taxons (Figure 8). Le réseau routier secondaire apparaît comme ayant en moyenne le plus d’impact sur la fonctionnalité des continuités écologiques. Concernant l’autoroute A89, un effet barrière significatif a été détecté malgré sa récente mise en service (2004). Il est fort probable que cet effet s’accroisse dans les années à venir, la différenciation génétique s’accroissant génération après génération.

Figure 8: Contribution moyenne des ILT en tant que corridor et/ou barrière à la structure génétique des 4 espèces. Ce résultat constitue une analyse multispécifique basée sur les 4 espèces de l'étude (alyte accoucheur, féronie noire, myrtil et couleuvre à collier). La D6089 a été traitée séparément des autres routes, car il s'agit d'un axe routier très fréquenté.



Ainsi, la **génétique du paysage répond au besoin des procédures réglementaires** concernant la quantification de la fonctionnalité des continuités écologiques pour la biodiversité « ordinaire » (approche multitaxons de la génétique du paysage) et pour les espèces « protégées » (approche spécifique de la génétique du paysage).

Concernant la viabilité des populations, la génétique du paysage peut fournir des estimations de la taille efficace des populations et de leur degré de consanguinité. Ces données n'ont pas encore été traitées dans le cadre du programme CIRFE, mais semblent prometteuses dans le cadre des procédures réglementaires.

Il est à noter **quelques limites dans l'utilisation de la génétique du paysage dans un cadre opérationnel** :

- Elle n'est pertinente que si la zone d'étude a une superficie bien supérieure à celle de l'aire vitale de l'espèce étudiée.
- L'effet d'une ILT ne sera détecté qu'au bout de plusieurs générations (temps d'intégration de l'effet sur la structuration génétique (voir Figure 6). Un temps de latence est donc nécessaire pour détecter l'effet d'une nouvelle ILT avec cette méthode (généralement à partir de quelques années après la mise en service).
- Cette méthode permet de déceler l'existence de flux d'individus de part et d'autre d'une ILT et leurs conséquences sur la viabilité génétique des populations. Elle ne localise donc pas les zones de passage des individus.
- Cet outil nécessite le développement de marqueurs moléculaires spécifique (par exemple microsatellites) pour une utilisation en routine. Ainsi, cette méthode n'est employable que sur un nombre limité d'espèce. Toutefois, cette limite tend à disparaître avec l'usage de nouvelles technologies moléculaires développées par les laboratoires de recherche.

- La technicité de l'analyse statistique à mettre en œuvre est très élevée et ne peut donc être réalisée que par un nombre limité d'acteurs opérationnels.

En conclusion, la génétique du paysage s'avère **très pertinente** dans le cadre de l'analyse de viabilité des espèces et de la fonctionnalité des continuités écologiques **pour l'évaluation environnementale d'une ILT**. Elle trouve tout son intérêt pour le diagnostic de la viabilité des populations et la fonctionnalité des réseaux **écologiques pour l'évaluation de l'état initial et dans les suivis post-travaux**.

IV. POTENTIEL DES OUTILS DE MODÉLISATION POUR L'ANALYSE DES EFFETS DES ILT ET DE LEUR CUMUL

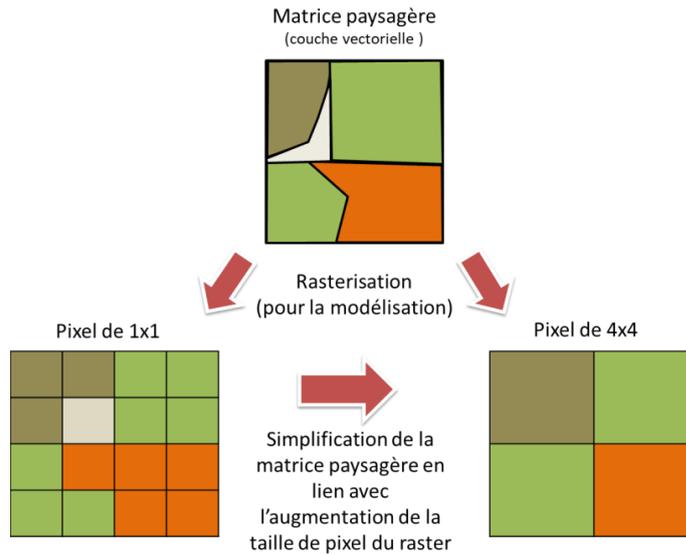
Les résultats de cette section sont présentés dans livrable II « Méthodes et résultats du programme CIRFE » de la page 68 à 140.

Contrairement aux outils de CMR ou de génétique du paysage, la modélisation a **une portée prédictive** ce qui permettrait de **concevoir les projets d'ILT de moindres impacts**, dans le respect de la séquence ERC. Cependant, pour être utilisable dans le cadre des procédures réglementaires, la modélisation doit pouvoir **évaluer la viabilité des espèces et la fonctionnalité des continuités écologiques**. CIRFE a eu pour objectif de comparer, dans ce contexte, 5 outils de modélisation : Circuitscape, Coût-déplacement, Dilatation-érosion, Graphab et SimOïko.

Les **5 outils de modélisation** ont en commun d'utiliser une même cartographie de l'occupation du sol comme donnée de départ. Ils **diffèrent ensuite dans les approches conceptuelles, le paramétrage et les compétences nécessaires à leur utilisation** (*voir livrable II page 79 à 90*). Circuitscape, coût-déplacement, dilatation-érosion et Graphab sont en libre accès : le paramétrage et l'utilisation du modèle doivent être assurés par le praticien. Le modèle de dilatation-érosion est le plus simple à utiliser nécessitant comme unique paramètre l'information sur la distance de dispersion de l'espèce. Circuitscape, coût-déplacement, et Graphab sont plus complexes et nécessitent des informations détaillées sur leurs capacités à traverser différents milieux naturels (représentées par des coefficients de friction), en plus de la distance de dispersion. SimOïko est un outil demandant une connaissance fine de l'écologie des espèces, car il intègre la description complète des cycles de vie en plus des informations de dispersion). Il est accessible sur une plateforme web payante au sein de laquelle ni le paramétrage ni la mise en œuvre du modèle n'ont à être assurés par le praticien. Les 5 outils de modélisations ont pu être utilisés sur les 4 espèces du projet CIRFE, pour analyser chaque ILT et sur la totalité de l'aire d'étude. Les résultats sont exploitables aux échelles globale et locale. Ils présentent donc certains avantages pour quantifier l'impact des ILT dans les procédures environnementales.

Tous les modèles n'ont pas la même **sensibilité à la résolution spatiale** (précision du pixel de description des milieux, Figure 9, *voir livrable II p.95*). Le plus sensible est Circuitscape, puis viennent Graphab et SimOïko. La modélisation par coût déplacement est peu sensible à la résolution spatiale et la dilatation-érosion ne l'est pas.

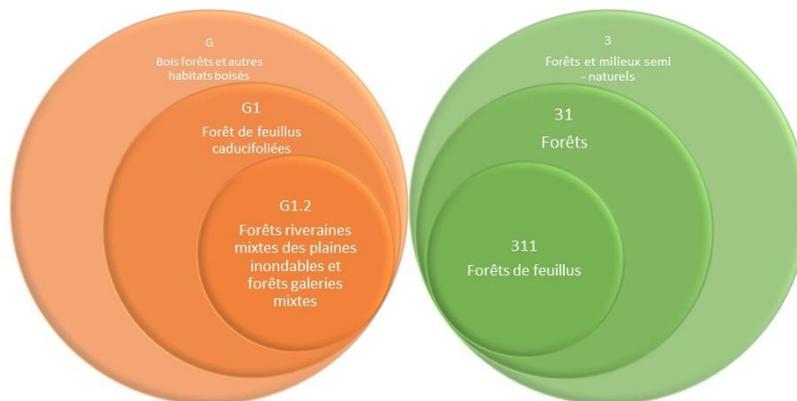
Figure 9: Effet de la résolution spatiale sur la précision des données d'occupation du sol pour la modélisation.



De même, les travaux ont mis en évidence **la sensibilité de la modélisation à la finesse typologique** des cartes d’occupation du sol (précision de la description des habitats, Figure 10, voir livrable II p.114). Une typologie mal adaptée peut rendre impossible la modélisation de certaines espèces.

Figure 10: Exemple des différents niveaux de précision typologique utilisés pour le code EUNIS G1.2 : Forêts riveraines mixtes des plaines inondables et forêts galeries mixtes.

Le niveau EUNIS 2 correspond à G1 « Forêt de feuillus de caducifoliées », le niveau EUNIS 1 correspond à G1 « Forêt de feuillus de caducifoliées », le niveau EUNIS 1 correspond à G « Bois de forêts et autres habitats boisés »

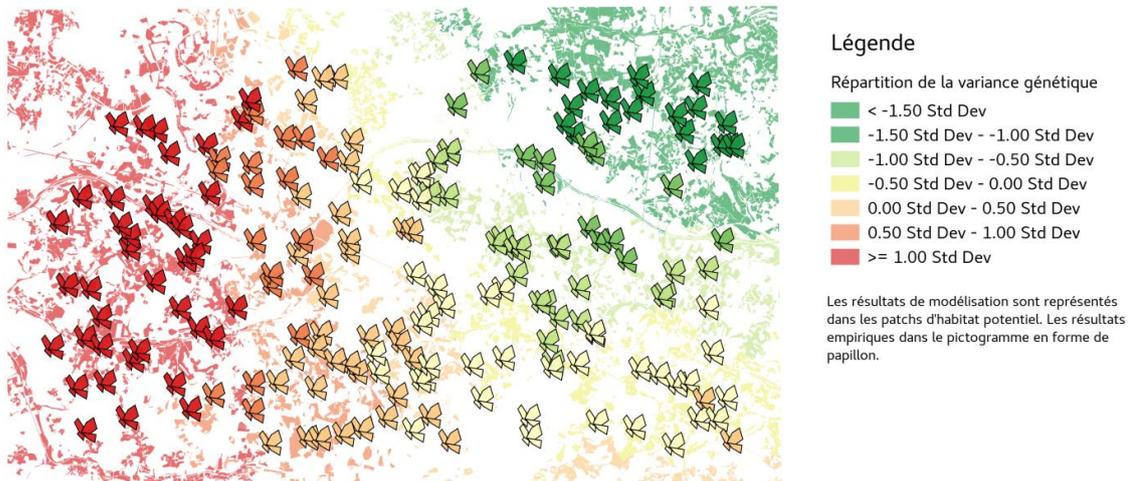


Il est possible de discriminer les 5 outils de modélisation quant aux métriques qu’ils fournissent en rapport avec les demandes de l’évaluation en environnementale (voir livrable II page 115 à 118). La méthode de dilatation-érosion donne une estimation binaire de l’accessibilité des habitats par dispersion (accessible ou non pour l’espèce modélisée). Les autres fournissent des métriques nettement plus fines. Circuitscape, coût-déplacement, et Graphab fournissent des métriques sur la fonctionnalité des continuités écologiques et ne fournissent pas de métriques permettant l’analyse de viabilité des populations. SimOïko fournit des estimations permettant l’analyse de la viabilité des espèces et la fonctionnalité des continuités écologiques (estimation des tailles de population, de la consanguinité et des probabilités d’extinction des populations ; estimation du trafic et des flux de gènes entre les populations). Ainsi, **les métriques disponibles et leur précision diffèrent entre les outils de modélisation.**

La comparaison directe entre données obtenues par modélisation et celles de terrain a été réalisée uniquement sur l'outil SimOïko (*voir livrable II page 127 à 140*). En effet, cet outil s'est révélé être le seul à fournir des métriques directement comparables avec les données empiriques. Il a donc été possible de mettre en place une méthode **d'évaluation du niveau de réalisme** à la fois à partir des données de CMR et de génétique du paysage :

- **Capture-marquage-recapture (CMR)** : La taille des populations estimée par SimOïko est très congruente avec l'estimation qui en est faite par CMR pour 2 sites sur 3. Sur le dernier site, il semblerait que les informations disponibles sur l'habitat de reproduction de l'alyte accoucheur soient insuffisantes. Ce résultat indique donc bien une corrélation entre finesse des données d'entrées et réalisme des résultats de
- **génétique du paysage** : il existe une forte congruence entre la structuration génétique estimée par SimOïko et celle de génétique du paysage observée sur le terrain. Là encore, plus les données d'entrée du modèle sont fines, plus cette congruence est forte.

Figure 11: Comparaison entre la structure génétique des populations de Myrtils observée sur le terrain (pictogramme) et modélisée avec SimOïko (dans les patches).

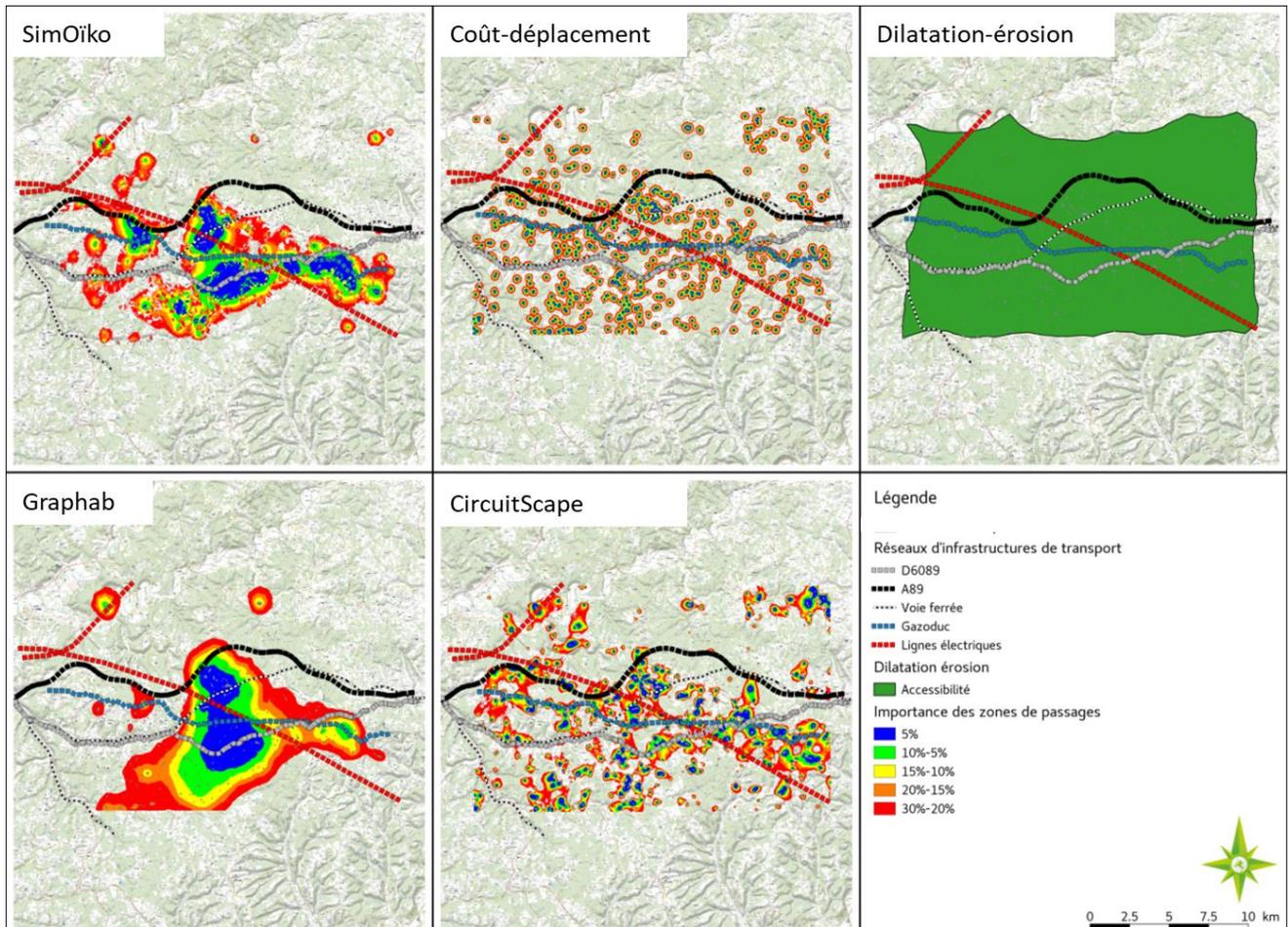


Cette comparaison n'a pas pu être effectuée pour les autres modèles, car leurs métriques ne permettent pas de mise en lien direct. Néanmoins, une méthode d'évaluation indirecte reposant sur les hypothèses proposées par Simpkins et al (2018)* a été testée pour Circuitscape et Graphab.

Curieusement, les estimations des flux d'individus, support de l'évaluation de la fonctionnalité des corridors biologiques diffèrent entre les modèles (Figure 12, *voir livrable II p. 118 à 126*). À ce titre, les résultats de dilatation-érosion et de coût-déplacement se distinguent fortement de ceux de Circuitscape, Graphab et SimOïko. Toutefois, parmi ces trois outils, des divergences ont été relevées pour toutes les espèces modélisées. Ainsi, **l'estimation de la fonctionnalité des continuités écologiques et les décisions opérationnelles qui en découlent sont dépendantes des outils mobilisés. C'est pourquoi il revient au praticien de bien connaître les conditions d'application et les limites des outils de modélisation** qu'il emploie afin de fournir un diagnostic écologique fiable.

* Simpkins, C. E., Dennis, T. E., Etherington, T. R. & Perry, G. L. W. Assessing the performance of common landscape connectivity metrics using a virtual ecologist approach. *Ecological Modelling* 367, 13-23, doi:10.1016/j.ecolmodel.2017.11.001 (2018).

Figure 12 : Comparaison des zones de déplacements préférentiels de l’alyte accoucheur modélisé par les différents outils déployés dans CIRFE. Le gradient des zones de passages est basé sur la distribution des quantiles : par exemple la classe 0-5% (couleur bleue) correspond à 5% des déplacements les plus fréquents obtenus par la modélisation, 10%-5% (couleur verte) correspond aux déplacements entre les 5% et les 10% les plus fréquents, etc. À noter que les résultats de dilatation-érosion correspondent à une aire d’accessibilité (pas de métrique quantitative disponible pour cet outil de modélisation).



En conclusion, l’utilisation de la modélisation **est fortement recommandée** dans le cadre des procédures réglementaires. Elle présente l’avantage, selon les outils, de pouvoir analyser la viabilité des populations et/ou la fonctionnalité des réseaux écologiques. De plus, **sa portée prédictive permettrait de concevoir le projet de moindre impact dans le respect de la séquence ERC.**

V. ANALYSE ÉCONOMIQUE DE L'INTÉGRATION DE LA MODÉLISATION DANS LES ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES

Les résultats de cette section sont présentés dans livrable II « Méthodes et résultats du programme CIRFE » de la page 142 à 157.

L'analyse économique montre que les méthodes émergentes de modélisation apportent une **forte plus-value aux procédures d'évaluation environnementale**. D'une part, elles permettent de pallier l'impossibilité d'un point de vue économique de couvrir la totalité d'une zone d'étude à large échelle par des inventaires. Ensuite, elles permettent de rééquilibrer la part du volet flore/habitat par rapport au volet faune actuellement très dominant (Figure 13). En effet, la modélisation nécessite une bonne cartographie des habitats. **Une nouvelle pratique couplant l'usage d'outils de modélisation et d'inventaires de terrain est donc possible** et même souhaitable à la fois pour les services instructeurs (**meilleure prise en compte des enjeux**) que des praticiens (**diminution des coûts**).

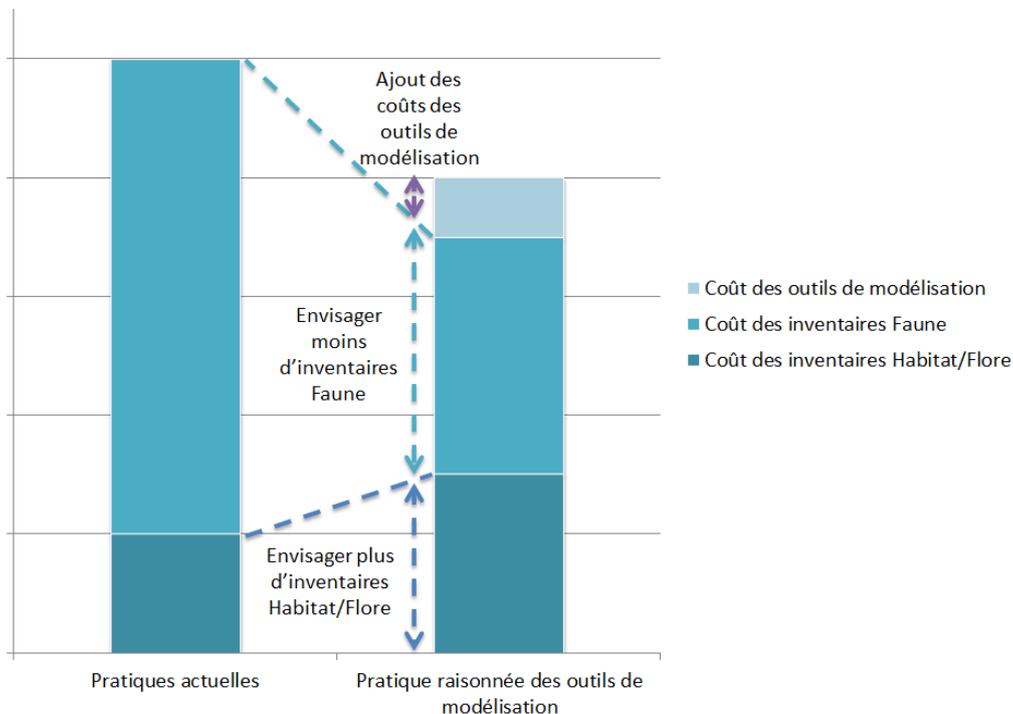


Figure 13 : Représentation schématique de comparaison entre les pratiques actuelles et une pratique raisonnée avec des outils de modélisation

Une conclusion inattendue de l'analyse économique est l'impossibilité de clairement pouvoir statuer sur **le meilleur ratio coût-réalisme** entre les pratiques actuelles et les méthodes émergentes à partir des retours d'expérience étudiés. Pourtant, une analyse économique d'un plus grand nombre de retours d'expérience permettrait d'établir un référentiel de bonnes pratiques pour les évaluations environnementales en matière de ressources à allouer aux inventaires (pratiques actuelles) et à la modélisation (pratiques émergentes).

Les outils de modélisation actuellement disponibles ont en commun d'utiliser une cartographie de l'occupation du sol en données d'entrée. Ils diffèrent, en revanche, sur les données et les compétences nécessaires à leur utilisation, sur leur réalisme et leur opérationnalité (voir guide d'aide à la décision (partie 3)). Concernant leur différence de coût en termes d'utilisation, l'analyse économique montre clairement que **le coût de la modélisation est faible** au regard

des coûts liés à l'élaboration de la cartographie de l'occupation du sol. Le type de modèle n'est donc pas un élément différenciant en termes de coût. Dans ce contexte, il apparaît que **le ratio coût-réalisme de l'évaluation environnementale est principalement influencé par le niveau de précision et de fiabilité des modèles.**

GUIDE D'AIDE À LA DÉCISION SUR L'EXPLOITATION DES OUTILS DE MODÉLISATION DANS LES ÉTUDES PORTANT SUR LES ILT

Ce guide est à destination des aménageurs et praticiens (bureaux d'études, etc.) en charge des évaluations environnementales portant sur les infrastructures linéaires de transport terrestre (ILT). Les informations et recommandations de ce guide d'aide à la décision se basent sur les travaux du programme CIRFE, présentés dans le livrable II « Méthodes et résultats scientifiques ». Pour faciliter la lecture croisée de ces deux livrables, ce document présente des renvois à des sections et pages du livrable II.

I. CHOIX DES ESPÈCES

Le projet CIRFE a démontré que la modélisation pouvait s'avérer un outil fiable et précis pour identifier et caractériser les effets des Infrastructures Linéaires de Transports (ILT) sur les espèces. En outre, il est possible de quantifier la viabilité des populations et la fonctionnalité des continuités écologiques aussi bien pour les espèces protégées que pour les espèces de nature « ordinaire ». C'est donc l'ensemble des volets Éviter – Réduire – Compenser (ERC) et Trame Verte et Bleue (TVB) qui peuvent être traités avec la modélisation. Dans ce contexte, le praticien va être confronté à la nécessité de choisir les espèces à modéliser.

1. COMPILER LA LISTE DES ESPÈCES EN LIEN AVEC LES EXIGENCES DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

ETAPE 1 : RÉALISATION D'UN ÉTAT DES LIEUX DES ESPÈCES PRÉSENTES DANS LE SECTEUR D'ÉTUDE

Pour l'évaluation environnementale de projet, ou de plans et programmes, le choix des espèces à modéliser doit être fait après :

- la compilation des données existantes (TVB, SRADDET, SRCE, SCoT, PLUi, PLU ; zonages réglementaires et d'inventaires ; observatoire national et régional de la biodiversité...),
- la prise en compte de l'avis d'experts locaux,
- et si possible, après l'observation des espèces sur site.

Ce premier travail doit permettre au praticien d'établir la **liste des espèces présentes ou potentiellement présentes** sur le site et ses alentours.

ETAPE 2 : CONFORMITÉ AVEC LES EXIGENCES DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

La liste des espèces doit être confrontée aux textes réglementaires et évaluations environnementales agissant sur le même territoire que l'ILT :

- Dans le cadre de la demande de dérogation à la protection stricte des espèces.

L'ensemble des espèces protégées recensées devront être modélisées. Dans ce contexte, **le choix des espèces est clairement dicté par la liste des espèces protégées en vigueur.**

- Dans le cadre de l'identification des impacts sur les continuités écologiques(TVB)

Le choix est moins clairement défini réglementairement. Toutefois, l'article L.371-2 du code de l'environnement précise que les éléments de la trame verte et bleue doivent être rattachés aux 5 sous-trames de cohérence nationale (boisés, ouverts, humides, cours d'eau et milieux littoraux pour les régions concernées). De plus, une liste d'espèces de cohérence nationale, déclinée par région, est réglementairement établie. Dans ce contexte, le praticien peut également s'aider dans son choix d'espèces en répertoriant les choix d'espèces effectués dans les documents TVB relatifs à son site d'étude (SRADDET, SRCE, SCoT, PLUi, PLU). Nous conseillons donc **de lister les espèces cibles des évaluations environnementales de plans et programmes (documents de planification, etc.) et autres politiques publiques (plan de gestion, etc.) agissant sur le même territoire que l'ILT.**

Une fois la liste des espèces réalisées, le praticien sera amené à sélectionner celles qui feront l'objet d'une modélisation.

2. CRITÈRES DE CHOIX DANS LE CAS DE L'ÉTUDE DES CONTINUITÉS ÉCOLOGIQUES

A. MODÉLISATION CENTRÉE SUR DES ESPÈCES OU SUR DES GUILDES D'ESPÈCES

LA MODÉLISATION CENTRÉE SUR DES ESPÈCES :

- **Espèce patrimoniale.** C'est une espèce protégée, menacée, rare ou ayant un intérêt scientifique ou symbolique important (agrion de mercure, lézard ocellé, ours brun, lynx, chat forestier...).
- **Espèce de nature ordinaire.** C'est une espèce sans statut de protection particulier, souvent facilement observable et abondante (machaon, hérisson, mésange charbonnière...).
- **Espèce indicatrice ou parapluie.** C'est une espèce pour laquelle les connaissances sont valables pour un groupe plus large (agrion de mercure pour l'ensemble des odonates, triton crêté pour l'ensemble des urodèles, chevreuil pour l'ensemble des grands mammifères...).

LA MODÉLISATION CENTRÉE SUR DES GUILDES D'ESPÈCES :

La guilde est une manière de classer des espèces qui se ressemblent au niveau de caractéristiques précises (milieux de vie, capacité de dispersion, cycle de vie,...). Les paramètres permettant de modéliser la guilde sont empruntés à plusieurs espèces. Un exemple classique est la guilde des grands mammifères forestiers qui regroupe les cerfs, les sangliers et les chevreuils. Ces espèces ont de fortes capacités de dispersion et un cycle de vie long.

MODÉLISATION CENTRÉE ESPÈCES OU GUILDES D'ESPÈCES, QUE CHOISIR ?

Le travail par guilde d'espèce correspond à une approche de type « globale », « biodiversité ordinaire », « guilde fonctionnelle », « service écosystémique » tandis que le travail par espèce

correspond à une approche de type « particulier », « biodiversité remarquable », « espèce centrée ».

D'un point de vue pratique et opérationnel, l'approche par espèce peut être plus limitante notamment quand les paramètres nécessaires à modéliser l'espèce ne sont pas bien établis. Dans l'approche par guildes, plusieurs espèces sont utilisées ce qui permet de combler les lacunes de connaissances sur une espèce en utilisant des informations existantes sur une autre espèce de la guildes.

Il est important de noter que les deux approches sont similaires d'un point de vue de la qualité de l'étude des continuités écologiques et ne sont pas mutuellement exclusives. Ainsi, une même étude peut utiliser l'approche par guildes et l'approche par espèce.

B. AIDE À LA DÉCISION POUR LE CHOIX DES ESPÈCES LORSQUE CELUI-CI N'EST PAS CLAIREMENT DÉFINI PAR LA PROCÉDURE ENVIRONNEMENTALE

Dans le cadre de l'étude de l'impact des ITL sur les continuités écologiques, le plus important est d'être en mesure de représenter au mieux l'ensemble de la biodiversité. En effet, le projet CIRFE a clairement démontré que les impacts des ITL étaient très différents suivant les espèces choisies. Pour cela, le praticien doit particulièrement être vigilant à choisir des espèces suffisamment nombreuses et hétérogènes pour représenter les différent(e)s :

- 1) sous-trames de cohérence nationale (boisés, ouverts, humides, cours d'eau et milieux littoraux pour les régions concernées),
- 2) capacités et modes de dispersion/mouvement,
- 3) densités potentielles des espèces,
- 4) cycles de vie (espérance de vie, survie, fécondité...).

En matière de nombre d'espèces, nous recommandons de caractériser une continuité écologique avec a minima **3 espèces ou guildes d'espèces**. Une illustration du choix des espèces par sous-trame est proposée ci-dessous :

Sous-trame boisée

Capacités de dispersion	Modes de dispersion	Densités	Cycles de vie	Exemples
+++	Terrestre	+	Longévité +++ fécondité +	Grands mammifères forestiers (cerf)
+++	Aérien	++	Longévité ++ fécondité +	Chiroptères (murin de Daubenton)
++	Aérien	+++	Longévité + fécondité +++	Insectes forestiers (féronie noire)
+	Terrestre	++	Longévité ++ fécondité +++	Amphibiens forestiers (salamandre)

Sous-trame ouverte

Capacités de dispersion	Modes de dispersion	Densités	Cycles de vie	Exemples
+++	Aérien	+	Longévité +++ fécondité +	Rapaces (chouette chevêche)
++	Terrestre	++	Longévité ++ fécondité ++	Petits mammifères (hérisson)
++	Aérien	+++	Longévité + fécondité +++	Rhopalocères (Myrtil)
+	Terrestre	+++	Longévité ++ fécondité ++	Lézards (lézard vert)

Sous-trame des cours d'eau*

Capacités de dispersion	Modes de dispersion	Densités	Cycles de vie	Exemples
+++	Terrestre	++	Longévité +++ fécondité +	Mammifères aquatiques (Loutre)
+++	Aérien	+	Longévité ++ fécondité ++	Oiseaux aquatiques (martin-pêcheur)
++	Aérien	+++	Longévité + fécondité +++	Odonates (Agrion de mercure)
+	Terrestre	+	Longévité +++ fécondité ++	Serpents (Couleuvre à collier)

*Aucune espèce strictement aquatique n'est proposée, car celles-ci n'ont pas été étudiées dans le cadre de CIRFE.

Sous-trame humide

Capacités de dispersion	Modes de dispersion	Densités	Cycles de vie	Exemples
++	Terrestre	+	Longévité +++ fécondité +	Amphibien anoure (Alyte accoucheur)
+++	Aérien	++	Longévité + fécondité +++	Rhopalocères (cuivré des marais)
+	Terrestre	+++	Longévité +	Orthoptères

			fécondité ++	(criquet ensanglanté)
+	Terrestre	+++	Longévité + fécondité +++	Amphibiens urodèles (triton crêté)

3. CONCLUSION SUR LE CHOIX DES ESPÈCES :

Le choix des espèces à modéliser, dans le cadre de l'étude de l'impact des ILTs, est une étape très importante. Pour faire son choix, le praticien doit prendre en compte :

- Les données disponibles sur sa zone d'étude afin d'établir la liste des espèces potentiellement impactées,
- confronter cette liste aux exigences de la procédure environnementale,
- confronter cette liste aux documents relatifs à la définition des trames vertes et bleues,
- maximiser l'hétérogénéité des espèces à modéliser pour représenter au mieux les enjeux potentiels sur l'ensemble de la biodiversité.

II. RECOMMANDATIONS SUR LES CARTES D'OCCUPATION DU SOL

GÉOMÉTRIE

Pour les outils de modélisation, les erreurs de géométrie (imprécisions concernant le tracé des polygones : croisement des arêtes, etc.) sont source de perte de réalisme. Il est donc impératif de travailler sur une carte respectant les standards de géométrie (par exemple ceux de l'ISO 19157).

RÉSOLUTION SPATIALE

D'après nos résultats se limitant à trois espèces, mais aux écologies très diversifiées et aux capacités de déplacements très contrastées, **l'utilisation d'occupations du sol dont les pixels auraient une taille supérieure à 10 m de côté risquerait d'altérer significativement le réalisme des résultats**, quel que soit l'outil de modélisation utilisé. L'échelle de digitalisation influence énormément les résultats. Elle doit donc être adaptée à l'objectif de l'étude (opportunité ou évaluation environnementale) et à l'écologie des espèces étudiées. Il est difficile de faire des recommandations claires sur ce sujet, néanmoins, il apparaît que **dans la majorité des cas, il faut privilégier une échelle de digitalisation inférieure au 1/10 000^e** pour obtenir des résultats précis et réalistes.

RÉSOLUTION TYPOLOGIQUE

La nomenclature EUNIS s'est révélée plus adaptée que la nomenclature Corine Land Cover. De plus, il semble recommandé de décrire les habitats **au niveau typologique 3 a minima** afin de rendre la modélisation possible pour tous les taxons. L'analyse économique a

montré que le coût d'acquisition de la carte d'occupation du sol en niveau 3 reste légèrement supérieur à celui du niveau 2 (différence de 0,28€/ha).

III. RECOMMANDATIONS SUR LES INFORMATIONS DE PARAMÉTRAGE À FAIRE FIGURER DANS LES ÉTUDES

Le programme CIRFE démontre que la gestion du paramétrage conditionne la qualité de la modélisation. En effet, l'objectivité et le réalisme de la modélisation dépendent de ces données d'entrée. Sa mise en œuvre doit donc être justifiée par les praticiens.

Dans le cadre d'une étude opérationnelle, le praticien en charge de la modélisation dispose de deux ressources pour effectuer le paramétrage de l'outil de modélisation : la bibliographie (scientifique et technique) et le dire d'experts.

Les **paramètres de la bibliographie scientifique et technique** reposent généralement sur des données empiriques de génétique des populations, de capture-marquage-recapture et de trajectométrie. Lorsqu'une espèce est largement documentée, le praticien peut obtenir plusieurs valeurs pour un paramètre donné. Il aura alors un choix méthodologique à opérer :

- Soit calculer une valeur moyenne à partir de ces différentes valeurs
- Soit choisir la valeur mesurée dans la zone d'étude la plus « proche » de celle visée par la modélisation. La proximité peut être, selon les cas, géographiques ou paysagères (dominante urbaine, dominante forestière, etc.)

Les **valeurs de paramètres obtenues par dire d'experts** peuvent fournir des données précises et fiables à condition de mettre en place une méthode de questionnaire permettant de recueillir l'expertise de manière standardisée. Le croisement de plusieurs expertises est favorable à l'obtention de valeurs robustes.

Une pratique courante mise en œuvre par les praticiens est l'ajustement itératif du paramétrage sur analyse de résultats intermédiaires. Cette approche diminue nécessairement l'objectivité de la modélisation puisqu'elle est corrigée par le praticien. Le praticien peut alors se baser sur des données d'inventaires ou sur son expertise pour corriger le paramétrage. Il est à noter que faire **ajuster la modélisation aux données d'inventaires constitue un biais** important en raison de leur couverture généralement non exhaustive du territoire d'étude.

Une approche alternative consiste à réaliser des **scénarios de paramétrage**. Cette approche permet **d'appréhender la sensibilité du diagnostic aux hypothèses de modélisation** et augmente l'objectivité du diagnostic écologique. À partir des résultats obtenus, le praticien a la possibilité soit de combiner les résultats de ces différents scénarios pour obtenir une modélisation « moyenne », soit de se baser sur le scénario le plus « probable » en discutant le diagnostic en lien avec les résultats des autres scénarios.

En conclusion, afin de pouvoir fournir aux services instructeurs les éléments nécessaires à l'évaluation du diagnostic écologique obtenu à partir de la modélisation, **il est recommandé au praticien de détailler :**

- 1) Les sources bibliographiques exploitées pour le paramétrage ainsi que le calcul/choix de la valeur retenue pour la modélisation
- 2) Les sources d'expertises et leur méthode de standardisation
- 3) Si existant, la mise en place d'ajustements itératifs et la méthode de correction

employée

- 4) Si existant, la mise en place de plusieurs scénarios de paramétrage et la méthode d'exploitation des résultats employée
- 5) La liste de la totalité des paramètres et leurs valeurs pour la modélisation sur laquelle se base le diagnostic écologique

IV. TABLEAU COMPARATIF DES OUTILS DE MODÉLISATION

Le guide d'aide à la décision a été conçu sous forme d'un tableau comparatif avec comme objectif d'apporter une information synthétique et pratique aux aménageurs et praticiens.

1. SÉLECTION DES OUTILS DE MODÉLISATION

Dans le cadre du programme CIRFE, 5 outils de modélisation ont été retenus (*voir Livrable II p.34*)

- Circuitscape
- Coût-déplacement
- Dilatation-érosion
- Graphab
- SimOïko

Ces outils de modélisation ont été retenus selon des critères d'opérationnalité pour les diagnostics portant sur la transparence des ILT (volet « continuités écologiques-Trame Verte et Bleue » ou « caractérisation des effets corridors/barrières ») et/ou portant sur l'effet des ILT en matière de fonctionnement des espèces protégées (volet « dossier CNPN »).

2. LES CRITÈRES DE COMPARAISON

La comparaison des outils a été structurée en 4 étapes :

1) Caractéristiques techniques et processus écologiques modélisés

Il s'agit d'apporter une description compréhensible pour les aménageurs et praticiens leur permettant d'appréhender les types de modélisation intégrés dans ces outils et leurs différences.

2) Gestion du paramétrage

L'objectif est de souligner les enjeux méthodologiques associés au paramétrage et donc des compétences associées à leur mise en œuvre. Il s'agit aussi d'étudier la sensibilité des outils à la résolution spatiale et typologique de l'occupation du sol qui conditionne fortement le coût de la mise en œuvre de la modélisation.

3) Exploitation des résultats

Les résultats de modélisation sont exploités en vue de réaliser un diagnostic écologique. La comparaison portera tout d'abord sur la portée informative des métriques calculées dans ces outils de modélisation. La comparaison détaillera ensuite les convergences et divergences de résultats sur la zone et les espèces cibles de l'étude et leur implication dans les décisions opérationnelles sur le projet d'ILT.

4) Estimation de la puissance prédictive

Le réalisme et la précision d'un outil de modélisation sont un critère essentiel à son exploitation opérationnelle. Il s'agit de déterminer de quelle manière le calcul de l'erreur des outils de modélisation est possible à partir de données de terrain.

Il est à noter que les outils de modélisation sont présentés selon un ordre alphabétique, et que la comparaison réalisée dans le cadre du programme CIRFE n'a pas pour objectif d'aboutir à une classification de ces outils.

Le tableau ci-dessous explicite les critères utilisés pour chaque étape de la comparaison :

Critères	Signification
Caractéristiques des outils de modélisation	
Accessibilité	Donne le mode de distribution de l'outil de modélisation
Théorie de modélisation	Nom de l'approche conceptuelle sur laquelle le modèle repose.
Score d'ambition de la modélisation des processus écologiques	Donne le nombre de processus écologiques modélisables par l'outil de modélisation. Ce peut être des comportements de dispersion, de reproduction, la survie, etc.
Gestion du Paramétrage	
Flexibilité du paramétrage	Appréciation obtenue à partir de la flexibilité méthodologique offerte à l'utilisateur pour le paramétrage de l'outil de modélisation
Étapes de mise en œuvre du paramétrage	Donne le nombre d'étapes de paramétrage que l'utilisateur doit réaliser pour obtenir une modélisation
Sensibilité à la pixellisation	Appréciation obtenue à partir des résultats de modélisation variant au niveau de la taille du pixel utilisé à la rasterisation de la carte d'occupation du sol (le format raster est nécessaire pour la plupart des outils)
Sensibilité à la résolution de digitalisation	Appréciation obtenue à partir des résultats de modélisation variant au niveau de l'échelle cartographique utilisée lors de la digitalisation de l'occupation du sol
Sensibilité à la résolution typologique	Appréciation obtenue à partir des résultats de modélisation variant au niveau de la typologie (EUNIS ou Corine Land cover) et de la finesse de description de l'occupation du sol (niveau 1 à 3 de chaque typologie)
Exploitation des résultats	
Métriques de dynamique des populations	Nombre et nature des métriques (résultats) apportant des informations sur la dynamique des populations de l'espèce modélisée
Métriques de dispersion	Nombre et nature des métriques (résultats) apportant des informations sur les déplacements en dispersion de l'espèce modélisée
Métrique de structure génétique	Nombre et nature des métriques (résultats) apportant des informations sur la structure génétique des populations de l'espèce modélisée
Adéquation des métriques pour la fonctionnalité des continuités écologiques	Appréciation obtenue à partir de la comparaison des informations attendues dans les textes réglementaires concernant la fonctionnalité des réseaux écologiques et les informations (métriques) issues des modélisations
Adéquation des métriques pour la viabilité des populations	Appréciation obtenue à partir de la comparaison des informations attendues dans les textes réglementaires concernant la viabilité des populations et les informations (métriques) issues des modélisations
Estimation de la puissance prédictive des outils	
Score de comparabilité avec des données empiriques	Appréciation obtenue à partir de la comparabilité des métriques à des données empiriques de génétique des populations, de Capture-Marquage-Recapture et de trajectométrie.
Comparabilité des outils entre eux	Possibilité (oui ou non) de mise en œuvre de la méthodologie de comparaison de modèles basée sur les hypothèses de Simpkins et al. (2018)

TABLEAU DE COMPARAISON DES OUTILS DE MODÉLISATION SERVANT DE GUIDE D’AIDE À LA DÉCISION

Critères	CircuitScape	Coût-déplacement	Dilatation-érosion	Graphab	SimOïko	Renvoi au livrable II
Caractéristiques des outils de modélisation						
Accessibilité	Logiciel open source (code source disponible et modifiable)	Via les logiciels SIG	Via les logiciels SIG	Logiciel libre d’accès	Logiciel payant en SaaS	p.71-78
Théorie de modélisation	Modèle des circuits électriques	Modèle de percolation	Modèle de morphologie mathématique	Modèle de graphes paysagers	Modèle multi-agents	
Score d’ambition de la modélisation des processus écologiques	4	1	1	4	25	
Gestion du paramétrage						
Flexibilité du paramétrage	Moyenne	Faible	Faible	Forte	Standardisée	p.79-82
Étapes de mise en œuvre du paramétrage	8	6	5	10	0	
Sensibilité à la pixellisation	Forte	Insensible	Faible	Moyenne	Moyenne	p.97-111
Sensibilité à la digitalisation	Moyen à Fort selon les espèces	Moyen à Fort selon les espèces	Moyen à Fort selon les espèces	Moyen à Fort selon les espèces	Moyen à Fort selon les espèces	p.112-114
Sensibilité à la résolution typologique	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	p.114
Exploitation des résultats						
Métriques de dynamique des populations	0	0	0	0	4 métriques quantitatives	p.115 - 126
Métriques de dispersion	1 métrique quantitative	1 métrique quantitative	1 métrique qualitative	> 10 métriques quantitatives	2 métriques quantitatives	
Métrique de structure génétique	0	0	0	0	6 métriques quantitatives	
Adéquation des métriques pour la fonctionnalité des continuités écologiques	Bonne	Faible	Faible	Bonne	Très bonne	
Adéquation des métriques pour la viabilité des populations	Faible	Faible	Faible	Faible	Très bonne	
Estimation de la puissance prédictive des outils						
Comparabilité avec des données empiriques	Indirecte partielle	Indirecte partielle	Non	Indirecte partielle	Directe complète	p.128-132
Comparabilité des outils entre eux	Graphab, SimOïko	Non	Non	CircuitScape, SimOïko	CircuitScape, Graphab	p.132-136

TABLEAU DE COMPARAISON DES OUTILS DE MODÉLISATION SERVANT DE GUIDE D'AIDE À LA DÉCISION

CONCLUSIONS

Circuitscape	Coût-déplacement	Dilatation-érosion	Graphab	SimOïko
Caractéristiques des outils de modélisation				
Circuitscape exploite des concepts physiques extrapolés à l'usage de modélisation écologique. Le flux de dispersion se comporte comme un circuit électrique et interagit avec le type de milieu traversé. Il prend en compte de manière simple la taille des populations comme facteur de pondération des flux de dispersants.	L'outil de modélisation coût – déplacement exploite des concepts physiques simples extrapolés à l'usage de modélisation écologique. Les individus dispersants se comportent comme un fluide et interagissent avec le type de milieu traversé.	L'outil de dilatation-érosion exploite une méthode de géographie. Les patchs d'habitat sont connectés ou non par dispersion en fonction de la distance qui les sépare.	Graphab exploite des concepts mathématiques extrapolés à l'usage de modélisation écologique. Le flux de dispersion se définit selon le chemin de moindre coût et interagit avec le type de milieu traversé. Il prend en compte de manière simple la taille des populations comme facteur de pondération des flux de dispersants.	SimOïko simule la vie d'individus à partir de la description mécanistique des processus écologiques de leur espèce (cycle de vie). Les individus dispersants sont en capacité d'appréhender les milieux traversés de proche en proche. Des populations sont définies à partir des individus qui les composent et leurs dynamiques enregistrées.
Gestion du paramétrage				
Tous les modèles sont sensibles à la qualité de la carte d'occupation du sol en particulier l'échelle de digitalisation et la finesse typologique.				
Cet outil a une interface utilisateur ergonomique. L'utilisateur a plusieurs choix méthodologiques à faire, mais la prise en main de cet outil reste envisageable pour un utilisateur professionnel. Son interface et guide utilisateur sont en anglais.	Cet outil est simple d'utilisation et demande une vigilance uniquement dans les choix méthodologiques de résolution spatiale.	Sa simplicité le rend très facile d'utilisation et de paramétrage.	Cet outil a une interface utilisateur ergonomique en français. Il comporte l'avantage de proposer beaucoup de flexibilité dans son paramétrage, ce qui impose la nécessité d'une exploitation par un utilisateur averti pour justifier des choix méthodologiques réalisés.	La plateforme de vente de simulations offre une interface utilisateur ergonomique en français. L'utilisateur peut uniquement choisir les espèces qu'il souhaite simuler. Le paramétrage des espèces est réalisé par les concepteurs de cet outil. Les données de paramétrage sont transmises aux utilisateurs.

TABLEAU DE COMPARAISON DES OUTILS DE MODÉLISATION SERVANT DE GUIDE D’AIDE À LA DÉCISION

CONCLUSIONS

Circuitscape	Coût-déplacement	Dilatation-érosion	Graphab	SimOïko
Exploitation des résultats				
Les résultats permettent de traiter les effets de l’ILT sur le déplacement des espèces tant pour l’étude des continuités écologiques que pour celle de l’état de conservation des espèces.	Les résultats permettent de traiter les effets de l’ILT sur le déplacement des espèces tant pour l’étude des continuités écologiques que pour celle de l’état de conservation des espèces.	Les résultats permettent de traiter uniquement l’effet des ILT sur la localisation des zones de déplacements dans le cadre de l’étude des continuités écologiques. La portée informative des résultats est très limitée	Les résultats permettent de traiter les effets de l’ILT sur le déplacement des espèces tant pour l’étude des continuités écologiques que pour celle de l’état de conservation des espèces.	Les résultats permettent de traiter les effets de l’ILT sur la dynamique démographique et le déplacement des espèces ainsi que sur leur structure génétique. Il répond aux exigences des études sur les continuités écologiques et sur l’état de conservation des espèces.
Estimation de la puissance prédictive des outils				
Le réalisme d’un modèle dépend de sa puissance prédictive qui s’estime par comparaison avec des données empiriques. Une phase de validation du réalisme des outils de modélisation sur des sites expérimentaux est fortement souhaitable en amont de leur exploitation opérationnelle en routine.				
Cet outil fournit des métriques de type indices (abstraites) qui rendent difficile l’estimation de sa puissance prédictive à partir de données empiriques. Seules des données de trajectométrie peuvent être directement utiles pour estimer partiellement la puissance prédictive de CircuitScape (données non produites par le programme CIRFE)	Cet outil fournit des métriques de type indices (abstraites) qui rendent difficile l’estimation de sa puissance prédictive à partir de données empiriques. Seules des données de trajectométrie peuvent être directement utiles pour estimer partiellement la puissance prédictive de Coût-Déplacement (données non produites par le programme CIRFE)	Du fait de ses résultats qualitatifs, calculer la puissance prédictive de cet outil est impossible.	Cet outil fournit des métriques de type indices (abstraites) qui rendent difficile l’estimation de sa puissance prédictive à partir de données empiriques. Seules des données de trajectométrie peuvent être directement utiles pour estimer partiellement la puissance prédictive de Graphab (données non produites par le programme CIRFE)	Il est possible d’estimer la puissance prédictive de SimOïko avec tout type de données empiriques. Le réalisme de cet outil a pu être estimé à partir des données de génétique et de capture-marquage-recapture du programme CIRFE.