

## Livrable

1. Infrastructures et bruit
2. Infrastructures et transparence écologique
3. Premières propositions d'amélioration

## Auteurs/Organismes

De ROINCÉ Catherine (TOROIKO/CINOV)  
FRANÇOIS Denis (IFSTTAR)  
GUILLOTEAU Sylvain (VINCI AUTOROUTES)  
LE GALLIC Yann (SETEC)

LEROUX Denis (SETEC)  
PAOLI Florence (SETEC)  
RUAS Anne (IFSTTAR)  
TOLMER Charles-Edouard (EGIS)

## Infrastructure et Environnement (UC6)

MINnD\_TH03\_UC06\_01\_Infrastructure\_Environnement\_007\_2015

Décembre 2015

# UC6 – Infrastructure et environnement

## 1- Infrastructures et bruit

# Sommaire

<b>1. CONTEXTE</b> .....	<b>3</b>
1.1. Définition du cas d'usage « Bruit et infrastructure » .....	3
1.2. Cadre réglementaire .....	4
<b>2. PROCESSUS MÉTIER : LES OBJETS, FLUX DE DONNÉES ET LEURS TRAITEMENTS</b> .....	<b>5</b>
2.1. Problématique .....	5
2.2. Méthodologie .....	5
2.3. Étapes métier du processus d'analyse acoustique .....	6
2.4. Diagrammes de cas d'utilisation .....	10
2.5. Intégration des différents objets dans le processus d'étude acoustique .....	13
2.6. Tableaux de synthèse des objets et transformations .....	14
<b>3. ANALYSE DES INTERFACES ENTRE DONNÉES D'INFRASTRUCTURES ET DE SIMULATION DU BRUIT</b> .....	<b>17</b>
3.1. Problématique .....	17
3.2. Analyses pour le cas d'usage « Infrastructures et bruit » .....	17
<b>4. HISTORISATION DES DONNÉES</b> .....	<b>26</b>
<b>5. INTERFACES POUR L'INTÉGRATION DE DONNÉES CONCERNANT LA FAUNE</b> .....	<b>28</b>
5.1. Problématique .....	28
5.2. Introduction .....	29
5.3. Que sait-on de l'impact du bruit d'une ITT sur les processus écologiques ? .....	29
5.4. Principe et pratiques de l'intégration du bruit dans les outils de modélisation de la faune .....	34
5.5. Conclusions et perspectives .....	37
<b>6. BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>39</b>
6.1. Partie I .....	39
6.2. Partie 2 .....	40
<b>7. ANNEXES</b> .....	<b>42</b>
7.1. Annexe I .....	42

# I. CONTEXTE

## I.1. Définition du cas d'usage « Bruit et infrastructure »

### Objet du document

L'objet de ce document est de décrire, par rapport à la méthodologie et aux hypothèses d'une étude acoustique, le cycle de vie des données d'études de bruit pour un projet d'infrastructure linéaire.

Nous nous intéressons dans un premier temps :

- aux modèles utilisés,
- à la gestion des interfaces,
- aux échanges entre acteurs,
- à la validation et l'archivage des données ou objets.

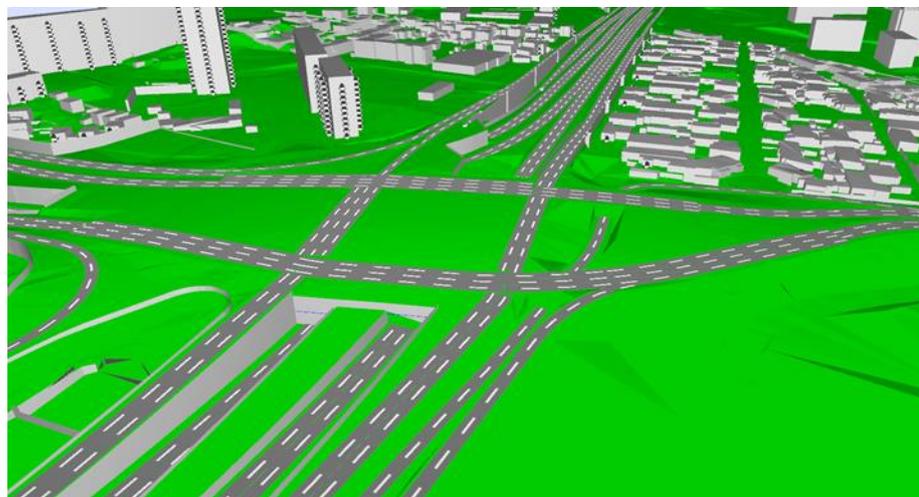
### Échange et transformation d'information

Par conséquent, nous ne nous intéressons pas uniquement à la partie technique ou réglementaire de la gestion des données, mais également à tout ce qui concerne les échanges et transformations d'information.

La réflexion décrite dans cette partie est basée sur un exemple d'infrastructure routière, mais peut parfaitement être portée sur d'autres types de projets moyennant quelques adaptations sur les acteurs, workflows<sup>1</sup> et objets manipulés.

Un contexte urbain, pour montrer la pertinence de la modélisation 3D

Enfin, nous plaçons notre analyse dans un contexte plutôt urbain afin de bien mettre en valeur au travers des interactions et échanges d'informations entre les acteurs, l'importance de la modélisation 3D des objets manipulés.



Exemple de projet routier vu en 3D

### Phénomènes de pertes d'informations et de ressaisies

Nous cherchons ici à démontrer les problématiques d'échanges de données dans ce cas précis d'étude acoustique et notamment les phénomènes de pertes d'informations et de ressaisies, en particulier sur la partie modélisation et représentation visuelle 3D des objets. Cet exemple est pertinent puisqu'en tant qu'étude environnementale, l'échelle de travail est plus petite que celle des objets de conception à considérer (échelle du projet). Nous travaillons donc à la convergence des échelles des SIG et de la CAO avec par conséquent des manières de représenter et de gérer l'information bien différentes.

<sup>1</sup> Workflow : Séquence d'étapes, de transformations, d'états et de validations que suit un objet.

## I.2. Cadre réglementaire

### Présentation du cadre réglementaire

Les études acoustiques et la mise en place de mesures de réduction de bruit s'inscrivent dans un cadre réglementaire et sont soumises à obligation de résultat.

La démarche de mise en place des mesures de réduction du bruit peut être volontaire de la part de l'État, du Maître d'Ouvrage ou d'une des parties prenantes. Il peut par exemple y avoir des engagements de l'État qui donnent des conditions spécifiques à respecter (un type de protection particulier, un seuil plus restrictif que la réglementation en vigueur, des horizons d'études lointains, etc.).

### Obligations du MOA

Les obligations du Maître d'ouvrage (MOA) sont les suivantes :

- Engagement de résultats.
- Respects des seuils réglementaires en vigueur sur toute la durée de vie de l'infrastructure.
- Suivi permanent (bilan à la mise en service et à + 5 ans après la mise en service (LOT)).

### Responsabilité du MOA

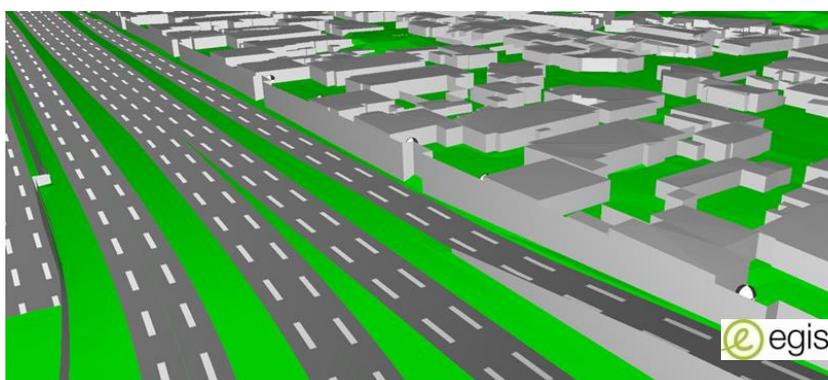
La responsabilité du Maître d'ouvrage porte sur les points suivants :

- Le MOA est responsable de l'infrastructure.
- Les bureaux d'études participant à la conception de l'infrastructure ont la responsabilité du dimensionnement (traçabilité de la solution retenue et de sa justification).
- Les données d'entrée servant à l'établissement du modèle prévisionnel sont primordiales : matériel roulant, composition du trafic, débits de trafics, vitesse, paramètre de chaussée ou de voie ferrée, etc.

### Dossiers des études

Les principaux dossiers des études sont les suivants :

- Études préliminaires (APS/AVP<sup>2</sup>) : permettent d'identifier les secteurs à enjeux et de pré-dimensionner les ouvrages (fixe une enveloppe budgétaire).
- Étude d'impact et dossier d'EPDUP<sup>3</sup> : présentent les variantes et la solution de protections retenue.
- APD<sup>4</sup> : rentre plus dans le détail et affine le dimensionnement et intègre les nombreuses interfaces.



Exemple de mise en place de murs antibruit en phase étude d'impact (source : Egis)

<sup>2</sup> APS/APD : Avant Projet Sommaire / Avant Projet.

<sup>3</sup> EPDUP : Enquête Préalable à la Déclaration d'Utilité Publique.

<sup>4</sup> AVP : Avant Projet Détaillé.

## 2. PROCESSUS MÉTIER : LES OBJETS, FLUX DE DONNÉES ET LEURS TRAITEMENTS

### 2.1. Problématique

<b>Questions abordées</b>	<p>Cette partie s'intéresse en particulier au déroulement actuel des processus métiers liés aux études acoustiques et à son analyse. Cette partie répond aux questions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quelles sont les grandes étapes d'une étude d'impact acoustique d'une infrastructure linéaire ?</li> <li>• Quels sont les données ou objets manipulés ?</li> <li>• Quels sont les acteurs qui interviennent dans ce cas d'usage ?</li> <li>• Par quels formats transitent ces informations ?</li> <li>• Quels traitements subissent les données lors de ce processus ?</li> <li>• Quels logiciels sont utilisés avec quelles séquences de tâches (entrants, modifications, sortants) ?</li> <li>• Quels sont les livrables et sous quelle forme sont-ils disponibles et diffusés ?</li> </ul>
---------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 2.2. Méthodologie

<b>Composantes à prendre en compte</b>	<p>Cette partie vise à décrire en détail les objets et données manipulés lors d'une étude acoustique pour un projet d'infrastructure routière. Elle comprend également une analyse des outils manipulés et des traitements à réaliser sur ces objets et données. Nous incluons dans ce travail une <b>forte présence de la composante 3D de la gestion de l'information</b>.</p> <p>La seconde composante importante de cette partie consiste à <b>décrire les flux d'informations autour de ce cas d'usage</b>. Nous nous intéressons donc également :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• aux flux amont et aval du processus de dimensionnement des protections acoustiques,</li> <li>• aux flux entre acteurs techniques spécifiques à ce dimensionnement.</li> </ul>
<b>Présentation du processus complet de manipulation de l'information</b>	<p>Répondre aux questions ci-dessus revient à présenter le processus complet de manipulation de l'information lors des études acoustiques.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nous commençons par la présentation des étapes d'une étude acoustique (cas de la création d'une nouvelle infrastructure routière) et définissons les objets concernés.</li> <li>2. Ensuite, nous réalisons une analyse générale des échanges et besoins pour trois éléments fondamentaux que sont :       <ul style="list-style-type: none"> <li>– le modèle interne de l'outil utilisé (CadnaA),</li> <li>– les sortants de l'analyse,</li> <li>– la MN<sup>5</sup> de synthèse qui intègre les éléments d'étude acoustique.</li> </ul> </li> <li>3. Nous passons ensuite à la description des processus et des traitements subis par ces objets.</li> <li>4. La partie suivante (Partie III) consistera en l'analyse de cette partie II.</li> </ol>

<sup>5</sup> MN : Maquette numérique.

### Formalisme de représentation : l'UML

Nous avons retenu comme formalisme de représentation l'UML<sup>6</sup>. L'UML se prête très bien à la représentation des objets et processus que nous souhaitons décrire ici, comme cela est démontré dans de nombreux travaux :

- (Zignale, 2013) traite avec l'UML de problématiques similaires à celles de ce cas d'usage : travail collaboratif adapté à des pratiques métiers, méthodes et usages.
- (Billen, Laplanche, Zlatanova, & Emgard, 2008) montre un intérêt certain pour l'UML lors de la création d'un modèle de données pour l'information spatiale 3D urbaine.

Nous allons donc utiliser ici les diagrammes de classes ainsi que les diagrammes de cas d'utilisation (définitions ci-dessous).

#### Définitions complémentaires sur l'UML

Une classe est une description d'un ensemble d'objets ayant une sémantique, des attributs, des méthodes et des relations en commun. Un objet est une instance de classe (Charroux, Osmani, & Thierry-Mieg, 2010). Il s'agit donc d'un ensemble d'objets qui partagent une structure commune et un comportement commun (Morley, Hugues, & Leblanc, 2008). Les objets manipulés lors d'un projet sont des instances des classes.

- Un **Diagramme des classes** modélise la structure statique d'un système, en représentant graphiquement les classes interconnectées par des associations ou des relations de généralisation (Audibert, 2014).
- Un **Diagramme de cas d'utilisation** permet de représenter les interactions fonctionnelles entre les acteurs et le système étudié. Il est particulièrement important pour l'organisation et l'identification des grandes fonctions du système (Audibert, 2014).

Voir (Audibert, 2014; Booch, 1992; Charroux et al., 2010) pour plus de détails sur ce formalisme.

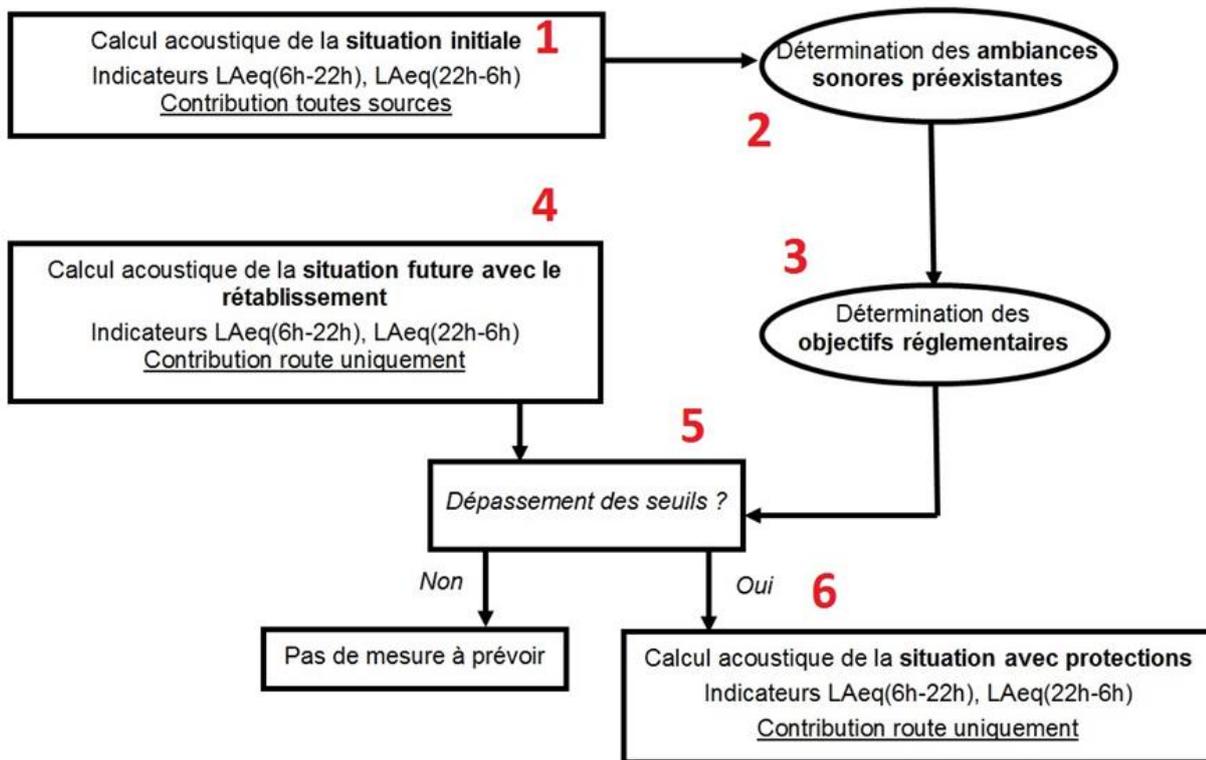
## 2.3. Étapes métier du processus d'analyse acoustique

### Cas de la création d'une nouvelle infrastructure routière : étapes générales

La figure suivante reprend les étapes principales d'une étude acoustique lors de la création d'une nouvelle infrastructure. Une étape préliminaire de calage du logiciel d'analyse (étape 0) est nécessaire. Cette étape a pour objectif de :

- Définir les paramètres (propriétés météorologiques, absorption acoustique du sol, nombre de réflexions) utilisés dans l'outil.
- Calibrer les paramètres du modèle interne de l'outil de calculs acoustiques pour être cohérent avec les mesures faites sur site.
- Calibrer les propriétés phoniques des murs existants et des revêtements routiers.

<sup>6</sup> UML: Unified Modeling Language : Langage de modélisation unifié, largement utilisé dans l'industrie de manière générale pour la modélisation.



Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement (ou d'une nouvelle infrastructure routière)

### Définition des objets manipulés

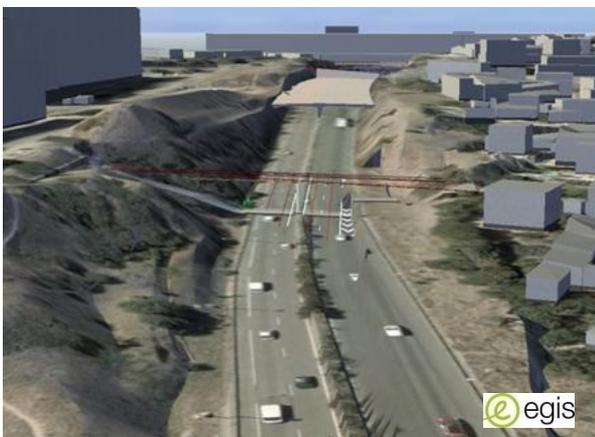
#### MNT : Modèle numérique de terrain

Les objets manipulés sont décrits dans les paragraphes suivants :

Le MNT<sup>7</sup> est dans un premier temps représentatif de l'état existant avant le projet (topographie du sol et nature des sols). Puis il intègre les modifications dues aux différents ouvrages et plateformes du projet.

L'étude acoustique manipule deux objets distincts :

- le MNT avant le projet, pour calculer l'état initial des niveaux de bruit,
- le MNT modifié par le projet, pour évaluer les modifications des niveaux sonores et les propositions de protections acoustiques.



MNT (avec orthophoto drapée) avant le projet (à gauche) et après le projet (à droite)

<sup>7</sup> MNT : Modèle numérique de Terrain.

**Plateforme<sup>8</sup> existante**

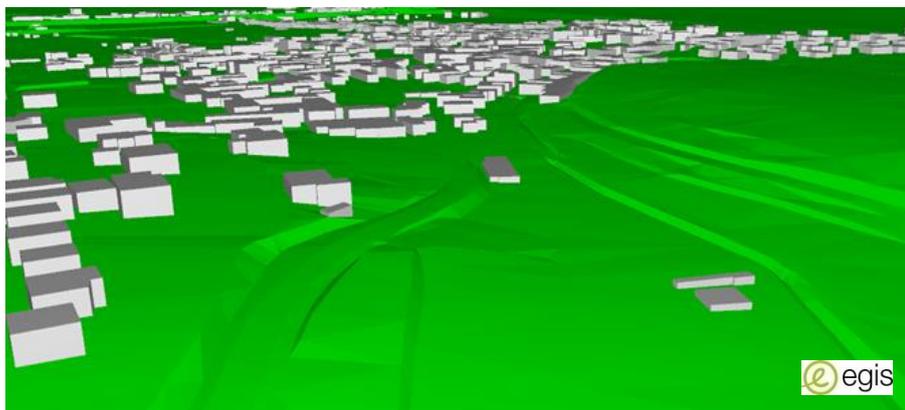
Les plateformes existantes représentent le réseau viaire existant, qui sera ponctuellement connecté aux plateformes du projet. Elles servent à modéliser le bruit actuel sans l'infrastructure en projet (voir figure à gauche).

**Plateforme projet**

Les plateformes projet représentent les zones roulables du projet en cours de conception (emprise de la route conçue par le projet). L'axe projet est également une donnée source qui va être l'objet porteur du bruit. Elles modifient généralement le MNT par leurs emprises et aménagements en bordures (talus, fossés). (voir figure de droite)

**Bâtiment existant**

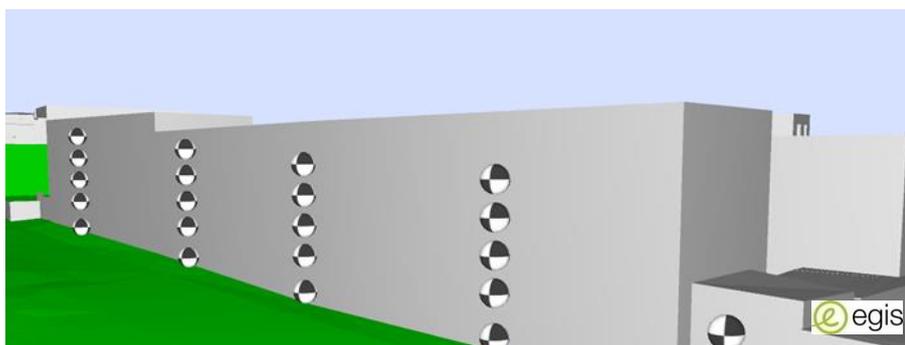
Les bâtiments existants sont dans un premier temps des emprises au sol avec un attribut de hauteur du toit. Ils serviront à positionner les récepteurs pour les calculs de niveau sonore. Il peut exister des bâtiments faisant partie du projet, mais ce cas est assez rare.



Maquette numérique de synthèse avec MNT et bâtiments existants

**Récepteur acoustique**

Un récepteur acoustique est un objet ponctuel créé dans l'outil d'analyse acoustique. Les récepteurs sont placés à 2 m en avant des façades des bâtiments évalués et pour chaque étage des bâtiments sensibles au bruit (logement, santé, éducation). Ils servent à l'outil de modélisation acoustique de points de calcul pour produire des résultats explicites (valeurs de niveau sonore selon les différents scénarios).



Récepteur acoustique

**Interface de tranchée couverte (TC)**

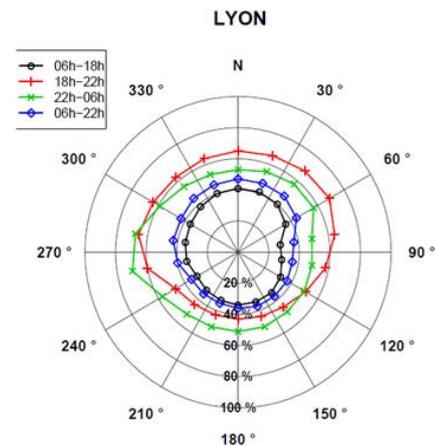
Une interface de tranchée couverte (TC) est une zone avec un comportement acoustique particulier. Cet objet est une source de bruit qui matérialise pour les calculs le niveau sonore sortant aux extrémités d'une tranchée couverte (TC).

<sup>8</sup> Une plateforme (ou plate-forme) est principalement constituée de la couche de roulement des véhicules ainsi que des accotements ou trottoirs.

### Conditions météorologiques

L'effet des conditions météorologiques est mesurable dès que la distance Source / Récepteur est supérieure à une centaine de mètres. Il croît avec la distance. La variation du niveau sonore à grande distance est due à un phénomène de réfraction des ondes acoustiques dans la basse atmosphère, due à des variations de la température de l'air et de la vitesse du vent.

Une liste de 40 villes réparties sur toute la France avec ses paramètres météorologiques propres est enregistrée dans le logiciel est dans les codes de calculs. La figure ci-contre présente le diagramme considéré pour la ville de Lyon, qui prend en compte les vents dominants les plus favorables à la propagation du bruit.



Valeurs d'occurrences météorologiques favorables, pour la ville de Lyon dans toutes les directions

### Mur acoustique

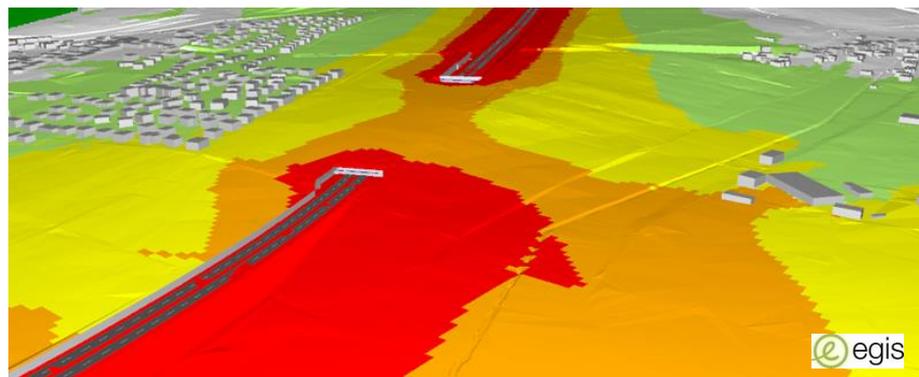
Un mur acoustique est un élément dédié à l'absorption ou à la réflexion des nuisances sonores. Leur dimensionnement (géométrie et matériaux) et leur implantation sont la finalité de l'étude acoustique.

### Ouvrages de génie civil

Les ouvrages d'art autres que les TC ne sont généralement pas modélisés pour l'étude acoustique : leur impact sur la diffusion du bruit n'est pas significatif ou bien est défavorable à la diffusion du bruit : il n'est donc pas utile de les prendre en compte ici.

### Isophone

Un isophone est une représentation particulière de la modélisation des études de bruit. Les isophones peuvent être déployés sur tout le linéaire du projet ou bien seulement sur de petites zones qui nécessitent une attention particulière (discussion avec les élus ou riverains par exemple).



Exemple d'isophones en vue 3D sur un projet routier : les isophones délimitent l'emprise de chaque couleur, qui correspond à un niveau de bruit (source : Egis)

## 2.4. Diagrammes de cas d'utilisation

### Précisions sur le formalisme

Les diagrammes de cas d'utilisation décrivent les exigences auxquelles un système doit pouvoir répondre. Le formalisme constitue donc une étape d'analyse préalable à la conception d'un système ou modèle de données (Laplanche, 2002). Concrètement, l'acteur agit sur le système étudié au travers de l'action du cas d'utilisation.

**Acteur** : c'est l'idéalisation d'un rôle joué par une personne externe (ou acteur moral), un processus ou une chose qui interagit avec le système modélisé (Audibert, 2014).

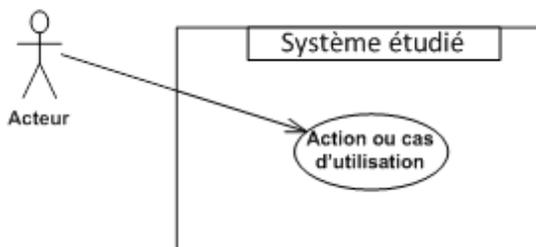


Illustration du formalisme pour les cas d'utilisation

**Action** : ou « cas d'utilisation » est une unité cohérente représentant une fonctionnalité visible de l'extérieur du système. Un cas d'utilisation réalise un service de bout en bout, avec un déclenchement, un déroulement et une fin, pour l'acteur qui l'initie. Un cas d'utilisation modélise donc un service rendu par le système, sans imposer le mode de réalisation de ce service (Audibert, 2014).

Les objectifs de cette représentation des cas d'utilisation sont :

- Décrire les grandes étapes d'utilisation du système étudié, et donc plus spécifiquement, dans notre cas, identifier les échanges de données.
- Identifier les besoins et difficultés d'échanges des utilisateurs.
- Comprendre les interactions entre acteurs autour des mêmes données ou d'un même système.

### Définition des acteurs du cas d'usage

Pour cette étude, nous considérons les acteurs suivants :

#### Conception de l'infrastructure

Les acteurs pour la conception de l'infrastructure sont :

- Bureau d'études acoustique : acteur central de ce cas d'usage.
- Direction des études : bureau d'étude maîtrise d'œuvre.
- BE air : bureau d'étude des pollutions aériennes.
- BE GC : bureau d'étude Génie civil.
- Bureau maquette : acteur responsable de l'intégration des objets et données dans la maquette numérique de synthèse.
- Direction de projet.
- Direction des études.

#### Autres acteurs

Autres acteurs :

- Architecte et/ou paysagiste.
- MOA : Maîtrise d'ouvrage.
- Entreprise de travaux.
- Administrations territoriales : CETE, CEREMA, DREAL, etc.
- Riverains.

**Définition des systèmes étudiés**

Pour notre travail, nous considérons uniquement **l'outil CadnaA<sup>9</sup>** qui est du point de vue national l'outil le plus utilisé pour ce genre d'étude. Les autres outils disponibles sur le marché ont un fonctionnement similaire à l'outil CadnaA et fournissent les mêmes formats de sortants.

Pour cette étude, nous considérons les systèmes suivants :

Système	Finalité
Modèle CadnaA	Identifier les flux de données entrants dans l'outil d'étude acoustique et la manière dont est alimenté ce modèle.
Sortants de l'outil CadnaA	Connaître la nature des livrables à émettre selon l'utilisateur de ces sortants.
Maquette numérique de synthèse	Connaître le support d'échange d'information entre le BE d'étude acoustique et la maquette de synthèse : on pourra ainsi identifier par exemple les manques concernant les possibilités d'export de l'outil CadnaA.

**Diagrammes des cas d'utilisation**

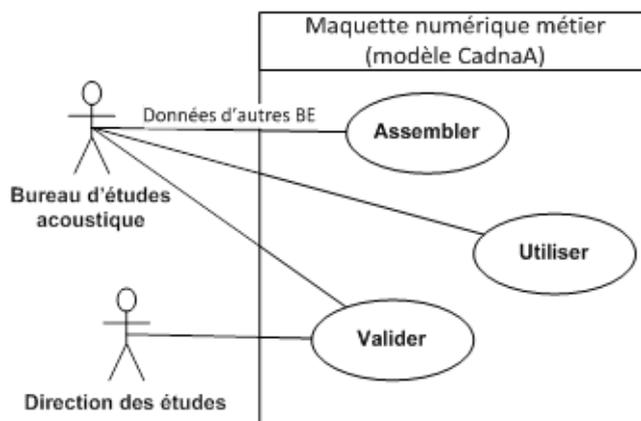
Nous vous présentons ci-dessous les diagrammes des cas d'utilisation.

**Étude du modèle interne à l'outil CadnaA**

Le bureau d'études acoustiques est le seul acteur qui agit sur le modèle interne à CadnaA. Il :

- intègre les données provenant d'autres acteurs (données de l'existant ou données de conception),
- valide la conformité du modèle et des analyses avec la réglementation et les exigences du client.

Par conséquent, les problèmes mis en évidence par ce cas d'utilisation sont situés à l'intégration des données provenant des autres acteurs (voir figure ci-dessous). Nous verrons plus bas quels sont précisément les problèmes d'intégration.



Cas d'utilisation du modèle 3D interne à l'outil CadnaA

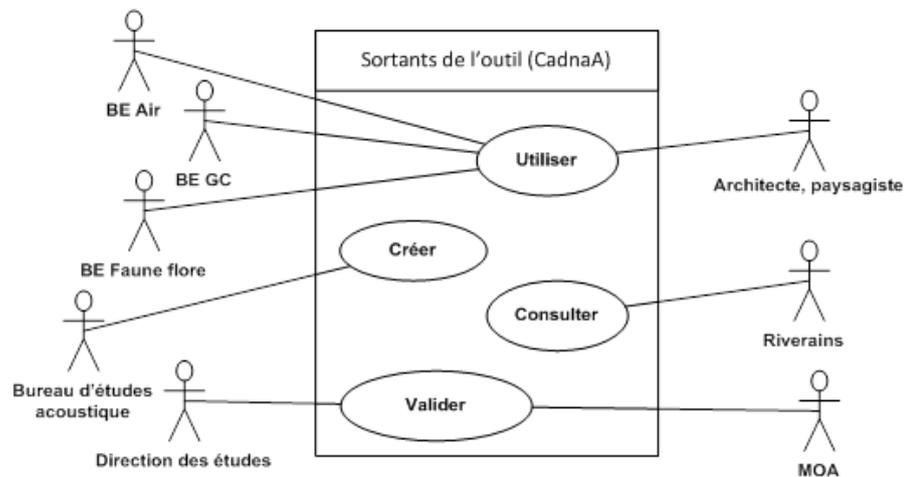
<sup>9</sup> CadnaA est une solution logicielle pour le calcul, l'évaluation, la prévision et la présentation de l'exposition acoustique et de l'impact des polluants dans l'air.

**Étude des sortants de CadnaA**

Les sortants de l'étude acoustique sont les suivants :

- Isophones : courbes ou surfaces de niveaux de bruits.
- Récepteurs acoustiques en façade des bâtiments (tableau ou base de données géo spatiale).
- Localisation des mesures de réduction du bruit (murs antibruit, merlons, enrobés phoniques, etc.).
- Préconisations dans des rapports.

La figure suivante illustre les acteurs qui interagissent avec les sortants de l'outil métier CadnaA.



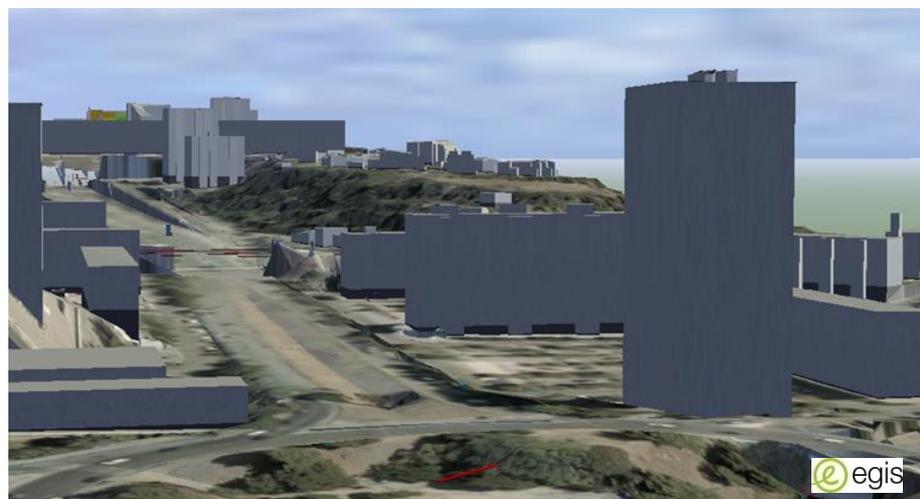
Cas d'utilisation des sortants de l'outil métier CadnaA

**Étude de la maquette numérique de synthèse**

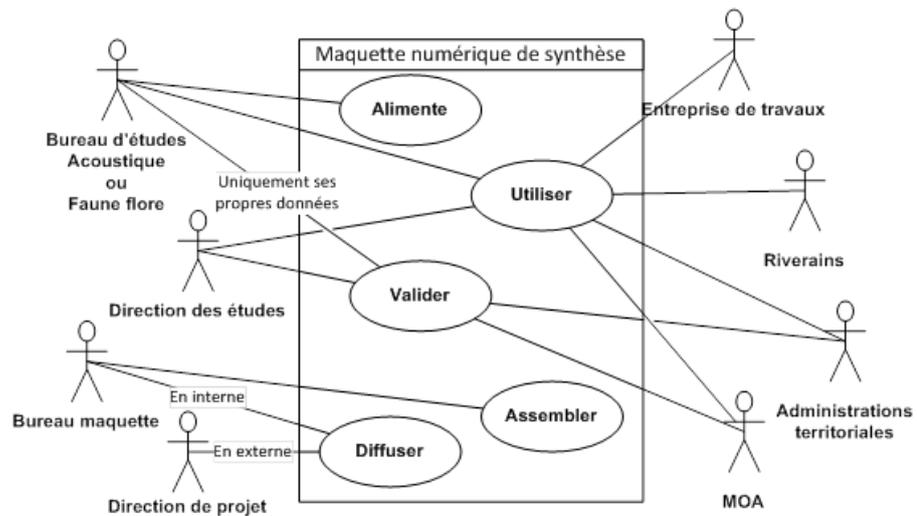
Les éléments des études acoustiques qui alimentent la MN de synthèse (voir figure ci-dessous) sont les suivants.

- murs antibruit,
- merlons,
- récepteurs acoustiques,
- enrobés phoniques,
- isophones.

Le schéma suivant traite ce cas d'utilisation autour de la MN de synthèse.



Vue de la maquette numérique de synthèse, pour comparaisons avec l'image de la page 4



Cas d'utilisation de la maquette numérique de synthèse. Le BE Acoustique alimente la MN de synthèse au travers de la modélisation faite par le Bureau maquette. Selon les outils de MN de synthèse, il se peut que le Bureau Maquette n'existe pas. L'intégration entre base de données et MN est directe, sous condition d'interopérabilité principalement.

## 2.5. Intégration des différents objets dans le processus d'étude acoustique

### Tableau récapitulatif

En lien avec la figure de la page 7 « Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement », nous avons établi ce tableau qui identifie pour chaque étape le ou les objets qui entrent dans le processus de modélisation. Certaines étapes consistent uniquement à ajouter des attributs à des objets déjà présents dans la maquette numérique d'analyse acoustique.

Objets \ Etapes	1	2	3 : identification des seuils à respecter	4	5	6
MNT	X (entrant)			(X)		
Emprises	X (entrant)					
murs existants	X (entrant)					
bâtiments	X (entrant)	affectation des zones modérées et non modérées		(isolation façades)		
trafic initial	X (entrant)					
voirie existante	X (entrant)					
récepteurs	X (entrant)			impact du projet seul		
réglementation			X (entrant)		X (entrant)	
isophones						faits ponctuellement selon le besoins ; jamais sur tout le projet (sortant)
murs projet				(X) (sortant)		
plateformes projet				X (entrant) (enrobé acoustique)		
interface tranchée couverte projet				X (entrant)		

Les étapes 1 à 6 sont celles décrites dans le schéma de la page 7 « Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement ». Les parenthèses dans ce tableau indiquent que ces objets n'apparaissent qu'après la première itération (après la première étape 6).

## 2.6. Tableaux de synthèse des objets et transformations

### Préambule

Dans cette partie, nous répondons à la problématique posée dans la partie précédente par des tableaux de synthèse pour chaque objet. Chaque tableau précise : l'objet traité et ses évolutions (géométrie, attributs), les formats utilisés, les opérations de traitement ainsi que les acteurs réalisant ces traitements et manipulations des objets.

Dans un premier temps nous précisons le formalisme retenu pour cette synthèse.

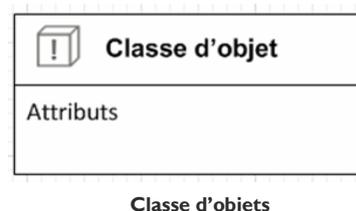
### Définition du formalisme utilisé

Nous détaillons dans cette partie les objets manipulés dans le cas d'usage « Bruit et infrastructure ». Nous utilisons comme formalisme de représentation les diagrammes de classes de l'UML. C'est un formalisme répandu qui permet la modélisation uniformisée de concepts tant statiques que dynamiques.

L'UML impose **une structuration stricte de la modélisation, mais qui est universelle et permet de ne s'intéresser qu'aux problématiques de fond du problème à modéliser.**

#### Modélisation de classes d'objets

Avec le formalisme UML, on modélise des **Classes** : c'est une description formelle d'un ensemble d'objets ayant une sémantique et des caractéristiques communes. Par exemple une classe voiture ou personne (Audibert, 2014).



Un objet manipulé est une instance d'une classe (classe *voiture*, instance *cette voiture-ci avec telle marque, telle couleur etc.*). Les attributs d'une classe sont listés dans la casse du bas d'une classe (voir ci-contre).

### Perceptory, outil de formalisme visuel complémentaire

En complément de ce formalisme, qui peut paraître austère pour des novices, nous utilisons un formalisme visuel complémentaire appelé Perceptory. C'est un complément au formalisme UML.

Perceptory est un outil simple, efficace et testé de modélisation visuelle de bases de données spatiales et de base de données spatio-temporelles. Il permet de personnaliser facilement l'aspect visuel des modèles de données modélisés en UML en ajoutant des pictogrammes qui indiquent la dimensionnalité des objets (0, 1, 2 ou 3 dimensions) de la modélisation (suivre le lien <http://sirs.scg.ulaval.ca/Perceptory/introduc.asp>). Une partie temporelle permet également de spécifier des paramètres temporels, mais ils ne seront pas utilisés ici. Les principaux pictogrammes sont décrits ci-après.

Pour plus d'information, on pourra se référer au site <http://sirs.scg.ulaval.ca/> et aux références (Bédard, 1999 ; Larrivée, Bédard, & Pouliot, 2006).

	pictogramme	description
Géométrie simple		Objets représentés par un point (objets à 0 dimension)
		Objets représentés par une ligne (objets à 1 dimension)
		Objets représentés par une surface (objets à 2 dimensions)
	 0,1	Objets représentés par une géométrie simple avec multiplicité
Géométrie alternative		Les objets représentés possèdent une ou l'autre des géométries proposées
Géométrie multiple		Les objets représentés possèdent autant de géométries qu'il y'a de pictogrammes
Géométrie complexe		Objets composés en même temps de toutes les géométries proposées

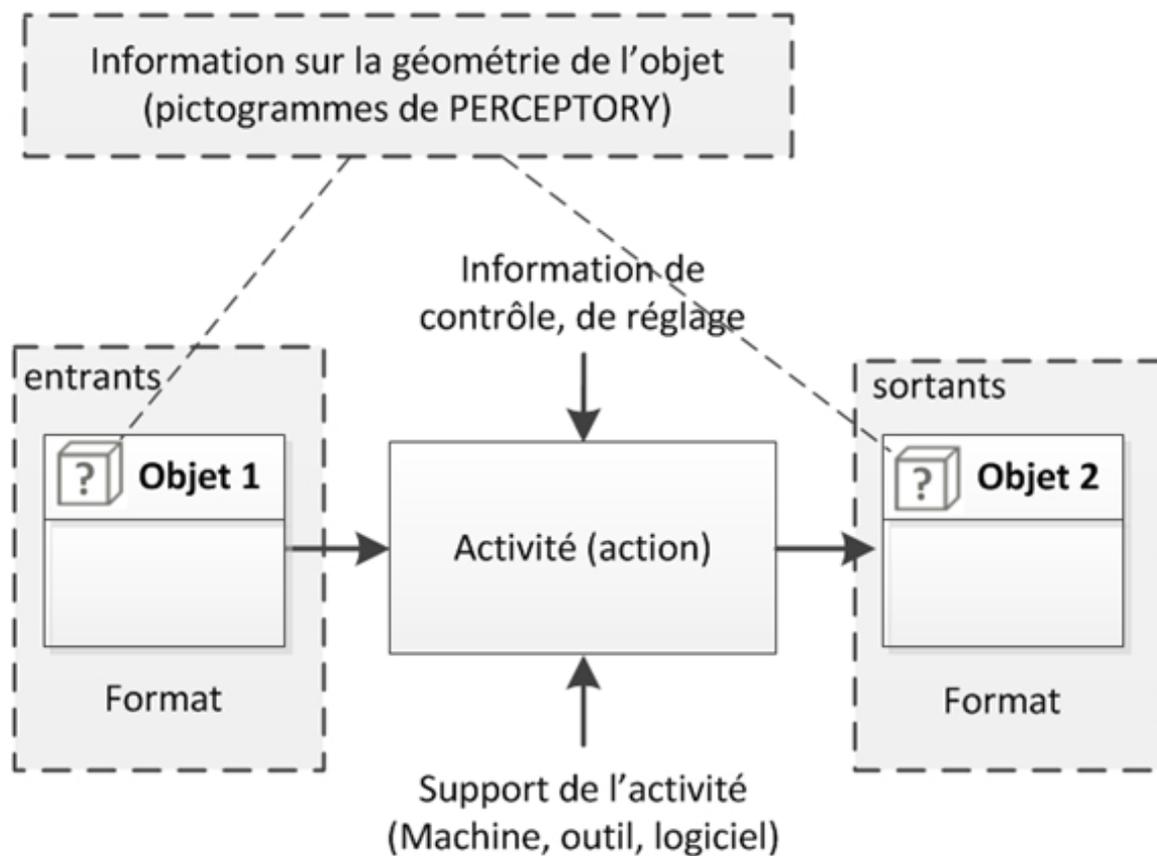
Principaux pictogrammes spatiaux de PERCEPTORY, d'après (Larrivée et al., 2006), image de (Zoghalmi, 2013)

Lorsqu'un pictogramme de Perceptory est présent pour une *classe* ou *instance*, cela signifie que l'élément existe spatialement et possède donc une géométrie à 0, 1, 2 ou 3 dimensions. Ces pictogrammes sont placés à gauche du nom de la classe *Classe d'objets* (voir ci-dessus). Le pictogramme suivant  peut également être utilisé. Il n'appartient pas à Perceptory. Il signifie que l'objet est un document : plan, rapport, réglementation, compte rendu, etc.)

### Explication des diagrammes basés sur SADT<sup>10</sup>

Ce type de diagramme est utilisé dans les annexes pour décrire le workflow des différents objets de ce cas d'usage. Voici quelques indications complémentaires au schéma ci-dessous. Un changement de numéro (Objet N) signifie que l'objet a changé, mais qu'il représente la même entité : il y a création d'un nouvel objet.

- Un « ' » supplémentaire (Objet N ') signifie que l'objet est le même, mais qu'il a été modifié dans ses attributs, dans sa géométrie ou les deux : il n'y a pas création d'un nouvel objet.



Légende de diagramme SADT modifié : les entrants sont ici les objets manipulés avec le formalisme UML + PERCEPTORY

### Application sur les objets du modèle acoustique

Les éléments de cette partie sont regroupés dans l'annexe 1

<sup>10</sup> SADT : Structured Analysis and Design Technique (technique structurée de modélisation et d'analyse. Voir <http://philippe.berger2.free.fr/automatique/cours/sadt/sadt.htm> pour précisions.

## 3. ANALYSE DES INTERFACES ENTRE DONNÉES D'INFRASTRUCTURES ET DE SIMULATION DU BRUIT

### 3.1. Problématique

<b>Objectif de cette partie</b>	<p>Nous allons ici analyser ce qui a été décrit et formalisé dans la partie précédente. L'objectif de cette partie est l'identification :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• des problèmes d'échanges et de modélisation des données,</li> <li>• des relations qui existent et peuvent perturber le workflow entre les données d'infrastructures et les données (environnementales) de l'étude de bruit.</li> </ul>
---------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Sources des problématiques identifiées</b>	<p>Les problématiques identifiées proviennent :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• des différences d'approche et de structuration de l'information entre le monde de la géomatique et du SIG et le monde de la conception (CAO),</li> <li>• des nécessaires échanges de données entre acteurs, qui nécessitent des transformations de la donnée et donc des pertes d'informations du fait de l'inexistence d'un format standard d'échange capable de transporter les informations spécifiques à notre cas d'usage.</li> </ul>
-----------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Distinguer les problématiques et proposer des solutions de structuration de l'information</b>	<p>Nous allons donc dans un premier temps dégager de la partie précédente des problématiques liées à l'échange des données, à leur accès ainsi qu'à leur modélisation spatiale.</p> <p>Dans un second temps nous décrivons des pistes d'amélioration qui pourraient répondre aux besoins des différents acteurs de ce cas d'usage. Nous proposons donc des solutions de structuration de l'information pertinente pour ce cas d'usage, mais également dans un contexte plus global de projet.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 3.2. Analyses pour le cas d'usage « Infrastructures et bruit »

<b>Analyse des cas d'utilisation</b>  Étude du modèle interne à l'outil CadnaA	<p>Avec l'étude du cas d'utilisation du modèle interne à CadnaA (Schéma page 11 « Cas d'utilisation du modèle 3D interne à l'outil CadnaA), nous pouvons affirmer que le seul acteur qui modélise dans l'outil métier CadnaA est le BE acoustique. Toutefois, ce dernier doit modéliser des informations qui proviennent d'autres acteurs. On peut noter que :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les données reçues par le BE acoustique sont généralement trop riches et trop précises pour les outils d'études acoustiques. Trop d'informations et de précision auront tendance à fausser les résultats qui sont calculés avec des hypothèses spécifiques de précision géométrique par exemple. Par conséquent, les données reçues par le BE acoustique sont retravaillées et épurées :           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les emprises au sol sont supprimées : seule la surface représentant le toit des bâtiments doit être introduite dans l'outil de modélisation (CadnaA).</li> <li>– Certaines lignes des plateformes projet sont également supprimées : les seules informations utiles sont les axes en 3D des futures voies et les largeurs de voies.</li> <li>– Certains éléments du MNT peuvent être supprimés si nécessaire (éléments</li> </ul> </li> </ul>
--------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

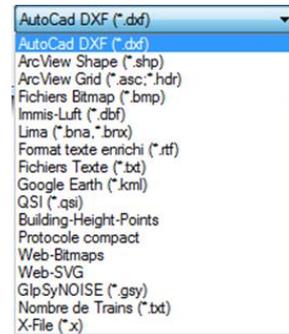
### Étude des sortants de CadnaA

créant du « bruit » : points ou lignes de niveau incohérents, etc.).

- Les capacités d'import et les formats d'échange ne permettent pas à l'outil de récupérer simultanément les informations géométriques, sémantiques et les métadonnées. Pour preuve, les tableaux de synthèse de la partie précédente mettent en évidence une étape d'intégration de la géométrie des objets puis un renseignement des attributs de ces objets.

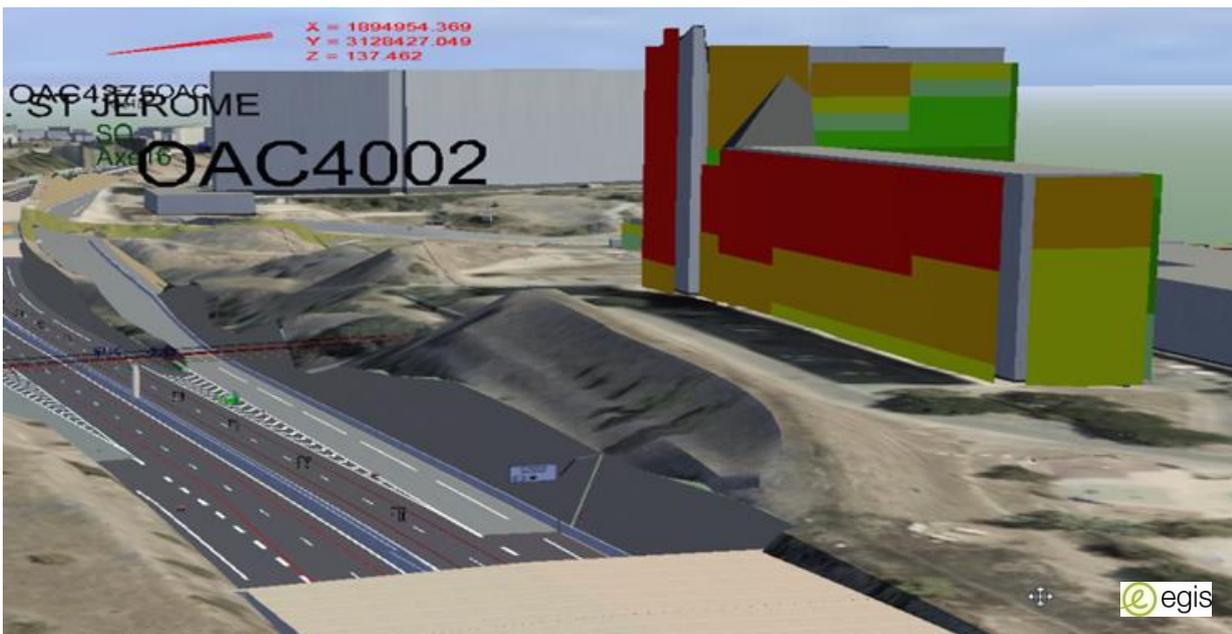
Une liste importante de formats de sortants de CadnaA est disponible. Les sortants usuels sont les sortants shp et dxf :

- shp pour tous les sortants de manière à faire des sortants cartographiques,
- dxf pour les dispositifs de protections (mur, merlon et enrobé) contre le bruit (échanges avec la direction des études).



Les données shp contiennent toutes les informations de géométrie et toutes les informations produites :

- Les récepteurs et les bâtiments associés contiennent les niveaux sonores de chaque variante.
- Les dispositifs antibruit contiennent les caractéristiques de l'élément : hauteur, type, etc.



Modélisation des niveaux de bruit par récepteur (éléments verts, jaunes, oranges ou rouges : légende de couleur réglementaire) ; il existe plusieurs récepteurs pour chaque bâtiment, répartis selon les étapes et façades exposées (voir page 8 « Récepteur acoustique ») ; ici un seul scénario est représenté. Vue de la MN de synthèse

Les sortants dxf sont envoyés à la direction de projet pour validation et intégrations aux plans 2D. Les dxf sont accompagnés d'un tableau avec les caractéristiques des éléments (hauteur, type ou autre).

### Étude de la maquette numérique de synthèse

De nombreux acteurs utilisent la maquette numérique de synthèse (Voir schéma page 13 « Cas d'utilisation de la maquette numérique de synthèse »). L'outil CadnaA est capable d'exporter de plusieurs manières les informations concernant les récepteurs, les isophones ou les murs acoustiques. La manière dont ces éléments doivent être exportés dépend :

- des besoins des acteurs (quels niveau de détail géométrique et sémantique, quelle précision ?),
- de l'outil de montage de la MN de synthèse.

Afin de déterminer la manière dont doivent être exportées les informations, il conviendrait pour chaque projet de définir de manière précise les modèles à échanger ainsi que les informations indispensables selon l'acteur.

De manière générale, les objets les plus importants à modéliser dans la MN de synthèse et provenant de l'étude acoustique sont les murs antibruit et les merlons acoustiques (butte de terre). Ces exports puis leur intégration dans la MN de synthèse permettent de contrôler la cohérence entre les propositions de dispositifs antibruit (murs, merlons ou protections en façades) et le reste du projet.

Comme le montre la figure suivante, des itérations de conception sont indispensables pour affiner le calage entre les différents objets du projet. Les informations de type « préconisations » (protections acoustiques en façade, matériaux spéciaux pour les couches de roulement) ne sont pas attachées à leurs objets relatifs (respectivement bâtiment et plateforme) : ces informations sont dans des rapports annexes et ne font ainsi pas partie intégrante des informations liées aux objets 3D manipulés pour les études acoustiques.



Incohérence entre l'implantation d'un mur antibruit et la plateforme projet. Vue de la MN de synthèse

L'export est possible, comme le montre la figure de droite extraite du tableau de l'objet Mur\_acoustique (voir plus haut) :

- soit en tant que ligne 3D qui matérialise la crête du mur,
- soit directement en tant qu'objet 3D, mais qui s'arrête en pied au niveau du MNT.

Cet élément 3D n'intègre pas la partie basse du mur ainsi que ses fondations. Les rendus isophones et les niveaux sonores sur récepteurs sont des résultats qui alimentent usuellement le dossier d'étude d'impact du projet. Ils n'ont pas d'interaction avec le reste du projet conception.

### Concept de système pour la gestion des données

#### Définir les données du modèle transmises

Tous les objets ne sont pas créés par le même acteur. De plus, chaque objet est ensuite utilisé par d'autres acteurs, comme nous l'avons vu dans l'analyse des cas d'utilisation ci-dessus, mais pas nécessairement dans l'intégralité de l'information qui le décrit.

#### Concept de système

Il conviendrait donc de pouvoir définir les informations géométriques et sémantiques qui doivent être échangées selon l'utilisation qui doit en être faite (il s'agit du concept d'IDM<sup>11</sup> qui existe actuellement dans le contexte des IFC<sup>12</sup>) : il s'agit de définir les données du modèle qui sont transmises.

Pour ce faire, nous allons utiliser ici un concept qui permet de mieux organiser les informations échangées : il s'agit du **concept de Système** proposé dans (C.-E. Tolmer, Castaing, Morand, & Diab, 2015). Un système regroupe des objets pour constituer :

- Soit un réel système fonctionnel : réseau d'assainissement, réseau électrique, etc.
- Soit un ensemble d'éléments relatifs à un métier : Système Géométrie pour les plateformes, Ouvrages d'art et Génie civil, etc.

Créer les relations entre les objets et systèmes permet :

1. de savoir à quels métier ou système se rapporte un objet (qui sont les créateurs et utilisateurs de cette donnée),
2. de définir un niveau de détail commun à tous les éléments d'un même système.

### Concept de niveau de détail et de niveau d'information

#### LOD et LODt

Nous avons vu dans la partie précédente que les données fournies par un acteur ne correspondent pas forcément à ce qui est attendu par l'acteur qui les reçoit. La représentation géométrique ou les attributs ne correspondent pas, certains manquent ou sont en trop. Du fait d'une absence de format d'échange 3D efficace, interopérable, entre ces deux acteurs, les informations sémantiques et attributaires sont ressaisies à la main (travail fastidieux et sujet à des erreurs de retranscription ou d'interprétation), mais seulement partiellement, puisque filtrées par l'opérateur selon ses besoins. **Dans un contexte de format d'échange interopérable, il conviendrait de mettre en place des automatismes qui n'intègrent pas les données non utiles ou que les outils filtrent les données à l'export.**

Cette réflexion sur les données pertinentes ou non et le niveau d'information à transmettre (précision de la géométrie, attributs) peut être traitée par une **combinaison de concepts** : certains, du fait de leur étroite adéquation avec le sujet de ce cas d'usage, sont décrits ci-dessous (dans leur définition actuelle, mais en cours de redéfinition partielle) :

- Level Of Detail (LOD).
- Level Of Development (notés ici LODt).

#### Remarques

Notons que :

1. Certains acteurs du BIM au niveau mondial proposent de ne plus utiliser le concept de Level Of Development (LODt) pour différencier :
  - niveau de détail (ou de représentation, LOD, mais différent du LOD de CityGML),
  - niveau d'information (LOI) relatif à la partie sémantique et attributaire des objets.

Lorsque nous évoquons ici le LODt, nous évoquons simultanément les LODt de BIM Forum (BIMForum, 2015) et l'ensemble LOD – LOI de la British Standard Institution (BSI, 2015).

2. Les autres concepts sont seulement évoqués pour mémoire : BIM use, IDM (Information Delivery Manual) et MVD (Model View Definition). Ils font l'objet

<sup>11</sup> IDM : Information Delivery Manual.

<sup>12</sup> IFC : Industry Foundation Classes.

d'autres travaux de recherche et de normalisation au niveau international.

**État de la recherche sur la structuration de l'information et la modélisation pour les projets d'infrastructures linéaires**

Les LODt, pour transcrire l'avancée de la conception

*Cette partie est extraite du travail de (C.-E. Tolmer et al., 2015).*

Les LOD facilitent la visualisation et ainsi l'analyse des données : un objet peut avoir une représentation différente pour chaque LOD, ce qui permet l'analyse et la visualisation d'un même objet avec plusieurs degrés de résolution (Norme de CityGML, 2012) (voir figure ci-dessous).

Les LODt transcrivent l'avancée de la conception. Par contre, ils ne sont pas normalisés et sont donc soumis à interprétation, même si certaines guides d'entreprises ou d'instituts proposent des LODt (parfois encore appelés Level Of Detail) adaptés à leurs contextes de travail (AIA, 2013; BIMForum, 2014; BIMProtocol, 2013; Kreider & Messner, 2013) (voir figure ci-dessous).

Les LODt de BIM Protocol (BIMProtocol, 2013), basés sur le PAS 1193-2 2013 de la British Standards Institution, sont ceux qui considèrent le plus largement l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage. De plus, ce sont les seuls qui bénéficient d'une description à la fois pour les bâtiments et pour les infrastructures.

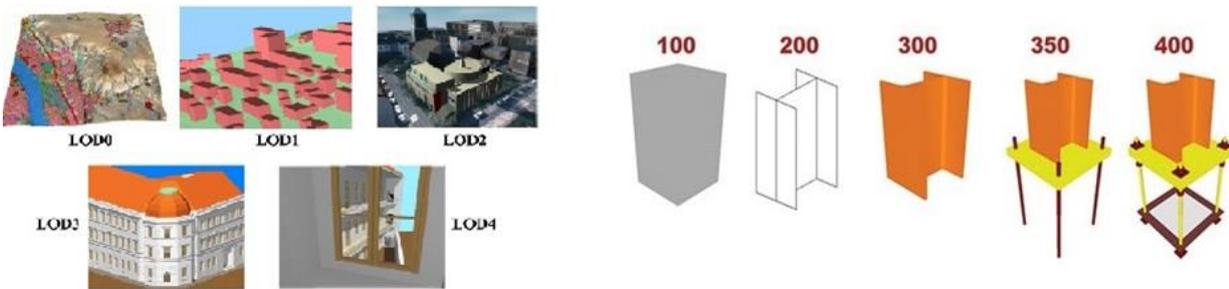


Illustration des LOD à gauche (Norme de CityGML, 2012) et des LODt à droite (BIMForum, 2014)

**LODt et niveaux d'information et de détail**

Les LODt intègrent, comme les LOD, plusieurs éléments de la description d'un objet de manière explicite ou implicite, comme le précise la figure ci-dessous. Aujourd'hui, les LODt (qui proviennent plutôt des États-Unis) sont en confrontation avec une décomposition en deux types de niveau :

- les niveaux d'information, qui traitent la partie attributaire et sémantique d'un objet,
- les niveaux de détail, qui traitent exclusivement de la géométrie de l'objet (vision plus répandue en Grande-Bretagne).

Ces propositions ne sont pas standardisées, mais se développent rapidement.

Sub-concept	geometric complexity	dimensionnalité	appearance	semantic	presence	attributes
illustration				Generic or detailed object, link with System or Domain...	YES or NOT	Property, type, material...
LOD	+	-	-	-	+	+
LODt	+	0	-	+	0	+

Comparaison des concepts explicites (+) et implicites (-) portés par les LOD et LODt (0 signifie que les concepts ne sont pas gérés par les LOD ou LODt). Figure extraite de (C. Tolmer, Castaing, Morand, & Diab, 2015)

### Nécessité d'un concept de niveau d'abstraction supérieur

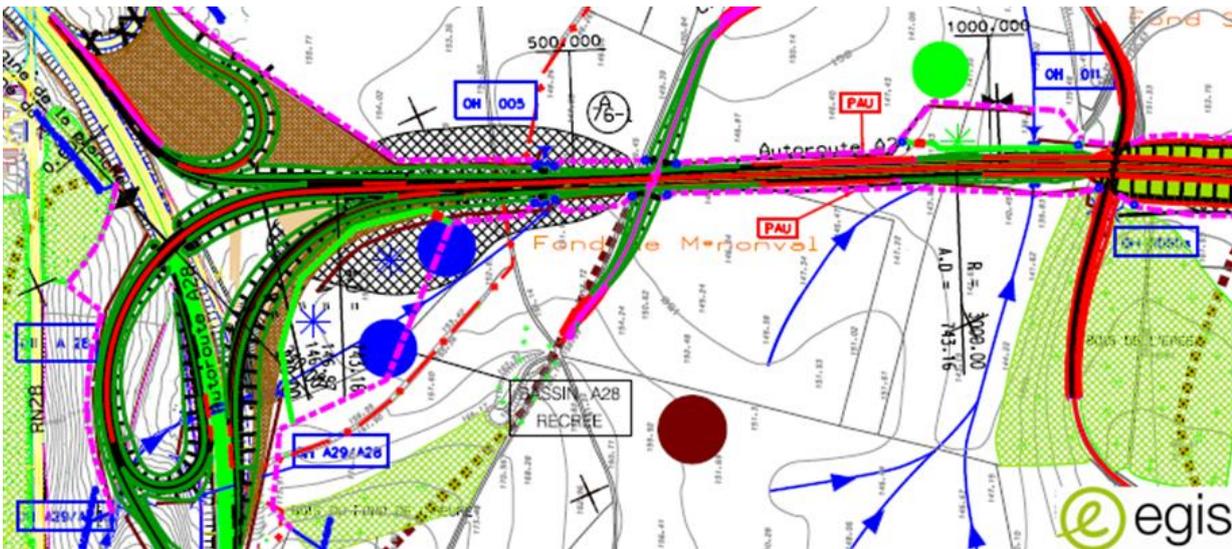
Les LOD structurent implicitement les objets modélisés dans un seul arbre hiérarchique : pour un LOD supérieur, un objet est éclaté en plusieurs objets. Or, cette approche unique de structuration n'est pas suffisante.

Comme nous allons le voir dans notre exemple ci-dessous, la description d'un objet est fonction de son contexte et du cadre dans lequel il est utilisé, et non seulement relative aux informations qui le décrivent et à l'échelle à laquelle nous l'observons. Un concept de niveau d'abstraction supérieur doit être introduit afin d'intégrer :

- le contexte d'utilisation des objets d'un modèle,
- les exigences auxquelles il permet de répondre.

### L'unicité du LODt par objet n'est pas pertinente

Dans un premier temps, les LODt correspondaient très fortement aux différentes phases d'un projet de bâtiment. Nous constatons sur des projets d'infrastructure que le niveau de développement des objets n'est pas nécessairement identique pour tous les objets pour une phase donnée. Les LODt sont en fait définis dans l'absolu alors que selon le projet – mais également plus finement selon l'acteur qui s'intéresse à la modélisation des données avec son point de vue propre – l'unicité du LODt par objet n'est pas pertinente, comme le montre la figure ci-dessous. En contrepartie, le fait d'utiliser des LODt relatifs à chaque objet implique une redéfinition partielle ou totale à chaque nouveau projet, puisqu'ils sont variables pour chaque objet selon le contrat, la décision ou l'acteur considéré.



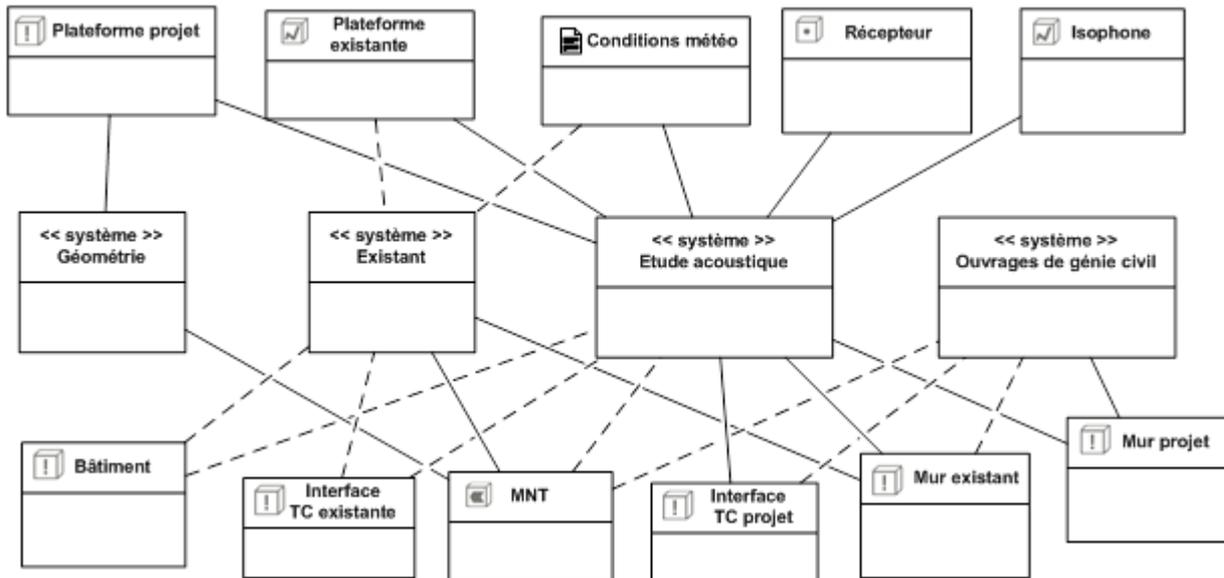
Plan d'Avant-Projet Sommaire : (1) la géométrie du tracé routier est parfaitement définie et détaillée (LOD et LODt élevés) ; (2) pour les bassins (cercles bleus), on a déjà fixé assez précisément leur nombre, leur volume, leur implantation spatiale, leur géométrie (principalement au travers de la proportion réglementaire entre largeur et longueur) et vérifié la faisabilité technique : seule la complexité de la forme géométrique n'est pas précise (LOD moyen et LODt élevé), (3) les études hydrauliques d'écoulement des eaux naturelles sont précises à cette phase, mais leur représentation est schématique (LOD faible et LODt élevé).

### Application au cas d'usage infrastructure et bruit

Pour ce cas d'usage Infrastructure et bruit, nous avons identifié quatre Systèmes :

1. Géométrie (terme générique pour désigner le tracé de la route en conception).
2. Ouvrages de génie civil.
3. Existant.
4. Étude acoustique.

Les objets décrits évoqués ci-dessus (voir notamment le tableau récapitulatif de la page 13) sont liés aux systèmes de la manière suivante :



Liens entre les Systèmes et les objets (le type de trait n'a pas de signification, il sert seulement à faciliter la lecture ; les boîtes avec un point d'exclamation indiquent que la géométrie est « complexe » : elle n'est pas unique et peut varier selon le LODt de l'objet (avancement de la conception) et le LOD demandé pour une utilisation particulière, ici une étude acoustique.

Cette approche est intéressante puisqu'elle permet par exemple de bien différencier les plateformes existantes des plateformes projet : ce sont d'un point de vue sémantique des objets identiques, mais qui n'ont pas du tout le même LOD. Par ailleurs, certaines exigences se rapportent également aux éléments d'un système (ou domaine métier) : cette structuration de l'information est également pertinente pour répondre aux différentes exigences du projet.

### Application du concept de LOD et LODt

Le LOD est plutôt faible pour notre cas d'usage (LOD1), ce qui est classique pour des études environnementales. Le LOD2 des bâtiments peut également être utilisé pour le placement des récepteurs par étage ou par appartement. En revanche, la géométrie des bâtiments est toujours prise en compte avec un LOD1 : l'outil simplifie lui-même les formes géométriques trop complexes.

Les LOD nécessaires sont les mêmes pour les études acoustiques à toutes les phases. Pour certains projets en phases amont, seuls les isophones sont produits. Les récepteurs ne sont pas modélisés dans ce cas.

### Contraintes liées aux données

#### Incohérences constatées

Quelques problèmes ou incohérences sont récurrents dans les entrants comme les relevés de l'existant. C'est le cas par exemple pour les données permettant de modéliser :

- le MNT (il peut exister quelques points avec une altitude de 0 par exemple),
- les bâtiments (également quelques problèmes possibles d'altitude de certains points),
- les intersections de routes et/ou voies ferrées,
- etc.

Ces données peuvent contenir des incohérences. Un lissage et une modification manuelle de certains éléments sont nécessaires pour avoir un projet propre compréhensible par le logiciel (nombreux bugs en cas d'incohérence de lignes topographiques par exemple).

#### Occupation des bâtiments

Dans CadnaA les attributs d'occupation des bâtiments existants sont contrôlés manuellement pour vérifier la cohérence avec l'occupation réelle. Il peut exister des incohérences entre les données et la réalité.

De plus, dans certaines classifications comme celle de l'IGN, il existe de nombreux types d'occupation. Le BE acoustique n'a besoin que de 5 catégories qui sont : habitation, bâti à vocation d'enseignement, bâti de santé, bureaux et autre (ces familles sont en lien avec les seuils réglementaires). Ces données sont donc à renseigner à la main par l'opérateur de CadnaA.

#### Préconisations

La préconisation, qui correspond généralement à une préconisation d'isolation en façade, est ajoutée suite à la réalisation de la première étape 6. Les livrables de ces préconisations sont généralement des tableaux ainsi que des cartes.

Il est toutefois possible d'ajouter ces informations dans la base de données interne de CadnaA pour ensuite l'exporter en format shapefile pour une réutilisation ultérieure par les acteurs ou pour une intégration dans une maquette numérique de synthèse. L'idéal serait de pouvoir exporter en conformité avec les standards préconisés par l'OGC<sup>13</sup> ou l'ISO<sup>14</sup> pour la gestion de données géospatiales.

### Contraintes imposées par l'outil

Le logiciel CadnaA est conçu comme un mini SIG avec des métadonnées internes. Toutefois, il est difficile d'exporter ces métadonnées.

Ensuite, une majorité des transformations des données se passe après l'intégration des données dans l'outil CadnaA. Une majorité des attributs saisis dans CadnaA le sont de manière manuelle à la fois à cause de :

- problématiques d'outil (les imports possibles ou non),
- problématiques de données (les données fournies ne sont pas nécessairement dans leur forme la plus pertinente pour l'intégration).

**Il y a donc un travail à initier avec les éditeurs pour améliorer la manière dont peuvent être intégrées les données (formats supportés, de préférence ouverts, cohérences entre modèles de données), et avec les acteurs qui fournissent les données d'entrée pour le BE acoustique.**

<sup>13</sup> OGC : Open Geospatial Consortium.

<sup>14</sup> ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

**Problématiques concernant le workflow**

Pour chaque variante, une saisie manuelle de paramètres ou des caractéristiques est nécessaire pour tous les éléments. Par exemple, pour une nouvelle variante de tracé :

1. Il faut supprimer manuellement les lignes topographiques sous le nouveau tracé avant de l'intégrer au modèle (pour éviter les bugs de modélisation et de calcul).
2. Il faut ensuite renseigner les données trafics et paramètres de voies (largeurs, type de revêtements, etc.).

**Différences de fréquence de mise à jour**

Du fait des **difficultés d'intégration des données** évoquées ci-dessus, la mise à jour du modèle pour l'étude acoustique est moins fréquente que la mise à jour de la géométrie du projet. Il est à noter que cela vient également du fait que les temporalités entre le BE acoustique et le BE géométrie sont bien différentes : le « BE géométrie » travaille en permanence sur le projet alors que le BE acoustique n'est sollicité que ponctuellement pour ses études.

**Étude de la qualité de l'air**

Sur certains projets, il peut être envisagé d'exporter le modèle CadnaA pour intégration dans l'outil d'étude de la qualité de l'air. Il y a toujours certains problèmes d'interopérabilité et de cohérence des données : par exemple, les données de trafic sont différentes pour l'acoustique et pour l'air, bien qu'elles décrivent le même trafic supposé. Ceci est logique puisque les analyses ont des objectifs différents, mais cela nécessite à nouveau des ressaisies de données alors que l'on modélise les mêmes objets géométriques.

**Impossibilité de connecter CadnaA directement à un GED**

Enfin, CadnaA ne peut pas être directement connecté à une GED<sup>15</sup>, ce qui rend difficile la gestion du workflow, des versions et du statut des fichiers : cela limite le travail collaboratif.

<sup>15</sup> GED : Gestion Electronique de Documents.

## 4. HISTORISATION DES DONNÉES

### Historisation des données

Les sujets traités dans cette partie répondent aux questions suivantes :

- Qu'est-ce qui est conservé aujourd'hui ? Qu'est-ce qui devrait être conservé et comment ? À quels enjeux cela répond ?
- Sous quelle forme devrait-on conserver ces données ? Quels acteurs seraient responsables de la gestion de ces données historisées ?
- Qui pourrait ensuite utiliser ces données ? Comment gérer les droits et la disponibilité de ces données ?

#### Il convient de bien différencier :

Historisation des données	Elle décrit les données à un instant donné : on fait un point d'arrêt.
Suivi et évolution temporelle, ce qui est appelé workflow	Le workflow décrit les étapes parcourues par une même information, un même objet, lors d'un processus de conception.

### Pendant le projet

Pendant le projet, jusqu'à validation définitive de la conception, l'ensemble des données et variantes est conservé. Les modifications de données entrantes, à historiser, peuvent être :

- Des modifications techniques de projet : modifications de PL, PT, géométrie, emprise.
- Des modifications suite à concertation : administration, élus, population, etc.
- Des modifications des hypothèses de trafic.

Sont également conservés les sortants, relatifs aux modifications évoquées ci-dessus. La conservation de ces données est faite en interne (BE acoustique) ou par le client.

### Suite aux études techniques

*Nous parlons ici des données liées aux études acoustiques. La description ci-dessus n'est valable que si les données techniques du projet sont également disponibles (plateformes, ouvrages d'art).*

De manière générale, seule la solution retenue est conservée (murs : implantations, dimensions et propriétés comme le matériau ; préconisation d'isolation en façade). Toutefois, il conviendrait de conserver plus largement les données de conception et décisions qui ont influé sur les analyses, les résultats des études et sur les préconisations qui en découlent :

- Modifications suite à concertation : importance forte.
- Modifications des hypothèses de trafic : importance forte.
- Modifications suite aux demandes client.
- Modifications techniques de projet : sur certaines modifications significatives (indépendantes des précédents cas).
- Hypothèses, sortants, raisons du choix (politique, réglementaire, technique).

Un autre point de vue consiste à dire qu'il est peu fréquent d'avoir à revenir sur les données du passé et que la problématique d'historisation est marginale pour ce sujet.

### Sous quelle forme conserver ces données ?

L'idéal serait d'avoir ces données (entrants de CadnaA) dans leur format d'origine pour faire les études. Cependant cela devient lourd et complexe à gérer. En effet, conserver ces données sur des décennies impose de pouvoir les réutiliser. Or les formats propriétaires non ouverts et les éditeurs ne garantissent pas cette longévité. On entrevoit donc ici l'intérêt de l'utilisation de standards ouverts, de préférence soutenu par des organismes reconnus.

Au minimum, il conviendrait de posséder les sortants des différentes modifications pour pouvoir ensuite reconstruire les modèles d'analyses dans l'outil métier pour l'acoustique. Ce n'est qu'une possibilité provisoire, car les capacités et même l'existence de l'outil ne sont pas garanties sur un temps long (plusieurs dizaines d'années). **C'est principalement le Maître d'Ouvrage qui devrait conserver ces données pour une utilisation interne, excepté peut-être les données demandées par la directive INSPIRE.**

## 5. INTERFACES POUR L'INTÉGRATION DE DONNÉES CONCERNANT LA FAUNE

### 5.1. Problématique

#### Une partie complémentaire du rapport 6.2

Nous étendons ici la problématique de l'impact sonore d'une infrastructure linéaire sur la faune en veillant à ne pas faire doublon avec le rapport 6.2 - *Transparence et continuité écologique – réduction et compensation des impacts*. Cette partie est complémentaire et dresse un bilan de l'état des connaissances de l'impact du bruit sur quelques espèces d'animaux.

#### Questions principales

Voici quelques interrogations sur ce sujet auxquelles nous apportons des réponses, certaines seulement partielles, étant donné le nombre limité d'études sur le sujet de l'impact sonore d'une infrastructure sur la faune :

- Contrairement aux études acoustiques pour les zones habitées qui ne couvrent généralement qu'une faible part du tracé complet de l'infrastructure, les études d'impact sur la faune seraient susceptibles de couvrir l'ensemble du tracé, ou tout au moins les zones naturelles protégées. Comment intégrer ces études aux études acoustiques classiques ? Quel coût pour des études sur tout le tracé ? Est-ce que les données sur la faune peuvent être disponibles pour permettre ces études ? Quelle distance à l'infrastructure est à prendre en compte ?
- Est-ce que des mesures pourraient être réalisées après mise en service de l'infrastructure ?
- La pertinence et la faisabilité de la modélisation 3D de l'impact sonore sont encore à tester.
- Pourrait-on utiliser les sortants des calculs pour l'homme pour les animaux ? Quelles fréquences ou types de bruit seraient à considérer ?

#### Questions liées

En lien avec ces interrogations, il conviendrait dans un premier temps de définir quel type de bruit perturbe quelle espèce et pour quelle activité.

#### Exemples

En effet, par exemple, certaines espèces chassent parfois en se focalisant non pas sur les ultrasons, mais sur le son réellement émis par leurs proies (insectes). Certains bruits routiers peuvent donc les masquer. On pourrait également s'intéresser plus en détail aux parties du bruit routier qui perturbent le plus ces animaux (roulement, moteur).

## 5.2. Introduction

### Prendre en compte les couloirs de dispersion des espèces

Les études de conception des infrastructures de transport cherchent la meilleure intégration de celles-ci dans leur environnement. Leur impact sur la faune est pris en compte, en particulier sur la conservation des couloirs de dispersion des espèces.

### Barrière physique et barrière par effarouchement

La prise en compte de la barrière physique que peut constituer une ITT<sup>16</sup> induit ainsi la mise en place de différents « éco-ponts » (passage à faune, chiroptéroduct, aménagements de buses) le long de celle-ci. Ceux-ci sont placés de manière à ce que la faune puisse traverser l'ITT sans risque de collision. À l'heure actuelle, le choix de leur localisation et de leurs caractéristiques n'intègre pas l'effet de barrière par effarouchement que peut constituer le bruit engendré par les usagers de l'ITT.

#### Différents types d'impact du bruit

Les études scientifiques menées sur la pollution sonore ont en effet décelé différents types d'impact du bruit : évitement lors de la dispersion, baisse du succès reproducteur, changement des comportements de prospection :

**Ces impacts sont quelquefois temporaires**, les populations ayant démontré une capacité de plasticité dans leurs comportements et donc une capacité à s'adapter à ce nouvel environnement.

**Dans d'autres cas, les comportements d'évitement du bruit sont stables** et donc peuvent conduire à ce que des couloirs de dispersion observés avant la construction de l'ITT soient abandonnés ou déviés.

Ainsi, une non-prise en compte de l'impact sonore sur la faune peut rendre un éco-pont peu efficace.

### Objectif de cette section

L'objectif de cette section est donc d'appréhender l'intérêt de coupler la modélisation sur le bruit et sur la faune dans les études de conception des ITT pour anticiper ces comportements d'évitement et préciser au mieux la localisation des emplacements des éco-ponts.

## 5.3. Que sait-on de l'impact du bruit d'une ITT sur les processus écologiques ?

### Introduction

La bibliographie sur le sujet reste mince et se confronte à la difficulté d'isoler l'effet seul du bruit des autres perturbations. En effet, la pollution sonore est souvent confondue avec les autres perturbations liées à l'installation et l'utilisation d'une ITT : lumière, trafic (mouvements), barrière physique, etc. Certaines études menées en laboratoire doivent être confirmées en conditions réelles.

La connaissance actuelle sur le sujet ne couvre pas l'ensemble des groupes d'espèces étudiés dans une étude d'impact, et au sein d'un groupe, seules quelques espèces ont fait l'objet d'une étude.

Néanmoins, les études recensées permettent de dégager **trois niveaux de sensibilité au bruit** au cours de la dispersion et des mouvements de prospection (chasse) :

- Certains groupes d'espèces ne sont pas sensibles au bruit.
- Certaines espèces sont capables de s'adapter au bruit.
- Certaines espèces ne s'adaptent pas au bruit.

<sup>16</sup> ITT : Infrastructure de Transport Terrestre.

### Synthèse des études bibliographiques traitant des impacts du bruit sur la faune

Le tableau suivant présente une synthèse des études bibliographiques traitant des impacts du bruit sur la faune.

	Nombre d'articles mettant en évidence des espèces :		
	Sensibles au bruit	Capables de s'adapter, plutôt résilientes	Niveaux de sensibilité
Grands Mammifères	5	0	Fort
Petits Mammifères terrestres	1	1	Variables selon les espèces
Chiroptères	3	0	Fort
Oiseaux	6	0	Moyen
Amphibiens	0	2	Faible

Les résultats de l'analyse bibliographique présentés ici ne sont pas exhaustifs, ils ne sont valables que pour un certain nombre d'espèces étudiées dans la littérature scientifique. Il est à noter également qu'une orientation existe vers la mise en évidence d'un effet négatif (ou positif) plutôt que neutre.

### Impact sur le comportement de prospection

Il semble que les recherches de proies dans un environnement à haut niveau sonore soient plus difficiles pour les **chauves-souris** (Hage and Matzner, 2013, Siemers and Schaub, 2010). Dans leurs expérimentations en laboratoires, Schaub et al. (2008) montrent que les individus s'orientent d'eux-mêmes vers les zones moins bruyantes quand le choix leur est proposé.

Pour les **mammifères**, ce sont les capacités de perception qui sont touchées. Par exemple, dans leur étude sur les chiens de prairies (*Cynomys*) dans les environnements bruyants, Shannon et al. (2014) mettent en évidence la réaction de la population, en diminuant la proportion d'individus en recherche de nourriture au profit du comportement de vigilance.

**Impact sur le comportement de dispersion et colonisation****Exemple des oiseaux**

En plus de la modification du comportement des individus, le bruit peut impacter la répartition spatiale des populations dans une zone. Pour les **oiseaux**, un certain nombre d'études a montré que la pollution sonore entraînait la diminution de la densité d'individus dans la zone proche de la source (Benítez-López et al., 2010, Reijnen et al., 1996). Dans leur étude, Brotons et Herrando (2001) mettent en évidence la diminution de la probabilité de rencontrer un oiseau forestier à mesure que la proximité avec une autoroute augmente.

Pour les oiseaux également, d'après (Barber, Crooks, & Fristrup, 2010) :

- le masque acoustique généré par les bruits de fond réduit :
  - le nombre d'individus qui perçoivent les signaux émis et a un impact mal connu sur la reproduction,
  - l'efficacité des cris d'alarme pour signaler les prédateurs et maintenir la cohésion des groupes.
- Le masque imposé par le bruit anthropogénique peut avoir des conséquences volatiles et imprévisibles. En effet, l'environnement acoustique n'est pas une conversation privée entre émetteur et récepteur, mais un paysage de réseaux d'informations interconnectés et de bruits adventices. Les activités humaines associées à des niveaux de bruit anthropogénique élevés modifient l'écologie animale : les oiseaux chanteurs montrent une plus grande désertion et un plus grand abandon du nid, mais une moindre prédation, dans une zone de 100 m par rapport à des pistes empruntées par des tout-terrains. Une vaste étude menée aux Pays-Bas a révélé que 26 des 43 (60 %) espèces d'oiseaux forestiers ont montré une réduction de leur nombre près des routes. Une autre étude montre que les espèces avec des cris à haute fréquence fuient moins la proximité des routes que les espèces avec des cris basse fréquence.
- Pour les activités de plein air, il semblerait que le déplacement à pied produit plus de perturbation qu'une circulation motorisée, cette perturbation anthropique étant perçue comme un risque de prédation sans lien avec le niveau sonore.

**Exemple des grands mammifères**

La nuisance sonore influence également les déplacements des grands mammifères : les cerfs ou les rennes s'éloignent des sources de bruit (Seiler, 2001), ce qui remet en cause la réelle utilisation des structures de passage de la faune (Mata et al., 2009). Les bordures des routes très empruntées semblent évitées par les grizzlis (Seiler, 2001), alors même qu'il existe un habitat très favorable à de telles populations à proximité de celles-ci (Mace et al., 1996).

### Impact sur la chasse

#### Exemple des hiboux et chauve-souris : travaux de Barber

D'après (Barber et al., 2010) :

- Les chiroptères qui capturent des proies à la surface du sol ou les glaneuses s'appuient sur les sons générés par les proies pour les localiser. La sérotine brune américaine se sert des sons basse fréquence émis par le vol des insectes pour passer outre leur « camouflage acoustique ».
- Le travail de base avec les hiboux et les chauves-souris a montré que les fréquences comprises entre 3 et 8 kHz sont cruciales pour la précision de localisation par son passif. Une récente étude de laboratoire a montré que les chauves-souris glaneuses évitent la chasse dans les zones avec bruit de fond de la route contenant l'énergie dans cette bande spectrale.
- L'urbanisation impacte plus les chauves-souris avec des formes d'ailes particulières (rapports d'aspect bas de l'aile).
- Une étude radio-pistage a montré qu'une chauve-souris glaneuse, *Myotis bechsteinii*, était moins susceptible de traverser la chaussée (3 sur 34 individus) qu'une espèce chasseuse de milieu ouvert, *Barbastella barbastellus* (5 sur 6 individus). Cela implique que le bruit est un agent de fragmentation pour certaines chauves-souris. Cette dernière espèce chasse les insectes volants en utilisant l'écholocation (un comportement auditif qui utilise des signaux à ultrasons au-dessus du spectre de bruit d'origine anthropique). Des résultats similaires suggèrent que les espèces chassant avec des moyens acoustiques sont à risque, comme la guilda des oiseaux se nourrissant d'insectes terrestres qui ont fui la construction de routes en Amazonie. **Que ces animaux comptent vraisemblablement sur le son pour la chasse pourrait ne pas être une coïncidence.**

#### Travaux de Schaub, Ostwald et Siemers

De récents travaux (Schaub, Ostwald, & Siemers, 2008) démontrent que le Grand Murin, autre espèce glaneuse évite de chasser dans le bruit.

L'étude a été réalisée avec un compartiment silence et un compartiment bruit de trafic, de vent dans la végétation ou bruit blanc = bruit avec une énergie égale dans tout le spectre de fréquence.

#### Travaux de Jones

(Jones, 2008) cite également les récents travaux (Schaub et al., 2008) : le principe de capture du Grand murin est bien connu. L'écholocation étant ineffective quand la proie est dans la végétation (à cause des échos), il utilise les sons émis par les proies, réduisant ses émissions ultrasonores.

Ainsi la détection des proies en environnement bruyant est remise en cause, le son du trafic masquant les émissions sonores des proies de type carabidés (clicks avec pic d'amplitude à 12 kHz). Le trafic émet des bruits avec beaucoup d'énergie à cette fréquence.

### Impact sur la communication entre partenaires et la reproduction

La pollution sonore peut entraîner une diminution du succès reproducteur dans les populations ne fuyant pas la zone. Ce phénomène est surtout étudié chez les oiseaux (Halfwerk et al., 2011) ou les anoures (i.e. crapauds et grenouilles ; Bee and Swanson, 2007). À cause du bruit ambiant, la perception des signaux sonores entre le mâle et la femelle est de plus en plus difficile. De ce fait, la reproduction est compromise. D'une façon plus générale, **toutes les formes de communication sont compromises** : de l'appel des petits dans le nid aux signaux d'alarme (Parris and Schneider, 2009).

### Plasticité du chant des oiseaux, ou effet Lombard

Pour pallier les problèmes de communication dans un environnement trop bruyant, la plupart des **oiseaux** démontrent une certaine plasticité dans leur chant, qui leur permet de minimiser la nuisance sonore dans leurs échanges (Paris and Schneider, 2009, Slabberkoorn and Ripmeester, 2008). Cette plasticité leur permet de moduler la fréquence ou l'amplitude de leurs signaux de communication. On parle d'effet Lombard, observable **également chez l'homme**, qui a tendance à parler plus fort dans un lieu au niveau sonore élevé.

Une étude américaine menée sur le **carouge à épaulettes** (Cartwright et al., 2014) a mis en évidence ce phénomène ainsi qu'une différence dans la composition du chant en lui-même (diminution de la durée ou du nombre de syllabes introductives par exemple) dans des environnements à niveaux sonores très élevés.

Cette plasticité existe également chez les **amphibiens** (Lengagne, 2008, Sun and Narins, 2003) ou les **chiroptères** (Hage et al., 2014).

### Mise en perspective des résultats sur la reproduction

Néanmoins, lorsqu'il s'agit d'estimer les impacts d'un projet sur l'état de conservation d'une population, ces résultats sur la reproduction doivent être mis en perspective : **une baisse du succès reproducteur n'implique pas nécessairement une diminution des effectifs de la population.**

En effet, une baisse du nombre de juvéniles peut diminuer les effets de compétition au sein de la population (compétition pour les ressources, compétition pour un territoire). Or la compétition au sein d'une population occasionne :

- soit de la mortalité directe (épuisement de la ressource),
- soit un fort taux de dispersion (les juvéniles ou adultes se déplacent vers un territoire).

Ainsi, une population qui génère moins de juvéniles est susceptible de garder un effectif constant du fait de la diminution des effets de la compétition.

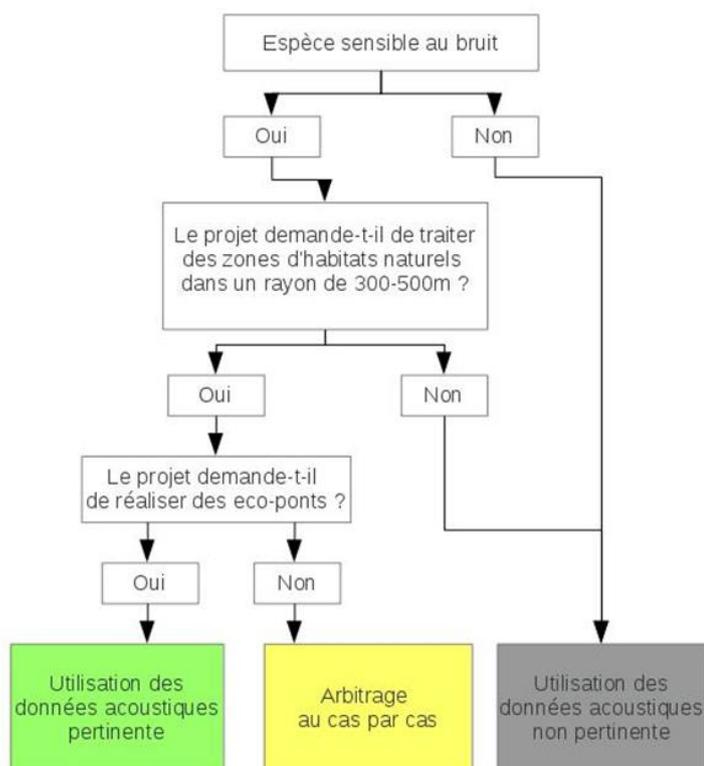


Schéma de prise en compte des données acoustiques en fonction des espèces

### Conclusion

Bien que la pollution sonore ne soit pas source de mortalité directe pour les populations, elle peut induire des comportements de fuite ou des difficultés de stabilisation dans la zone concernée. **Il existe donc un intérêt à intégrer la composante bruit dans la mise en place des aménagements en faveur de la biodiversité sur le parcours de l'ITT.**

Néanmoins, cet intérêt est à arbitrer au cas par cas. En effet :

- le niveau de sensibilité au bruit diffère entre espèces et groupes faunistiques,
- l'expertise de l'effet du bruit sur de nombreuses espèces est absente.

## 5.4. Principe et pratiques de l'intégration du bruit dans les outils de modélisation de la faune

### Les acteurs susceptibles d'utiliser les données bruit

Les bureaux d'études en charge de l'étude écologique peuvent tirer profit des données sur le bruit dans leurs études sur la faune à plusieurs étapes :

1. Étude de l'impact du projet sur les continuités écologiques : trame verte et bleue.
2. Étude de l'impact du projet sur l'état de conservation des populations dans le cadre des demandes de dérogation pour destruction d'espèces protégées et des incidences Natura 2000.
3. Proposition d'aménagements en faveur de la biodiversité : éco-ponts, zones tampons, etc.

Les données bruit de l'ITT peuvent être utilisées :

- soit dans l'analyse multicritère de l'étude écologique des habitats naturels potentiellement impactés par le projet,
- soit dans les outils de modélisation des déplacements et des dynamiques démographiques des espèces.

### Principe de l'utilisation des données de bruit dans la modélisation des déplacements de la faune

Les données sur le bruit peuvent être intégrées comme un facteur diminuant la qualité des habitats naturels de la carte d'occupation des sols pour les espèces sensibles au bruit. Ainsi deux types d'influence peuvent être pris en compte :

- Impact du bruit sur la qualité de l'habitat naturel en tant que **milieu de résidence** de l'espèce.
- Impact du bruit sur la qualité de l'habitat en tant que **milieu de passage** de l'espèce.

#### Impact du bruit sur la qualité de l'habitat naturel en tant que milieu de résidence de l'espèce

Dans ce premier cas, l'étude prend en compte une baisse de la qualité du milieu de résidence via une baisse de la capacité de charge de l'habitat naturel (nombre maximum d'adultes/Ha) en fonction du niveau sonore et de la sensibilité de l'espèce au bruit.

Ainsi, à titre d'exemple, la capacité de charge d'un habitat naturel avant la construction de l'ITT est estimée à 60 adultes/Ha. Avec la construction de l'ITT, le niveau sonore est supérieur de 30 dB pour un niveau sonore final de 70 dB. L'expertise écologique indique une baisse de 10 % de la capacité de charge à partir du seuil de 50 dB tous les 10 dB. Ainsi la capacité de charge de l'habitat naturel sera diminuée de 20 % soit 48 adultes/Ha.

#### Impact du bruit sur la qualité de l'habitat en tant que milieu de passage de l'espèce

Dans ce second cas, l'étude prend en compte une baisse de l'attractivité du milieu pour le déplacement des individus, liée à un comportement d'évitement du bruit (baisse répercutée dans le coefficient de perméabilité ou coefficient de friction) en fonction

- du niveau sonore,
- de la sensibilité de l'espèce au bruit.

**Adéquation entre les données de bruit dans la modélisation de la faune**

Outre le manque de connaissance sur la sensibilité des espèces au bruit évoquées précédemment, il n'existe qu'une seule limite majeure à l'utilisation des données de bruit dans l'étude écologique (voir tableau ci-dessous). Cette limite concerne le fait que **l'étude acoustique se concentre généralement sur les zones d'habitation et en conséquence, certains segments de l'ITT ne sont pas concernés par celle-ci.**

En conséquence, étudier l'impact du niveau sonore sur les couloirs de dispersion ou de prospection des espèces (continuités écologiques) peut demander d'étendre cette étude acoustique à d'autres segments de l'ITT. Dans ce cas de figure, cette démarche doit donc **intégrer un arbitrage coût-bénéfice** selon les objectifs de l'étude écologique.

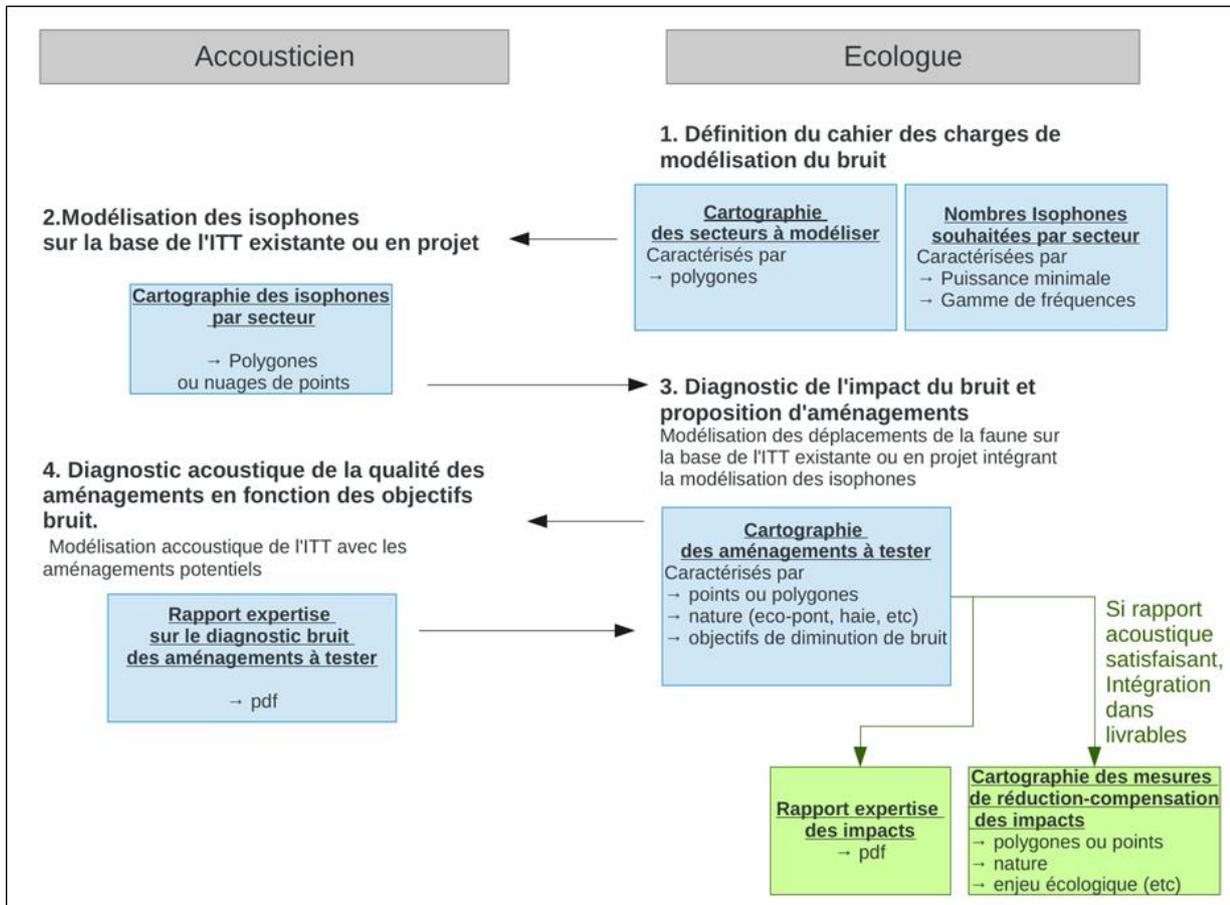
Ainsi, dans le cas d'une étude portant sur la localisation d'un passage à faune coûteux ou d'une mesure de compensation pour une espèce connue pour être sensible au bruit (cervidés, ursidés, etc.), elle serait à conseiller. Et inversement, dans le cas d'un aménagement mineur de buse pour une espèce peu sensible (certains petits mammifères, amphibiens, etc.).

	Étude écologique faune-flore	Étude sur le bruit	Adéquation entre les études
<b>Cartographie</b>			
<b>Largeur de la zone d'étude de part et d'autre de l'ITT</b>	3-10 km	300-500 m	Surface d'influence du bruit est inférieure à celle de l'étude écologique
<b>Segmentation de la zone étudiée</b>	Aucune : la totalité de la longueur de l'ITT est cartographiée	Focalisation sur les segments à impact sur les habitations	Besoin d'étendre les données sur le bruit au minimum sur les secteurs à enjeux pour le rétablissement des continuités écologiques
<b>Précision de l'échelle</b>	1/2500 <sup>ième</sup> à 1/10 000 <sup>ième</sup>	1/1000 <sup>ième</sup> à 1/10 000 <sup>ième</sup>	Échelles compatibles
<b>Unité de mesure</b>	Nb d'individus/Ha Coefficient de perméabilité/friction (unité de grandeur sans dimension)	En France on utilise le dB(A) qui prend en compte les sensibilités de l'oreille humaine. Pour la faune, il faudrait donc utiliser un dB spécifique à chaque espèce prenant en compte la plage de sensibilité au bruit de l'espèce.	Nécessité de conversion de l'unité dB en un % de diminution des unités faune-flore. → tableau de correspondance à réaliser à partir des expertises et travaux en écologie
<b>Format</b>			
<b>SIG</b>	Shape, Raster	Shape, Raster	Formats compatibles, mais la structuration des objets et attributs liés différent : à confirmer.
<b>Calendrier</b>			
<b>Utilisation des données et modèles de terrain</b>	Entre 6-12 mois après le début de la mission, après les inventaires faune-flore	2 mois après début mission	Les données acoustiques sont disponibles à temps pour l'étude faune-flore
<b>Étude prospective du flux d'informations entre la modélisation du bruit et de la faune au cours de la conception d'un éco-pont</b>			

**Principe du flux d'information envisagé entre les écologues et les acousticiens**

Ce schéma donne le principe du flux d'information envisagé entre les écologues et les acousticiens pour une étude visant à concevoir un éco-pont. Ce schéma de principe est à expérimenter et à préciser de la même manière que ce qui a été fait dans les parties précédentes afin d'identifier :

- les blocages dans les échanges,
- la réutilisation des données pour la modélisation de l'impact sonore d'une infrastructure sur la faune.



Principe du flux d'information envisagé entre les écologues et les acousticiens pour une étude visant à concevoir un éco-pont.

## Conclusions

D'un point de vue opérationnel, les données générées par l'étude du bruit sont disponibles et donc utilisables dans les méthodologies employées pour les études écologiques. En revanche, étant donné que l'étude acoustique se focalise généralement sur les segments potentiellement impactant pour les habitations, **intégrer le bruit dans l'étude écologique peut demander d'étendre l'étude acoustique sur des secteurs non habités**. Si cela est le cas, il s'agira ici aussi d'**arbitrer le coût-bénéfice de ce travail** par rapport aux objectifs de l'étude écologique.

**Difficulté à intégrer ces données dans le processus global du BIM**

Ce travail bibliographique de prospective montre clairement qu'il est pour le moment compliqué de chercher à intégrer les données de ce genre d'étude dans le processus global du BIM, en tout cas du point de vue de la modélisation 3D. D'autres travaux de recherche sont à mener pour arriver à évaluer les impacts et puissances sonores maximales à ne pas dépasser pour ne pas perturber la faune dans ses différentes activités de vie.

**Point bloquant : workflow et utilisation des données entre acousticiens et écologues**

Les outils actuels permettent, avec quelques modifications de paramètres, d'étendre les études acoustiques pour les plages de fréquence et niveaux sonores qui perturbent chaque espèce pour différentes activités. La partie bloquante est plus sur le workflow suivi par les données, les différentes ressaisies et transformations qu'elles subissent au cours de ces études, entre leurs utilisations par les écologues et les acousticiens notamment.

**Une recherche dans une phase prospective**

Ainsi, la recherche et l'établissement d'indicateurs de perturbation pour compléter les indicateurs de la partie « Passage à faune » de ce rapport seraient un travail conséquent, mais pertinent pour couvrir un champ plus large d'impact d'une infrastructure sur la faune.

Nous sommes bien ici dans une phase prospective qui doit s'appuyer fortement sur la recherche scientifique dans ce domaine de la bioacoustique.

## 5.5. Conclusions et perspectives

### Une étude du workflow

Dans cette partie sur l'étude acoustique, nous avons étudié le workflow des données nécessaires à l'étude acoustique :

- depuis le moment où elles intègrent le processus métier,
- jusqu'à la production des livrables (uniquement les objets manipulés et non les rapports par exemple) sortants techniques de l'étude acoustique devant normalement réintégrer la base de données du projet (GED).

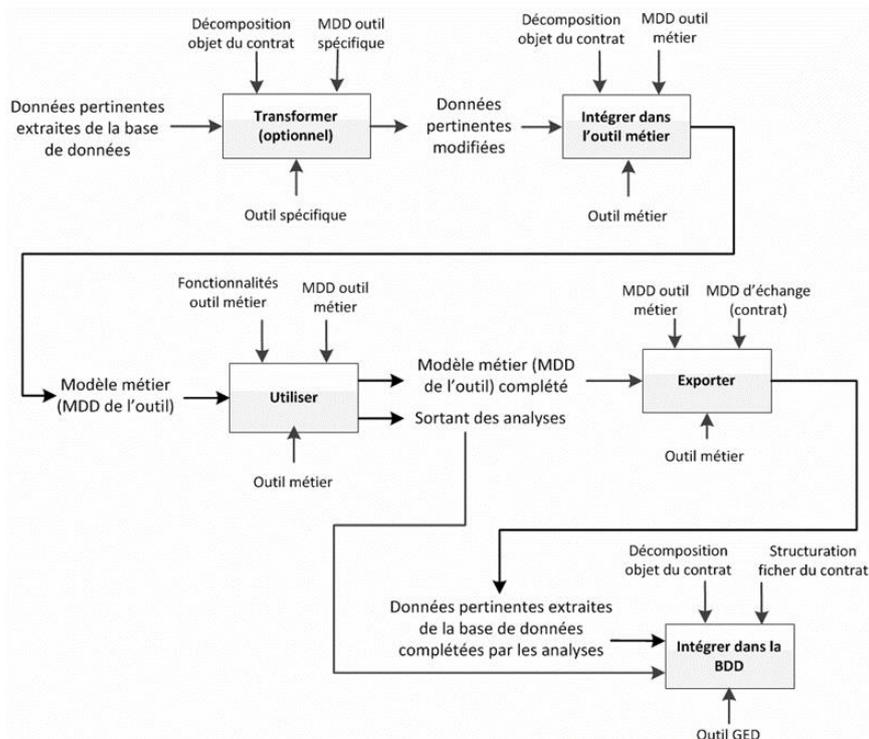
### Blocages identifiés

Nous avons identifié des blocages suivants :

Blocages identifiés	
pour les entrants	Dans les données de relevé de l'existant
	Dans les sortants d'autres métiers qui alimentent le modèle de l'étude acoustique
	Dans l'outil métier acoustique dans l'intégration des données entrantes : ressaisies et transformations de données, etc.
pour les sortants	Formats d'export limités
	Pas de connexion possible avec une GED

### Une perpétuelle transformation des données

Ainsi, sur cette partie d'étude acoustique, à intégrer dans le processus global de conception d'une infrastructure routière, on remarque une **perpétuelle transformation des données avec des ressaisies systématiques de la partie attributive des objets manipulés** (voir figure ci-dessous).



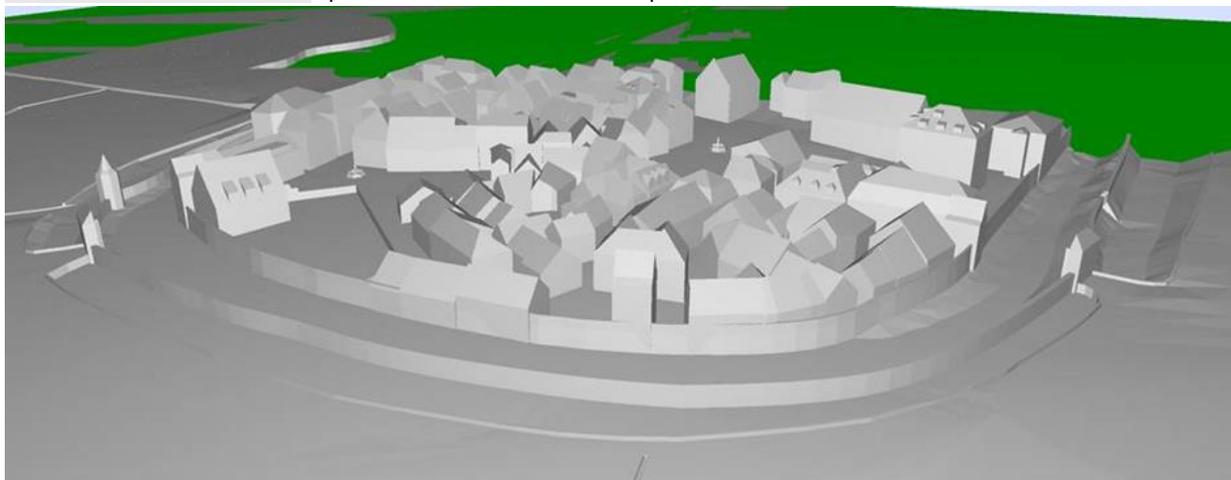
**Processus récurrent de transformation des données dans un projet de conception d'infrastructure. Ce diagramme générique peut s'appliquer aux données de nombreux métiers d'un projet. Extrait de (C. Tolmer, 2016)**

### Format ouvert CityGML

On note toutefois la possibilité d'utiliser le format ouvert CityGML, dans un modèle CadnaA qui reste à améliorer, pour :

- Reconnaître les différentes classes d'objets ainsi que les attributs.
- Ne pas modéliser l'ensemble des objets dans une seule classe d'objets (voir figure suivante).

Il convient également de vérifier que CityGML (avec des extensions de type « ADE Acoustique ») est suffisant pour échanger les objets évoqués dans cette partie sur les études acoustiques.



Modélisation d'éléments urbains en CityGML dans l'outil CadnaA (source du modèle CityGML : <http://www.citygml.org/?id=1539>)

## 6. BIBLIOGRAPHIE

### 6.1. Partie I

- AIA. (2013). AIA. Retrieved from <http://www.aia.org/>
- Audibert, L. (2014). UML 2 de l'Apprentissage à la Pratique (Ellipses M.).
- Barber, J. R., Crooks, K. R., & Fristrup, K. M. (2010). The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends In ecology and Evolution*, 25(3), 180–189. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2009.08.002>
- Bédard, Y. (1999). Visual modelling of spatial database: toward spatial PVL and UML. *Geomatica*, 53(2), 169–186.
- Billen, R., Laplanche, F., Zlatanova, S., & Emgard, L. (2008). Vers la création d'un méta-modèle générique de l'information spatiale 3D urbaine. *XYZ*, 114, 37–42.
- BIMForum. (2014). Level of development specification. Retrieved from <https://bimforum.org/lod/>
- BIMForum. (2015). Level of development specification.
- BIMProtocol. (2013). BIM protocol. Standard Protocol for use in projects using Building Information Models.
- Booch, G. (1992). Conception orientée objets et applications (Addison-We.).
- bsi. (2015). BIM Toolkit. Retrieved October 15, 2015, from <https://toolkit.thenbs.com/>
- Charroux, B., Osmani, A., & Thierry-Mieg, Y. (2010). UML 2 Pratique de la modélisation (Pearson.).
- Jones, G. (2008). Sensory ecology: noise annoys foraging bats. *Current Biology*, 18(23), 1098. doi:10.1016/j.cub.2008.10.005
- Kreider, R. G., & Messner, J. I. (2013). The Uses of BIM: Classifying and Selecting BIM Uses. The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA. Retrieved from <http://bim.psu.edu>
- Laplanche, F. (2002). Conception de projet SIG avec UML. *Bulletin de La Société Géographique de Liège*, 42, 19–25.
- Larrivée, S., Bédard, Y., & Pouliot, J. (2006). Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D. *Revue Internationale de Géomatique*, VOL 16/1, 9–27. doi:10.3166/ri.16.9-27
- Morley, C., Hugues, J., & Leblanc, B. (2008). UML 2 Pour l'analyse d'un système d'information (Dunod.). Paris, France.
- Norme de CityGML. (2012). Open Geospatial Consortium OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding standard.
- Schaub, A., Ostwald, J., & Siemers, B. M. (2008). Foraging bats avoid noise. *The Journal of Experimental Biology*, 211, 3174–3180. doi:10.1242/jeb.022863
- Tolmer, C. (2016). Contribution à la mise en place d'un modèle d'ingénierie concurrente pour les projets de conception d'infrastructures linéaires. Paris Est Marne-La-Vallée, Lab'Urba.
- Tolmer, C., Castaing, C., Morand, D., & Diab, Y. (2015). Information management for linear infrastructure projects: conceptual model integrating Level Of Detail and Level Of Development. In 32nd CIB W78 Conference. Eindhoven, Pays-Bas.
- Tolmer, C.-E., Castaing, C., Morand, D., & Diab, Y. (2015). Modèle conceptuel pour la structuration de l'information en conception d'infrastructures. In 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, Bayonne, France. Retrieved from <http://rugc15.sciencesconf.org/program>
- Zignale, D. (2013). Concevoir des services collaboratifs adaptés à des pratiques métiers : une méthode centrée usages. Application au domaine de la construction. Université de Lorraine.
- Zoghliami, A. (2013). Modélisation et conception de systèmes d'information géographique gérant l'imprécision. Université Paris 8.

## 6.2. Partie 2

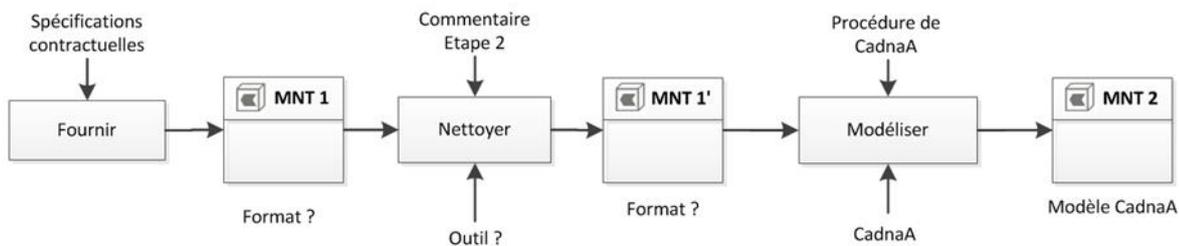
- Bee, M.A., Swanson, E.M., 2007. Auditory masking of anuran advertisement calls by road traffic noise. *Anim. Behav.* 74, 1765–1776.
- Benitez-Lopez, A., Alkemade, R., Verweij, P.A., 2010. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis. *Biological Conservation* 143, 1307–1316.
- Brotos, L., Herrando, S., 2001. Reduced bird occurrence in pine forest fragments associated with road proximity in a Mediterranean agricultural area. *Landscape and Urban Planning* 57, 77–89.
- Cartwright, L.A., Taylor, D.R., Wilson, D.R., Chow-Fraser, P., 2014. Urban noise affects song structure and daily patterns of song production in Red-winged Blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). *Urban Ecosystems* 17, 561–572.
- CETE, 2007. Bruit urbain et faune sauvage : synthèse bibliographique.
- Coffin, A.W., 2007. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography* 15, 396–406.
- Forman, R.T.T., Alexander, L.E., 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29, 207–+.
- Forman, R.T.T., Deblinger, R.D., 2000. The ecological road-effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway. *Conservation Biology* 14, 36–46.
- Gagnon, J.W., Theimer, T.C., Dodd, N.L., Boe, S., Schweinsburg, R.E., 2007. Traffic volume alters elk distribution and highway crossings in Arizona. *Journal of Wildlife Management* 71, 2318–2323.
- Hage, S.R., Jiang, T., Berquist, S., Feng, J., Metzner, W., 2014. Ambient noise causes independent changes in distinct spectro-temporal features of echolocation calls in horseshoe bats. *The Journal of experimental biology* jeb-102855.
- Hage, S.R., Metzner, W., 2013. Potential effects of anthropogenic noise on echolocation behavior in horseshoe bats. *Commun Integr Biol* 6, e24753.
- Halfwerk, W., Holleman, L.J.M., Lessells, C., Slabbekoorn, H., 2011. Negative impact of traffic noise on avian reproductive success. *Journal of Applied Ecology* 48, 210–219.
- Iuell, B., Bekker, H., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlaváč, V., Keller, V., Rosell, C., Sangwine, T., Tørsløv, N., Wandall, B., 2007. Faune et trafic - Manuel européen d'identification des conflits et de conception de solutions.
- Kaselloo, P.A., 2005. Synthesis of noise effects on wildlife populations. Road Ecology Center.
- Kitzes, J., Merenlender, A., 2014. Large Roads Reduce Bat Activity across Multiple Species. *PLoS One* 9, e96341.
- Knight, R.L., Gutzwiller, K., Bowles, A.E., 2013. Response of wildlife to noise, in: *Wildlife and Recreationists: Coexistence Through Management And Research*. Island Press.
- Lengagne, T., 2008. Traffic noise affects communication behaviour in a breeding anuran, *Hyla arborea*. *Biological Conservation* 141, 2023–2031.
- Luo, J., Clarin, B.-M., Borissov, I.M., Siemers, B.M., 2014. Are torpid bats immune to anthropogenic noise? *Journal of Experimental Biology* 217, 1072–1078.
- Mace, R.D., Waller, J.S., Manley, T.L., Lyon, L.J., Zuuring, H., 1996. Relationships among grizzly bears, roads and habitat in the Swan Mountains Montana. *Journal of Applied Ecology* 1395–1404.
- Mata, C., Hervas, I., Herranz, J., Malo, J.E., Suarez, F., 2009. Seasonal changes in wildlife use of motorway crossing structures and their implication for monitoring programmes. *Transportation Research Part D-Transport and Environment* 14, 447–452.
- McGregor, R.L., Bender, D.J., Fahrig, L., 2008. Do small mammals avoid roads because of the traffic? *Journal of Applied Ecology* 45, 117–123.
- Newmark, W.D., Boshe, J.I., Sariko, H.I., Makumbule, G.K., 1996. Effects of a highway on large mammals in Mikumi National Park, Tanzania. *African Journal of Ecology* 34, 15–31.

- Parris, K.M., Schneider, A., 2009. Impacts of Traffic Noise and Traffic Volume on Birds of Roadside Habitats. *Ecol. Soc.* 14, 29.
- Radle, A.L., 2007. The effect of noise on wildlife: a literature review, in: *World Forum for Acoustic Ecology Online Reader*.
- Reijnen, R., Foppen, R., Meeuwssen, H., 1996. The effects of traffic on the density of breeding birds in Dutch agricultural grasslands. *Biological Conservation* 75, 255–260.
- Reijnen, R., Foppen, R., Veenbaas, G., 1997. Disturbance by traffic of breeding birds: evaluation of the effect and considerations in planning and managing road corridors. *Biodiversity and Conservation* 6, 567–581.
- Schaub, A., Ostwald, J., Siemers, B.M., 2008. Foraging bats avoid noise. *J Exp Biol* 211, 3174–3180.
- Seiler, A., 2001. Ecological effects of roads: a review. *Introductory research essay* 9, 1–40.
- Shannon, G., Angeloni, L.M., Wittemyer, G., Fristrup, K.M., Crooks, K.R., 2014. Road traffic noise modifies behaviour of a keystone species. *Animal Behaviour* 94, 135–141.
- Siemers, B.M., Schaub, A., 2010. Hunting at the highway: traffic noise reduces foraging efficiency in acoustic predators. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*.
- Slabbekoorn, H., Ripmeester, E.A.P., 2008. Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. *Molecular Ecology* 17, 72–83.
- Spellerberg, I.A.N., 1998. Ecological effects of roads and traffic: a literature review. *Global Ecology and Biogeography* 7, 317–333.
- Sun, J.W.C., Narins, P.A., 2005. Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate. *Biol. Conserv.* 121, 419–427.
- Thirion, J.-M., Doré, F., Sériot, J., 2010. Impact de la pollution sonore sur la faune. *Le Courrier de la Nature* n°254 32–37.
- Tremblay, M.A., St Clair, C.C., 2009. Factors affecting the permeability of transportation and riparian corridors to the movements of songbirds in an urban landscape. *J. Appl. Ecol.* 46, 1314–1322.
- Underhill, J.E., Angold, P.G., 1999. Effects of roads on wildlife in an intensively modified landscape. *Environmental Reviews* 8, 21–39.

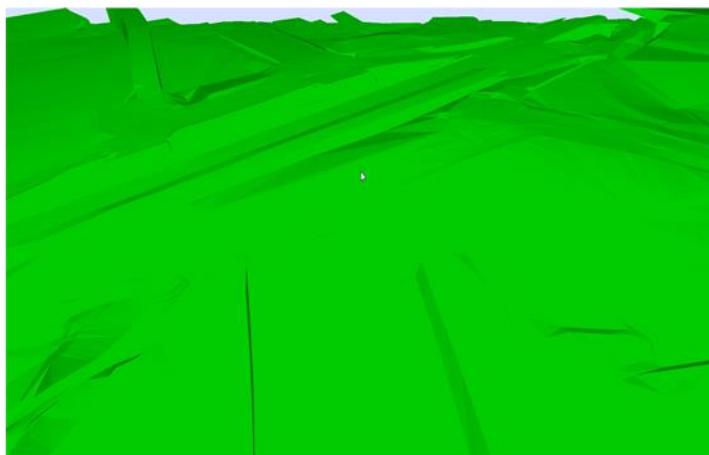
## 7. ANNEXES

### 7.1. Annexe I

#### Objet MNT

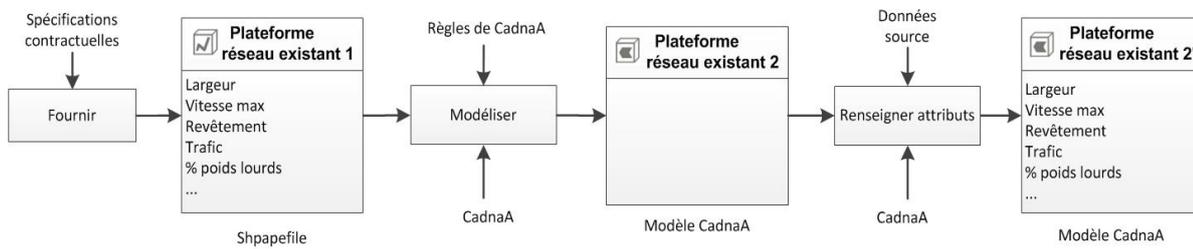


Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	?	Fournir	Nettoyage des données topo, suppression des vertex faux, concaténation des fichiers... pour des fichiers topo n'intégrant que les données du MNT. Dans le cas de relevés topo globaux (en format DWG par exemple) il convient de séparer les types de données : MNT, bâtiments, surfaces aquatiques, voirie, voies ferrées, murs...
2	BE acoustique	Nettoyer	Peut également être un MNT modifié par le projet
3	BE acoustique	Modéliser	Peut également être un MNT modifié par le projet

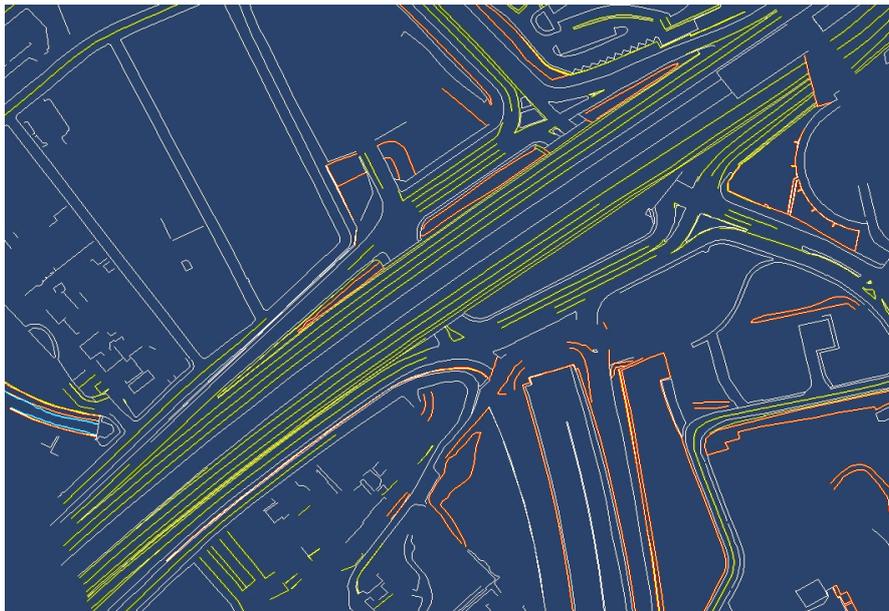


Objet MNT

## Objet Plateforme existante

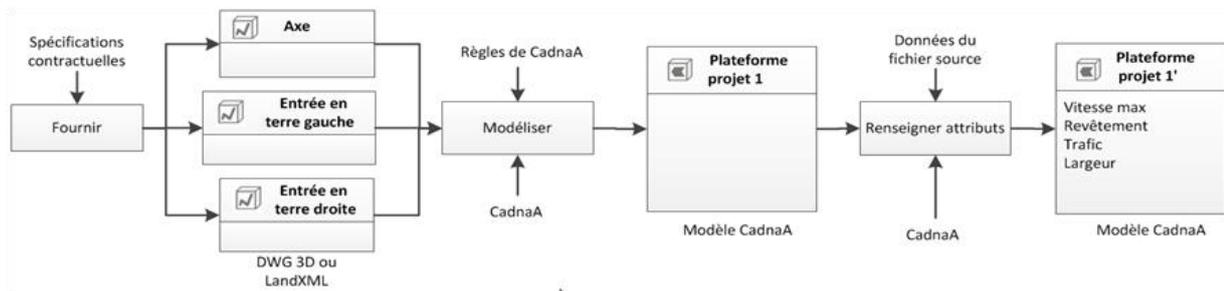


Étape	Acteur	Action	Commentaires
1	IGN ou autre organisme ou entreprise de relevé	Fournir	Généralement, toutes ces informations attributaires ne sont pas disponibles dans le fichier géospatial, elles sont disponibles dans un document annexe type tableau
2	BE acoustique	Modéliser	
3	BE acoustique	Renseigner les informations attributaires	



Objet Plateforme existante

## Objet Plateforme projet

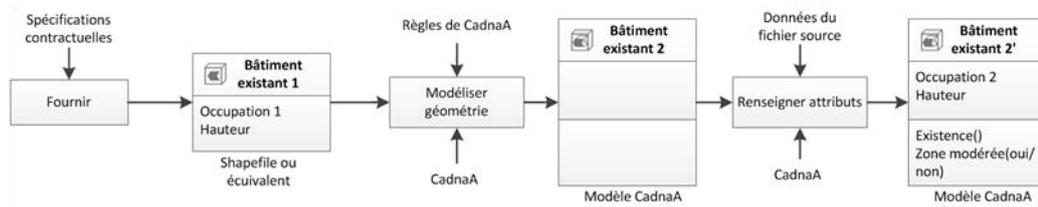


Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	BE géométrie	Fournir	
2	BE acoustique	Modéliser	
3	BE acoustique	Renseigner les informations attributaires	Nous pouvons choisir et préconiser un revêtement spécial (enrobé phonique)

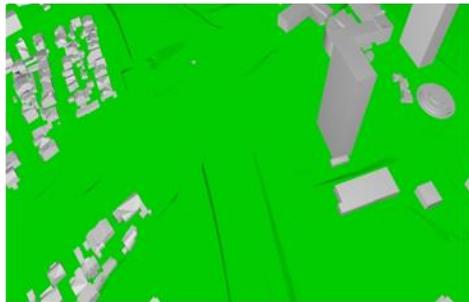


Objet Plateforme projet

## Objet Bâtiment existant

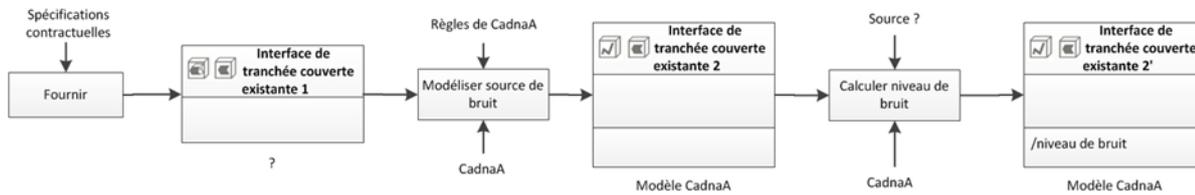


Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	IGN ou autre organisme ou entreprise de relevé	Fournir	
2	BE acoustique	Modélise	il n'y a pas de raccord entre le MNT et l'implantation des bâtiments : cette précision géométrique n'est pas nécessaire pour des études acoustiques.
3	BE acoustique	Renseigne les informations attributaires	



Objet Bâtiment existant

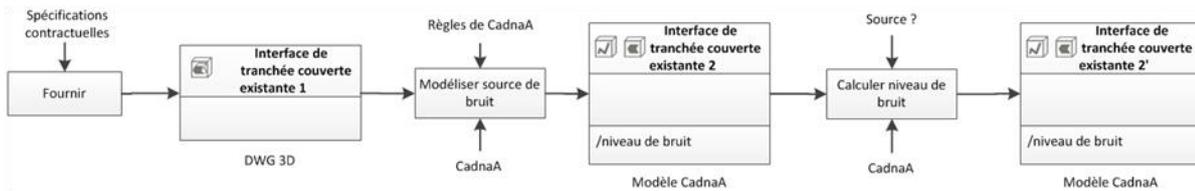
### Objet Interface de tranchée couverte existante



Etape	Acteur	Action
1	?	Fournir
2	BE acoustique	Modélise source de bruit
3	BE acoustique	Calculer niveau de bruit

### Objet Interface de tranchée couverte existante

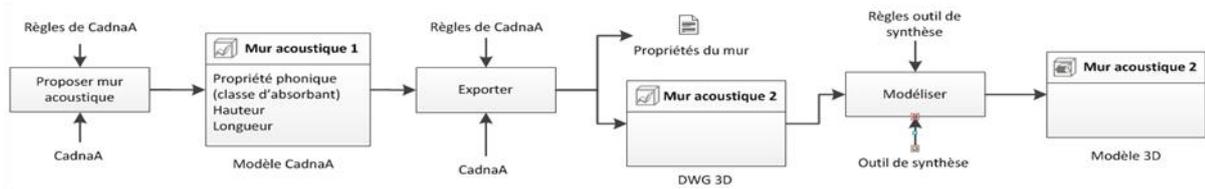
### Objet Interface tranchée couverte projet



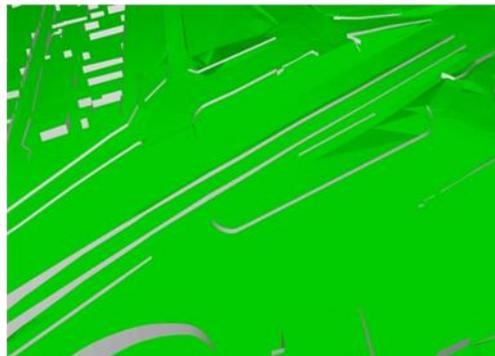
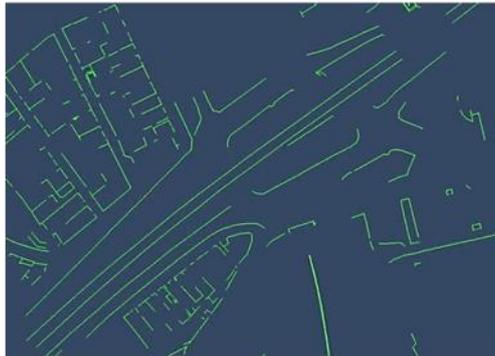
Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	BE ouvrages d'art	Fournir	
2	BE acoustique	Modélise	
3	BE acoustique	Calcul des niveaux de bruit	en fonction des attributs de la plateforme qui traverse cette TC

### Objet Interface tranchée couverte projet

## Objet Mur acoustique projet

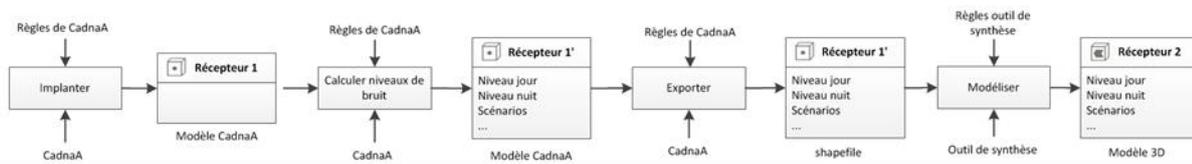


Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	BE acoustique	Proposer mur acoustique	
2	BE acoustique	Exporte	L'export des propriétés des murs n'est pas automatique
3	Equipe MN	Exporte	L'export des propriétés des murs n'est pas automatique ; export ensuite réutilisé par le BE géométrie

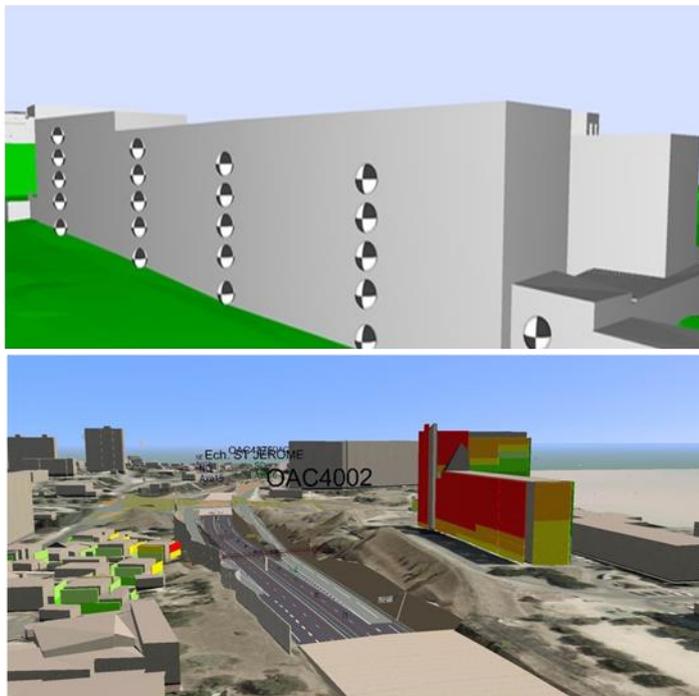


Objet Mur acoustique projet

## Objet Récepteur acoustique

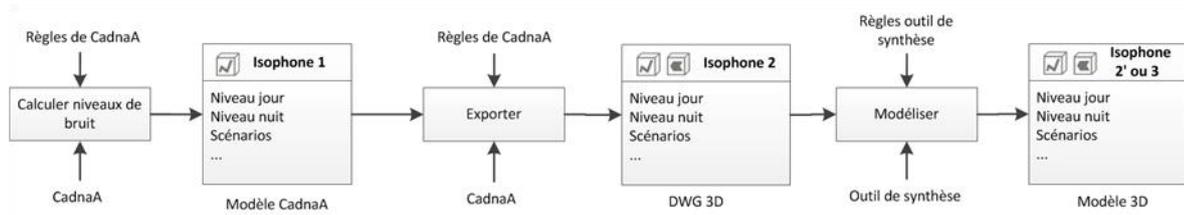


Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	BE acoustique	Implante	Les récepteurs sont les sphères blanches et noires des images ci-dessous ; elles matérialisent les points où le niveau acoustique doit être calculé (image de gauche).
2	BE acoustique	Calcul les niveaux de bruit	
3	BE acoustique	Exporte	Les différents scénarios sont exportés avec niveaux de jour et nuit, avec et sans protection acoustique.
4	BE acoustique ou autre	Modéliser	Modélisation des différents scénarios avec une représentation plus explicite (image de droite).

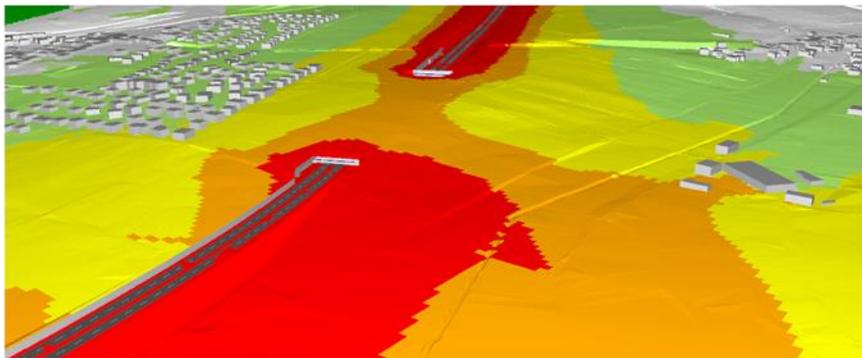


Objet Récepteur acoustique

## Objet Isophone



Etape	Acteur	Action	Commentaire
1	BE acoustique	Calculer	
2	BE acoustique	Exporter	Variable selon l'outil de maquette numérique et les besoins
3	Equipe MN	Modéliser	Variable selon l'outil de maquette numérique et les besoins ; pour le moment pas de modélisation des isophones, uniquement des niveaux de bruit pour les récepteurs



Objet Isophone

# UC6 – Infrastructure et environnement

## 2- infrastructures et transparence écologique

# Sommaire

<b>1. OBJECTIFS ET STRUCTURE DU RAPPORT .....</b>	<b>52</b>
1.1. Objectifs.....	52
1.2. Quelles données, pour quoi faire ? .....	53
1.3. Structure de ce rapport.....	54
<b>2. LES DONNÉES À PRENDRE EN COMPTE, LEUR USAGE TOUT AU LONG DU PROJET ET LES BESOINS EN TERMES DE VISUALISATION ET STOCKAGE .....</b>	<b>55</b>
2.1. Au début d'un projet (conception d'une nouvelle infrastructure ou modification significative d'une infrastructure existante). Stade de l'avant-projet AVP .....	55
2.2. Stade des enquêtes publiques (DUP, parcellaire, police de l'eau) et des dossiers réglementaires (CNPJ).....	56
2.3. Principaux livrables et objets .....	56
2.4. Phase de construction.....	59
2.5. Processus de création, modèle de données et représentation 3D .....	60
<b>3. ZOOM SUR LES INTERFACES ENTRE LES DONNÉES D'INFRASTRUCTURE ET LES AUTRES DONNÉES : EXEMPLE DE MODÉLISATION 3D DE L'ÉCO-PONT DE PEYREHARASSE DE L'A64 .....</b>	<b>62</b>
3.1. Entrants et processus.....	62
3.2. Quels outils ? .....	64
3.3. Retour d'expérience sur ce travail.....	64
<b>4. QUELLES MÉTRIQUES POSSIBLES POUR CALCULER LA FRAGMENTATION DUE À UNE INFRASTRUCTURE ET L'APPORT DE PASSAGE À FAUNE (TYPE ÉCO-PONT).....</b>	<b>65</b>
4.1. Introduction.....	65
4.2. Pratiques d'évaluation de la fragmentation dans les études de projets d'infrastructures .....	67
4.3. Éléments prospectifs transférables au plan opérationnel à brève échéance.....	71
4.4. Quel apport possible de la 3D ? .....	74
<b>5. LES COMPENSATIONS ET MESURES DE RÉDUCTION : COMMENT LES CALCULER ? COMMENT ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES MESURES DANS LE TEMPS ?.....</b>	<b>75</b>
5.1. Méthode courante de calcul des compensations .....	75
5.2. Méthode prospective pour le calcul des compensations.....	78
<b>6. L'HISTORISATION : QUELLES DONNÉES CONSERVER ? .....</b>	<b>83</b>
6.1. Réglementation actuelle.....	83
6.2. Acteurs impliqués .....	85
6.3. Les données de conception et de réalisation, état 0 .....	86
6.4. Le suivi des mesures de transparence écologique.....	87
6.5. Le suivi des mesures de compensation : la vie administrative des compensations .....	88
6.6. Quels modèles pour historiser au mieux les données ?.....	89
<b>7. MÉTHODE PROSPECTIVE POUR LA LOCALISATION DES ÉCO-PONTS PAR SIMULATION.....</b>	<b>91</b>
7.1. Simulation numérique de déplacements animaliers dans un espace géographique numérique en 2D5.....	91
7.2. Conception d'un modèle de simulation de déplacement animalier .....	92
7.3. Expérimentations pour évaluer l'impact d'infrastructures et d'aménagements .....	99
7.4. Comment aller plus loin avec un modèle 3D complet.....	102
<b>8. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>104</b>
8.1. Bibliographie citée .....	104
8.2. Autre bibliographie .....	105
<b>9. ANNEXE.....</b>	<b>107</b>
9.1. Annexe A – Éléments de contexte : réglementations, TVB et études d'impacts.....	107
<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS .....</b>	<b>116</b>
<b>2. SPÉCIFICATIONS À L'USAGE DES ACTEURS (SPÉCIFICATION « MÉTIERS ») .....</b>	<b>117</b>
2.1. Rappel du jeu d'acteurs sur les données.....	117

2.2. Propositions d'amélioration .....	118
3. SPÉCIFICATIONS SUR LES DONNÉES .....	121
4. SPÉCIFICATIONS LOGICIELLES.....	122
4.1. Quels outils pour quels métiers ?.....	122
4.2. Les propositions d'amélioration de logiciels pour réduire les perturbations sur le cycle de vie des données.....	123
4.3. Réflexion sur les formats : vers la généralisation des formats standards (type cityGML, IFC, etc.)	123
5. PROPOSITIONS DE NATURE NORMATIVE OU RÉGLEMENTAIRE .....	124
5.1. Rappel des réglementations et normes existantes pour l'interopérabilité des données .....	124
5.2. Nos premières propositions (tranche I) .....	125

# I. OBJECTIFS ET STRUCTURE DU RAPPORT

## I.1. Objectifs

<b>Suivi de mesures environnementales</b>	<p>Ce rapport a pour objectif de traiter la problématique du suivi des mesures environnementales mises en œuvre pour réduire et compenser les impacts environnementaux des infrastructures linéaires, du point de vue :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• des échanges de données,</li><li>• du suivi de l'information,</li><li>• de l'implication des différents types d'acteurs dans la production et l'utilisation des données.</li></ul>
<b>Cas d'usage : tronçon d'autoroute</b>	<p>Le cas d'usage est un tronçon d'autoroute, dans le cas de travaux d'élargissement ou de requalification environnementale, avec la construction d'un passage à faune (mesures de réduction d'impact) et les mesures compensatoires.</p> <p>On distingue deux cas :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• celui où un <b>éco-pont</b> est construit (chapitre 2, 3, 4),</li><li>• celui où une autoroute est construite <b>sans éco-pont</b> et où il faut mettre en place des <b>mesures compensatoires</b> (chapitre 5).</li></ul>
<b>Annexe</b>	<p>L'annexe A rappelle le contexte réglementaire et les usages des constructions de trames vertes et bleues et d'études d'impacts.</p>

## I.2. Quelles données, pour quoi faire ?

<b>Données nécessaires</b>	Si on se place dans la construction d'un éco-pont, indépendamment des acteurs, voici les besoins en données numériques que l'on peut identifier au cours du temps.
Étapes	Données
Études préalables visant à voir où placer un éco-pont	Analyses d'impacts écologiques et économiques pour chaque scénario.
Une fois qu'un emplacement est choisi	Raisons qui ont poussé à positionner l'éco-pont à cet endroit.
	Données de biodiversité autour de l'espace choisi avant la construction de l'éco-pont.
	Maquette numérique de l'éco-pont et de son environnement permettant sa construction.
Une fois l'éco-pont construit	Géométrie de l'éco-pont une fois construit (et non la maquette pour sa construction) avec les matériaux utilisés (pour les pollutions et le suivi).
	Topographie autour de l'éco-pont en 3D. En effet certaines zones ont pu être modifiées par l'éco-pont : cours d'eau, talus, etc.
	Suivi de l'état écologique au cours du temps : le stockage d'indicateurs environnementaux à proximité de l'ouvrage.
	Suivi de l'état de l'éco-pont.
<b>En cas de litige</b>	En cas de litige ou de problèmes environnementaux ou de problèmes de maintenance sur l'ouvrage construit, on veut pouvoir consulter toutes ces données.

<b>Étapes prises en compte</b>	<p>Pour les <b>éco-ponts</b> on distingue donc les étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• d'analyse, pour savoir où construire,</li> <li>• de construction,</li> <li>• d'exploitation.</li> </ul> <p>Pour les <b>mesures de compensation</b>, on distingue :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• le choix des zones de compensations,</li> <li>• leur suivi dans le temps.</li> </ul>
--------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Autres données</b>	Les données suivantes sont aussi nécessaires :
Étapes	Données
Construire où ?	Quelles données, quelles métriques ?
	Comment le sauvegarder ?
	Comment conserver les mesures de caractérisation de la faune et flore ?
En exploitation	Quelles informations stocker ? Sur quoi ? Où ? Qui ? Quels accès ?

## 1.3. Structure de ce rapport

### Clé de lecture du rapport

**En vert on trouvera décrit dans ce rapport ce que l'on souhaiterait obtenir grâce à des données numériques bien structurées, complètes et accessibles ou les difficultés rencontrées.**

### Structure des chapitres

Le rapport est structuré selon les chapitres suivants :

Chapitre	Contenu
2.	Présente les données à prendre en compte tout au long d'un projet de construction d'un éco-pont et les acteurs concernés.
3.	Plus technique et en lien avec MINnD. Il est focalisé sur les interfaces entre les données d'infrastructure et les autres données. Là aussi on différencie l'existant de ce que l'on souhaiterait obtenir.
4.	Centré sur les indicateurs (que l'on appelle les métriques) qui permettraient de caractériser l'environnement autour des infrastructures, pour le suivi de l'impact de l'infrastructure sur l'environnement.
5.	Centré sur les compensations. Il commence par une présentation des pratiques puis propose des pistes pour améliorer le choix des zones. Le chapitre 5 essaye de répondre à la question du calcul des compensations et du contrôle de leur efficacité dans le temps. Là encore, on verra que ces analyses reposent sur l'existence de données numériques.
6.	Centré sur les problématiques d'historisation. Il essaie de répondre à la question : que faudrait-il conserver et comment pour gérer au mieux, au cours du temps, les interactions de l'infrastructure avec son environnement ? Ce chapitre a été moins développé que prévu.
7.	Centré sur le rôle de la simulation dans le choix de la localisation des éco-ponts. Actuellement, les choix des lieux ne sont pas basés sur la simulation, comme c'est le cas pour la protection anti-bruit (rapport UC6.1 de MINnD). Nous présentons des pistes pour aller dans cette direction. Elles s'appuient sur des données numériques décrivant l'environnement, les infrastructures et les passages.

### Chapitres prospectifs

On notera que les chapitres 5, 6 et 7 sont prospectifs. Ils illustrent l'apport du numérique pour une meilleure coexistence des infrastructures et de la biodiversité.

### Présentation des conclusions

Ce travail permet de définir les bases pour une tranche 2 de MINnD. Cette tranche mènera des analyses concrètes, en utilisant des données et logiciels. Elle analysera les difficultés d'interopérabilité des données et logiciels pour étudier la construction d'éco-pont sur une infrastructure, ce en fonction des ressources environnementales et de l'historisation des données qu'il faudrait en faire.

**La conclusion générale sera donc présentée en tranche 2.** Le présent rapport présente de nombreuses conclusions partielles (en vert) au fil des chapitres.

### Formalisme

Comme pour le rapport UC6.1 (Infrastructures et bruit) les formalismes **UML** et **SADT** sont utilisés. Ces formalismes sont présentés brièvement dans le rapport 6.1.

## 2. LES DONNÉES À PRENDRE EN COMPTE, LEUR USAGE TOUT AU LONG DU PROJET ET LES BESOINS EN TERMES DE VISUALISATION ET STOCKAGE

### Une grande diversité des données d'entrée

Les données à prendre en compte ont des origines et des formats différents et le plus souvent non intégrables directement dans un SIG ou dans les outils de manipulation d'une Maquette numérique.

En effet, les acteurs présents sur ces projets sont très divers, tant en taille de structures que d'équipements. Ils produisent un grand nombre d'informations, qui, sans être préalablement décrites à la commande, sont livrées sur toutes sortes de supports et de formats.

### 2.1. Au début d'un projet (conception d'une nouvelle infrastructure ou modification significative d'une infrastructure existante). Stade de l'avant-projet AVP

#### Liste des données

Le tableau suivant liste les données communément utilisées, ainsi que les formats et les logiciels. Il s'agit de réunir dans un même système d'information les données qui ont permis d'effectuer la conception de l'infrastructure répondant aux exigences environnementales, notamment :

Données	Formats et logiciels
4. <b>Les informations décrivant l'infrastructure et les emprises</b> : issues du concessionnaire ou du constructeur de l'infrastructure. Du point de vue environnemental, il s'agit notamment des ouvrages de transparence écologique prévus.	Données hétérogènes : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bureautique (Word, Excel),</li> <li>• Autocad (dwg),</li> <li>• SIG (shape) et papier.</li> </ul> <i>Données non-géo référencées pour la plupart</i>
2. <b>Les données cartographiques et topographiques.</b>	IGN (RGE) « Lambert 93 » Plans au 1/1000e dwg, Nuages de points, MNT, socle 3D mappé « Lambert 93 et CC 9 zones »
8. <b>Le cadastre.</b>	Autocad « Lambert 93 CC 9 zones », <i>Attention à l'assemblage des sections cadastrales et des communes pour un projet linéaire</i>
9. <b>Les données relatives aux zones environnementales spécifiques</b> (Natura 2000, ZPS, ZNIEFF, etc).	Flux WMS (DREAL, sites nationaux) Données SIG téléchargeables (DREAL, sites nationaux) « Lambert 93 »
10. <b>Les inventaires faune et flore initiaux</b> , issus des bureaux d'études spécialisés. En général, plusieurs BE produisent ces inventaires, répartis en fonction de leur spécialité ou de zones géographiques.	Données SIG au format shape « Lambert 93 » parfois format kmz « WGS84 » Données format Word, Excel, PDF
11. <b>Les trames vertes et bleues identifiées (et leur état initial)</b> issues des communes, régions, départements.	<i>Données hétérogènes pas toujours disponibles au format SIG</i>

## 2.2. Stade des enquêtes publiques (DUP, parcellaire, police de l'eau) et des dossiers réglementaires (CNP)

### Une synthèse des enjeux et des impacts

Cette phase réglementaire du projet permet de réaliser une synthèse des enjeux et des impacts relatifs à l'aménagement projeté, pour :

- justifier l'intérêt de l'aménagement,
- définir les principales mesures de compensation.

### Liste des dossiers produits

Les dossiers produits sont les suivants (liste non exhaustive) :

- Annexes environnementales du contrat (*non systématique*).
- Engagements de l'état (attaché au contrat).
- Inventaires préliminaires : en général déclenché par le concédant.
- Les études d'impact (*non systématique*).
- Arrêts espèces protégées et loi sur l'eau : ministère, DREAL. Plusieurs DREAL peuvent être impliquées si l'infrastructure traverse plusieurs régions.
- Les dossiers « Espèces protégées » et « Loi sur l'eau » qui ont été montés par le concessionnaire ou le constructeur.
- Déclaration d'utilité publique (qui définit notamment les emprises).

## 2.3. Principaux livrables et objets

### Inventaires initiaux

En l'état actuel, les inventaires initiaux sont en général d'énormes mémoires issus des bureaux d'études A, B, C, etc. Ils ne permettent pas d'avoir :

- ni de visibilité globale des impacts,
- ni de visibilité des inventaires dans l'espace,
- ni de visibilité transversale (par exemple, pouvoir visualiser l'inventaire d'une espèce donnée sur le long du tracé).

#### Ce que l'on espère

Ce que l'on espère :

- La maquette numérique devrait pouvoir intégrer et reporter sur le tracé de l'infrastructure l'ensemble des informations relatives aux inventaires. Il serait ainsi possible de visualiser :
  - le tracé de l'infrastructure,
  - les espèces et habitats recensés,
  - les données paysagères,
  - les trames vertes et bleues répertoriées.

La représentation du relief (socle 3D MNT drapé, nuages de points LIDAR) améliorera cette représentation et la consultation des données.

- Une base de données spécifique permettrait d'extraire toutes les réalisations prévues pour une espèce donnée ou pour une fonctionnalité écologique donnée.
- La maquette numérique devrait permettre d'extraire les atlas faune et flore et les habitats de chaque famille d'espèce recensés.



Relevé topographique par méthode Lidar et socle 3D réaliste (ASF – A63)

### Ouvrages de transparence écologique prévus

#### Ce que l'on attend

Il s'agit de :

- Passages grandes faunes, qui passent au-dessus de l'infrastructure (éco-ponts).
- Passages petite ou grande faunes, qui passent au-dessous de l'infrastructure (écoducs).
- Ouvrages hydrauliques, qui enjambent les rivières, ruisseaux (continuité hydraulique), zones humides.

Ce que l'on attend :

- Chaque ouvrage de continuité écologique doit être visualisable sur la MN (avec son point kilométrique et son modèle 3D réaliste de la conception à la livraison).
- Une fiche d'information pourrait être attachée à chaque ouvrage et/ou objet :
  - fonction de l'ouvrage, espèces protégées cibles,
  - description physique de l'ouvrage,
  - référence à l'engagement figurant dans le dossier espèces protégées ou loi sur l'eau auquel l'ouvrage répond,
  - spécificités de l'ouvrage au regard des espèces cibles (ex. : description des banquettes d'un ouvrage de continuité hydraulique pour les mammifères semi-aquatiques, mares sur un éco-pont permettant d'attirer la grande faune sur le pont, méandres et profondeurs d'un cours d'eau dérivé, etc.),
  - justification de la localisation de l'ouvrage (ex. : référence à une trame verte préexistante).
- Le type d'ouvrage et les familles d'espèces cibles sont visualisables sur le tracé avec un ou des pictogrammes. Ils permettent de repérer aisément la fonction de l'ouvrage.
- Il serait pertinent de garder l'historique de la dérivation des cours d'eau, en particulier les tracés initiaux des cours d'eau, quand ceux-ci font l'objet de dérivation définitive.

**2.2 Mise en œuvre des mesures de réduction d'impact**  
Mise en œuvre des dérivations définitives

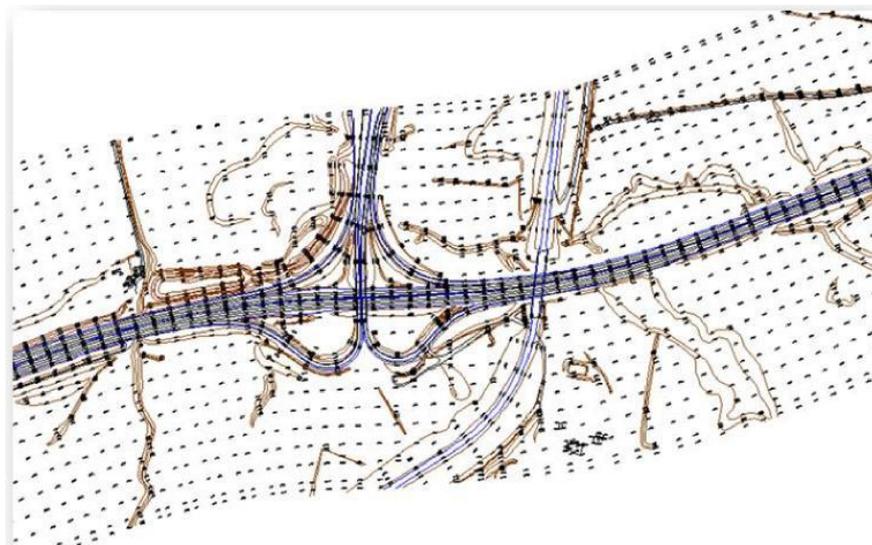
54 dérivation définitives de cours d'eau  
32 projets validés par les services de l'Etat  
26 remises en eau déjà réalisées

**Traitement des dérivation de cours d'eau**  
Principes de diversification des faciès d'écoulement

**Traitement des dérivation définitives de cours d'eau**  
Demandes spécifiques des services de l'Etat

Création d'une alternance de fosses et de radiers  
Création de méandres  
Amplitude des méandres complètement développés 6 fois la largeur

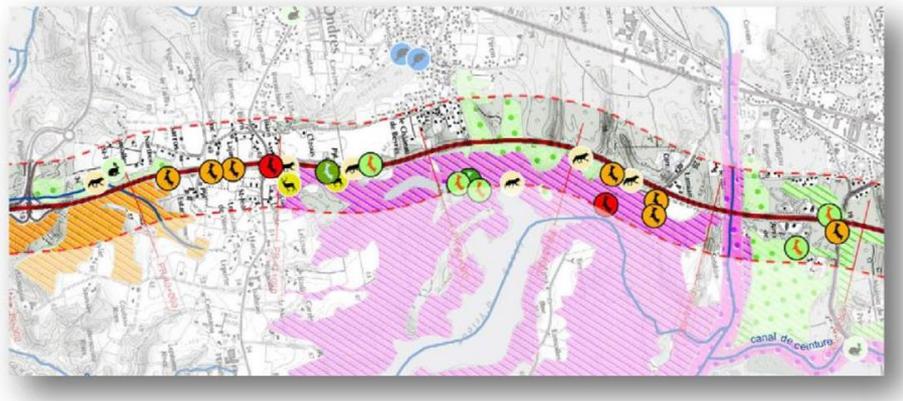
Exemple de conception et de réalisation de dérivation définitive de cours d'eau – Projet SEA (plans Autocad et schéma de principe en 2D)



Modèle numérique de terrain 3D (Autocad)



Flux WMS des DREAL sur orthophotos de l'IGN



Exemple de carte de synthèse des enjeux faune

## 2.4. Phase de construction

### Modifications en cours de construction

Entre l'obtention des arrêtés et l'achèvement de l'infrastructure, de nombreuses modifications surviennent, par exemple une modification, un déplacement ou une suppression de passages faune.

Ces modifications font l'objet de **portés à connaissance**.

#### Ce que l'on attend

Ce que l'on attend :

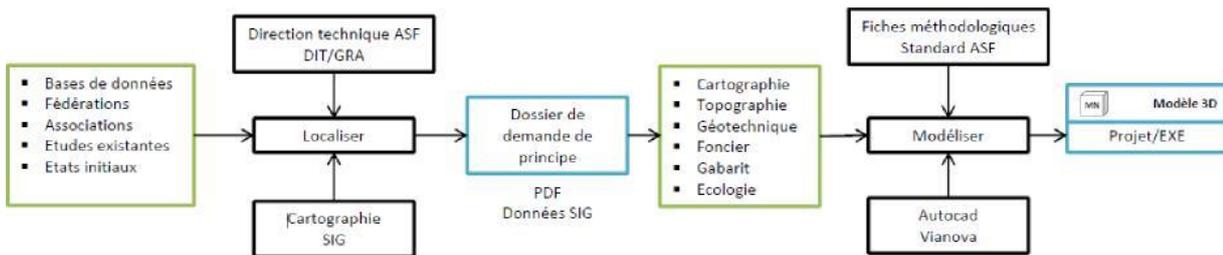
- Une fonction de modification automatique des atlas doit être prévue.
- La MN devrait être mise à jour soit globalement (cartographie de l'opération) soit au niveau de chaque ouvrage (équipements écologiques, fonctionnalités).
- Chaque objet devra être renseigné et suivi jusqu'à la livraison de l'ouvrage.

## 2.5. Processus de création, modèle de données et représentation 3D

### Critères pris en compte dans le processus de création

Le processus de création d'un éco-pont permet de déterminer la position géographique la plus adaptée de l'ouvrage en fonction de nombreux critères issus :

- d'études existantes,
- d'états initiaux,
- des connaissances du milieu transmises par les associations et fédérations du territoire concerné par le projet.



Processus de construction de l'éco-pont (formalisme inspiré par UML & SADT)

### Ce que l'on attend

Ce que l'on attend :

- Un cahier des charges spécifiques doit être rédigé pour structurer les données d'entrée et les modéliser dans la MN.

### Schéma de données actuel

Le schéma suivant représente le schéma de données tel qu'il est aujourd'hui utilisé lors de la création d'éco-ponts.

Nous précisons les points suivants :

- AVP/PRO : classe qui porte les informations nécessaires à l'avant-projet.
- EXE : classe qui porte les informations relatives à l'exécution.
- Dans l'UML suivant, GM\_ fait référence au type de géométrie dans la norme ISO 19107 pour la géométrie.

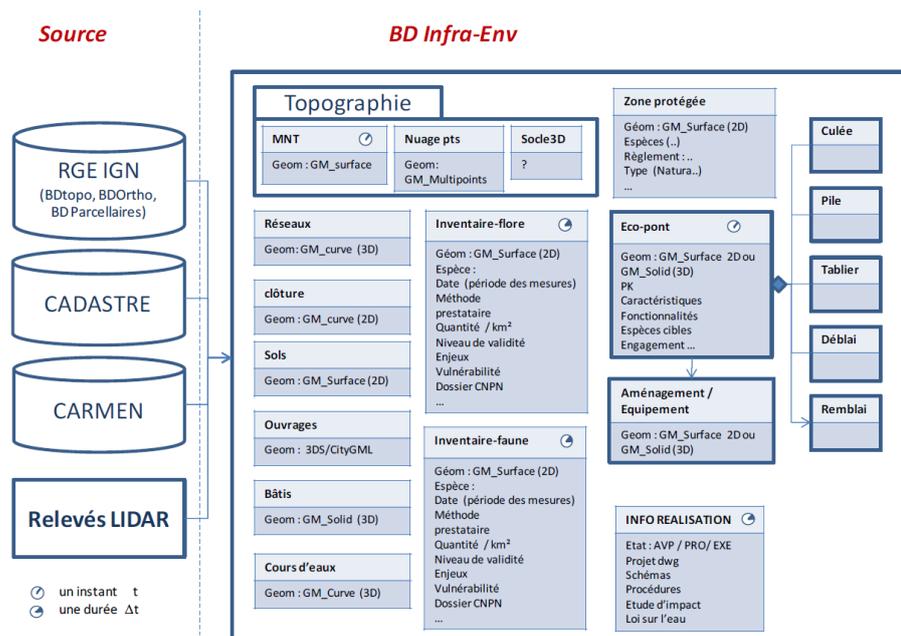


Schéma de données pour la conception de l'éco-pont

Données d'entrée et outils utilisés

Le tableau suivant liste les données d'entrée et les outils qui peuvent être utilisés tout au long du processus de modélisation d'un éco-pont (exemple ASF sur A64)

Données utilisées / Étales du projet	Type de données	Localiser			Modéliser	
		État des lieux	Synthèse	Esquisse/AVP	Projet	Exécution
<b>Fonds documentaire:</b> Orthophotos Modèle numérique de terrain Bâti Infrastructures existantes Hydrographie Occupation des sols	ECW, JPW IGN, fmt grille asc IGN polygon Shape 2d + H IGN polyligne Shape (x,y,z) IGN polyligne Shape (x,y,z) IGN	Outils : SIG (Arcgis, MapInfo) Base de données : PostgreSQL DAO : Autocad / COVADIS Traitement 3D : Autocad / COVADIS viewer : Terra explorer  OUT : dwg 2D/3D 3DM (Rhino) cartographie thématique base de données PDF  Données hétérogènes à intégrer Synthèse des connaissances		Outils : DAO : Autocad / COVADIS Traitement 3D : Autocad / COVADIS Socle 3D : RhinoTerrain viewer : Terra explorer  OUT : dwg 3D cartographie thématique PDF	Outils : CAO : Autocad / COVADIS Traitement 3D : VIANOVA / FME viewer : Terra explorer  OUT : dwg 3D / CityGml PDF	Outils : CAO : Autocad / COVADIS Traitement 3D : VIANOVA  OUT : dwg 2D/3D PDF  Adaptation terrain Contrôle à réaliser
Données réglementaires: DREAL / CARMEN Urbanisme	WMS polyligne shape 2d PDF / dwg					
Foncier : Cadastré	dwg / shape polyligne 2D + texte dwg / shape polyligne 2D					
États initiaux / Études existantes Habitats, espèces	PDF / shape polyligne 2D					
Connaissances locales: associations fédérations	PDF PDF					
Topographie: Photogrammétrie Relevé LIDAR MNT Relevé traditionnel	ECW / DWG xyz (LIDAR) DWG					
Géotechnique	Excel / PDF					

Étales-données-logiciels

## 3. ZOOM SUR LES INTERFACES ENTRE LES DONNÉES D'INFRASTRUCTURE ET LES AUTRES DONNÉES : EXEMPLE DE MODÉLISATION 3D DE L'ÉCO-PONT DE PEYREHARASSE DE L'A64

### Rédacteur

Rédigé par Vinci-Autoroute.

Cet exemple sera étendu lors de la tranche 2 de MINnD.

### 3.1. Entrants et processus

#### Précisions sur les entrants

Les entrants recueillis au démarrage d'une étude de réalisation d'un éco-pont peuvent être très hétérogènes. Il peut s'agir d'un échange verbal avec une association locale, d'une cartographie précise issue d'études existantes, en passant par un relevé topographique des lieux en trois dimensions.

Ce chapitre aborde uniquement l'aspect modélisation de l'ouvrage et les outils utilisés sur un cas précis d'ouvrage.

#### Entrants utilisés pour la modélisation

Les entrants utilisés pour la modélisation sont les suivants :

- Plan topographique au 1/500<sup>e</sup> du tronçon autoroutier concerné (environ 500m de long sur 200m de large).
- Fichiers Autocad d'avant-projet au format autocad 2D.
- Esquisse des équipements écologiques au format PDF.

#### Exemple de maquette

Une première maquette dite visuelle a été réalisée au format 3DS pour visualiser et communiquer sur le projet.



Intégration du projet sur un socle 3D

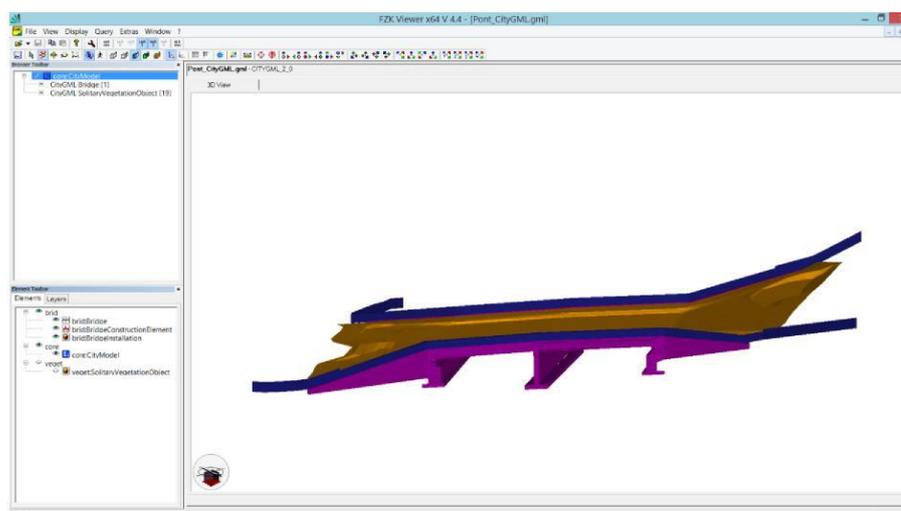


Modélisation et visualisation des aménagements écologiques

### Extraction d'objets 3D

Sur la base de la maquette dite visuelle, il a été procédé à des extractions d'objets 3D, notamment les structures de l'éco-pont :

- Réalisation d'un export au format 3DS.
- Traitement du modèle 3DS avec FME de Safe Software.
- Création de classes d'objets (Bridge/Core/veget).
- Création d'un modèle au format CityGml.
- Visualisation du modèle avec FZK Viewer (fig 11).



Visualisation du modèle avec FZK Viewer

## 3.2. Quels outils ?

### Liste des outils

Le tableau suivant liste les outils utilisés sur les différentes étapes.

Logiciels mobilisés pour localiser et modéliser un éco-pont		
Thème	Éditeur	Logiciel
Entrants : bases de données, fédérations, associations, études existantes, états initiaux	Microsoft Logiciel libre Autodesk ESRI Bentley Skyline	Excel PostGIS/PostgreSQL AutocadMap ArcGIS MapInfo Terra Explorer
Localiser le projet	Autodesk ESRI Bentley Skyline	AutocadMap ArcGIS MapInfo Terra Explorer
Modéliser	Autodesk Vianova system Rhinocéros	Civil 3D Vianova RhinoTerrain/RhinoCity
Exploiter (non réalisé en tranche 1)	?	?

## 3.3. Retour d'expérience sur ce travail

### Un travail qui a permis de préciser les exigences liées à la modélisation d'un ouvrage

Le travail réalisé jusqu'à présent sur le projet d'éco-pont de Peyreharasse a permis d'identifier les entrants et les étapes nécessaires pour modéliser ce type d'ouvrage.

L'objectif premier était de visualiser le projet et les équipements écologiques projetés. Les traitements 3D réalisés par la suite ont fait la démonstration qu'il est nécessaire de détailler les processus et les outils au travers des étapes définies au préalable, pour disposer d'éléments exploitables en sortie d'opération.

### Piste d'amélioration pour projets similaires

Le tableau ci-après liste les premières réflexions sur ce sujet et donne les premières pistes d'amélioration pour la réalisation de projets similaires.

Pistes d'amélioration pour la localisation et la modélisation d'un éco-pont		
Étapes	Observations	Pour aller plus loin
Entrants	Le format 3DS n'est pas le plus adapté pour extraire de la donnée 3D au format CityGml. Un problème de coordonnées géographiques a été rencontré, sans doute lié au format 3DS.	Pour une meilleure interopérabilité il serait préférable de disposer d'un format type OBJ ou DirectX.
Création du modèle	Bien définir au préalable les classes d'objets en fonction des besoins. Le logiciel FME est désormais bien adapté pour modéliser et structurer un modèle CityGml type infrastructure (bibliothèque enrichie).	Il est nécessaire de structurer les entrants en fonction des classes d'objet (cahier des charges). Un contrôle du modèle 3D doit être réalisé avant la création du modèle en CityGml (géométrie, faces).
Textures	Format DDS à éviter (infographie).	Demander les textures au format png. Moins performant, mais assure une meilleure interopérabilité.
Export	Format CityGml facile à exploiter.	Format 3DM (Rhino) à tester.

## 4. QUELLES MÉTRIQUES POSSIBLES POUR CALCULER LA FRAGMENTATION DUE À UNE INFRASTRUCTURE ET L'APPORT DE PASSAGE À FAUNE (TYPE ÉCO-PONT)

Rédacteur

Rédigé par TerrOiko (Catherine de Roince) et IFSTTAR (Denis François).

### 4.1. Introduction

#### L'exigence de l'étude des fonctions écologiques

##### Exigences européennes

La Commission européenne pose comme exigence que l'aménagement du territoire se fonde sur des méthodes quantitatives pour mesurer les impacts potentiels des infrastructures sur les processus écologiques.

Ces exigences sont issues des directives « Environmental Impact Assessment » (EIA) et « Strategic Environmental Assessment » (SEA). Voir :

- EIA: Directive 85/337/EEC.
- SEA: Directive 2001/42/EC.
- Journal officiel de la Commission européenne, JO, 1985 et 2001.

##### Exigences françaises

En France, le dispositif de trame verte et bleue (TVB, LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 - art. 121) constitue le texte réglementaire référent sur les enjeux de la fragmentation du paysage.

##### Objectifs de la trame verte et bleue (TVB)

Le dispositif TVB requiert notamment d'estimer les effets des infrastructures linéaires de transport (ILT) sur la viabilité des populations animales. Ce dispositif comprend 6 objectifs dont :

- Diminuer la fragmentation et la vulnérabilité des habitats naturels et habitats d'espèces et prendre en compte leur déplacement dans le contexte du changement climatique.
- Identifier, préserver et relier les espaces importants pour la préservation de la biodiversité par des corridors écologiques.
- Faciliter les échanges génétiques nécessaires à la survie des espèces de la faune et de la flore sauvages.

Dans le cadre des études d'impact des projets d'ILT, les impacts résiduels et cumulés sur le fonctionnement de la TVB doivent être quantifiés au cours de la séquence Éviter-Réduire-Compenser.

**La connectivité fonctionnelle pour l'évaluation de la fragmentation par une ILT**

La connectivité fonctionnelle d'un paysage pour une métapopulation comporte :

- Une dimension structurelle correspondant à la géographie du paysage (ex. : quelle distance y a-t-il entre deux taches<sup>17</sup>),
- Une dimension biologique correspondant :
  - au comportement des espèces (causes comportementales de la dispersion),
  - à leur interaction avec l'environnement (capacité physique de déplacement dans le milieu concerné).

L'étude de la fonctionnalité d'une connectivité se rapporte aux champs de l'écologie du paysage, de la génétique du paysage et des problématiques liées à la dispersion des espèces de façon générale (Lebreton et al. 1992; Hanski and Gilpin 1997; Clobert et al. 2001; Clobert et al. 2013).

**Les méthodes d'analyse de la connectivité fonctionnelle du paysage et de l'effet barrière des ILT s'appuient sur l'étude des espèces ou de groupes d'espèces et sur l'obtention de métriques de dispersion. Or des études récentes ont pointé le fait que les méthodes d'évaluation de la connectivité fonctionnelle sont très peu utilisées dans les études portant sur la fragmentation due à l'aménagement d'ILT.**

**Les métriques de la connectivité**

Depuis les années 80, une grande variété de métriques spatiales a été proposée par l'écologie du paysage pour décrire les effets de la fragmentation (Forman & Godron, 1986 ; O'Neil et al., 1988 ; Turner, 1989 ; Turner & Gardner, 1991 ; Giles & Trani, 1999).

Ces métriques proviennent de champs disciplinaires très différents (géographie, écologie, télécommunication, informatique, etc.). Il convient donc de :

- bien identifier le sens de chaque métrique,
- être en mesure d'identifier celles pouvant être appropriées aux questions soulevées par l'évaluation de la connectivité fonctionnelle.

**Quelques exemples de métriques développées pour l'étude de la connectivité**

Métrique	Composante de la connectivité	Échelle	Type d'étude	Obtention
Distance euclidienne	Structurelle	Locale / Régionale	Empirique et modélisation	Outils SIG
Agrégation	Structurelle	Locale / Régionale	Empirique	Outils SIG
Densité-activité	Fonctionnelle	Locale	Empirique	Piégeage, observation de terrain
Flux d'individus	Fonctionnelle	Locale / Régionale	Empirique et modélisation	MARK, SURGE, etc. / Modélisation SMS, FunCon, RangeShifter, MetaConnect, etc.)
Fst	Fonctionnelle	Régionale	Empirique	Piégeage et outils génétiques

<sup>17</sup> Selon la littérature on parle de Patch ou de tache. Dans la suite nous parlerons de tache.

## 4.2. Pratiques d'évaluation de la fragmentation dans les études de projets d'infrastructures

### Évaluation de la fragmentation par les méthodes empiriques

#### Configuration paysagère et métriques de connectivité structurelle:

Les méthodes permettant de mesurer la connectivité font l'objet de nombreux ouvrages (Clobert et al., 2001 ; Clobert et al., 1999 ; Hanski, 1999).

Divers outils (FRAGSTAT, ArcGIS, QGIS, GrassGIS, etc.) sont disponibles pour calculer de nombreuses métriques liées à la configuration paysagère (connectivité structurelle).

Leurs données d'entrée sont des cartes d'occupation des sols obtenues à partir de la compilation de diverses sources de données (voir figure ci-dessous).

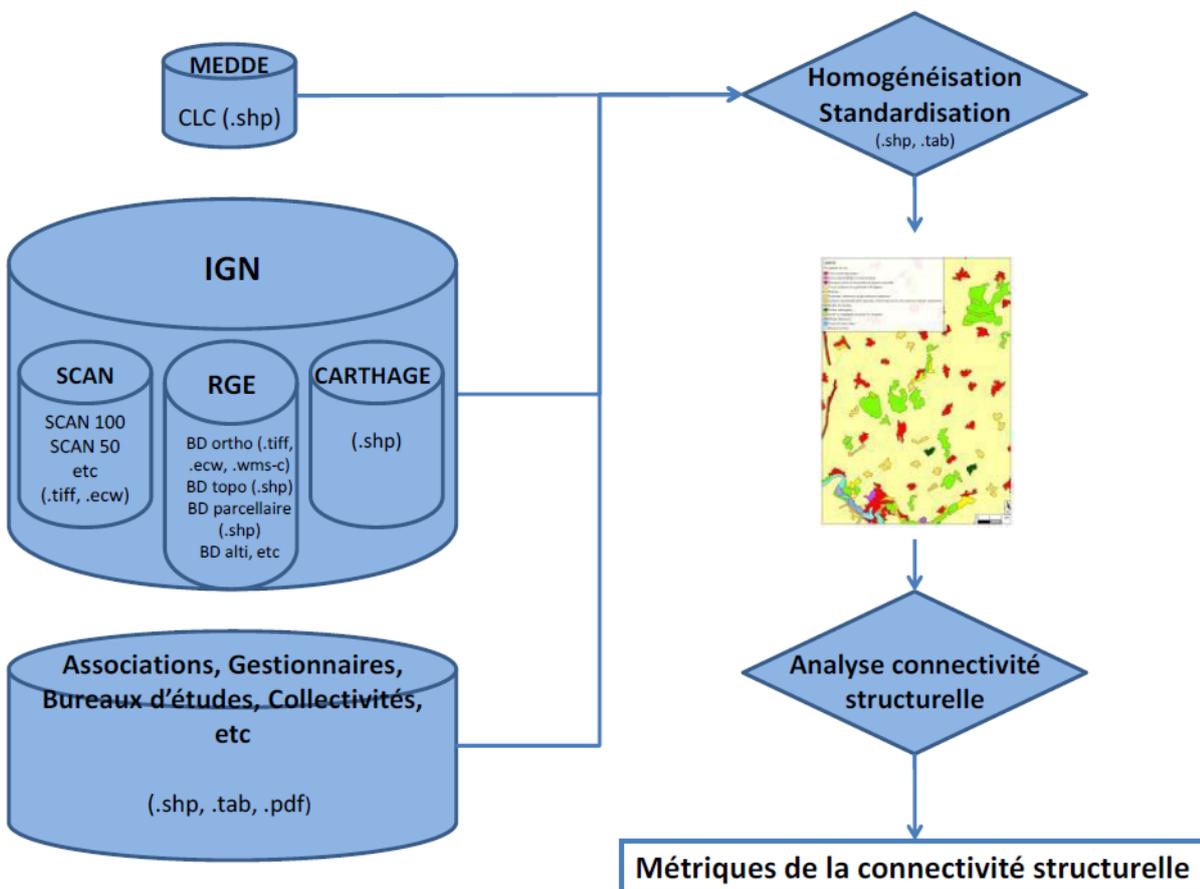


Schéma de production des métriques de la connectivité structurelle

#### Ce que l'on espère

Ce que l'on espère :

- Conserver dans le temps les cartes d'occupation du sol qui sont utilisées pour calculer les métriques de connectivités fonctionnelles.

Évaluation de la connectivité à partir d'observations faunistiques et avis d'expert

▼ Méthodes de diagnostic

Diverses méthodes sont utilisables pour réaliser des diagnostics de présence/absence des espèces dans un territoire donné :

- observation (visuelle, écoutes, enregistrements sonores ou ultrasonores),
- capture (ex. : certains insectes),
- relevés de collisions.

▼ Cartes de répartition

La géolocalisation de ces informations permet de réaliser des cartes de répartition des espèces identifiées dans le territoire d'étude, avec des indications de densité spatiale des populations.

L'interprétation de la répartition des populations se fait par rapport aux cartes d'occupation des sols. **De même, dans le cadre d'un projet, la comparaison des cartes de répartition des densités de population, avant et après réalisation, est un élément d'évaluation de l'impact du projet.** Les cartes de répartition sont aussi utilisées comme support par des experts taxonomiques sollicités pour estimer la connectivité du paysage étudié.

▼ Photos-pièges

Les informations produites par les photos-pièges, qui sont utilisées pour évaluer la fréquentation des ouvrages de franchissement (buses, éco-ponts), peuvent aussi être exploitées par les experts taxonomiques pour apprécier la répartition des populations à travers l'analyse des déplacements des individus.



Exemples de photographies nocturnes prises par un photo-piège

La métrique générée par ces deux types d'observations est de même nature : il s'agit du nombre d'individus par unité spatiale ou temporelle. Elle ne permet pas d'évaluer directement la connectivité, mais sert de support à son estimation.

▼ Données produites

Cette approche de l'évaluation de la connectivité aboutit à :

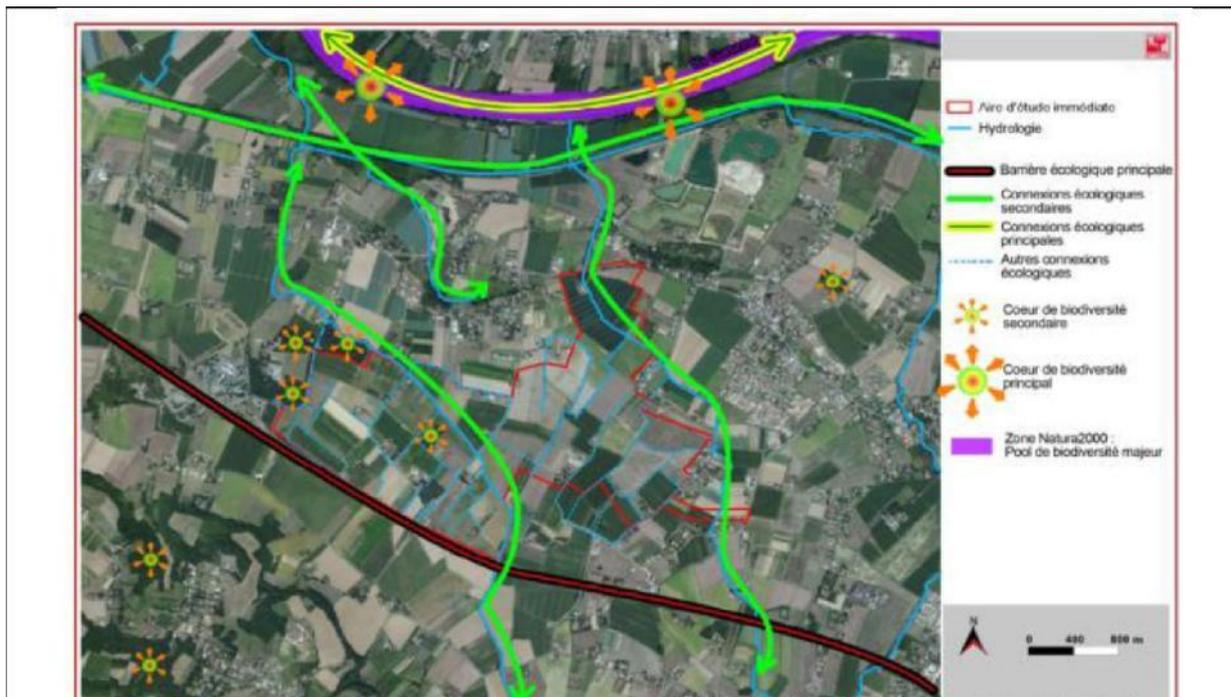
Données	Formats
Cartes de répartition des espèces	Shp ou tab
Cartes interprétées	Généralement jpg ou pdf
Comptes rendus d'inventaires	Pdf

▼ Avis d'experts

Les experts formulent leurs avis sur les effets potentiels sur la connectivité, à partir :

- d'inventaires d'espèces,
- de leurs connaissances préalables sur l'écologie des espèces concernées,
- de la configuration paysagère de la zone d'étude.

**L'avis d'expert ne fournit que des métriques qualitatives des effets sur la connectivité.**



Exemple de carte produite sur avis d'expert motivé par les résultats d'inventaires et de l'occupation du sol (d'après Marchis, 2013)

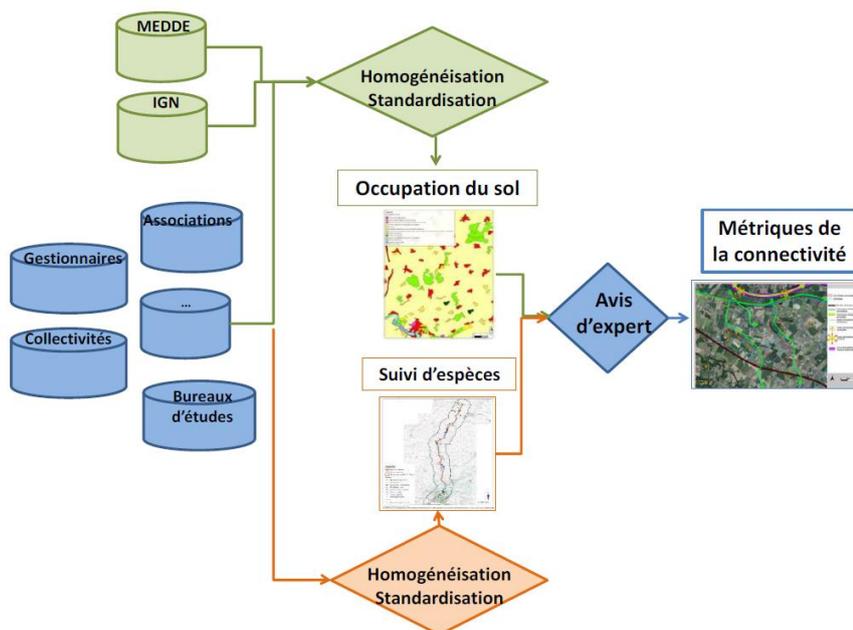


Schéma de production des métriques de connectivité à partir de données de suivi de terrain actuellement utilisées

Ce que l'on attend

Ce que l'on attend :

- Archiver les données avec leur méthode d'observation et préciser leur but (pour le suivi d'un passage à faune, etc.).

Note sur cette approche

Plusieurs études récentes ont pu montrer que cette approche seule produit des résultats limités (Gaillard, 2013 ; Palmer et al., 2014 ; Coulon et al., 2015)

### Estimation de la connectivité par modélisation

Un réalisme limité

Informations préalables à l'utilisation des modèles de métapopulations

Modèles de déplacement simplifiés

Métriques de connectivité produites

Jusqu'à présent, l'évaluation des effets des infrastructures sur la connectivité au moyen de la modélisation a été essentiellement pratiquée pour les projets d'assez grande envergure. Cet usage tend à se généraliser actuellement, mais les modèles utilisés jusqu'à présent sont généralement d'un réalisme limité.

Les modèles de métapopulations utilisent comme entrées les métriques de la connectivité structurelle. Ils les pondèrent par des estimateurs de paramètres biologiques tels que la taille de population par tache d'habitat ou sa probabilité d'extinction (exemples de métrique de connectivité : indice de Hanski, SPOMSIM, etc.).

Leur utilisation suppose donc l'existence d'informations relatives aux tailles de populations suivies et/ou à leurs probabilités d'extinction.

Les modèles de déplacements simplifiés intègrent les capacités de déplacement des différentes espèces sous des modalités simples de mouvement (diffusion, percolation, etc.). Ils requièrent :

- Des informations sur leur biologie (ex. : distances de dispersion).
- Des cartes d'occupation du sol des zones d'étude traduites en facilité de cheminement pour les espèces (ex. : coefficients de friction/perméabilité/rugosité).

Leur traitement produit différentes métriques de connectivité :

Métriques	Logiciels de traitement
Probabilité de présence	Modèles de percolation exploités par le logiciel Zonation et la plupart des outils SIG
Coûts de déplacement origine-destination	Modèles de chemin de moindre coût calculable par la plupart des outils SIG
Métriques de connectivité spatialisées ou non	Conefor, Sensinode, Graphab

Les métriques générées par ces modèles sont **semi-quantitatives, relatives à la probabilité de présence ou de passage des espèces.**

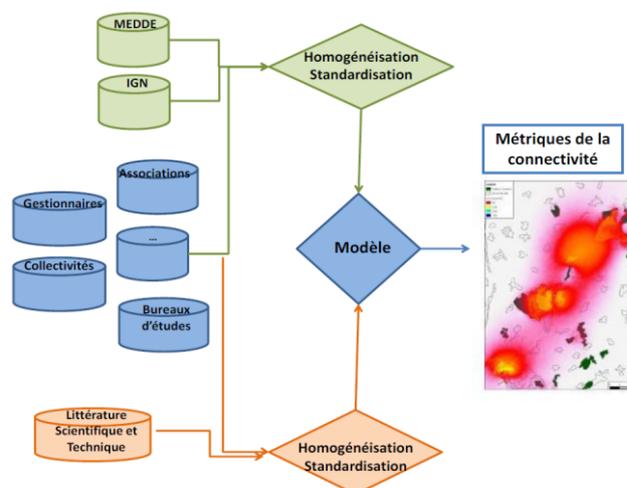


Schéma de production des métriques de connectivité à partir d'outils de modélisation

**Limites des méthodes actuelles**

Deux limites principales existent dans les méthodes actuelles d'évaluation :

- Il s'agit d'une part du manque de prise en compte de la connectivité fonctionnelle du paysage, la majorité des évaluations consistant en une analyse structurelle des paysages. Les métriques structurelles sont descriptives des états du paysage, mais ne reflètent pas les processus écologiques en jeu au sein de la mosaïque paysagère.
- Il s'agit d'autre part de la dimension uniquement qualitative ou semi-quantitative des évaluations produites par ces méthodes (avis d'expert et modèles, respectivement).

Besoin en méthodes quantitatives, encouragées par l'Union européenne

Aujourd'hui, des méthodes quantitatives permettant de traiter de la fonctionnalité des connectivités écologiques sont nécessaires, afin que les résultats puissent être confrontés à des mesures et des inventaires de terrain.

Ce besoin est relayé par l'Union européenne qui incite les États membres à développer davantage de méthodes quantitatives et prédictives pour l'analyse des impacts potentiels des aménagements.

Ce que cela implique pour l'intégration dans la maquette numérique

Les implications pour l'intégration de la maquette numérique sont les suivantes :

- Les métriques qualitatives doivent être indiquées par des pictogrammes sur la MN plutôt que par des gradients de couleur.
- Bien faire la distinction entre métriques de connectivité structurelle et de connectivité fonctionnelle.

### 4.3. Éléments prospectifs transférables au plan opérationnel à brève échéance

**Amélioration de l'utilisation des méthodes de terrain**

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),
- de l'utilisation de la génétique.

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.



Prise d'un échantillon pour l'analyse génétique de l'individu par swap



Exemple de Capture-Marquage-Recapture :

À gauche, un *Orthetrum* bleuisse marqué au feutre.

À droite, un triton palmé marqué avec un implant visuel en élastomère et illustration d'un prélèvement non invasif de génétique sur un crapaud accoucheur.

#### Les outils de CMR

Les outils de CMR permettent d'estimer :

- des tailles de populations,
- 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 :

- identité de chaque individu (ex : son code),
- 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

Les outils de la génétique 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.

Les données d'entrées sont des listes de marqueurs génétiques utilisés (ex. microsatellites) chez les populations/individus prélevés. Il convient dès lors de stocker aussi les informations relatives aux protocoles de laboratoire permettant cette identification.

Les données de sorties sont des taux de migration entre taches d'habitats (individus/an).

#### Modélisation de la connectivité fonctionnelle des réseaux écologiques

Les modèles comportementalistes sont les plus réalistes

La modélisation des réseaux écologiques offre un cadre méthodologique pertinent et simple à mettre en œuvre pour des analyses quantitatives de la connectivité. De plus des modèles existants et déployés sur le terrain, il existe des modèles opérationnels d'un niveau de réalisme supérieur aux modèles précédemment décrits.

Les modèles comportementalistes sont actuellement les plus réalistes pour l'estimation des métriques de la connectivité fonctionnelle. Ils intègrent de façon explicite une grande partie du cycle de vie des espèces et de leurs déplacements.

Ces modèles utilisent en entrée les cartes d'occupation des sols comprenant l'information relative aux coefficients de friction, les informations sur la biologie des espèces étudiées.

En sortie, ils produisent :

- des cartes d'occupation du paysage par les espèces (densité d'individu/unité de surface) (logiciels FunCon, RangeShifter, MetaConnect),
- des estimations de flux d'individus (nombre d'individus par unité de temps) entre secteurs du paysage (FunCon, MetaConnect) ou entre taches d'habitats (MetaConnect),
- des estimations de flux de gènes (MetaConnect).

Plateformes de modélisation : simulations possibles et plateformes opérationnelles

Les plateformes de modélisation permettent le couplage de différents modèles, susceptibles notamment de simuler à la fois :

- les dynamiques paysagères,
- leurs répercussions sur les dynamiques de population et leurs implications en termes de connectivité.

Ces plateformes sont actuellement en cours de développement, mais **seules deux sont actuellement opérationnelles : RangeShifter et MetaConnect.**

Des métriques quantitatives

Les métriques générées par ces modèles sont quantitatives, en termes de flux de dispersants et de densités d'individus.

**Études en cours**

Des études utilisant ces modèles sont en cours :

- en France (étude d'impact, requalification d'ILTe existantes pour les ILTe),
- en Allemagne et au Royaume-Uni (pas sur ILTe).

**Stockage requis**

Ces modèles requièrent le stockage de données quant aux caractéristiques biologiques des espèces étudiées (survie, fécondité, etc.).

**Ce que l'on attend**

Ce que l'on attend :

- Un archivage des données ponctuelles de terrain avec leur visualisation sur la MN.
- Une visualisation sur la MN de la valeur de la métrique de connectivité fonctionnelle sur les points de passage de la faune et de la flore représentée par un gradient de couleur.
- Une visualisation des cartes d'entrée utilisées pour la modélisation (coefficients de perméabilité, etc.).

## 4.4. Quel apport possible de la 3D ?

### Rédacteur

Rédigé par Denis François (IFSTTAR).

### Principes de base

Il faut tout d'abord déterminer la longueur maximale admissible pour s'assurer de l'efficacité d'un passage à faunes inférieur. Deux points doivent être pris en compte :

- Problème de l'effet tunnel.
- Question du rapport diamètre/longueur.

Ces points peuvent être rédhibitoires pour des raisons fonctionnelles, techniques et financières.

On pourrait envisager de positionner les passages à faune en  $\Delta x$  (largeur de la vallée) et  $\Delta z$ , de façon à permettre une longueur minimale des passages. Cela permettrait une économie en génie civil, et au besoin d'accroître le rapport diamètre/longueur des passages.

Un passage long en fond de vallée est un argument fréquent de la combinaison passage à faune + transparence hydraulique. Cette solution pourrait être remplacée par des passages plus courts qui ne seraient pas forcément situés en pied de remblai.

### Cas des remblais

Un calage en  $\Delta z$  et  $\Delta x$  sur les remblais d'infrastructure impliquerait de travailler sur l'attractivité des ouvrages, sur le flanc des remblais, pour faire « monter » les animaux :

- Créer une trame verte sur les remblais.
- Adapter les modelés pour faciliter le cheminement des espèces.

### Cas des déblais

Pour les passages à faunes dans les zones en déblai (donc passages supérieurs), le calage en  $\Delta z$  et  $\Delta x$  sont à définir.

Pour cela, doivent être pris en compte :

- La contrainte technique de la portée des ouvrages d'art.
- La contrainte financière de la taille des ouvrages.

On peut dès lors penser que, implicitement, le calage en  $\Delta z$  est intégré dans la conception des dispositifs de franchissement dans les passages d'infrastructures en déblai.

D'une façon générale, tant par rapport à cette proposition que par rapport aux pratiques actuelles, la question de l'adaptation de la faune au relief créé se pose. C'est aussi le cas de celle de la flore, notamment arborée plantée. Comment intégrer ces questions dans la conception SIG ?

## 5. LES COMPENSATIONS ET MESURES DE RÉDUCTION : COMMENT LES CALCULER ? COMMENT ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES MESURES DANS LE TEMPS ?

### Rédacteurs

Rédigé par :

- Sylvain Guilloteau (Vinci-Autoroute) 5.1.
- Catherine de Roinçé (Terroïko), Denis François (Ifsttar) 5.2.

### 5.1. Méthode courante de calcul des compensations

#### La doctrine ERC

Lors de la mise en place d'une infrastructure, la doctrine ERC est appliquée. Lorsque les mesures d'**évitement (E)** et de **réduction (R)** ne permettent pas de maintenir la biodiversité/l'écosystème dans un état équivalent à l'initial, les impacts résiduels doivent être **compensés (C)**.

Cette pratique est récente et porte sur des processus assez longs, son efficacité est encore assez mal évaluée (Regnery et al. 2013).

#### Méthode surfacique

La méthode la plus couramment employée pour évaluer les compensations nécessaires se base sur un calcul surfacique. Il s'agit :

1. ... d'estimer l'impact résiduel du projet en termes de surfaces d'habitats à compenser, et...
2. ... d'y appliquer un taux de compensation surfacique (généralement, surface atteinte multipliée par 2 ou par 3 selon les caractéristiques de l'habitat)...
3. ... pour obtenir les unités de compensation surfacique à mettre en œuvre.

#### Méthode pour définir les mesures compensatoires dans le cas d'une autoroute

Cette section décrit la méthode pour définir les mesures compensatoires dans le cas d'une autoroute (illustration par le cas récent de l'A63).

1. Dans un premier temps, les **arrêtés définissent les secteurs où les surfaces de compensation doivent se situer**. Cela permet de sécuriser, restaurer et gérer des espaces naturels pour la conservation d'habitats de repos et de sites de reproduction d'espèces réglementées. Dans le cas de l'A63, il a été choisi par le maître d'ouvrage d'acquérir 50% des surfaces nécessaires (110 ha) et de conventionner les autres 50% (établissement de convention de gestion avec les propriétaires fonciers), ceci afin de réduire la surface totale à prospecter pour identifier les zones de compensation. Une méthodologie d'analyse des données permet de faciliter le choix des zones de compensation.
2. Orientée en faveur du Vison d'Europe et de la Loutre, la méthode dans le cas de l'A63, a consisté en premier lieu à **identifier les sous-bassins hydrographiques les plus importants et pertinents pour ces espèces** en analysant des critères tels que : capacité d'accueil (zones potentielles d'activité ; habitats préférentiels ; rythmes potentiels d'activité) ; risques de collision routière ; ancienneté des occupations, etc.
3. À partir de ces zones, des **périmètres d'action foncière ont été définis** : orientation des actions de maîtrise foncière et gestion nécessaire pour la renaturation/restauration. Des diagnostics d'éligibilité des parcelles de ces zones ont été réalisés ainsi que la négociation foncière (acquisition vs conventionnement).
4. Puis, en collaboration avec les acteurs territoriaux (collectivités, services de l'État, etc.), une **stratégie d'intervention concertée** a été définie.
5. Enfin, des **plans de gestion sur des secteurs sécurisés** au bénéfice des deux

### Prise en compte des arrêtés

espèces cibles ont été élaborés en tenant compte de l'ensemble du patrimoine naturel. Ces plans comportent une phase initiale de caractérisation des secteurs et de définition des opérations de gestion sur 5 ans, et une phase de gestion proprement dite de suivi et d'animation sur 25 ans comportant des bilans de gestion tous les 5 ans.

Les arrêtés définissent les secteurs où les surfaces de compensation doivent se situer. Cela permet de sécuriser, restaurer et gérer des espaces naturels pour la conservation d'habitats de repos et de sites de reproduction d'espèces réglementées.

Dans l'exemple de l'aménagement de l'A63, vu les enjeux et les surfaces de compensation, il a été décidé :

- d'acquérir 50 % des surfaces retenues,
- de conventionner les 50 % restants.



Exemple de localisation des surfaces de compensation autour de la A63

### Quel intérêt pour un maître d'ouvrage ?

L'intérêt pour le maître d'ouvrage est :

- Sur le plan de l'écologie fonctionnelle, cela permet de garantir une approche robuste et indiscutable entre les parties prenantes.
- Sur le plan foncier, cela permet d'assurer la fiabilité de la démarche et l'atteinte des objectifs fixés par les arrêtés, en réduisant les surfaces à prospecter de 12000 ha à 450 ha concentrant l'animation foncière sur le cœur de cible et d'acquérir plus de 110 ha à l'amiable et de conventionner 110 ha en parallèle.

Une méthodologie d'analyse de données permet de faciliter le choix des zones. Sans méthodologie, il faut envisager 10 000 parcelles, représentant 1900 propriétaires. La méthodologie utilisée permet de réduire l'espace de recherche à 365 parcelles, représentant 72 propriétaires.

## La méthodologie appliquée sur l'A63 par ASF

La méthodologie appliquée sur l'A63 par ASF est présentée dans le tableau ci-dessous.

### Méthodologie appliquée sur l'A63

#### Mettre en évidence les sous-bassins hydrographiques pertinents.

Les critères et indicateurs retenus pour la caractérisation des sous-bassins sont les suivants :

- Capacité d'accueil du bassin hydrographique et des cours d'eau :
  - Zone potentielle d'activité : surface du lit majeur hors zones artificialisées.
  - Habitats préférentiels : surfaces d'habitats (nature, structure, dynamique, gestion et lien avec le cours d'eau) préférentiels et ratio par rapport à la zone potentielle d'activité.
  - Rythme potentiel d'activité : longueur des types de tronçons de cours d'eau (4 classes).
  - Zone potentielle d'activité principale : présence/absence d'une zone à forte concentration d'habitats préférentiels sur tronçons de cours d'eau favorables.
- Risque de collision routière.
- Ancienneté des données de présence du vison d'Europe.
- Présence du vison d'Amérique.
- Contexte territorial.

#### Analyser ces critères et indicateurs, pour chaque bassin et sous bassin hydrographique

#### Définir des périmètres d'action foncière

- Renaturation / Restauration d'habitats préférentiels.
- Notice pour l'orientation des actions de maîtrise foncière et de gestion dans chacun des périmètres d'action.

#### Réaliser des diagnostics d'éligibilité des parcelles et négociation foncière

Sélection des parcelles à sécuriser, à restaurer, et nécessitant une gestion particulière (acquisition et conventionnement).

#### Mettre en place une stratégie d'intervention concertée à l'échelle du ou des sous-bassins hydrographiques

Mise en cohérence territoriale de la démarche avec les acteurs locaux (CG64 & CG40 infrastructures et environnement, collectivités, services de l'état, etc.).

#### Bâtir des plans de gestion sur les secteurs à sécuriser au bénéfice du Vison d'Europe et de la Loutre, en tenant compte de l'ensemble du patrimoine naturel présent

Organisation du plan de gestion :

- **Phase initiale** (caractérisation physique et écologique, facteurs d'altération, enjeux et objectifs de conservation, définition et planification des opérations de gestion et des protocoles de suivi pour les 5 premières années).
- **Plan de gestion sur 25 ans** (suivis scientifiques et techniques des opérations de restauration et de gestion courante, animation locale, bilan annuel, bilan de gestion tous les 5 ans).

## 5.2. Méthode prospective pour le calcul des compensations

### Notions liées à la compensation fonctionnelle

Comme vu précédemment, historiquement, le principe de compensation structurelle a été employé. La méthode surfacique a été la méthode de calcul la plus employée pour définir les mesures de compensation.

Cette méthodologie se heurte à l'absence de traçabilité des fonctions que les surfaces impactées exerçaient pour :

- la qualité des milieux,
- le maintien des espèces protégées,
- la biodiversité ordinaire,
- les réseaux écologiques.

Cela empêchait de vérifier que le principe d'équivalence fonctionnelle avait été respecté (de Marsilly et al., 2013).

La prise en compte de la biodiversité ordinaire et des réseaux écologiques demande donc de travailler en **équivalence fonctionnelle**, c'est-à-dire de savoir si chaque fonction perdue sur les surfaces impactées se trouve compensée par les surfaces recrées ou restaurées (de Marsilly et al, 2013 ; Burylo & Julliard, 2012).

### Ce que l'on attend de la MN pour suivre la compensation fonctionnelle :

- **Visualisation des zones concernées par les mesures de réduction ou de compensation avec la fonction qu'elles occupent (d'un point de vue écosystémique ou pour une espèce donnée) et le reporting de leur évaluation.**

### Définition d'une mesure de compensation fonctionnelle efficace

Dans cette section, nous conviendrons qu'une mesure de réduction ou de compensation visant à rétablir la transparence d'une infrastructure **est efficace lorsqu'elle rétablit (ou améliore) le niveau de fonctionnalité initial du réseau écologique**, en favorisant les flux de dispersion « efficace » d'individus.

Nous détaillerons les besoins en inventaire et leur stockage au sein de la MN au cours du suivi de l'efficacité de ces mesures.

### Cadre méthodologique du calcul et de l'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction et de compensation des impacts sur la fonctionnalité des réseaux écologiques

La méthodologie de calcul et d'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction et de compensation des impacts sur la fonctionnalité des réseaux écologiques suit 3 étapes :

Étape	Processus
1.	Choix des espèces, méthodes d'acquisition des données et de la périodicité des suivis.
2.	État initial et calcul des mesures de réduction et compensation.
3.	Évaluation de l'efficacité des mesures et suivis au cours des travaux et de la mise en place des mesures.

#### Étape 1 : Choix des espèces, méthodes d'acquisition des données et de la périodicité des suivis

L'analyse qualitative des sources bibliographiques, associée si possible à des modélisations SIG de préfiguration des impacts, permet de définir :

- Les enjeux de transparence qui seront susceptibles d'émerger du projet.
- La liste des espèces « parapluies » potentielles de l'étude.
- Les zones d'échantillonnage prioritaires.

#### Données préexistantes, objectifs et données de terrain

Les données préexistantes disponibles sur le territoire sont :

- Données cartographiques : Corine Land Cover, BD topographie, cartographies des habitats, etc.
- Données d'inventaires : Natura 2000, ZNIEFF, etc.
- Études Trame verte et bleue.

Cette étape permet :

- de cibler la ou les méthode(s) d'acquisition des données nécessaire(s) à l'étude de transparence,
- de cibler les métriques supports de l'étude,
- de fixer le protocole de l'étude de l'état initial (périodicités des suivis, zone d'échantillonnage).

Deux catégories de données de terrain sont nécessaires au calcul puis le suivi de ces mesures :

- Les observations permettent de calculer les métriques de connectivité fonctionnelle (cf. chapitre 6.4). Elles informent sur la fonctionnalité des réseaux écologiques pour chacune des espèces ciblées.
- Les données de contrôle des observations informent sur les conditions d'acquisition des données d'observation et permettent de rendre comparable les années de suivis. En effet, elles regroupent trois catégories :
  - les informations démographiques de l'espèce cible (effectifs, etc.),
  - les informations liées à son observabilité (météo, observateurs, etc.),
  - les informations sur l'évolution de la matrice paysagère, des éléments fragmentant et des éléments support de la dispersion des espèces (observatoire du paysage).

#### ▼ Définition, nature et conservation des méthodes d'acquisition, des métriques et des indicateurs

Il est par la suite indispensable de conserver les méthodes d'acquisition de données ainsi que les métriques et indicateurs choisis pour pouvoir assurer la comparabilité de l'état initial avec les données issues des suivis post-aménagements.

Ces métriques peuvent être différentes selon les espèces « parapluies », car toutes les méthodes d'acquisition de données ne peuvent être appliquées à toutes les espèces.

Le choix de la méthode d'acquisition de données (ou du couplage) dépendra donc de :

- son temps de génération,
- sa capacité de dispersion,
- sa facilité à être observée/capturée : espèce cryptique, taille, etc.,
- l'échelle spatiale de l'étude,
- le niveau de précision exigé (souvent liée aux enjeux : espèce protégée, etc.).

Seuls la périodicité du suivi, l'effort de prospection et l'exhaustivité des zones échantillonnées peuvent varier selon les étapes du projet. Ces changements de protocole sont à définir au cas par cas. En effet, ils sont particulièrement dépendants de ce qui a été révélé au cours de l'état initial, de la localisation et de la nature des mesures de transparence mises en place, ainsi que des besoins de réajustements qui émergent au cours du projet.

#### Ce que l'on attend :

- **La MN doit conserver la justification du choix de chaque espèce retenue pour le suivi ainsi que les méthodes d'acquisition de données associées.**

Étape 2 : État initial et calcul des mesures de réduction et compensation

▼ État initial

Quel que soit le type de mesures, si l'on souhaite les calculer et/ou évaluer leur efficacité, il est impératif de réaliser préalablement aux travaux une **analyse précise de l'état initial du point de vue du fonctionnement du réseau écologique**. Il faut caractériser :

- les corridors,
- les zones relais,
- les éventuelles zones de conflits qui pourraient être traitées.

Cet **état de référence** sert à calculer les mesures de réduction et de compensation et de point de comparaison pour évaluer la réduction puis la restauration de la fonctionnalité de la connectivité une fois les travaux réalisés.

▼ Mesures de réduction et compensation

Dans une approche fonctionnelle de la compensation, les mesures peuvent prendre n'importe quelle forme, du moment que la (les) fonction(s) impacté(es) a (ont) été restaurée(s) ou améliorée(s).

Lorsque les observations de terrain apportent une mesure directe de la fonctionnalité actuelle de l'habitat ou structure impactée (flux de dispersants et/ou brassage génétique entre les deux réservoirs connectés via l'habitat relais), l'étude de compensation fonctionnelle cherche à trouver des mesures qui permettent d'obtenir le même niveau de fonctionnalité ou de l'améliorer :

- même flux de dispersants entre les réservoirs,
- même brassage génétique entre les réservoirs.

L'équivalence est donc fonctionnelle lorsque la valeur de la métrique de dispersion avec les mesures de réduction et/ou de compensation est égale à celle de l'état initial ou celle de l'état initial + un gain écologique. **Le seuil minimal d'équivalence à respecter est donc égal à la valeur de la métrique à l'état initial.**

▼ Modélisations et simulations

La modélisation qui permet de simuler de manière prédictive l'effet de mesures de réduction et de compensation est un outil d'aide à la conception de ces mesures très précieux. Il permet de tester de nombreux scénarii de mesures en indiquant le niveau de confiance à donner aux résultats de simulation.

En effet, le niveau de confiance en la qualité prédictive des simulations est donné à partir de l'état initial. Plus les résultats de modélisation de l'état initial sont proches des observations de terrain, plus l'on peut supposer que le modèle sera fiable dans ses calculs prédictifs. Pour calculer ce niveau de confiance, la modélisation doit donc impérativement traiter les mêmes métriques que celles observées sur le terrain (nombre d'individus, flux d'individus, métrique de brassage génétique).

Ce que l'on attend :

- **L'archivage doit associer les données d'observations géolocalisées avec les données de contrôle d'observation associées. Il faut conserver les informations de contrôles liées :**
  - aux données abiotiques (matrice paysagère et données météorologiques),
  - aux données d'échantillonnage (pression et conditions).
- **Dans le cas où le protocole d'acquisition est basé sur le suivi d'individus, il faut à tout moment pouvoir avoir accès aux informations individuelles de chaque spécimen étudié. Il devra pouvoir être identifié par une marque propre (1 individu, 1 code d'identification) (Lebreton et al. 1992).**
- **Il est aussi important de conserver les raisons pour lesquelles certaines zones de compensation n'ont pas été retenues (problématique administrative, enjeu écologique, etc.).**

Étape 3 : Évaluation de l'efficacité des mesures et suivis au cours des travaux et de la mise en place des mesures

▼ Les suivis au cours des travaux

Le suivi des perturbations des habitats pendant les travaux permet de vérifier que les hypothèses d'état des habitats post-travaux sur lesquelles les mesures de compensation ont été calculées sont bien réalisées. Ce suivi des perturbations permet de réajuster les mesures dans le cas contraire.

Dans certains cas, le suivi des perturbations des déplacements des espèces liées aux travaux peut s'avérer être judicieux. Néanmoins, ce suivi peut ne pas être nécessaire.

▼ Les suivis post-travaux

Les suivis post-travaux doivent être réalisés :

1. le plus tôt possible après les travaux, afin d'estimer la modification de la connectivité fonctionnelle liée à la réalisation des travaux,
6. puis au cours des dynamiques de recolonisation et/ou de déplacement des espèces ciblées par les mesures de compensation (1 à 10 ans).

Les suivis post-travaux sur le long terme viendront en contrôle de la stabilité de l'efficacité des mesures de transparence.

▼ L'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction et de compensation

Dans le **premier cas** où l'état initial aura été réalisé avec des métriques de dispersion, la mesure de réduction pourra être considérée comme efficace à partir du seuil où la métrique reprend sa valeur d'état initial.

Dans le **second cas**, où la mesure de réduction a été mise en place dans le cadre d'un plan de requalification de l'infrastructure de transport, les métriques de dispersion ne sont généralement pas disponibles à l'état initial avant l'implantation de l'infrastructure. L'efficacité de la mesure de réduction sera donc suivie de manière relative avec pour **état référent, l'« état 0 »**, correspondant à l'infrastructure implantée sans mesures de réduction. Un suivi des métriques de dispersion sera donc réalisé avant la mise en place de la mesure de réduction. Le diagnostic « état 0 » est recommandé pour définir quels sont les enjeux de fragmentation liés à l'ILTe. Cet « état 0 » sert aussi à construire des indicateurs pertinents de la réussite de l'opération en fonction des enjeux définis au cours du diagnostic :

- Objectif 1 : les 5 espèces cibles utilisent cette mesure pour leur déplacement.
- Objectif 2 : cette mesure permet de connecter l'habitat réservoir X et l'habitat réservoir Y pour l'espèce alpha.
- Etc.

L'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction consiste donc à suivre les métriques de dispersion après leur mise en place et de les comparer à l'« état 0 » de référence. Les indicateurs précis de la réussite de l'opération servent alors à déterminer le moment où la mesure a atteint son seuil d'efficacité souhaité. Lorsque tous les indicateurs ont dépassé leur seuil de réussite, le protocole de suivi des métriques de dispersion peut se faire sur une périodicité plus longue dans un principe de veille (cf-tableau évaluation sur le long terme).

	État initial	Suivi des travaux : projet + mesures	Évaluation de l'efficacité des mesures - court terme	Évaluation de l'efficacité des mesures – long terme
Objectifs	État de référence	Suivi des perturbations – ajustements si nécessaire	Vérification de la bonne « appropriation » des mesures par les espèces - ajustements si nécessaire	Stabilité de l'efficacité des mesures - Détection de perturbations exogènes pouvant réduire/limiter leur efficacité
Durée	1 à 5 ans	Selon le projet	1 à 10 ans	5 à 25 ans
Données paysagères	Caractérisation des habitats	Suivi annuel des habitats sur les zones de travaux État initial des habitats sur les zones de mesures	Suivi périodique des habitats (périodicité à définir selon les habitats)	Suivi périodique des habitats (périodicité à définir selon les habitats)
Données de dispersion	Unique ou annuel selon les méthodes, en couplage des données d'inventaires	Pas indispensable	Suivi périodique (périodicité 1 à 3 ans selon les espèces)	Suivi périodique (périodicité de 1 à 5 ans selon les espèces)
Données de contrôle		Au minimum même périodicité que les données de dispersion	Au minimum même périodicité que les données de dispersion	Au minimum même périodicité que les données de dispersion

Évolution des suivis au cours de terrain du projet d'ITT

#### Ce que l'on attend :

- Une visualisation de la MN avec le « tableau de bord de la compensation » associé à chaque zone, permettant de visualiser rapidement
  - sur quoi porte la mesure (liste des différentes fonctions écologiques/espèces),
  - le niveau actuel d'efficacité de la mesure en rapport à l'objectif initial de compensation (objectif atteint, en cours d'acquisition, évolution critique).
- Des fiches détaillées disponibles par espèce ou fonction écologique avec le reporting de suivi de l'efficacité depuis l'état de référence, et le détail des actions liées à cette mesure passées et à venir.
- Archivage de toutes les données d'observations de manière identique à celle de l'état de référence.

## 6. L'HISTORISATION : QUELLES DONNÉES CONSERVER ?

### Rédacteur

Rédigé principalement par Sylvain Guilloteau (Vinci-Autoroute).

### Préambule

On rappelle que cette partie sera enrichie lors de la tranche 2 du projet MINnD.

Il s'agit de définir et de prioriser les données qui doivent être conservées pendant la durée de vie de l'infrastructure, au regard :

- De la réglementation actuelle.
- De la nécessité de garder une traçabilité des décisions prises dans les différentes phases du projet (conception, construction, exploitation).
- De la nécessité d'être en capacité de justifier a posteriori la conception et les décisions prises à un moment donné, notamment les hypothèses de dimensionnement en fonction :
  - de la réglementation,
  - de la connaissance scientifique,
  - des données du territoire.

L'ensemble de ce contexte peut ensuite évoluer dans le temps.

- De la nécessité de prioriser les données à conserver, afin de maîtriser les coûts associés au maintien d'une base de données dans le temps ; **à terme, il ne faut surtout pas vouloir tout garder sur la durée d'une concession, qui peut durer de 10 à 60 ans.**

En fonction du type de données à conserver, il s'agit de déterminer leur représentation numérique et le niveau de détail à conserver, ainsi que la forme sous laquelle ces données seront conservées. Il s'agit aussi d'identifier les différents types d'acteurs qui produisent ces données et les acteurs à qui ces données seront accessibles et comment.

### 6.1. Réglementation actuelle

#### Demandes d'autorisation de dérogation

Il faut déposer un dossier de demande d'autorisation de dérogation au titre des articles L411-1 et suivant du Code de l'Environnement, notamment concernant la destruction d'habitats d'espèces et captures d'espèces protégées.

La dérogation est obtenue par arrêté ministériel et/ou préfectoral en fonction des enjeux et des espèces concernés.

## Contenu des arrêtés

Dans ces arrêtés nous trouvons habituellement les rubriques suivantes :

- Identité du bénéficiaire.
- Nature de la dérogation :
  - Exemple : La société ASF est autorisée à détruire 2,2 hectares de site de reproduction et aires de repos de Vison d'Europe (*Mustela lutreola*) et de Loutre (*Lutra lutra*) dans le secteur du Hillans, commune Saint-Pierre d'Îrube (64) et 21,68 hectares de sites de reproduction et aires de repos de Vison d'Europe (*Mustela lutreola*) et de Loutre (*Lutra lutra*) dans le secteur d'Ametzondo, commune de Bayonne (64), Mouguerre (64) et Saint-Pierre d'Îrube (64), tels que décrits dans le dossier de demande.
- Conditions de la dérogation :
  - Exemple : Sécurisation, restauration et gestion conservatoire, selon les exigences biologiques de l'espèce, d'aires de repos et de sites de reproduction favorables au Vison d'Europe et à la Loutre sur une surface de 87 hectares dans la vallée de la Nivelle, de l'Adour (rive droite), du ruisseau d'Alotz et du Zirikolatzeko Erreka.
  - Gestion conservatoire de ces terrains jusqu'au 31 décembre 2032 par un organisme qualifié.
- Exécution
  - Exemple : Le directeur de la nature et des paysages, le préfet de département des Pyrénées-Atlantiques et le directeur régional de l'environnement en Aquitaine sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté.

## Démarche pour une demande de dérogation

Le tableau ci-dessous présente un exemple de démarche globale à mettre en œuvre pour rédiger un dossier de demande de dérogation :

Étape	Action
4.	État initial
5.	Évaluation des impacts sur les habitats et sur les individus ou spécimens de faune et de flore protégés.
7.	Identification des espèces faisant l'objet de la demande de dérogation. Il s'agit des espèces pour lesquelles le projet présente, après analyse des impacts, un risque avéré ou potentiel de mortalité et/ou de destruction d'habitat.
8.	Choix des mesures d'évitement, de réduction et d'accompagnement adaptées aux impacts
9.	Identification des impacts résiduels après mise en place des précédentes mesures. Identification des espèces faisant l'objet de mesures de compensation.
10.	Choix des mesures de compensation adaptées à chaque espèce ou groupe d'espèce.
11.	Choix des mesures de suivi. La mesure de suivi s'applique en parallèle des mesures précédemment citées, et vise à surveiller la mise en place, l'entretien, l'efficacité et la durabilité de celles-ci sur un temps donné.

## Des données qui alimentent le socle commun des mesures compensatoires

La réalisation d'un dossier de demande de dérogation fait intervenir de nombreux acteurs, de la collecte des données, à la rédaction des mesures de suivi. Ces données alimentent en parallèle les études d'impacts, les études de conception du projet (évitement et réduction des impacts) et cela sous toutes les formes envisageables (papier, PDF, Word, Excel, Autocad, SIG, modélisations, etc.).

**Toutes ces données forment le socle commun aux mesures compensatoires du projet et doivent être conservées, enrichies et mises à jour**

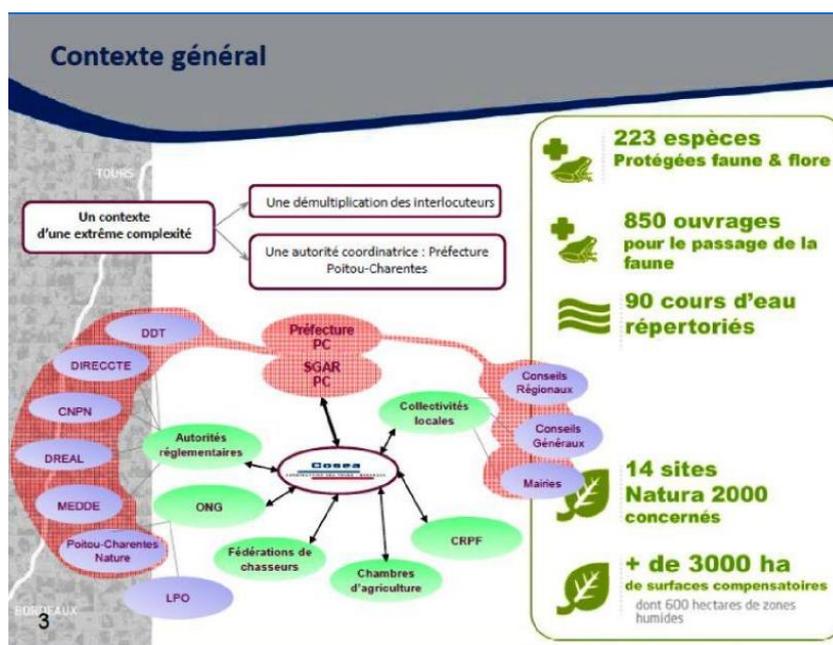
## 6.2. Acteurs impliqués

### Un nombre important d'acteurs

Quantité d'acteurs sont impliqués dans l'élaboration, la mise en œuvre, le contrôle et le suivi des mesures environnementales.

#### Les attentes que l'on pourrait donc avoir sur les données numériques seraient les suivantes :

- La maquette numérique doit faire preuve de flexibilité quant aux différents types d'extraction de données possible. Elle doit pouvoir être utilisée dans les phases d'études, de concertations et de suivi du projet :
  - Revues de projet.
  - Réunions publiques.
  - Présentation du projet aux DREAL, ONEMA, associations environnementales, conservatoires d'espaces naturels, associations de pêches et de chasse, agriculteurs, etc.
- Des accès différenciés aux parties prenantes externes doivent être prévus afin de faciliter l'échange d'informations et la co-construction des mesures environnementales :
  - Permettre un accès différencié aux informations (lecture des données).
  - Permettre à certaines parties prenantes de contribuer au processus lui-même : chargement d'informations (suivi par exemple), processus de validation (validation d'un terrain pour une mesure compensatoire).
  - Permettre l'accès aux données publiques (WMF).



Exemple des acteurs impliqués sur le projet SEA

## 6.3. Les données de conception et de réalisation, état 0

### Exigences de conservation et données concernées

Les données justificatives de la conception doivent être conservées, pour pouvoir justifier a posteriori la conception et les décisions prises en fonction :

- des hypothèses de dimensionnement,
- de la réglementation de la connaissance scientifique,
- des données du territoire au moment de la conception.

L'état d'achèvement des ouvrages de transparence écologiques doit être conservé, au même titre que les données d'infrastructure.

Les inventaires initiaux et toute donnée permettant la qualification de « l'état 0 » doivent être conservés.

### Exemple des données initiales conservées (ASF-A63)

L'enjeu est de pouvoir identifier, localiser et suivre les mesures compensatoires relatives à un arrêté sur une période très longue et par différents services en fonction de l'évolution de la société.

La direction de la construction réalise pendant et jusqu'à l'achèvement des travaux :

- Les états initiaux.
- Les acquisitions.
- Les conventions.
- La rédaction des plans de gestion des parcelles concernées.

À la livraison de l'ouvrage, ces données doivent être transmises au service qui assure le suivi de ces mesures, à savoir l'exploitant et plus particulièrement le district ou le service de gestion de maintenance du patrimoine (organisation ASF).

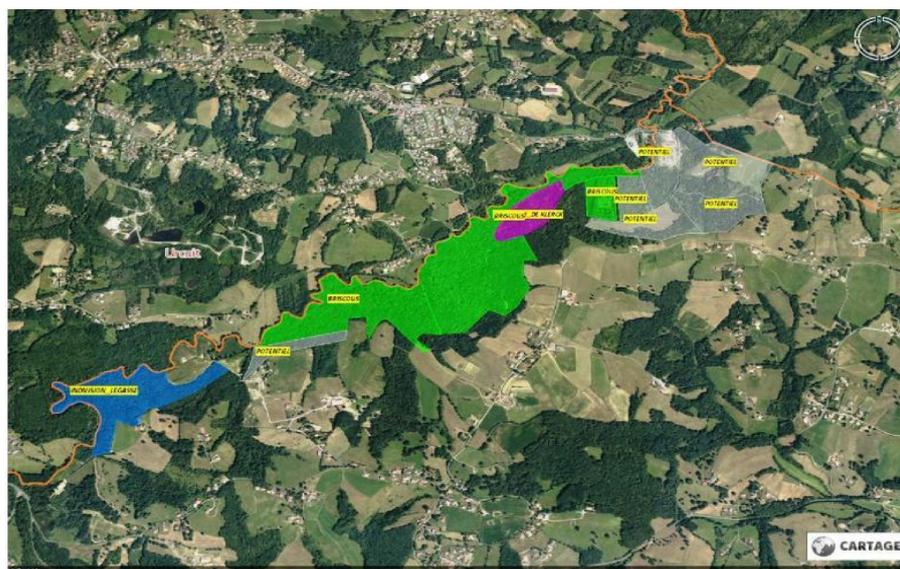
Ce récolement n'est donc pas figé et doit être utilisable et mis à jour facilement.

Il a été choisi de réaliser un outil cartographique sur la base d'un socle 3D (MNT Lidar, RGE de l'IGN et couches SIG 2D) relié à une base de données dédiées aux mesures compensatoires.

Tous les acteurs concernés ont été consultés pour finaliser la liste des données à conserver et/ou à renseigner à court terme. Cette liste peut évoluer en fonction des besoins et de la réglementation.

### Visuels

Les figures suivantes illustrent les données utilisées.



Repérage des parcelles de compensation sur un socle 3D (couleur par propriétaire)



Visualisation des parcelles de compensation à proximité de l'infrastructure, et de la limite du domaine public autoroutier

## 6.4. Le suivi des mesures de transparence écologique

### Pertinence et efficacité des mesures écologiques

Le suivi doit permettre d'évaluer la pertinence et l'efficacité des continuités écologiques réalisées. Les paramètres conduisant à l'évaluation de cette efficacité font encore l'objet de recherches et ne sont pas stabilisés.

Dans l'état actuel des pratiques, toutes les données permettant d'évaluer l'efficacité des mesures doivent être conservées à **court terme**.

**Sur la durée d'une concession, il convient d'envisager ensuite de ne garder que des synthèses des états successifs afin de ne pas avoir à gérer une quantité de données exponentielle.** Le type et la fréquence de relevés diffèrent d'un impact environnemental à l'autre. Une stratégie est définie en concertation avec les acteurs et les services de l'état pour chaque projet et chaque type de mesure environnementale. **Ces stratégies ne sont pas stabilisées aujourd'hui.**

La grandeur la plus évidente et la plus accessible concernant les ouvrages de transparence est le **comptage des passages d'animaux**. Ce comptage est effectué de manière variée, en fonction des espèces et de la configuration des lieux (pièges photographiques, pièges à trace, pêches de contrôle, etc.).

### Le Système d'Information doit permettre :

- de stocker ces informations, sous leurs formes diverses, de les répertorier dans le temps et dans l'espace,
- des synthèses et des extractions par type d'espèces ou par type d'ouvrage.

## 6.5. Le suivi des mesures de compensation : la vie administrative des compensations

### Complexité du volet administratif

Le suivi écologique relève du même type que celui de mesures de transparence.

La complexité du volet administratif n'est pas à négliger, et un suivi précis de la vie administrative des surfaces de compensation est indispensable.

### Modalités de sécurisation foncière

Deux modalités sont en général mises en œuvre au titre des sécurisations foncières :

- **L'acquisition de terrains** par le concessionnaire, qui sont en général rétrocédés aux conservatoires d'espaces naturels (CEN). La responsabilité du suivi de la mesure compensatoire reste de la responsabilité du concessionnaire.
- **Le conventionnement**, avec des particuliers ou des agriculteurs, qui représente la majeure partie des surfaces compensatoires. Ces conventionnements sont en général d'une durée de 5 ans. Il s'agit donc de les renouveler régulièrement ou, si non-renouvellement, de prospecter des surfaces foncières alternatives. Ces conventionnements font l'objet d'autant de contrats, qui engagent le concessionnaire d'une part et le particulier/agriculteur d'autre part (rémunération, modalité de gestion du foncier, durée, modes de contrôle). Le respect de ces engagements doit être suivi dans le temps.

### Prédiagnostics écologiques

Dans tous les cas, ces espaces font l'objet de pré-diagnostic écologiques, qui conduisent ou non à leur éligibilité puis à leur validation par les services de l'état, en fonction de cahiers des charges définis préalablement par espèces ou par habitat. Ces cahiers des charges sont coconstruits avec l'ensemble des parties prenantes : associations de protection de la nature, CEN, CRPF, fédérations de pêches, chambres d'agriculture.

**Au-delà des métriques utilisées pour l'évaluation de l'efficacité écologique des mesures compensatoires, le système d'information doit permettre de gérer la diversité des contrats, leurs suivis dans le temps, les aspects juridiques, financiers. Il doit aussi permettre de rendre compte aux services de l'état et au concédant.**

## 6.6. Quels modèles pour historiser au mieux les données ?

### Exemples de fichiers Excel

Actuellement les données sont stockées à l'aide de tableurs (Excel). La Tranche 2 visera à proposer des modèles de données.

Pour transmettre toutes les données aux services (l'exploitant) qui assureront le suivi et la gestion de ces parcelles liées à la compensation, en complément des données graphiques, des fichiers Excel peuvent être remplis par le service qui livre l'ouvrage (le constructeur) à l'exploitant.

Ces fichiers Excel permettent de hiérarchiser les données et de les trier pour ensuite remplir une base de données dédiée au suivi des mesures compensatoires.

Les tables principales permettent d'identifier le type d'arrêté et les mesures en place sur chaque parcelle identifiée.

Tableau d'identification des parcelles

IDENTIFIANT	DPAC	SECTION CADASTRALE	REFERENCES CADASTRALES				DRE DE RATTACHEMENT	
			NUMERO CADASTRAL	SURFACE CADASTRALE (ha)	DEPARTEMENT	COMMUNE		N° INSEE
1	NON	AC	253	1.3520	47	LAYRAC	47256	AMP
2	NON	AC	253	1.2360	47	LAYRAC	47256	AMP
3	NON	BO	352	2.3250	33	LANGON	33545	AMP
4	NON	BO	402	5.2300	33	LANGON	33545	AMP
5	NON	BO	325	1.2530	33	LANGON	33545	AMP
6	NON	BO	504	0.5820	33	LANGON	33545	AMP

Renseignements sur les arrêtés

IDENTIFIANT PARCELLE	REFERENCE REGLEMENTAIRE			
	TYPE	PREFECTURE	DATE	NUMERO OU REFERENCE
1 - 2	Arrêté préfectoral	AGEN	12/06/2005	125854A-023
3 - 4 - 5 - 6	Arrêté préfectoral	BORDEAUX	13/06/2005	122564A-035

Renseignements sur le projet

IDENTIFIANT PARCELLE	PROJET		
	AUTOROUTE	TYPE DE PROJET	REFERENCE PROJET
1 - 2	A62	Extension	xxxxxx
3 - 4 - 5 - 6	A62	Extension	xxxxxx

Renseignements sur la mesure compensatoire

IDENTIFIANT PARCELLE	REFERENCE DE LA MESURE				
	LIBELLE	OBJECTIF	DATE DE FIN DE LA MESURE	ETAT	SURFACE DE LA MESURE
1 - 2		Protection reptiles	Fin de Concession	En cours	IDEM
3 - 4 - 5 - 6		Protection flore	25/03/2030	En cours	IDEM

Une table reliée sert à suivre et à mettre à jour l'historique des parcelles en fonction des évolutions probables (changement de propriétaire et/ou d'exploitant par exemple).

Renseignements sur l'historique des parcelles

EVENEMENT	DATE	DATE DE FIN	PROPRIETAIRE	EXPLOITANT	GESTIONNAIRE DU SUIVI	COMMENTAIRE	IDENTIFIANT PARCELLE
Achat	12/12/2005		ASF	MEYNARD Serges 13 Lot du Jars 47320 Lougratte	ECO-CONTROL 20 rue Jean Moulin 47000 AGEN		1 - 2
Vente	05/01/2006		GIRODEAU Sébastien 11 Hameau du Pin 47210 Villeneuve sur Lot	MEYNARD Serges 13 Lot du Jars 47320 Lougratte	ECO-CONTROL 20 rue Jean Moulin 47000 AGEN		1 - 2
Achat	05/12/2005		ASF				3 - 4 - 5 - 6
Convention de suivi	01/02/2006	01/02/2015			ECO-FLORE		3 - 4 - 5 - 6
Quitus de plan de gestion	05/05/2006						3 - 4 - 5 - 6

### Exemples de fichiers Excel

### Identification des parcelles

Chaque parcelle est identifiée par un champ unique pour relier les tables entre elles et en faciliter le suivi et la mise à jour.

**Stockage et diffusion  
des données**

Ces données sont stockées sur un serveur et diffusées par l'intermédiaire d'un outil cartographique.

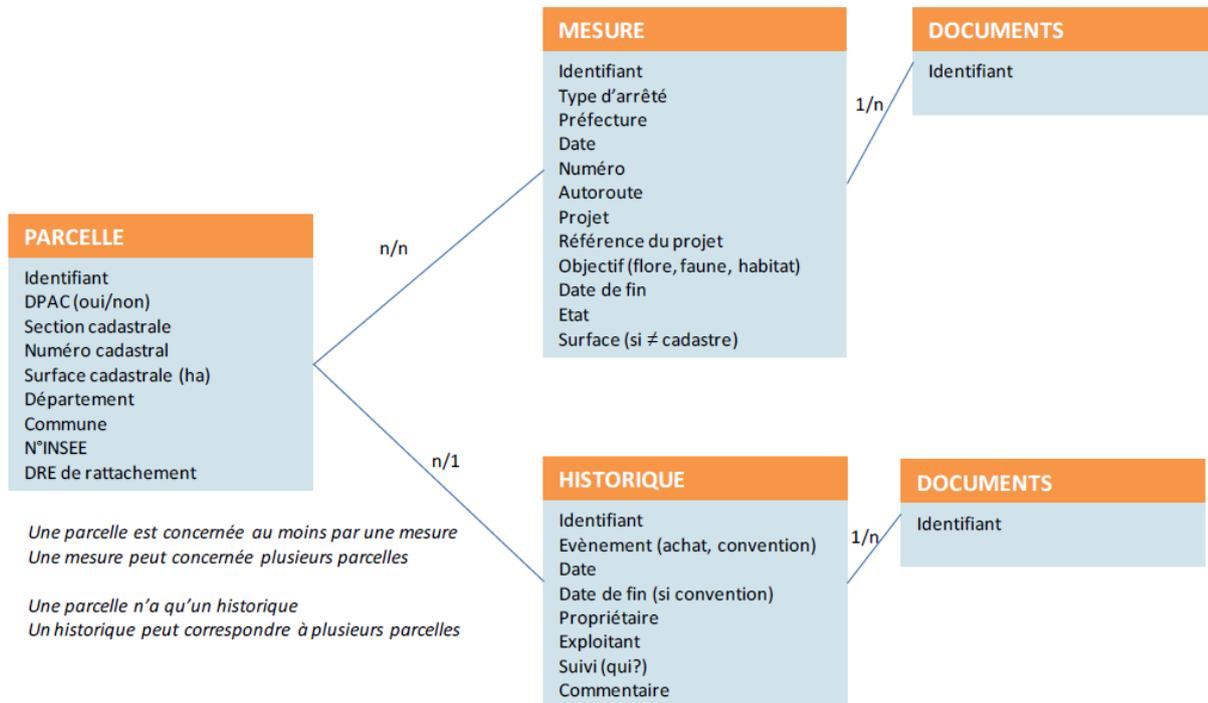


Schéma de données pour l'historisation des parcelles de compensation

## 7. MÉTHODE PROSPECTIVE POUR LA LOCALISATION DES ÉCO-PONTS PAR SIMULATION

Rédacteur

Rédigé par Ifsttar (Anne Ruas).

**Trouver, grâce aux données numériques, la localisation optimale d'un éco-pont**

Aujourd'hui les éco-ponts sont localisés par expertises diverses (voir chapitres 2 et 3). L'objectif de cette section est de présenter une **méthode prospective** permettant de tester des localisations d'éco-ponts par simulation de déplacements animaliers.

Contenu du chapitre

Dans le cadre de MINnD, le travail permet d'illustrer l'utilisation de données numériques pour réfléchir à des scénarios d'aménagements du territoire. Sans être fidèle à une réalité, ce type de simulation a pour objectif de **comparer des localisations** afin de voir quelle serait la localisation optimale.

Les chapitres 7.1 à 7.3 sont centrés sur le travail de thèse de Laurence Jolivet, ingénieure à l'IGN et encadrée par Anne Ruas et Marianne Cohen (Professeur à Paris-Sorbonne en Géographie et spécialiste en géographie du Paysage). Les figures sont extraites de la thèse de Laurence Jolivet et de son article (Jolivet et al, 2015) avec son autorisation. Le chapitre 7.4 est recentré sur le projet MINnD.

### 7.1. Simulation numérique de déplacements animaliers dans un espace géographique numérique en 2D5

Introduction

L'idée de la thèse est de **simuler le déplacement de certains animaux dans un espace géographique à aménager et de voir l'impact de certains aménagements sur ces déplacements.**

Aucun déplacement n'est réel, il s'agit bien de simulations. Par contre les déplacements, qu'on lance sur un espace, seront relancés avec les mêmes origines sur un espace aménagé. On pourra comparer ainsi des scénarios d'aménagements en comparant les lieux de passage et les destinations des trajectoires simulées. On notera bien que selon les aménagements, les animaux pourront ou non atteindre les mêmes destinations.

Type de déplacement

Les analyses ont été faites sur des étendues de l'ordre de la commune (quelques kilomètres sur quelques kilomètres). Les déplacements correspondent donc plutôt à des **déplacements journaliers**, dans l'espace vital plutôt qu'à des déplacements de migration.

Espèces étudiées

Les espèces étudiées sont des mammifères d'assez grande taille : **le cerf, le renard et le chevreuil**. Il ne s'agit donc pas d'étudier toutes les espèces, mais certaines espèces dont les déplacements ont pu être un minimum étudié, afin de générer des déplacements qui ne soient pas trop fantaisistes. Le choix des espèces a donc été guidé par la disponibilité de traces GPS. Des échanges ont eu lieu durant le travail de thèse avec des écologues de l'INRA et de l'ONCFS.

### Fonctionnement résumé

#### Analyses de préférence

Un déplacement se caractérise par une origine et une destination choisie. L'animal peut ou non arriver à atteindre la destination choisie selon les difficultés des déplacements rencontrées. Les origines, destinations et lieux de déplacement choisis par un animal dépendent de ses préférences : pour un animal, l'espace n'est pas homogène. En fonction des espèces, certains espaces sont des ressources (alimentaires), d'autres des lieux de protection, d'autres des lieux à éviter :

- Les analyses de préférences ont été faites à partir de la littérature et des traces GPS des 3 espèces.
- Les types d'occupation du sol pris en compte dans le modèle intègrent les données de description du paysage, en veillant d'utiliser des référentiels pour permettre une reproductibilité de la méthode sur différentes parties du territoire national.
- Le relief est également pris en compte.

#### Moteur de déplacement

Le **moteur de déplacement est le même pour les 3 espèces, mais les paramètres sont différents**. Un ensemble d'attributs permet ainsi de différencier les comportements. Si les connaissances étaient disponibles, on pourrait facilement différencier les comportements par exemple selon l'âge des animaux (juvénile, dominant, etc.)

Les comportements collectifs des animaux ne sont pas pris en compte.

#### Question principale

L'analyse porte sur la difficulté de se rendre d'un lieu à un autre afin d'étudier la **fragmentation du paysage**, les aménagements qui l'amplifient et ceux qui l'atténuent.

Par rapport à une démarche de construction de trames par analyse des paysages (voir chapitre 1) ici la question est plutôt de se demander, compte tenu d'un paysage donné, quels sont les espaces de déplacements privilégiés et en quoi un aménagement, facilite, gêne ou restreint ces déplacements.

## 7.2. Conception d'un modèle de simulation de déplacement animalier

### Introduction

On distingue la **construction du modèle** de simulation puis son **utilisation** pour simuler des déplacements sur différents espaces. Les expérimentations sont présentées en 7.4.

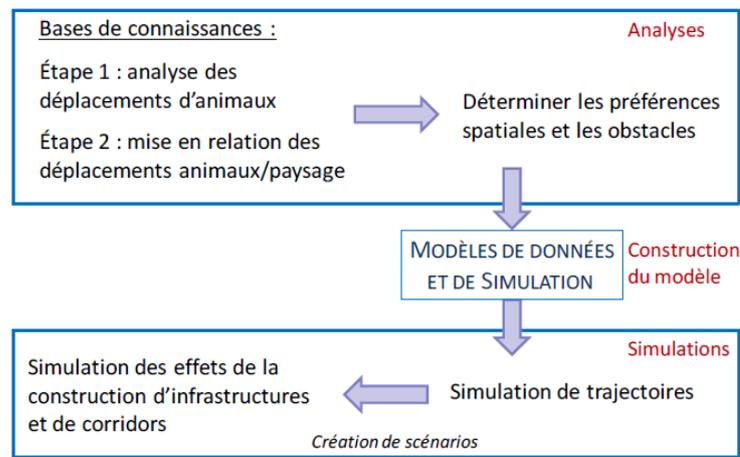
### Démarche globale pour la construction du modèle

Le modèle de simulation repose sur des connaissances, un modèle de données qui décrit le paysage et un modèle à base d'agents pour simuler les déplacements.

La construction du modèle est basée sur 2 étapes :

1. une analyse des traces et des préférences et des obstacles,
2. la construction d'un modèle de simulation.

On peut ensuite réaliser des simulations de trajectoire avec ou sans aménagements et comparer les déplacements pour en déduire des **hypothèses** sur la fragmentation ou la perméabilité du territoire en fonction des aménagements et pour les espèces étudiées.



Un processus à base de connaissances et de simulation (d'après Jolivet 2014)

### L'acquisition des connaissances par analyse des traces et du paysage

#### Analyse des traces GPAS

Une partie de la connaissance est issue de l'analyse de traces GPS de cerfs, de chevreuils et de renards :

- Les traces des renards viennent d'une zone périurbaine dans la région de Nancy (ANSES).
- Les traces de cerfs viennent des Vosges en zone de forêt (ONCFS).
- Les traces de chevreuils viennent des Vosges en zone de forêt (ONCFS) et d'Aquitaine en zone agricole (INRA).

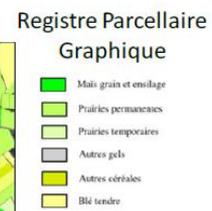
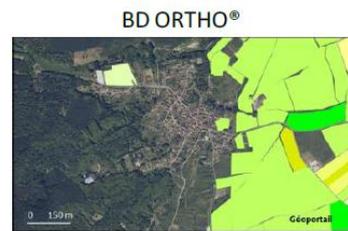
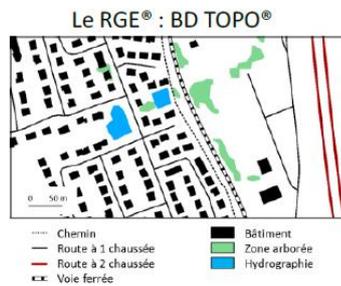
Les analyses peuvent se faire en premier lieu sans considérer l'espace support. On peut déduire des traces analysées de nombreuses informations tels que :

- Les renards à Nancy se déplacent en moyenne de 10 km par jour, sur une surface de 1 km<sup>2</sup> en 5 jours.
- Les chevreuils dans les Vosges se déplacent en moyenne de 8 km par jour, sur une surface de 0,5 km<sup>2</sup> sur 5 jours.

On peut aussi analyser les heures et les rythmes de déplacement.

**Prise en compte du milieu**

On note bien sûr que les connaissances dépendent du milieu qu'il faut prendre en compte. Les données de référence utilisées sont le RGE de l'IGN et Corine Land Cover. Pour compléter ces données, en milieu forestier, la base Carte Forestière est utilisée et en périphérie urbaine, le Registre Parcellaire Graphique décrit les parcelles agricoles et les prairies.

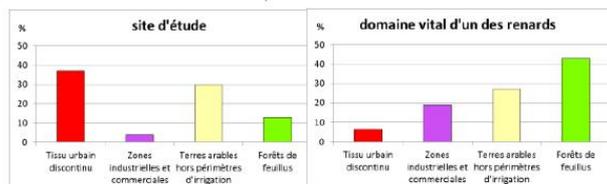
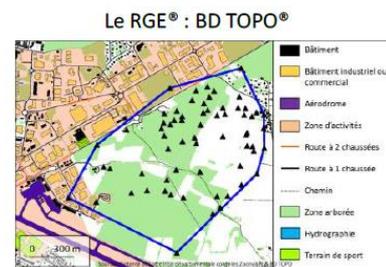
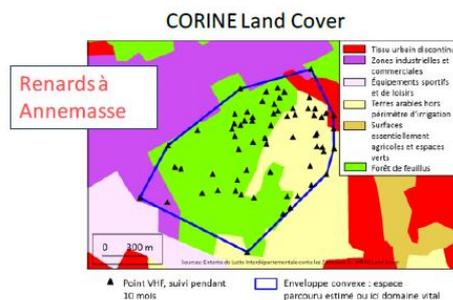


Sources de données pour décrire le paysage © Jolivet 2014

**Croisement des données**

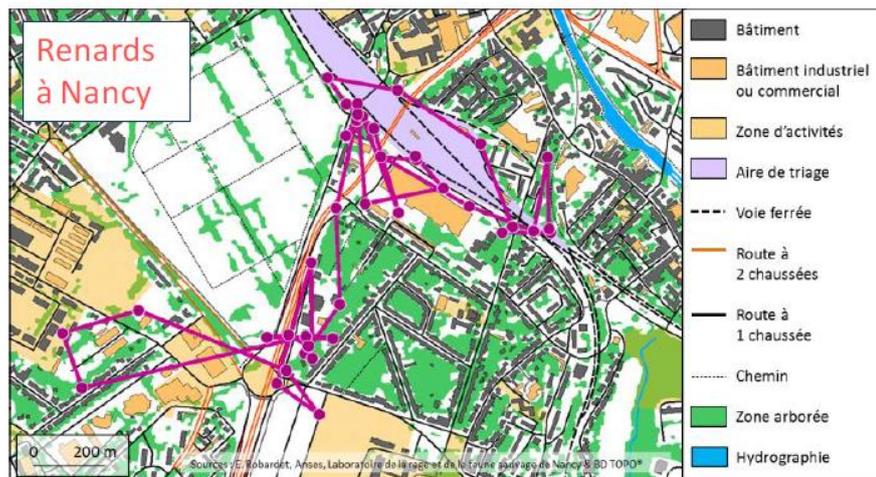
En croisant les traces avec les données décrivant l'espace géographique, on peut essayer de voir :

- Les caractéristiques de l'espace vital de chaque individu en comparant l'espace où il vit par rapport à l'espace environnant (fig 27 suivante)
- Lorsqu'un individu se déplace d'un point à l'autre, on peut étudier les caractéristiques des points d'origine et de destination, les lieux de passages et ceux qui sont évités (fig 28).



→ Le niveau de détail de la BD TOPO peut être adapté à la compréhension de choix locaux de déplacement.

Analyse des préférences pour l'espace vital d'un renard © Jolivet 2014



● Points GPS d'un renard pendant 12 h (période nocturne)      — Trace linéaire

Analyse des traces : obstacles, zones d'attractions et franchissement © Jolivet 2014

**Analyses et conclusions intégrées au modèle de simulation**

Des analyses (dont les résultats peuvent être trouvés dans la thèse de Jolivet (2014)) permettent d'avoir des relations entre la présence de renard et la distance aux zones arborées et aux bâtiments, ou entre la présence des cervidés (cerfs, chevreuils) et la pente.

Toutes ces informations, complétées par des connaissances extraites de la littérature, sont intégrées au modèle de simulation.

**Modèle de simulation**

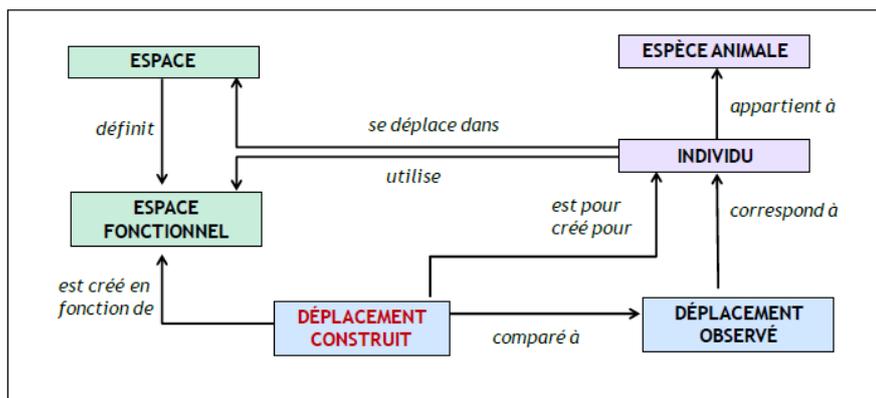
Principe de distinction entre l'espace topographique et l'espace perçu

Composition de l'espace fonctionnel d'une espèce

Le premier principe est la distinction entre l'espace topographique et l'espace perçu et vécu par l'animal. Pour un animal d'une espèce donnée, il y a donc les éléments du paysage qui favorisent les déplacements et ceux qui les freinent, ainsi que les zones d'intérêt propices à sa présence et constituant donc des motivations aux déplacements.

Cet espace est l'espace fonctionnel. Pour une espèce donnée, il est composé des éléments suivants :

Éléments	Description et exemples pour les renards
Éléments d'intérêt	Points vers lesquels l'animal va vouloir se diriger, tels que la végétation arborée, les bâtiments et les zones d'activité.
Éléments favorables aux déplacements	Végétation arborée, les voies non motorisées, les abords des voies ferrées, les zones d'activité et les zones de pentes faibles.
Obstacles lors des déplacements	Bâtiments, les routes, les voies ferrées, les cours d'eau, les fortes pentes.
Éléments à éviter	Routes.



L'espace vu par un individu d'une espèce © Jolivet 2014

### Codage des déplacements : paradigme Agent

Pour coder les déplacements, Jolivet a recours au paradigme Agent<sup>18</sup>. Chaque animal appartient à espèce. L'agent-animal a un certain nombre d'attributs et de méthodes qui lui permettent de se déplacer dans l'espace fonctionnel. Un Agent-Animal fait partie d'une espèce animale. Son but est d'aller d'un point origine à une destination.

#### Étapes de déplacement

Un déplacement est décomposé en 4 étapes :

Étape	Processus de déplacement
1.	l'agent connaît sa localisation et il perçoit son environnement spatial autour de cette localisation.
12.	l'agent choisit une destination qui est un élément du paysage d'intérêt pour l'espèce en fonction de son activité du moment (repos, alimentation ou recherche de ressources).
13.	l'agent se déplace de proche en proche vers cette destination en évitant si possible les obstacles.
14.	l'agent exploite la destination atteinte. Il la parcourt s'il s'agit d'un élément d'intérêt étendu comme une zone arborée. Il reste à proximité si la destination est un élément plus restreint et hermétique comme un bâtiment (pour les renards par exemple).

#### Attributs et méthodes

Pour cela il dispose d'un certain nombre d'attributs dont les valeurs dépendent soit de sa situation (lieu de départ, activités, mémoire) soit de son espèce (rayon de perception, vitesse, persévérance, audace) et de 3 méthodes (figure suivante) :

- Une qui lui permet de calculer ce qu'il voit.
- Une qui lui permet de choisir une destination dans ce qu'il voit.
- Une qui lui permet de se déplacer en direction de sa destination.

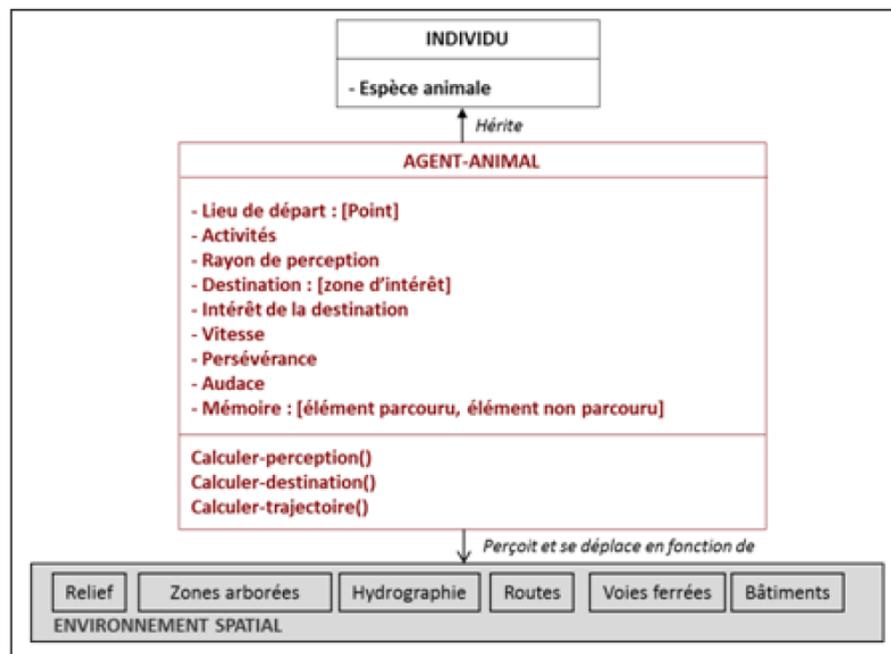
Lorsqu'il se déplace vers sa destination, il évite les obstacles en les contournant (voir figure). C'est une des originalités de la méthode employée. Le fait d'utiliser des données vectorielles précises permet de prendre en compte les obstacles et de calculer des contournements.

<sup>18</sup> On ne parlera pas de multiagents ici (SMA) parce que le modèle ne prend pas en compte les interactions entre agents (donc entre animaux). Par contre un animal perçoit et agit en fonction d'un but. C'est un agent cognitif.

#### Attributs de différenciation :

Si un animal n'arrive pas à atteindre sa destination parce qu'il y a trop d'obstacles, il change alors de destination ; c'est ainsi que la fragmentation émerge des trajectoires. Deux attributs sont mobilisés pour différencier les comportements : la persévérance et l'audace. Les valeurs varient selon l'espèce, mais peuvent varier selon les individus :

- La **persévérance** diminue ou augmente le temps pendant lequel l'animal accepte de faire un contour pour atteindre la destination qu'il a choisie initialement.
- L'**audace** influe sur la traversée d'obstacle lorsqu'il s'agit d'obstacles franchissables tels que des routes non clôturées.



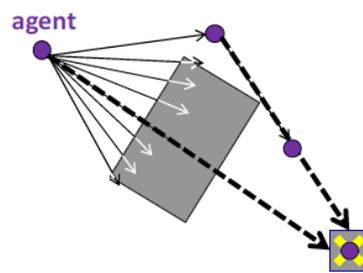
Attributs et méthodes d'un agent-animal (Jolivet 2014)

### Perception, sélection de destination et déplacement s'appuient sur l'espace fonctionnel

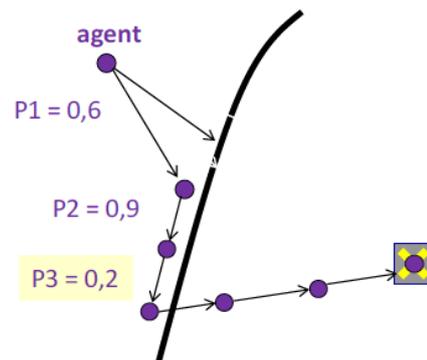
Les fonctions de perception, de sélection de destination et de déplacement s'appuient sur les caractéristiques de l'espace fonctionnel :

- La fonction de **perception** liste les éléments à une certaine distance.
- La fonction de **sélection** renvoie les éléments perceptibles et d'intérêt pour l'animal. Ensuite un coût est calculé entre la localisation de l'animal et les destinations possibles. La fonction de coût intègre le nombre d'obstacles, la pente, mais aussi les zones favorables au déplacement telles que les zones arborées. Une zone est finalement choisie parmi les meilleures zones.
- La fonction de **déplacement** construit la trajectoire point par point. À partir d'une localisation, l'agent calcule sa localisation suivante en scannant son voisinage par projetés de rayon et à une distance donnée. La première direction est celle de la destination. S'il y a un obstacle, une direction voisine est essayée jusqu'à ce qu'il trouve un passage.

Contournement d'un obstacle, probabilité de traversée = 0



Contournement d'un obstacle, probabilité de traversée = 0,3



Méthodes pour contourner un obstacle pour d'atteindre une destination (Jolivet 2014)

### Obstacles et traversabilité

Les obstacles sont soit hermétiques (les bâtiments) soit traversables (les routes). Un attribut de traversabilité est associé à chaque type d'objets pour traduire le fait que les animaux traversent plus volontiers une route étroite et peu fréquentée qu'une route large à fort trafic. Une part aléatoire est également introduite sur le fait de traverser ou de continuer à contourner l'obstacle (voir figure précédente). La pente est également considérée comme un obstacle si elle est supérieure à un seuil.

### Deux types de déplacement prévus dans les simulations

Pour réaliser les simulations, deux types de déplacement sont prévus :

- les déplacements libres vers une destination choisie par l'animal,
- les déplacements vers une destination fixe.

Ce type de déplacement est nécessaire pour réaliser des analyses comparatives.

### Format des développements

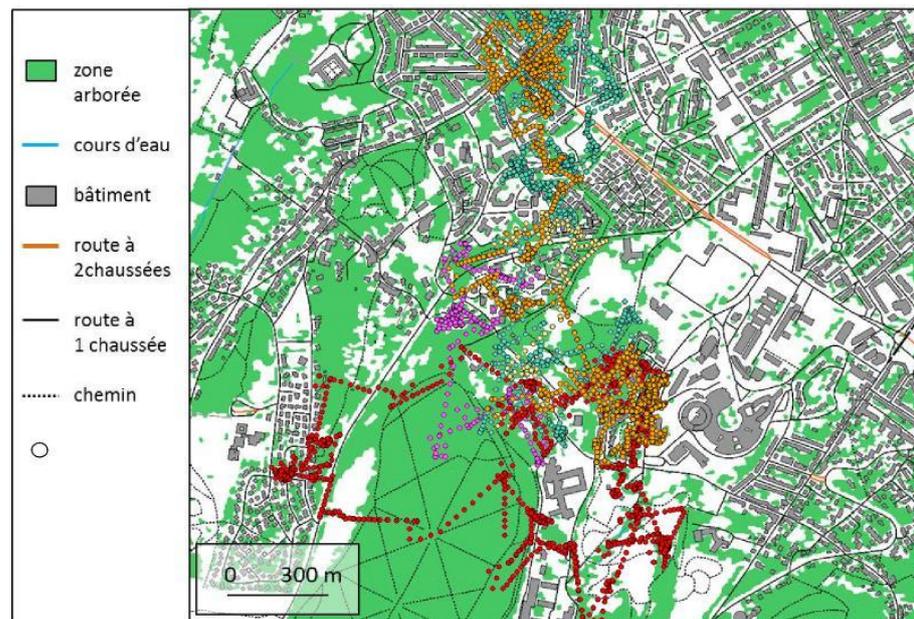
Les développements ont été réalisés sur la plateforme GeOxygène du laboratoire COGIT de l'IGN.

## 7.3. Expérimentations pour évaluer l'impact d'infrastructures et d'aménagements

### Deux types d'expérimentations

Deux types d'expérimentations ont été faites pendant la thèse de doctorat :

- Le premier, que nous ne présentons pas, vise à comparer les trajectoires simulées avec des traces GPS dans l'objectif de porter une analyse critique sur la simulation et l'améliorer.
- Le deuxième type a pour but d'étudier l'impact d'infrastructure et d'aménagements. Nous ne présentons que la méthode de l'expérimentation.



Simulation de déplacements d'un agent-renard en zone périurbaine (Jolivet 2014)

### Exemple de simulation

Dans le cas présent, une route fictive a été créée près de Nancy. Le site est majoritairement couvert de bois et de prairies et contient une zone bâtie. Des simulations ont été faites pour le déplacement de renards, et de chevreuils.

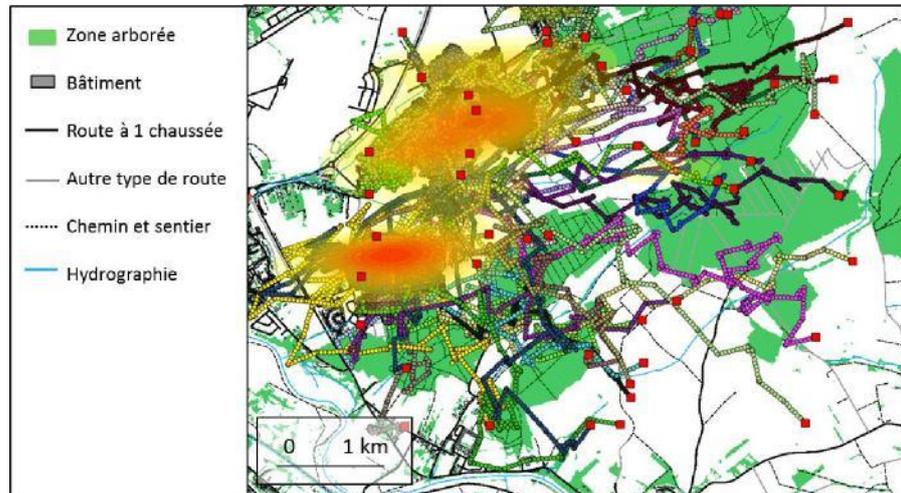
Chaque agent construit des trajectoires à partir de cinquante points initiaux répartis aléatoirement. Les déplacements sont d'abord libres puis à objectif fixé à partir de 50 autres points. Les différences principales entre les deux types d'agents sont :

- vitesse,
- rythme d'activité entre les pauses et la recherche de ressources,
- éléments d'intérêts (les bâtiments et zones arborées pour le renard et les zones arborées pour le chevreuil).

Quatre simulations ont été faites : une pour les renards à destination libre, une à destination fixées, et la même chose pour les chevreuils.

**Exemple de simulation  
à destination libre**

La figure suivante montre la simulation à destination libre pour un agent-renard à partir de 50 points origines. On voit que l'agent-renard se dirige vers la zone urbaine (la représentation jaune-orange montre la densité des localisations).

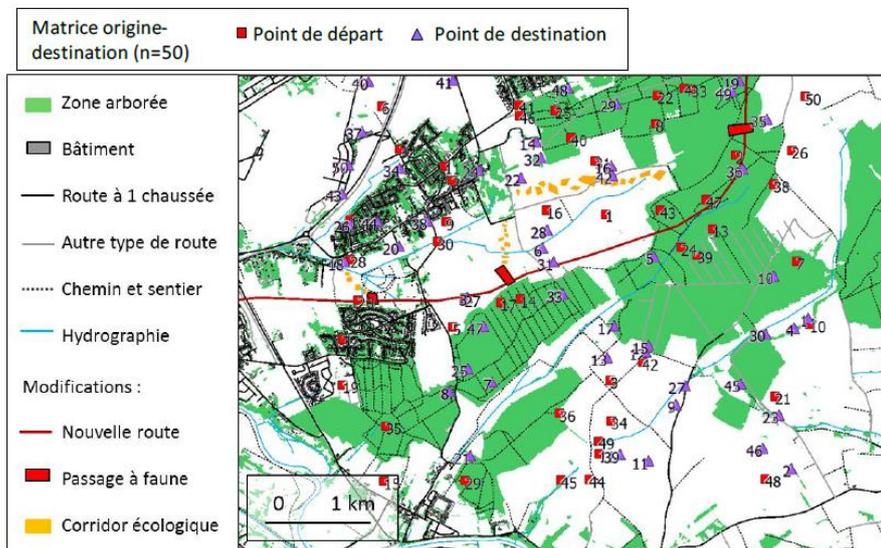


Simulation de déplacements d'un agent-renard en fixant les points de départ (Jolivet 2014)

Simulations sur de nouveaux espaces géographiques

Puis les mêmes simulations ont été lancées sur de nouveaux espaces géographiques :

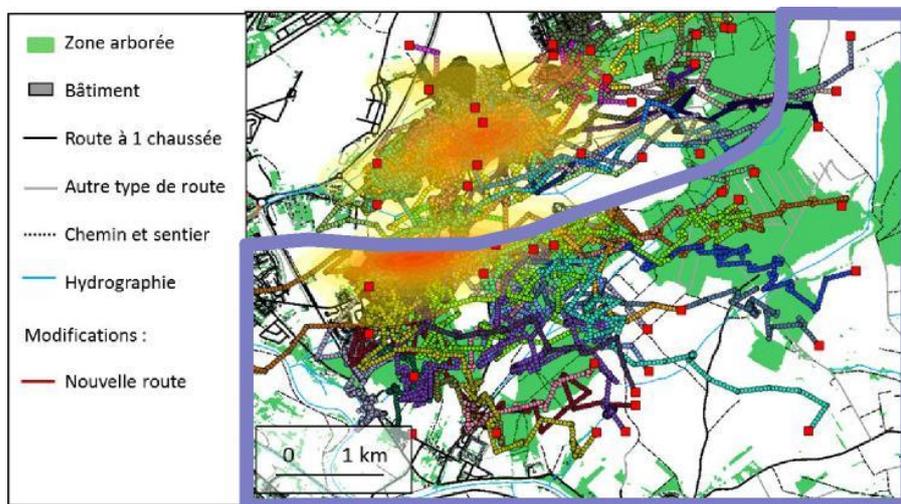
- Cas 1 : Un contenant une route ayant une faible probabilité à être traversée.
- Cas 2 : Un contenant la même route avec 3 passages à faunes et des corridors écologiques.



Ajout d'une infrastructure et d'aménagements pour étudier les déplacements (Jolivet 2014)

Cas 1

Dans le premier cas, les traces sont plus concentrées vers des éléments d'intérêts autour de la route. Certaines zones sont moins parcourues. La distance moyenne d'accès à destination est raccourcie (de 6,9 à 6,5 km) certains animaux ont renoncé et choisi de nouvelles destinations (figure suivante).



Carte des nouveaux déplacements des animaux

Cas 2

Dans le deuxième cas, d'après les simulations lancées, les passages favorisent la circulation des agents, même si aucun comportement d'apprentissage n'est implémenté.

Les agents empruntent les zones arborées aménagées autour de l'infrastructure puis la traversent au niveau des passages. La distance moyenne entre les origines et les objectifs est à nouveau proche de celle du scénario de référence (6,9 km).

De même, les déplacements sont favorisés au nord de la nouvelle route avec la création de corridors alors qu'ils étaient davantage confinés au sud dans le cas 1, dû à la présence de la route. Ces résultats semblent indiquer l'efficacité accrue des passages à faune lorsqu'ils sont intégrés dans un corridor écologique.

## 7.4. Comment aller plus loin avec un modèle 3D complet

### Retour sur les données utilisées dans Jolivet 2014

#### Limites portant sur les traces animalières

Dans le travail de thèse de Laurence Jolivet présenté aux chapitres 7.1, 7.2 et 7.3 les expérimentations ont été faites à partir de données disponibles et standard.

Au niveau des traces animalières, les limites viennent de 2 points :

- **Le nombre encore limité de traces.** Le coût du capteur, du collier et du fait d'attraper les animaux pour leur mettre des colliers étant encore élevé, l'accès aux données est limité. Pourtant ces données sont extraordinaires pour comprendre les déplacements réels.
- Dans les cas d'étude, les **points GPS** utilisés sont d'une précision supérieure au mètre et ils sont séparés au mieux d'un intervalle de temps de 5 minutes. Si la précision métrique est correcte, car elle est compatible avec les données du RGE, par contre **la fréquence temporelle gagnerait à être améliorée**. En effet, avec une fréquence de 5 minutes ou plus, on s'aperçoit qu'un renard croise une route ou une voie de chemin de fer, mais on ne sait pas par où il est passé.

#### Limites portant sur les données géographiques

Au niveau des données géographiques :

- **Le RGE est un bon support.** Il est métrique et dispose d'information altimétrique précieuse. **Par contre il manque les haies, murets, clôtures et grillages** qui sont essentiels :
  - pour les obstacles (clôture),
  - comme éléments facilitant les déplacements (haies). Pendant la thèse, ces informations ont été ajoutées par analyse d'images.
- **Au niveau de l'occupation des sols, le RGE est incomplet.** Si la géométrie est bonne, il faut ajouter des éléments thématiques. Il a été complété par Corine Land Cover, la base carte forestière et le registre parcellaire graphique. La carte forestière est progressivement disponible sur toute la France dans le référentiel de l'IGN. L'IGN étudie aussi l'enrichissement de sa couche occupation des sols sur l'ensemble de la France, c'est une piste intéressante. Il faut noter le projet CarHAB sur la cartographie nationale des habitats pourra aussi participer utilement à cet enrichissement.

### Un RGE plus simple que la réalité

Enfin, au niveau des franchissements, à proprement parler, la modélisation dans le RGE est beaucoup plus simple que la réalité (voir figure suivante). Nous seulement les grillages seraient utiles, mais aussi les bas-côtés qui peuvent être des zones de déplacements pour certains animaux lorsque leur accès est possible. Une modélisation 3D de ces espaces serait utile pour les simulations.



Les abords des infrastructures

### Faire de la simulation avec des données 3D, plus précises

#### Possibilités et limites

Les chapitres 7.1, 7.2 et 7.3 montrent qu'il est envisageable de :

- replonger des traces animalières dans un espace,
- analyser ces traces dans l'espace pour déterminer des lieux de passage,
- faire des simulations de déplacements grâce à ces analyses,
- étudier l'impact d'aménagement sur des déplacements simulés.

Les limites sont dues aujourd'hui au nombre limité de traces GPS, à la fréquence trop faible des points GPS et surtout à la représentation de l'espace géographique.

#### Le challenge de l'intégration des données et de résolutions numériques supérieures

Des modèles numériques du type BIM devraient pouvoir avoir des résolutions métriques nettement supérieures. L'intégration de données topographiques (de type RGE), d'occupation des sols (de type landCover) et d'infrastructures reste un challenge, ces données étant généralement manipulées sur des logiciels différents. Pourtant les études relatives aux couloirs écologiques montrent bien un cas où l'intégration des données serait pertinente.

#### La simulation, un outil majeur d'aménagement du territoire

La simulation, quant à elle, est un outil majeur d'aménagement du territoire. Le rapport 6.1 illustre qu'avant de construire un mur anti bruit, on le simule sur logiciel pour étudier sa pertinence et son efficacité et définir ses caractéristiques. Il faudrait pouvoir faire la même chose pour les franchissements de type éco-ponts, afin d'étudier où le construire et quels devraient être ses caractéristiques pour rendre le franchissement optimal en fonction d'un ensemble de contraintes et de particularités, notamment les espèces présentes.

Nous espérons que des recherches futures pourront avancer dans ce sens, compte tenu de l'importance des enjeux sociétaux et économiques.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

### 8.1. Bibliographie citée

- Brouard-Masson J, Miquel P La trame verte et bleue et les documents d'urbanisme. MEDDE 2011
- Burylo & Julliard. 2012. Regard critique sur la compensation écologique : Prendre en compte toutes les composantes de la biodiversité dans les mesures compensatoires, regards et débats sur la biodiversité, <http://www.sfecologie.org/regards/2012/09/26/r36-burylo-et-julliard-2/>
- Coulon A, Aben J; Stevens VM, Callens T, StrubbeD Lens L Matthysen E. Baguette M, Travis JM A stochastic movement simulator improves estimates of landscape connectivity. *Ecology*, 96(8), 2015, pp. 2203–2213 2015 by the Ecological Society of America
- Clobert, J., E. Danchin, A. A. Dhondt, and J. D. Nichols. 2001, *Dispersal*. Oxford, Oxford University Press.
- Clobert, J., M. Baguette, T. G. Benton, and J. M. Bullock. 2013, *Dispersal Ecology and Evolution*, Oxford University Press.
- Dreal (2012) La trame verte et bleue dans les plans locaux d'urbanisme, Dreal Midi-Pyrénées [http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references\\_bibliographiques/guide\\_tvb\\_plu\\_midi-pyrenees\\_0-1.pdf](http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/guide_tvb_plu_midi-pyrenees_0-1.pdf)
- Forman R.T.T. & Godron M., 1986. *Landscape ecology*. J. Wiley & sons, New York, États-Unis, 619 p.
- Giles R.H., M.K. Trani (1999), Key elements of landscape pattern measures. *Environmental Management* 23(4), pp. 477-481.
- Hanski, I., and M. E. Gilpin. 1997, *Metapopulation Biology, Ecology, Genetics, and Evolution*, Academic Press, Inc.
- Jolivet L.(2014) Modélisation des déplacements d'animaux dans un espace géographique – analyse et simulation. Thèse de doctorat École doctorale de géographie de Paris.
- Jolivet L., Cohen M., Ruas A. (2015), « Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de simulation agent », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 712, mis en ligne le 21 février 2015, consulté le 03 mars 2015. URL : <http://cybergeo.revues.org/26767> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26767
- Lebreton, J. D., K. P. Burnham, J. Clobert, and D. R. Anderson. 1992. Modeling Survival and Testing Biological Hypotheses Using Marked Animals - A Unified Approach with Case-Studies. *Ecological Monographs* 62:67-118.
- Marsily et al, Rapport du collège d'experts scientifiques sur la méthode de compensation des incidences sur les zones humides du projet d'aéroport et desserte routière de Notre-Dame-des-Landes, G. de MARSILY (Président), G. BARNAUD, M. BENOIT, V. de BILLY, F. BIRGAND, J. GARNIER, B. LESAFFRE, C. LEVEQUE, S. MULLER, A. MUSY, J. TOURNEBIZE, D. ZIMMER
- O'Neil et al., 1988 O'Neill R.V., et al. (1988), Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology* 1(3), pp. 153-162. Observatoire National de la Biodiversité (<http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/glossaire>).
- Palmer S. C. F., Coulon A., Travis J. M. J., 2011, Introducing a "stochastic movement simulator" for estimating habitat connectivity. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(3), pp. 258-268.
- Regnery, B., D. Couvet, and C. Kerbiriou. 2013. Offsets and Conservation of the Species of the EU Habitats and Birds Directives. *Conservation Biology* 27:1335-1343.
- Turner M., 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20(1989):171—197.
- Turner M.G., R.H. Gardner (1991), *Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*. New York: Spring

## 8.2. Autre bibliographie

- Adriansen F. et al., 2003. The application of « least-cost » modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning* 64(4):233—247.
- Andreou, D., J. Vacquie-Garcia, J. Cucherousset, S. Blanchet, R. E. Gozlan, and G. Loot. 2012. Individual genetic tagging for teleosts: an empirical validation and a guideline for ecologists. *Journal of Fish Biology* 80:181-194.
- Angelibert, S., and N. Giani. 2003. Dispersal characteristics of three odonate species in a patchy habitat. *Ecography* 26:1320.
- Baguette, M., S. Blanchet, D. Legrand, V. M. Stevens, and C. Turlure. 2013. Individual dispersal, landscape connectivity and ecological networks. *Biological Reviews* 88:310-326.
- Bergerot, B., P. Tournant, J.-P. Moussus, V.-M. Stevens, R. Julliard, M. Baguette, and J.-C. Foltête. 2013. Coupling inter-patch movement models and landscape graph to assess functional connectivity. *Population Ecology* 55:193-203.
- Bissonette J.A. & Rosa S.A., 2009. Road zone effects in small-mammal communities. *Ecology and Society* 14(1):27.
- Bonte, D., H. Van Dyck, J. M. Bullock, A. Coulon, M. Delgado, M. Gibbs, V. Lehouck et al. 2012. Costs of dispersal. *Biological Reviews* 87:290-312.
- Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2004. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research* 33:261-304.
- Cardon, M., G. Loot, G. Grenouillet, and S. Blanchet. 2011. Host characteristics and environmental factors differentially drive the burden and pathogenicity of an ectoparasite: a multilevel causal analysis. *Journal of Animal Ecology* 80:657667.
- Dajoz R., 2006. Précis d'écologie, 8<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris.
- Decout, S., S. Manel, C. Miaud, and S. Luque. 2012. Integrative approach for landscape-based graph connectivity analysis: a case study with the common frog (*Rana temporaria*) in human-dominated landscapes. *Landscape Ecology* 27:267-279.
- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 34:487-515.
- Foltete, J. C., C. Clauzel, and G. Vuidel. 2012. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software* 38:316-327.
- Geneletti D., 2002. Ecological evaluation for environmental assessment, Netherlands Geographical Studies, Utrecht.
- Girardet X., 2013. Paysage et infrastructures de transport, Modélisation des impacts des infrastructures sur les réseaux écologiques, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon.
- Gutzwiller, K. J., and S. H. Anderson. 1992. Interception of moving organisms - Influences of patch shape, size, and orientation on community structure. *Landscape Ecology* 6:293-303.
- Jaeger J.A.G., 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology* 15(2):115—130.
- Kukkala, A. S., and A. Moilanen. 2012. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. *Biological Reviews* 88:1-22.
- Mader H.J., 1984. Animal habitat isolation by roads and agriculture fields. *Biological Conservation* 29(1): 81-96.
- Mader H.J. et al., 1990. Linear barriers to arthropod movements in the landscape. *Biological Conservation* 54(3):209—222.
- Mancebo Quintana S. et al., 2010. A model for assessing habitat fragmentation caused by new infrastructures in extensive territories - evaluation of the impact of the Spanish strategic infrastructure and transport plan. *Journal of Environmental Management* 91(5):1087—1096.
- Matthiopoulos, J., 2003, The use of space by animals as a function of accessibility and preference. *Ecological Modelling*, 159(2-3), pp. 239-268.

- Michiels, N. K., and A. A. Dhondt. 1991. Characteristics of dispersal in sexually mature dragonflies. *Ecological Entomology* 16:449-459.
- Moilanen, A. 2011. On the limitations of graph-theoretic connectivity in spatial ecology and conservation. *Journal of Applied Ecology* 48:1543-1547.
- Moilanen, A., and I. Hanski. 2001. On the use of connectivity measures in spatial ecology. *Oikos* 95:147-151.
- Moulherat, S. 2013. Population viability of the keeled skimmer (*Orthetrum coerulescens*) within the bog network of the Montselgues plateau in France, SCALES.
- Mueller, T., and W. F. Fagan. 2008. Search and navigation in dynamic environments - from individual behaviors to population distributions. *Oikos* 117:654-664.
- Paz-Vinas, I., E. Quemere, L. Chikhi, G. Loot, and S. Blanchet. 2013. The demographic history of populations experiencing asymmetric gene flow: combining simulated and empirical data. *Molecular Ecology* 22:3279-3291.
- Pe'er, G., D. Saltz, H. H. Thulke, and U. Motro. 2004. Response to topography in a hilltopping butterfly and implications for modelling nonrandom dispersal. *Animal Behaviour* 68:825-839.
- Pe'er, G., K. Henle, C. Dislich, and K. Frank. 2011. Breaking Functional Connectivity into Components: A Novel Approach Using an Individual-Based Model, and First Outcomes. *Plos One* 6.
- Rayfield B. et al., 2011. Connectivity for conservation: a framework to classify network measures. *Ecology* 92(4):847—858.
- Ronce, O. 2007. How does it feel to be like a rolling stone? Ten questions about dispersal evolution. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 38:231-253.
- Roshier, D. A., V. A. J. Doerr, and E. D. Doerr. 2008. Animal movement in dynamic landscapes: interaction between behavioural strategies and resource distributions. *Oecologia* 156:465-477.
- Stevens, V. M., C. Verkenne, S. Vandewoestijne, R. A. Wesselingh, and M. Baguette. 2006. Gene flow and functional connectivity in the natterjack toad. *Molecular Ecology* 15:2333-2344.
- Urban, D., and T. Keitt. 2001. Landscape connectivity: A graph-theoretic perspective. *Ecology* 82:1205-1218. Vos C.C. et al., 2001. Toward ecologically scaled landscape indices. *The American Naturalist* 157(1):24—41.
- Vuilleumier S., Metzger R., 2006, Animal dispersal modelling: Handling landscape features and related animal choices. *Ecological Modelling*, 190, pp. 159-170
- Vuilleumier, S., and N. Perrin. 2006. Effects of cognitive abilities on metapopulation connectivity. *Oikos* 113:139-147.
- Wahlberg, N., A. Moilanen, and I. Hanski. 1996. Predicting the occurrence of endangered species in fragmented landscapes. *Science* 273:1536-1538.
- White, G. C., and K. P. Burnham. 1999. Program MARK: survival estimation from populations of marked animals. *Bird Study* 46:120-139.
- Wiegand, T., K. A. Moloney, J. Naves, and F. Knauer. 1999. Finding the missing link between landscape structure and population dynamics: A spatially explicit perspective. *American Naturalist* 154:605-627.
- With, K. A., S. J. Cadaret, and C. Davis. 1999. Movement responses to patch structure in experimental fractal landscapes. *Ecology* 80:1340-1353.

## 9. ANNEXE

### 9.1. Annexe A – Éléments de contexte : réglementations, TVB et études d'impacts

**Rédacteur** Rédigé par Anne Ruas, IFSTTAR.

#### Introduction

Contradiction entre objectifs de conservation des espèces et aménagement

Études d'impact

Contexte du Grenelle I et II

Objectifs de la Trame verte et bleue

Contenu du chapitre

Les objectifs de conservation des espèces via des réseaux écologiques peuvent être en contradiction avec certains projets d'aménagement, comme ceux accentuant l'étalement urbain ou ceux consacrés à la construction d'infrastructures de transport. Ces projets peuvent empiéter sur les domaines vitaux des espèces et de les contraindre dans leurs déplacements.

Le code de l'environnement prévoit la réalisation d'études d'impact en amont des projets d'aménagement, notamment pour évaluer leurs répercussions en termes de **fragmentation des habitats**. Ces études préalables sont menées pour tenter de prévoir et de limiter les conséquences des nouvelles constructions et plus largement des changements du paysage.

Les dynamiques de la faune et de la flore sont ainsi prises en compte dans les politiques d'aménagement. Elles sont au cœur du Grenelle de l'Environnement I et II par la définition :

- des Schémas régionaux de Cohérence environnementale (SRCE),
- de la Trame verte et bleue (TVB) sur l'ensemble du territoire français.

**La TVB vise le maintien de la biodiversité par la conservation et la création de corridors écologiques.** La TVB correspond à une préoccupation envers des espèces non seulement emblématiques, mais également plus communes. Elle a pour rôle d'intégrer les besoins de plusieurs espèces et des déplacements de types différents sur de courtes et de longues distances (voir Jolivet et al, 2015).

Nous présentons ci-dessous :

- un rappel de la composante réglementaire pour les corridors écologiques,
- les méthodes pour leur mise en place,

un rappel sur les études d'impacts, etc., afin d'expliquer la composante « transparence écologique » pour la construction d'infrastructures.

#### La composante réglementaire

Les dispositions de Grenelle I et II

La loi « Grenelle II », ou loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement modifie l'article L.121-10 du code de l'urbanisme : Les plans locaux d'urbanisme intégrant les dispositions des PDU (Plan de déplacements urbains) et les directives territoriales d'aménagement et de développement durable ne pourront plus être adoptés sans **une évaluation environnementale préalable** tenant compte de la surface, nature et sensibilité du territoire concerné, et de l'importance des travaux et aménagements qu'autorisent ces plans ou directives.

Au sujet des corridors écologiques, à la suite du Grenelle de l'Environnement, la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (Grenelle 1) a fixé les objectifs de la Trame verte et bleue (TVB), en y intégrant la préservation de la biodiversité notamment par la conservation, la restauration et la création de **continuités écologiques**.

### Décret du 27 décembre 2012

Toutefois un avis du Conseil d'État a mis en évidence, début 2012, des malfaçons juridiques qui fragilisaient l'édifice législatif et réglementaire, élaboré par la loi Grenelle II (loi n° du 10 juillet 2010). Le décret relatif à la Trame verte et bleue n° 2012-1492 du 27 décembre 2012 (J.O. du 29 décembre 2012), précise les définitions de la Trame verte et bleue, le contenu et la procédure d'élaboration des schémas régionaux de cohérence écologique.

### Une famille de dispositifs utiles pour la mise en œuvre des trames vertes et bleues

#### Outils nécessaires à la mise en œuvre des TVB

La construction des trames vertes et bleues est un processus complexe. Elles doivent prendre en compte en ensemble de contraintes pour être définies puis se traduire par des modifications et recommandations dans les différents plans pour que les trames constituées soient préservées.

Lors d'un séminaire organisé par le MEDDE en 2011 sur les trames vertes et bleues, un ensemble d'outils ont été identifiés, nécessaires à leur mise en œuvre. Nous les listons ci-dessous :

- **Outils d'inventaire et de connaissance du territoire** : Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF), zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO), zones humides d'intérêt environnemental particulier (ZHIEP), zones humides stratégiques pour la gestion des eaux (ZHSGE), observatoire de la biodiversité ; etc.
- **Outils de gestion contractuelle de l'espace** : mesures agroenvironnementales (MAE), baux ruraux, contrat, charte Natura 2000, etc.
- **Outils de planification territoriale** : orientations nationales pour la préservation et la restauration des continuités écologiques, schéma régional de cohérence écologique, charte des parcs naturels, schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE, SDAGE), schéma de cohérence territoriale (SCOT), plan local d'urbanisme (PLU), schéma de service collectif (SSC), directive territoriale d'aménagement (DTA), directives régionales d'aménagement, schéma régional d'aménagement et de développement du territoire (SRADT), orientations régionales forestières, schéma régional de gestion sylvicole, schéma régional d'aménagement, etc.
- **Outils de maîtrise foncière** : espaces naturels sensibles, acquisition de parcelles agricoles, de sites à requalifier, de zones humides, de secteurs littoraux, de milieux naturels remarquables, droit de préemption urbain (DPU), déclaration d'intérêt général (DIG), maîtrise foncière par contractualisation, etc.
- **Outils de protection à portée réglementaire** : arrêté préfectoral de protection de biotope, sites classés, réserves et parcs naturels, réserves de chasse et de faune sauvage, zones agricoles protégées (ZAP), protection des zones agricoles et des espaces naturels périurbains (PAEN), protection des paysages, périmètre de captage d'eau potable, loi littorale, zones de protection spéciale (ZPS), zones spéciales de conservation (ZSC), réserves biologiques domaniale (RBD), réserves de pêche, aires marines protégées
- **Outils financiers** : européen (FEDER, LIFE, ..), Région, agence de l'eau, taxes sur les espaces verts sensibles, plan de développement rural
- **Dispositifs d'évaluation environnementaux** : études d'indices dans les sites Natura 2000, évaluation du schéma régional de cohérence écologique, **évaluation des incidences des projets**, évaluation des plans et programme sur l'environnement.

#### Prise en compte des TVB

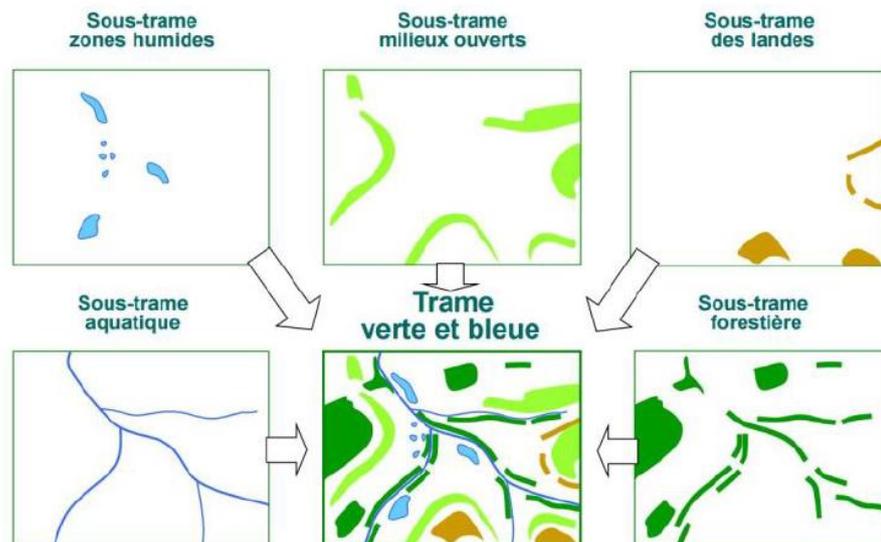
Nous le verrons ultérieurement, lorsque les trames sont définies, les nouveaux aménagements (dont les constructions d'infrastructures) doivent les prendre en compte.

### Définition des TVB

La définition des trames est complexe, des guides établis par le MEDDE et les services de l'état explicitent le processus de construction. Le centre de ressources Trame verte et bleue<sup>3</sup> a d'ailleurs été créé pour faciliter les mises en œuvre de ces trames.

De façon simplifiée, le processus passe par :

1. Détermination des sous-trames (1 par grand type de milieu).
2. Identification des réservoirs de biodiversité.
15. Identification des corridors écologiques.
16. Identification des menaces et obstacles.
17. Carte de synthèse.

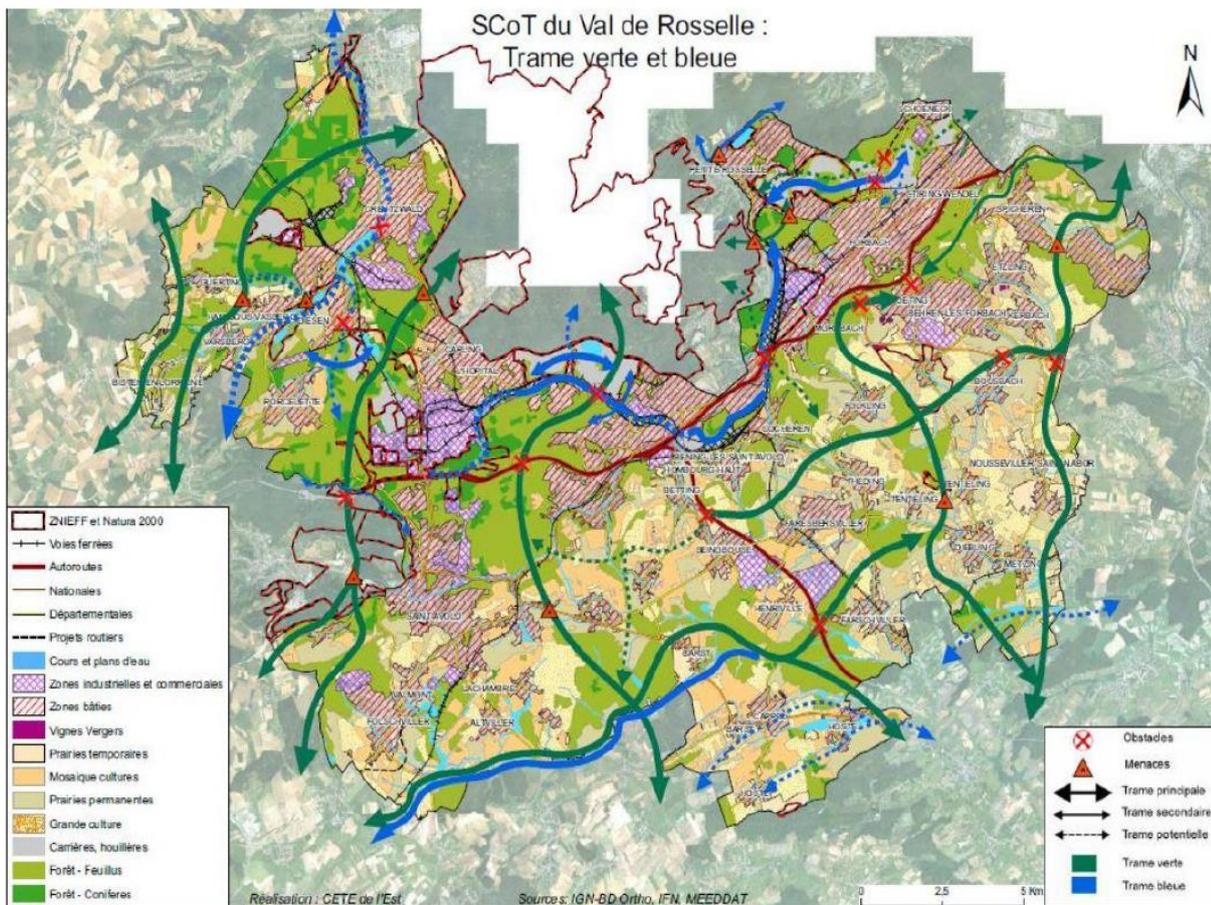


Sources pour construire des trames (Brouard-Masson et Miquel, 2011)

**Étapes de construction  
des TVB**

Plus précisément, la DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) de Midi-Pyrénées a listé les étapes de construction des TVB (Dreal 2012):

<b>Étapes de construction des TVB (listées par la DREAL)</b>	
<b>Étape 1 – Approche et données pour une vision globale stratégique du territoire</b>	
Identifier les acteurs.	
Identifier les documents, la connaissance existante à l'échelle du territoire élargi.	
Adapter localement une cartographie de TVB existante.	
<b>Étape 2 – Diagnostic paysager, environnemental et écologique du territoire</b>	
Approche paysagère.	
Identifier les modes d'occupation du sol du territoire :	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les éléments et espaces participant à la trame écologique.</li> <li>• Les obstacles pouvant créer des ruptures dans les continuités :               <ul style="list-style-type: none"> <li>– trafic routier et aménagement des voies et zones de collision avec la faune : muret central béton, clôtures, etc.,</li> <li>– urbanisation dense ou très dense,</li> <li>– pratiques intensifiées de gestion des espaces agricoles ou forestiers,</li> <li>– murs, barrières naturelles, falaise, clôtures, etc.,</li> <li>– seuils, digues, ouvrages hydrauliques, etc.</li> <li>– lieu de stockage des déchets,</li> <li>– obstacles potentiels et menaces (immatériels) : bruit, lumière, pollutions.</li> </ul> </li> </ul>	
Améliorer la cartographie de l'occupation des sols par la connaissance des espèces et des habitats naturels, par la connaissance acquise par les acteurs locaux (habitants, associations, etc.) ou par des inventaires naturalistes spécifiques.	
Prendre en compte les milieux naturels et les espèces :	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créer des groupes d'espèces représentatifs de différentes continuités (sous-trames).</li> </ul>	
<b>Étape 3 – Identification, validation et cartographie des continuités écologiques</b>	
Choisir les sous-trames (cf figure 1-a).	
Déterminer les réservoirs de biodiversités.	
Déterminer les corridors écologiques.	
Déterminer les obstacles.	
Établir des représentations cartographiques des continuités en fonction des étapes de la démarche.	
Moyens et modalités de validation des continuités écologiques : Des inventaires peuvent donc être lancés sur le territoire pour répondre à ces enjeux, voire même répondre au constat du manque de données nécessaires et suffisantes pour l'identification et la cartographie des continuités faites dans les Temps 1 et Temps 2.	
<b>Étape 4 – Croiser les continuités écologiques avec les autres problématiques territoriales</b>	
Évaluer les ruptures de continuités existantes et/ou menacées par les projets d'urbanisation : les fragilités, les contradictions.	
Évaluer les points forts, les atouts des continuités écologiques en lien avec les projets d'urbanisation : les synergies, les complémentarités.	
<b>Étape 5 – Identifier les possibles de la TVB</b>	
Mettre en avant les atouts de la TVB pour le projet de territoire.	
Intégrer la TVB dans la prospective territoriale.	
Définir les fonctionnalités de la TVB qui intéressent le territoire.	
Définir les différents scénarios possibles d'intégration des continuités écologiques.	
<b>Étape 6 – Faire les choix des objectifs et orientations pour la TVB</b>	
Fixer les objectifs de la TVB dans le PLU/PLUI.	
Définir une stratégie sur le long terme pour la TVB et prévoir sa mise en œuvre.	
<b>Étape 7 (non détaillée) – Traduction de la TVB dans le PLU/PLUI</b>	



Dessin des TVB dans un Scot. Identification des obstacles et des menaces (sources CETE - Est)

**Exemple de TVB dans un Scot**

La figure ci-dessus montre des trames dans un Scot (Schéma de COhérence Territoriale). Elle met en valeur des obstacles et des menaces, dont une part est liée aux zones de franchissement d'infrastructures.

### Méthodes : SIG, analyse photographique et inventaires

Dans le manuel écrit par la DREAL (2012) on peut lire deux points intéressants pour notre analyse :

- En se basant sur l'évolution passée (évolution comparée de l'urbanisation et de la TVB), **l'analyse photographique permet de se projeter, de préciser et de localiser les espaces à protéger**, voire à reconquérir pour préserver des continuités écologiques et/ ou des aménités liées à la TVB).
- **Les inventaires de terrain permettent de comprendre les logiques de déplacement des espèces au sein du paysage.** La mise en œuvre des investigations de terrain retenues sera réalisée par des spécialistes (naturalistes, écologues, etc.) sur :
  - L'étude et la description des réservoirs de biodiversité et/ou lieu de vie / reproduction des espèces représentatives et emblématiques du territoire (valeur patrimoniale, enjeux, état de conservation, menaces, dynamiques, etc.).
  - L'étude des milieux autour des réservoirs (enjeux, état de conservation, facilité de traversée, menaces, dynamiques, restauration à envisager, etc.).
  - La vérification de l'existence des corridors préalablement cartographiés et la recherche de corridors non identifiés (caractérisation de leur fonctionnalité : état de conservation, usage effectif, évolution, menaces, pérennité, etc.).
  - L'étude des discontinuités et obstacles qui peuvent présenter des enjeux pour le déplacement de la faune.

**Il y a bien une utilisation de SIG, de photographies aériennes et de vérifications terrain, mais pour l'instant on ne voit pas émerger l'utilisation de données 3D ou l'utilisation des méthodes de simulation.**

### Formations proposées par le centre de ressources TVB

Ceci est confirmé par exemple par les formations proposées en 2015 par le Centre de ressources TVB. Il propose, entre autres, des documents et des formations, dont une sur les « méthodes appliquées en information géographique ». L'objectif est de connaître les méthodes usuelles d'élaboration de la Trame verte et bleue à partir des données géographiques et de l'utilisation d'outils SIG. Les méthodes proposées sont basées sur de l'analyse d'image et de l'analyse de proximité basée sur des méthodes de dilution et d'érosion.

## Rappels sur le processus général pour les études d'impacts

### Un contenu proportionné

### Contenu de l'étude d'impact

Le dossier d'étude d'impact est transmis par l'autorité de décision (Préfecture, collectivités, DDTM) à l'autorité environnementale compétente (Préfet de région) et/ou par délégation à la DREAL (service « énergie, climat, habitat, logement et aménagement du territoire ») qui va analyser le contenu de l'évaluation.

Le contenu de l'étude d'impact doit être proportionné :

- à la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet,
- à l'importance et la nature des travaux, ouvrages et aménagements projetés et à leurs incidences prévisibles sur l'environnement ou la santé humaine.

L'étude d'impact présente :

- Une **description du projet** comportant des informations relatives à sa conception et à ses dimensions, y compris une description des caractéristiques physiques de l'ensemble du projet et des exigences techniques en matière d'utilisation du sol lors des phases de construction et de fonctionnement.
- Une **analyse de l'état initial de la zone et des milieux** susceptibles d'être affectés par le projet, portant notamment sur la population, la faune et la flore, les sites et paysages, les biens matériels, les continuités écologiques, les équilibres biologiques, le patrimoine culturel et archéologique, le sol, l'eau, l'air, le bruit, les espaces naturels, agricoles, forestiers, maritimes ou de loisirs, ainsi que les interrelations entre ces éléments.
- Une **analyse des effets** négatifs et positifs, directs et indirects, temporaires (y compris pendant la phase des travaux) et permanents, à court, moyen et long terme du projet sur l'environnement, en particulier sur les éléments énumérés dans l'analyse de l'état initial et sur les facteurs climatiques, la consommation énergétique, la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, émissions lumineuses), l'hygiène, la santé, la sécurité, la salubrité publique, ainsi que l'addition et l'interaction de ces effets entre eux.
- Une **analyse des effets cumulés** du projet avec d'autres projets connus.
- Une **esquisse des principales solutions de substitution** examinées par le pétitionnaire ou le maître d'ouvrage et les raisons pour lesquelles le projet présenté a été retenu.
- Les **éléments permettant d'apprécier la compatibilité du projet avec l'affectation des sols** définie par le document d'urbanisme opposable, ainsi que, si nécessaire, son articulation avec les plans, schémas et programmes mentionnés à l'article R. 122-17 du Code de l'environnement et la prise en compte du SRCE dans les cas mentionnés à l'article L. 371-3.
- Les **mesures prévues** par le pétitionnaire ou le maître de l'ouvrage pour :
  - éviter les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine et réduire les effets n'ayant pu être évités,
  - compenser, lorsque cela est possible, les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine qui n'ont pu être ni évités ni suffisamment réduits.

S'il n'est pas possible de compenser ces effets, le pétitionnaire ou le maître d'ouvrage justifie cette impossibilité.

- Une **description des difficultés éventuelles**, de nature technique ou scientifique, rencontrées par le maître d'ouvrage pour réaliser cette étude.
- Les **noms et qualités précises et complètes du ou des auteurs** de l'étude.

### Responsabilités et publicité

Le maître d'ouvrage est responsable du contenu de l'étude.

L'avis de l'autorité environnementale sur le projet est rendu public. L'étude d'impact est obligatoirement mise à disposition du public.

Le dossier d'étude d'impact est inséré soit au dossier d'enquête publique quand celle-ci est rendue obligatoire, soit au dossier de consultation du public prévue par les textes. En l'absence d'étude d'impact, le maître d'ouvrage doit tenir à la disposition du public un dossier comprenant une notice d'étude d'impact et l'indication des autorités compétentes pour prendre la décision.

### Finalités pour la mise en place d'une stratégie TVB locale (source : ENRx – les référentiels techniques pour les territoires)

La liste des projets concernés est présente dans la directive du 27 juin 1985 dite « EIE » (évaluation des incidences sur l'environnement) :

- étude d'impact automatique : industries dangereuses (raffineries de pétrole, centrales nucléaires, usines chimiques...), centrales thermiques importantes, traitement des déchets et des eaux, sites d'extraction, élevages intensifs, barrages, **voies de navigation intérieure et infrastructures de transport comme voies de chemin de fer, aéroports, autoroutes, etc.**
- étude d'impact optionnelle : en fonction de la localisation, du seuil : agriculture, sylviculture, aquaculture, industrie de l'énergie (production, transport et stockage), industries minérale, chimique, alimentaire et du textile, projets de tourisme (parcs d'attractions, villages vacances, pistes de ski, etc.) ou encore projets d'infrastructure (centres commerciaux, parkings, métros aériens et souterrains).

L'étude d'impact permet de prendre en compte l'environnement au stade de l'élaboration d'un projet et prévient les dommages susceptibles d'être causés, ou de prévoir leurs réductions, voire leur compensation.

Il arrive que des projets portant trop atteinte à l'environnement ou dont l'étude d'impact a été réalisée de manière insuffisante ne soient pas déclarés d'utilité publique, donc irréalisables sauf modifications.

# UC6 – Infrastructure et environnement

## 3- Premières propositions d'amélioration

# Sommaire

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS .....	116
2. SPÉCIFICATIONS À L'USAGE DES ACTEURS (SPÉCIFICATION « MÉTIERS ») .....	117
2.1. Rappel du jeu d'acteurs sur les données .....	117
2.2. Propositions d'amélioration .....	118
3. SPÉCIFICATIONS SUR LES DONNÉES .....	121
4. SPÉCIFICATIONS LOGICIELLES.....	122
4.1. Quels outils pour quels métiers ?.....	122
4.2. Les propositions d'amélioration de logiciels pour réduire les perturbations sur le cycle de vie des données.....	123
4.3. Réflexion sur les formats : vers la généralisation des formats standards (type cityGML, IFC, etc.)	123
5. PROPOSITIONS DE NATURE NORMATIVE OU RÉGLEMENTAIRE .....	124
5.1. Rappel des réglementations et normes existantes pour l'interopérabilité des données .....	124
5.2. Nos premières propositions (tranche I) .....	125

# I. CONTEXTE ET OBJECTIFS

## Contexte

La surabondance, l'hétérogénéité des données et leur mauvaise documentation peut porter atteinte à l'efficacité des traitements et à la pertinence même des études d'infrastructure.

Ce phénomène s'accroît au fil de la vie du projet, si la stratégie générale sur le cycle de vie des données n'est pas clairement identifiée et communiquée à l'ensemble des collaborateurs du projet.

### Éléments perturbateurs de la bonne gestion des données

Les principaux éléments perturbateurs de la bonne gestion des données sont :

Perturbation	Description
Perturbations liées aux acteurs	Malgré une récente évolution vers la normalisation de la gestion des données, chaque acteur du projet traite les données nécessaires aux études selon ses propres méthodes. L'acteur suivant a ensuite du mal à s'approprier l'ensemble des informations recueillies ou traitées. On constate donc de nombreux manques d'interopérabilité des données (discontinuité du flux de données, recherche de documents, extraction des données utiles, ressaisies, etc.) à chaque changement de phase d'étude.
Perturbations liées aux spécificités des métiers	Chaque métier (Technique – Acoustique – Assainissement – Géotechnique) possède ses propres méthodes de construction et de structuration des données, fortement liées aux outils de traitement et d'analyse répondant à leurs besoins.

## Objectifs

Notre réflexion consiste à proposer les règles de bonne conduite et de bonne organisation dans le but de réduire les perturbations des données par phase d'étude et par métier. Si nous nous intéresserons ici à l'angle environnemental, cela concerne tous les métiers travaillant sur un projet d'infrastructure.

L'objet du présent document est donc de **faire des propositions d'amélioration larges de manière à améliorer l'interopérabilité des données**. Il découle des 2 cas d'usage précédents (6-1 : retour d'expérience lié aux études acoustiques / 6-2 : retour d'expérience lié aux études sur la biodiversité).

Les propositions concernent :

- les spécifications des logiciels,
- le rôle de chaque acteur d'un projet,
- les spécifications à porter sur les données,
- les propositions de modification du corpus réglementaire.

## 2. SPÉCIFICATIONS À L'USAGE DES ACTEURS (SPÉCIFICATION « MÉTIERS »)

### Contenu du chapitre

Dans ce chapitre, il s'agit de clarifier pour chaque acteur quel est son rôle dans le cycle de vie des données, et ce tout au long de la vie du projet d'infrastructures. Le but est de proposer des solutions d'amélioration, qu'elles soient organisationnelles, méthodologiques ou réglementaires.

### 2.1. Rappel du jeu d'acteurs sur les données

#### Des acteurs divers

La liste suivante illustre la diversité des acteurs :

- Les fournisseurs de données publiques (porté à connaissance) qui sont de plus en plus souvent en ligne : BRGM<sup>19</sup>, Agence de l'Eau, DREAL<sup>20</sup> (Carmen<sup>21</sup>), etc.
- Les Maîtres d'ouvrage.
- L'assistance à maîtrise d'ouvrage.
- Les Maîtres d'œuvre.
- Le BE spécialisées.
- Les entreprises.
- Les organismes de recherche.

#### Acteurs en interface

Par ailleurs, il arrive fréquemment que les acteurs de plusieurs projets proches soient plus ou moins en interface. C'est le cas des projets suivants :

- Doublement de l'A9 et Contournement de Nîmes et de Montpellier dans l'Hérault.
- Mise à grand Gabarit de l'Oise, Canal Seine – Nord Europe et RD1032 dans l'Oise.

#### Rôles et responsabilités

Rôles et responsabilités de chaque acteur sur la donnée :

Acteur	Rôles et responsabilités
Maître d'ouvrage	Il a la plus haute responsabilité. Il insuffle la dynamique sur la qualité et l'interopérabilité des données ; il définit le cycle de vie sur l'ensemble du projet.
AMO	Il conseille le MOA sur la structuration des données. Il peut prendre en charge la gestion des données.
MOE	Il met en œuvre l'organisation des données selon les instructions données par le Maître d'ouvrage. Il peut avoir un rôle de conseil. Il pilote la structuration et l'homogénéisation.
BE spécifique	Il est souvent sous le contrôle des MOE, produit les données selon les directives du MOA ou du MOE.
Entreprises	Elles produisent des données : documents d'exécution, suivis environnementaux etc.

<sup>19</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières

<sup>20</sup> Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement

<sup>21</sup> Carmen est un des serveurs cartographiques du Ministère en charge de l'écologie

## 2.2. Propositions d'amélioration

### Résumé des solutions proposées

Afin de mettre l'ensemble des acteurs d'un projet (mais aussi d'un projet à l'autre) dans une dynamique collective, nous proposons un certain nombre de solutions :

- Produire au sein de l'interprofession un volet « gestion des données géographiques » (voire élargissable à l'ensemble des données sources et à leur gestion, incrémentation et restitution au client et aux tiers) à inclure dans les CCTP (*voir développement ci-dessous*).
- Développement d'un « volet numérique », notamment dans les visas des études d'EXEcution.
- Généraliser la gestion de données géographiques numériques sur serveur partagé.
- Généraliser le poste de « gestionnaire de données géographiques » dans les marchés d'AMO ou de MOE.
- Mettre en place un « Label Numérique » comparable à un Label Qualité pour la gestion des données : (normes AFNOR, ISO, etc.), éventuellement inspiré des normes anglaises PAS 1192.

### Volet « gestion des données géographiques » à inclure dans les CCTP de marchés publics

Le cahier des charges « gestion des données géographiques » doit concerner l'ensemble des données géographiques produites et/ou utilisées tout au long de l'étude, qu'il s'agisse de données techniques ou environnementales. Il doit répondre à la stratégie générale souhaitée par la Maîtrise d'ouvrage. Il doit s'agir d'un document unique pour l'ensemble des métiers idéalement à intégrer dans la démarche qualité.

Ces prescriptions doivent suivre un modèle national tel que les guides proposés par le CNIG (Conseil National de l'Information Géographique).

Les rubriques pourraient être les suivantes :

Thème	Rubrique
Les enjeux et objectifs	Description de la stratégie globale envisagée par le Maître d'ouvrage
	Cycle de vie de la donnée géographique
	Liste des données concernées (2D + 3D)
	Contrôles et visas
Format et structure	Format des données – Logiciels – Projection-précision – Normes (Inspire, IFC, ISO, etc.)
	Structure de gestion la donnée (calques, arborescence, etc.)
	Structure des objets (décomposition en objet et décomposition attributaire)
Historisation et catalogage	Règles de nommage des couches d'information et des noms de champs / calque
	Règles d'historisation et de métadonnées, catalogages
	Référence PMQ <sup>22</sup> – GED <sup>23</sup>

<sup>22</sup> Plan de Management de la Qualité

<sup>23</sup> Gestion Electronique des Docuents

### Généraliser les bases de données géographiques numériques sur serveur partagé

À l'échelle d'un projet : vers une base de données géographiques partagée en ligne pour les projets conséquents

Plus généralement : nous proposons la mise en place de serveurs « infrastructure de transport » avec toutes les données au fur et à mesure de l'avancée de la conception (AVP, EXE puis DOE<sup>25</sup>).

Plus un projet est conséquent, plus la segmentation des tâches dans le temps et par type de métier est nécessaire et de ce fait plus la multiplicité des acteurs est importante.

La généralisation du BIM<sup>24</sup> dans les infrastructures implique la production en mode partagé des différentes briques constitutives d'un projet : tous les objets 3D du projet seront disponibles et seront enrichis d'attributs. Cette mutation ne sera pas sans modifier la relation contractuelle des prestataires vers un fonctionnement plus collaboratif : aux livrables « historiques » (version pdf ou papier) s'ajouteront (voire se substitueront ?) des « livrables BIM ».

Pour ce qui concerne les données environnementales tout au moins (état initial mais aussi mesures pour protéger l'environnement prévues et mises en œuvre : réduction ou compensation) qui resteront encore longtemps majoritairement en 2D, les bases de données sur serveurs partagés se généralisent. Certaines pourront toutefois être rattachées à des objets 3D faisant partie de la maquette BIM : passages petite faune (PPF), passages grande faune (PGF), rescindements, etc.

La mise à disposition de tout ou partie des données sur un serveur « infrastructure de transport » librement accessible est une demande de ceux qui s'intéressent au suivi des effets des infrastructures sur l'environnement (ONG, monde la recherche).

Certes, aujourd'hui, tous les projets disposent de données très importantes, notamment les données de conception. Le recueil de ces données sur des supports standardisés et accessibles constitue toutefois un travail important et coûteux.

Si des standards de production des données étaient constitués dans un objectif de partage collaboratif des données, cela poserait moins de problèmes. Cela vaut :

- Pour un projet donné (pour fluidifier la collaboration entre ses nombreux acteurs).
- À une échelle bien plus large si l'on considère tous les acteurs susceptibles de graviter de manière indirecte autour d'un projet donné (monde de la recherche, projets proches, etc.) dans le long terme.

### Généraliser le poste de « gestionnaire de données géographiques » dans les marchés d'AMO ou de MOE

Mission du gestionnaire de données géographiques

Archivage, conservation et transmission des données

Au début des années 2000 les postes d'environnementaliste ou les postes de responsable qualité n'apparaissent pas dans les organigrammes et n'étaient pas spécifiquement demandés par les donneurs d'ordre. A l'instar des « BIM managers » dans le bâtiment et dans les projets d'infrastructure, **les postes de « gestionnaire de données géographiques » devraient apparaître plus clairement.** Les postes de BIM Manager et de gestionnaire de données géographiques sont complémentaires. Ils utilisent en partie des données communes mais les utilisations qu'ils en font sont différentes (aspect construction ou aspect environnement).

Le gestionnaire de données géographiques a pour mission le suivi du respect des chartes de formatage des données qu'il a mis en place conformément aux exigences du MOA (mission partagée avec le BIM manager sur les objets en commun).

Il intègre les données reçues des différents fournisseurs dans le système de gestion des données par import des fichiers source. Le formatage de l'information et son intégration dans les bases de données doivent en effet être constantes tout au long du projet.

De là en découle la **mission d'archivage et de conservation des données** entrantes et des données injectées dans la base de données centrale après tri des données non utiles. Elles devront être classées suivant le PMQ et accessibles au besoin.

Enfin, les données projets, à la fin de la réalisation, vont devenir les nouvelles données territoriales de l'existant. Le gestionnaire de données géographiques assurera la transmission des informations nécessaires à la mise à jour des bases de données des différents acteurs du territoire.

<sup>24</sup> Building Information Model

<sup>25</sup> Dossier des Ouvrages Exécutés

**« Label Numérique »**

Ce type de volet numérique dans les cahiers des charges, s'il était établi sur la base d'un document validé par l'interprofession, pourrait permettre la labélisation « qualité des données numériques » d'un projet donné.

De même il serait possible d'imaginer qu'un projet ne puisse être labellisé « Numérique » que s'il dispose d'une base de données sur serveur partagé, base de production des prestataires. Dans ce cas :

- La qualité et la structuration des données devraient également être prises en compte dans cette démarche.
- Le flux des données et workflow de production seraient clairement identifiés et appliqués par tous les acteurs du projet.
- Le niveau de compétence des administrateurs et le plan de formation à l'utilisation des données par acteurs du projet seraient également à prendre en compte.

**De même on pourrait imaginer que, pour un projet donné, le label soit aussi conditionné par la mise à disposition de certaines données de conception pertinentes (à chaque niveau : APS, APD, PRO, EXE, DOE) sur un serveur « infrastructure de transport » accessibles à tous. Un travail de prospective plus approfondi reste à effectuer pour définir ces données et accès.**

### 3. SPÉCIFICATIONS SUR LES DONNÉES

#### Données à prendre en compte

Il s'agit de définir comment sont ou devraient être traitées les données pour une meilleure interopérabilité, indépendamment de leur format.

Les données à prendre en compte sont :

- Type de données : format.
- Les échelles : d'acquisition & de restitution.
- Précision (granularité) pour chaque type de données.
- **Structuration MCD<sup>26</sup>** – Arborescence attendue.
- Diffusion – Contrôle – Qualité des données.
- Modèle de données 3D.

#### Producteurs des données

Lors de la conception d'un projet, les spécifications détaillées sont généralement produites par les MOE et soumises au MOA.

Lors de la construction proprement dite, ce sont les entreprises de travaux qui produisent les données (EXE et DOE).

Mais, comme on l'a vu, d'autres acteurs sont susceptibles d'intervenir, notamment les organismes régaliens ou les acteurs de la recherche.

#### Éviter la production de données sectorisées

Les spécifications sur la donnée géographique doivent intégrer tous les métiers concernés par le projet et ne pas produire une donnée sectorisée comme c'est souvent le cas aujourd'hui. **Le déploiement du BIM sur les projets d'infrastructures doit permettre à terme de centraliser les données vectorielles et autres métadonnées du projet. Un mode de communication ou de centralisation des données géographiques et des données du projet sont donc à prévoir.**

<sup>26</sup> Modèle Conceptuel des Données

## 4. SPÉCIFICATIONS LOGICIELLES

### Contenu du chapitre

Malgré la bonne volonté des acteurs pour rendre leurs données interopérables, de nombreux freins existent. Ils sont liés à la perte de données lors de la conversion des données produites sous un logiciel précis dans un autre format que le format propriétaire de l'éditeur du logiciel.

Le présent chapitre vise à faire le **bilan des meilleurs outils** à utiliser selon les métiers et les tâches, pour retenir les meilleures solutions possibles quand on passe de l'un à l'autre (données géométriques et données attributaires).

### 4.1. Quels outils pour quels métiers ?

#### Diversité des formats

Les métiers de l'environnement et de l'infrastructure travaillent avec une quantité de données significatives. Chaque domaine a besoin et produit des données spécifiques. C'est pourquoi, jusqu'à aujourd'hui les outils métiers utilisent principalement des formats propriétaires.

#### Les outils, logiciels et formats utilisés selon les métiers

Pour différencier les logiciels couramment utilisés, ceux-ci ont été classés par domaine de métier. Il y a deux types de logiciels :

- Les logiciels de calcul (CAO, tableurs, logiciels spécifiques).
- Les logiciels de présentation des résultats de calculs et d'analyses (DAO, tableurs, traitement de texte, CAO, SIG, etc.).

Le tableau ci-dessous résume en partie les types de logiciel utilisés en fonction des domaines (en plus du traitement de texte).

Liste des métiers	Outils utilisés
Conception de projet : tracé, entrées en terre, etc.	CAO – DAO
Ouvrages d'art	CAO – DAO
Acoustique	Logiciel spécifique - SIG
Géotechnique	Tableur – logiciel spécifique – DAO - CAO
Assainissement	CAO – logiciel spécifique - Tableur
Etudes de Trafic	Logiciel spécifique – SIG - Tableur
Environnement	SIG - CAO

#### Éditeurs de logiciels

Voici la liste des principaux éditeurs logiciels utilisés dans les études d'infrastructures, par type d'outil :

Bureautique		DAO		CAO		SIG	
Éditeur	Logiciel	Éditeur	Logiciel	Éditeur	Logiciel	Éditeur	Logiciel
Microsoft	suite office	Autodesk	Autocad	Autodesk	Civil 3D	ESRI	ArcGIS
Apache OpenOffice	OpenOffice	ZW	ZWCad	Bentley	Power Civil / Rail Track	MapInfo	MapInfo
Google	Chrome + pluging office	Bentley	Microstation	Covadis	Covadis	Autodesk	Map 3D
		Veremes	FME*	Géomensura	Mensura	Logiciel libre	QGIS
				Autodesk	Revit / Inventor	format	City GML
				Robert McNeel & Associates	Rhino 3D	Veremes	FME*
				Veremes	FME*		

\* logiciel de conversion de format seulement, n'est pas utilisé en production de données

### Problèmes d'intégration

Même si les principaux éditeurs de logiciels tendent à ouvrir leur modèle de données vers une certaine interopérabilité, on rencontre encore des problèmes d'intégration. C'est principalement le cas entre la CAO et le SIG. Ces problèmes s'amplifient dès que la structure des fichiers DWG devient complexe.

## 4.2. Les propositions d'amélioration de logiciels pour réduire les perturbations sur le cycle de vie des données.

### Liste des améliorations par logiciel

Il s'agit ici de proposer aux principaux éditeurs de logiciels les améliorations en lien avec les besoins spécifiques des études d'infrastructures.

Logiciels	Propositions d'amélioration et commentaires
DAO	Améliorer la souplesse de structuration des dessins pour la pérennité.
	Améliorer la gestion des éléments « texte » et faciliter l'apport d'éléments descriptifs.
CAO	Améliorer la gestion des géométries, en particulier pour les éléments surfaciques et volumiques.
	Permettre une gestion des métadonnées et d'historisation des plans d'informations en se rapprochant des normes ISO ou IFC déjà utilisées.
	Améliorer la compatibilité de la symbologie avec les logiciels SIG (gestion des textures et des hachures).
SIG	Améliorer la compatibilité des éléments COGO générés par CAO ou SIG.
	Améliorer la performance des traitements 3D.
	Améliorer l'interopérabilité avec la CAO lorsque le SIG est en mode client/serveur.
CADNAA	Pour les SIG de type Autodesk, améliorer la qualité des sortants cartographiques, aujourd'hui non compatible avec les exigences graphiques nécessaires pour les dossiers réglementaires.
	Ce logiciel inégal et pour certains aspects insuffisants, notamment pour la gestion interne de l'information. Par exemple lors des exports (pour les études sur la pollution de l'air par exemple) il transforme la donnée à chaque fois. Il intègre déjà toutefois cityGML, et s'intéresse à l'interopérabilité (prémisse dans les outils Infra GML).

## 4.3. Réflexion sur les formats : vers la généralisation des formats standards (type cityGML, IFC, etc.)

### Vers une production en formats standards

Il faudrait passer d'une production de données aux formats propriétaires des logiciels leader du marché à une production à des formats standards, type :

- cityGML,
- IFC,
- infra-GML, qui remplace Land-XML, à l'instar de Rail-GML.

### Développer les serveurs de base de données avec accès réservé

Dans l'idéal les données d'infrastructures devraient être stockées sur des serveurs de bases de données, via des SGBD opensource.

Les données pourraient être ainsi exportées dans les différents logiciels selon les besoins et des nouvelles données pourraient être déposées. Cela ne veut pas dire que la donnée soit gratuite. Un système de geoportail des données d'infrastructures devrait être mis en place avec :

- contrôle d'accès,
- définition claire des droits de propriétés.

## 5. PROPOSITIONS DE NATURE NORMATIVE OU RÉGLEMENTAIRE

### Contenu du chapitre

Pour conclure ce cas d'usage, des propositions d'ajouts réglementaires sont proposées afin de dépasser les limites de la bonne volonté et du volontariat.

Après un rappel des normes et lois existantes, nous proposons des pistes de réflexion visant à améliorer le corpus réglementaire :

- en proposant de nouveaux éléments s'adaptant plus spécifiquement aux études d'infrastructures,
- en modifiant le corpus existant.

### 5.1. Rappel des réglementations et normes existantes pour l'interopérabilité des données

#### Spécifications et normes internationales

- OGC : Open Geospatial Consortium : Organisation internationale à but non lucratif qui a pour mission la mise à disposition de spécifications de services permettant l'interopérabilité des Systèmes d'Information Géographiques.
- ISO : Normes internationales qui ont pour objectif la normalisation des échanges de données. De nombreuses normes concernent l'information géographique.
- IFC : Industry Foundation Classes : elles sont comprises dans la norme ISO 10303-21. C'est le format d'échange préférentiel des acteurs de la construction du bâtiment et qui tend à devenir commun aux métiers de l'infrastructure. Ce format est compatible avec certains logiciels SIG en particulier ESRI.

#### Directive européenne : la Directive INSPIRE

Élaborée par la Direction générale de l'environnement de la Commission européenne, elle vise à établir en Europe une infrastructure de données géographiques pour assurer l'interopérabilité entre les bases de données géographiques des organismes publics et faciliter la diffusion, la disponibilité, l'utilisation et la réutilisation de l'information géographique en Europe.

#### Les normes nationales

Il existe de nombreuses normes AFNOR concernant la gestion des données numériques, dont de nombreuses sont spécifiques aux données géographiques :

- NF -252-000 Juillet 1999 : traitement de l'info-échange de données informatisées dans le domaine de l'information géographique (EDIGéo).
- NF-EN-ISO-28258-Décembre 2013 : échange numérique des données relatives au sol.

#### Guides et doctrines

Le **CNIG** : (conseil national de l'information géographique) est chargé d'éclairer le gouvernement dans le domaine de l'information géographique et en particulier sur l'amélioration des interfaces entre les différents acteurs. Le CNIG est surtout en charge de la coordination nationale de la directive INSPIRE. Il publie notamment des standards pour la structuration des données relatives aux documents d'urbanisme.

## 5.2. Nos premières propositions (tranche I)

Nos premières propositions	
Modification du corpus réglementaire	<u>Modifier le Code du Marché Public</u> pour que la livraison des fichiers natifs géographiques soit obligatoire en fin de prestation.
	<u>Modifier le Code l'Environnement</u> pour que les méthodes des études réglementaires incluent le partage des données natives (données de conception, traitement de données d'état initial), ce qui favoriserait le partage et le flux de données et serait un gage de transparence et de démocratie.
Modification des normes	<u>Création ou adaptation d'un label de type AFNOR</u> lié au projet, garantissant la qualité de la gestion des données numériques tout au long des projets.
	D'autres projets notamment avec Médiaconstruct travaillent sur ces points avec des spécialistes de normalisation loi MOP, etc.
Compléments aux éléments contractuels	Développer des guides pour la définition des données à échanger, à conserver, ainsi que les formats à utiliser.

# Table des matières

<b>I. CONTEXTE</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Définition du cas d'usage « Bruit et infrastructure »</b> .....	<b>3</b>
Objet du document.....	3
Échange et transformation d'information.....	3
Un contexte urbain, pour montrer la pertinence de la modélisation 3D.....	3
Phénomènes de pertes d'informations et de ressaisies .....	3
<b>1.2. Cadre réglementaire</b> .....	<b>4</b>
Présentation du cadre réglementaire .....	4
Obligations du MOA.....	4
Responsabilité du MOA.....	4
Dossiers des études.....	4
<b>2. PROCESSUS MÉTIER : LES OBJETS, FLUX DE DONNÉES ET LEURS TRAITEMENTS</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Problématique</b> .....	<b>5</b>
Questions abordées .....	5
<b>2.2. Méthodologie</b> .....	<b>5</b>
Composantes à prendre en compte.....	5
Présentation du processus complet de manipulation de l'information.....	5
Formalisme de représentation : l'UML.....	6
Définitions complémentaires sur l'UML .....	6
<b>2.3. Étapes métier du processus d'analyse acoustique</b> .....	<b>6</b>
Cas de la création d'une nouvelle infrastructure routière : étapes générales .....	6
Définition des objets manipulés .....	7
MNT : Modèle numérique de terrain.....	7
Plateforme existante.....	8
Plateforme projet.....	8
Bâtiment existant .....	8
Récepteur acoustique.....	8
Interface de tranchée couverte (TC) .....	8
Conditions météorologiques .....	9
Mur acoustique.....	9
Ouvrages de génie civil .....	9
Isophone .....	9
<b>2.4. Diagrammes de cas d'utilisation</b> .....	<b>10</b>
Précisions sur le formalisme.....	10
Définition des acteurs du cas d'usage.....	10
Conception de l'infrastructure.....	10
Autres acteurs .....	10
Définition des systèmes étudiés .....	11
Diagrammes des cas d'utilisation .....	11
Étude du modèle interne à l'outil CadnaA.....	11
Étude des sortants de CadnaA.....	12
Étude de la maquette numérique de synthèse.....	12
<b>2.5. Intégration des différents objets dans le processus d'étude acoustique</b> .....	<b>13</b>
Tableau récapitulatif.....	13
<b>2.6. Tableaux de synthèse des objets et transformations</b> .....	<b>14</b>
Préambule.....	14
Définition du formalisme utilisé.....	14
Modélisation de classes d'objets.....	14
Perceptory, outil de formalisme visuel complémentaire .....	15

Explication des diagrammes basés sur SADT .....	16
Application sur les objets du modèle acoustique .....	16
<b>3. ANALYSE DES INTERFACES ENTRE DONNÉES D'INFRASTRUCTURES ET DE SIMULATION DU BRUIT ..</b>	<b>17</b>
<b>3.1. Problématique .....</b>	<b>17</b>
Objectif de cette partie .....	17
Sources des problématiques identifiées.....	17
Distinguer les problématiques et proposer des solutions de structuration de l'information .....	17
<b>3.2. Analyses pour le cas d'usage « Infrastructures et bruit » .....</b>	<b>17</b>
Analyse des cas d'utilisation .....	17
Étude du modèle interne à l'outil CadnaA.....	17
Étude des sortants de CadnaA.....	18
Étude de la maquette numérique de synthèse.....	19
Concept de système pour la gestion des données.....	20
Définir les données du modèle transmises .....	20
Concept de système.....	20
Concept de niveau de détail et de niveau d'information.....	20
LOD et LODt.....	20
Remarques.....	20
État de la recherche sur la structuration de l'information et la modélisation pour les projets d'infrastructures linéaires .....	21
Les LODt, pour transcrire l'avancée de la conception .....	21
LODt et niveaux d'information et de détail.....	21
Nécessité d'un concept de niveau d'abstraction supérieur.....	22
L'unicité du LODt par objet n'est pas pertinente.....	22
Application au cas d'usage infrastructure et bruit .....	23
Application du concept de LOD et LODt.....	23
Contraintes liées aux données .....	24
Incohérences constatées.....	24
Occupation des bâtiments.....	24
Préconisations.....	24
Contraintes imposées par l'outil.....	24
Problématiques concernant le workflow .....	25
Différences de fréquence de mise à jour.....	25
Étude de la qualité de l'air .....	25
Impossibilité de connecter CadnaA directement à un GED.....	25
<b>4. HISTORISATION DES DONNÉES .....</b>	<b>26</b>
Historisation des données.....	26
Pendant le projet .....	26
Suite aux études techniques .....	26
Sous quelle forme conserver ces données ? .....	27
<b>5. INTERFACES POUR L'INTÉGRATION DE DONNÉES CONCERNANT LA FAUNE.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1. Problématique .....</b>	<b>28</b>
Une partie complémentaire du rapport 6.2.....	28
Questions principales .....	28
Questions liées .....	28
Exemples.....	28
<b>5.2. Introduction .....</b>	<b>29</b>
Prendre en compte les couloirs de dispersion des espèces.....	29
Barrière physique et barrière par effarouchement.....	29
Différents types d'impact du bruit.....	29
Objectif de cette section .....	29
<b>5.3. Que sait-on de l'impact du bruit d'une ITT sur les processus écologiques ? .....</b>	<b>29</b>
Introduction.....	29

Synthèse des études bibliographiques traitant des impacts du bruit sur la faune .....	30
Impact sur le comportement de prospection .....	30
Impact sur le comportement de dispersion et colonisation .....	31
Exemple des oiseaux .....	31
Exemple des grands mammifères .....	31
Impact sur la chasse.....	32
Exemple des hiboux et chauve-souris : travaux de Barber .....	32
Travaux de Schaub, Ostwald et Siemers .....	32
Travaux de Jones.....	32
Impact sur la communication entre partenaires et la reproduction .....	32
Plasticité du chant des oiseaux, ou effet Lombard.....	33
Mise en perspective des résultats sur la reproduction .....	33
Conclusion.....	34
<b>5.4. Principe et pratiques de l'intégration du bruit dans les outils de modélisation de la faune.....</b>	<b>34</b>
Les acteurs susceptibles d'utiliser les données bruit.....	34
Principe de l'utilisation des données de bruit dans la modélisation des déplacements de la faune .....	34
Impact du bruit sur la qualité de l'habitat naturel en tant que milieu de résidence de l'espèce .....	34
Impact du bruit sur la qualité de l'habitat en tant que milieu de passage de l'espèce .....	34
Adéquation entre les données de bruit dans la modélisation de la faune .....	35
Principe du flux d'information envisagé entre les écologues et les acousticiens .....	36
Conclusions.....	37
Difficulté à intégrer ces données dans le processus global du BIM .....	37
Point bloquant : workflow et utilisation des données entre acousticiens et écologues .....	37
Une recherche dans une phase prospective .....	37
<b>5.5. Conclusions et perspectives .....</b>	<b>37</b>
Une étude du workflow.....	37
Blocages identifiés.....	37
Une perpétuelle transformation des données .....	38
Format ouvert CityGML.....	38
<b>6. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1. Partie I.....</b>	<b>39</b>
<b>6.2. Partie 2.....</b>	<b>40</b>
<b>7. ANNEXES.....</b>	<b>42</b>
<b>7.1. Annexe I .....</b>	<b>42</b>
Objet MNT.....	42
Objet Plateforme existante .....	43
Objet Plateforme projet .....	44
Objet Bâtiment existant .....	45
Objet Interface de tranchée couverte existante .....	46
Objet Interface tranchée couverte projet .....	46
Objet Mur acoustique projet.....	47
Objet Récepteur acoustique.....	48
Objet Isophone.....	49
<b>I. OBJECTIFS ET STRUCTURE DU RAPPORT .....</b>	<b>52</b>
<b>I.1. Objectifs .....</b>	<b>52</b>
Suivi de mesures environnementales.....	52
Cas d'usage : tronçon d'autoroute .....	52
Annexe .....	52
<b>I.2. Quelles données, pour quoi faire ? .....</b>	<b>53</b>
Données nécessaires.....	53
En cas de litige .....	53
Étapes prises en compte .....	53

Autres données .....	53
<b>1.3. Structure de ce rapport .....</b>	<b>54</b>
Clé de lecture du rapport .....	54
Structure des chapitres .....	54
Chapitres prospectifs .....	54
Présentation des conclusions .....	54
Formalisme .....	54
<b>2. LES DONNÉES À PRENDRE EN COMPTE, LEUR USAGE TOUT AU LONG DU PROJET ET LES BESOINS EN TERMES DE VISUALISATION ET STOCKAGE.....</b>	<b>55</b>
Une grande diversité des données d'entrée .....	55
<b>2.1. Au début d'un projet (conception d'une nouvelle infrastructure ou modification significative d'une infrastructure existante). Stade de l'avant-projet AVP .....</b>	<b>55</b>
Liste des données .....	55
<b>2.2. Stade des enquêtes publiques (DUP, parcellaire, police de l'eau) et des dossiers réglementaires (CNP).....</b>	<b>56</b>
Une synthèse des enjeux et des impacts .....	56
Liste des dossiers produits .....	56
<b>2.3. Principaux livrables et objets .....</b>	<b>56</b>
Inventaires initiaux .....	56
Ce que l'on espère.....	56
Ouvrages de transparence écologique prévus .....	57
Ce que l'on attend .....	57
<b>2.4. Phase de construction .....</b>	<b>59</b>
Modifications en cours de construction .....	59
Ce que l'on attend .....	59
<b>2.5. Processus de création, modèle de données et représentation 3D .....</b>	<b>60</b>
Critères pris en compte dans le processus de création .....	60
Ce que l'on attend .....	60
Schéma de données actuel .....	60
Données d'entrée et outils utilisés .....	61
<b>3. ZOOM SUR LES INTERFACES ENTRE LES DONNÉES D'INFRASTRUCTURE ET LES AUTRES DONNÉES : EXEMPLE DE MODÉLISATION 3D DE L'ÉCO-PONT DE PEYREHARASSE DE L'A64.....</b>	<b>62</b>
Rédacteur.....	62
<b>3.1. Entrants et processus.....</b>	<b>62</b>
Précisions sur les entrants .....	62
Entrants utilisés pour la modélisation.....	62
Exemple de maquette.....	62
Extraction d'objets 3D .....	63
<b>3.2. Quels outils ? .....</b>	<b>64</b>
Liste des outils .....	64
<b>3.3. Retour d'expérience sur ce travail .....</b>	<b>64</b>
Un travail qui a permis de préciser les exigences liées à la modélisation d'un ouvrage .....	64
Piste d'amélioration pour projets similaires .....	64
<b>4. QUELLES MÉTRIQUES POSSIBLES POUR CALCULER LA FRAGMENTATION DUE À UNE INFRASTRUCTURE ET L'APPORT DE PASSAGE À FAUNE (TYPE ÉCO-PONT) .....</b>	<b>65</b>
Rédacteur.....	65
<b>4.1. Introduction .....</b>	<b>65</b>
L'exigence de l'étude des fonctions écologiques .....	65
Exigences européennes .....	65
Exigences françaises .....	65
Objectifs de la trame verte et bleue (TVB).....	65
La connectivité fonctionnelle pour l'évaluation de la fragmentation par une ILT.....	66

Les métriques de la connectivité .....	66
<b>4.2. Pratiques d'évaluation de la fragmentation dans les études de projets d'infrastructures.....</b>	<b>67</b>
<b>Évaluation de la fragmentation par les méthodes empiriques .....</b>	<b>67</b>
Configuration paysagère et métriques de connectivité structurelle: .....	67
Ce que l'on espère.....	67
Évaluation de la connectivité à partir d'observations faunistiques et avis d'expert.....	68
Ce que l'on attend .....	70
Note sur cette approche.....	70
<b>Estimation de la connectivité par modélisation .....</b>	<b>70</b>
Un réalisme limité.....	70
Informations préalables à l'utilisation des modèles de métapopulations .....	70
Modèles de déplacement simplifiés.....	70
Métriques de connectivité produites.....	70
<b>Limites des méthodes actuelles .....</b>	<b>71</b>
Besoin en méthodes quantitatives, encouragées par l'Union européenne.....	71
Ce que cela implique pour l'intégration dans la maquette numérique.....	71
<b>4.3. Éléments prospectifs transférables au plan opérationnel à brève échéance .....</b>	<b>71</b>
<b>Amélioration de l'utilisation des méthodes de terrain.....</b>	<b>71</b>
Les outils de CMR.....	72
Les outils de la génétique .....	72
<b>Modélisation de la connectivité fonctionnelle des réseaux écologiques.....</b>	<b>72</b>
Les modèles comportementalistes sont les plus réalistes.....	72
Plateformes de modélisation : simulations possibles et plateformes opérationnelles.....	72
Des métriques quantitatives.....	72
Études en cours.....	73
Stockage requis.....	73
Ce que l'on attend .....	73
<b>4.4. Quel apport possible de la 3D ? .....</b>	<b>74</b>
<b>Rédacteur.....</b>	<b>74</b>
<b>Principes de base.....</b>	<b>74</b>
<b>Cas des remblais .....</b>	<b>74</b>
<b>Cas des déblais .....</b>	<b>74</b>
<b>5. LES COMPENSATIONS ET MESURES DE RÉDUCTION : COMMENT LES CALCULER ? COMMENT ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES MESURES DANS LE TEMPS ? .....</b>	<b>75</b>
<b>Rédacteurs .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Méthode courante de calcul des compensations .....</b>	<b>75</b>
<b>La doctrine ERC .....</b>	<b>75</b>
Méthode surfacique .....	75
Méthode pour définir les mesures compensatoires dans le cas d'une autoroute .....	75
<b>Prise en compte des arrêtés.....</b>	<b>76</b>
<b>Quel intérêt pour un maître d'ouvrage ? .....</b>	<b>76</b>
<b>La méthodologie appliquée sur l'A63 par ASF .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2. Méthode prospective pour le calcul des compensations.....</b>	<b>78</b>
<b>Notions liées à la compensation fonctionnelle.....</b>	<b>78</b>
Définition d'une mesure de compensation fonctionnelle efficace .....	78
<b>Cadre méthodologique du calcul et de l'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction et de compensation des impacts sur la fonctionnalité des réseaux écologiques .....</b>	<b>78</b>
Étape 1 : Choix des espèces, méthodes d'acquisition des données et de la périodicité des suivis .....	78
Étape 2 : État initial et calcul des mesures de réduction et compensation .....	80
Étape 3 : Évaluation de l'efficacité des mesures et suivis au cours des travaux et de la mise en place des mesures.....	81
<b>6. L'HISTORISATION : QUELLES DONNÉES CONSERVER ? .....</b>	<b>83</b>
<b>Rédacteur.....</b>	<b>83</b>
<b>Préambule.....</b>	<b>83</b>
<b>6.1. Réglementation actuelle.....</b>	<b>83</b>
<b>Demandes d'autorisation de dérogation .....</b>	<b>83</b>

Contenu des arrêtés.....	84
Démarche pour une demande de dérogation .....	84
Des données qui alimentent le socle commun des mesures compensatoires .....	84
<b>6.2. Acteurs impliqués.....</b>	<b>85</b>
<b>Un nombre important d'acteurs.....</b>	<b>85</b>
<b>6.3. Les données de conception et de réalisation, état 0 .....</b>	<b>86</b>
<b>Exigences de conservation et données concernées.....</b>	<b>86</b>
Exemple des données initiales conservées (ASF-A63).....	86
Visuels.....	86
<b>6.4. Le suivi des mesures de transparence écologique .....</b>	<b>87</b>
<b>Pertinence et efficacité des mesures écologiques .....</b>	<b>87</b>
<b>6.5. Le suivi des mesures de compensation : la vie administrative des compensations .....</b>	<b>88</b>
<b>Complexité du volet administratif.....</b>	<b>88</b>
<b>Modalités de sécurisation foncière .....</b>	<b>88</b>
<b>Prédiagnostics écologiques.....</b>	<b>88</b>
<b>6.6. Quels modèles pour historiser au mieux les données ?.....</b>	<b>89</b>
<b>Exemples de fichiers Excel.....</b>	<b>89</b>
Identification des parcelles .....	89
Stockage et diffusion des données .....	90
<b>7. MÉTHODE PROSPECTIVE POUR LA LOCALISATION DES ÉCO-PONTS PAR SIMULATION.....</b>	<b>91</b>
<b>Rédacteur.....</b>	<b>91</b>
<b>Trouver, grâce aux données numériques, la localisation optimale d'un éco-pont .....</b>	<b>91</b>
Contenu du chapitre .....	91
<b>7.1. Simulation numérique de déplacements animaliers dans un espace géographique numérique en 2D5</b>	<b>91</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>91</b>
Type de déplacement .....	91
Espèces étudiées.....	91
<b>Fonctionnement résumé.....</b>	<b>92</b>
Analyses de préférence.....	92
Moteur de déplacement.....	92
Question principale.....	92
<b>7.2. Conception d'un modèle de simulation de déplacement animalier.....</b>	<b>92</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>92</b>
<b>Démarche globale pour la construction du modèle.....</b>	<b>93</b>
<b>L'acquisition des connaissances par analyse des traces et du paysage .....</b>	<b>93</b>
Analyse des traces GPAS.....	93
Prise en compte du milieu .....	94
Croisement des données.....	94
Analyses et conclusions intégrées au modèle de simulation.....	95
<b>Modèle de simulation .....</b>	<b>95</b>
Principe de distinction entre l'espace topographique et l'espace perçu.....	95
Composition de l'espace fonctionnel d'une espèce.....	95
Codage des déplacements : paradigme Agent .....	96
Perception, sélection de destination et déplacement s'appuient sur l'espace fonctionnel.....	98
Obstacles et traversabilité.....	98
Deux types de déplacement prévus dans les simulations.....	98
Format des développements.....	98
<b>7.3. Expérimentations pour évaluer l'impact d'infrastructures et d'aménagements .....</b>	<b>99</b>
<b>Deux types d'expérimentations .....</b>	<b>99</b>
<b>Exemple de simulation.....</b>	<b>99</b>
Exemple de simulation à destination libre.....	100
Simulations sur de nouveaux espaces géographiques.....	101
Cas 1 .....	101
Cas 2.....	101
<b>7.4. Comment aller plus loin avec un modèle 3D complet.....</b>	<b>102</b>

<b>Retour sur les données utilisées dans Jolivet 2014 .....</b>	<b>102</b>
Limites portant sur les traces animalières.....	102
Limites portant sur les données géographiques.....	102
Un RGE plus simple que la réalité.....	103
<b>Faire de la simulation avec des données 3D, plus précises .....</b>	<b>103</b>
Possibilités et limites.....	103
Le challenge de l'intégration des données et de résolutions numériques supérieures.....	103
La simulation, un outil majeur d'aménagement du territoire .....	103
<b>8. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>104</b>
<b>8.1. Bibliographie citée.....</b>	<b>104</b>
<b>8.2. Autre bibliographie .....</b>	<b>105</b>
<b>9. ANNEXE.....</b>	<b>107</b>
<b>9.1. Annexe A – Éléments de contexte : réglementations, TVB et études d'impacts .....</b>	<b>107</b>
<b>Rédacteur.....</b>	<b>107</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>107</b>
Contradiction entre objectifs de conservation des espèces et aménagement.....	107
Études d'impact .....	107
Contexte du Grenelle I et II .....	107
Objectifs de la Trame verte et bleue .....	107
Contenu du chapitre .....	107
<b>La composante réglementaire .....</b>	<b>107</b>
Les dispositions de Grenelle I et II .....	107
Décret du 27 décembre 2012 .....	108
<b>Une famille de dispositifs utiles pour la mise en œuvre des trames vertes et bleues.....</b>	<b>108</b>
Outils nécessaires à la mise en œuvre des TVB.....	108
Prise en compte des TVB .....	108
Définition des TVB.....	109
Étapes de construction des TVB .....	110
Exemple de TVB dans un Scot.....	111
<b>Méthodes : SIG, analyse photographique et inventaires .....</b>	<b>112</b>
Formations proposées par le centre de ressources TVB.....	112
<b>Rappels sur le processus général pour les études d'impacts.....</b>	<b>113</b>
Un contenu proportionné.....	113
Contenu de l'étude d'impact.....	113
Responsabilités et publicité .....	114
Finalités pour la mise en place d'une stratégie TVB locale (source : ENRx – les référentiels techniques pour les territoires) .....	114
<b>I. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....</b>	<b>116</b>
<b>Contexte .....</b>	<b>116</b>
Éléments perturbateurs de la bonne gestion des données .....	116
<b>Objectifs .....</b>	<b>116</b>
<b>2. SPÉCIFICATIONS À L'USAGE DES ACTEURS (SPÉCIFICATION « MÉTIERS »).....</b>	<b>117</b>
<b>Contenu du chapitre.....</b>	<b>117</b>
<b>2.1. Rappel du jeu d'acteurs sur les données .....</b>	<b>117</b>
Des acteurs divers.....	117
Acteurs en interface .....	117
Rôles et responsabilités.....	117
<b>2.2. Propositions d'amélioration .....</b>	<b>118</b>
Résumé des solutions proposées .....	118
<b>Volet « gestion des données géographiques » à inclure dans les CCTP de marchés publics .....</b>	<b>118</b>
<b>Généraliser les bases de données géographiques numériques sur serveur partagé.....</b>	<b>119</b>
À l'échelle d'un projet : vers une base de données géographiques partagée en ligne pour les projets conséquents.....	119
Plus généralement : nous proposons la mise en place de serveurs « infrastructure de transport » avec toutes les données au fur et à mesure de l'avancée de la conception (AVP, EXE puis DOE).....	119
<b>Généraliser le poste de « gestionnaire de données géographiques » dans les marchés d'AMO ou de MOE.....</b>	<b>119</b>
Mission du gestionnaire de données géographiques.....	119
Archivage, conservation et transmission des données .....	119

« Label Numérique ».....	120
<b>3. SPÉCIFICATIONS SUR LES DONNÉES.....</b>	<b>121</b>
Données à prendre en compte.....	121
Producteurs des données.....	121
Éviter la production de données sectorisées.....	121
<b>4. SPÉCIFICATIONS LOGICIELLES .....</b>	<b>122</b>
Contenu du chapitre.....	122
<b>4.1. Quels outils pour quels métiers ? .....</b>	<b>122</b>
Diversité des formats .....	122
Les outils, logiciels et formats utilisés selon les métiers .....	122
Éditeurs de logiciels .....	122
Problèmes d'intégration.....	123
<b>4.2. Les propositions d'amélioration de logiciels pour réduire les perturbations sur le cycle de vie des données.....</b>	<b>123</b>
Liste des améliorations par logiciel .....	123
<b>4.3. Réflexion sur les formats : vers la généralisation des formats standards (type cityGML, IFC, etc.) ...</b>	<b>123</b>
Vers une production en formats standards .....	123
Développer les serveurs de base de données avec accès réservé .....	123
<b>5. PROPOSITIONS DE NATURE NORMATIVE OU RÉGLEMENTAIRE .....</b>	<b>124</b>
Contenu du chapitre.....	124
<b>5.1. Rappel des réglementations et normes existantes pour l'interopérabilité des données.....</b>	<b>124</b>
<b>5.2. Nos premières propositions (tranche I) .....</b>	<b>125</b>

# Sommaire des figures

Exemple de projet routier vu en 3D.....	3
Exemple de mise en place de murs antibruit en phase étude d'impact (source : Egis).....	4
Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement (ou d'une nouvelle infrastructure routière).....	7
MNT (avec orthophoto drapée) avant le projet (à gauche) et après le projet (à droite).....	7
Maquette numérique de synthèse avec MNT et bâtiments existants .....	8
Récepteur acoustique.....	8
Valeurs d'occurrences météorologiques favorables, pour la ville de Lyon dans toutes les directions.....	9
Exemple d'isophones en vue 3D sur un projet routier : les isophones délimitent l'emprise de chaque couleur, qui correspond à un niveau de bruit (source : Egis).....	9
Illustration du formalisme pour les cas d'utilisation .....	10
Cas d'utilisation du modèle 3D interne à l'outil CadnaA .....	11
Cas d'utilisation des sortants de l'outil métier CadnaA.....	12
Vue de la maquette numérique de synthèse, pour comparaisons avec l'image de la page 4.....	12
Cas d'utilisation de la maquette numérique de synthèse. Le BE Acoustique aliment la MN de synthèse au travers de la modélisation faite par le Bureau maquette. Selon les outils de MN de synthèse, il se peut que le Bureau Maquette n'existe pas. L'intégration entre base de données et MN est directe, sous condition d'interopérabilité principalement. ....	13
Les étapes 1 à 6 sont celles décrites dans le schéma de la page 7 « Étapes pour l'étude d'impact acoustique de la création d'un rétablissement. Les parenthèses dans ce tableau indiquent que ces objets n'apparaissent qu'après la première itération (après la première étape 6). ....	13
Classe d'objets.....	14
Principaux pictogrammes spatiaux de PERCEPTORY, d'après (Larrivée et al., 2006), image de (Zoghلامي, 2013) .	15
Légende de diagramme SADT modifié : les entrants sont ici les objets manipulés avec le formalisme UML + PERCEPTORY.....	16
Modélisation des niveaux de bruit par récepteur (éléments verts, jaunes, oranges ou rouges : légende de couleur réglementaire) ; il existe plusieurs récepteurs pour chaque bâtiment, répartis selon les étapes et façades exposées (voir page 8 « Récepteur acoustique ») ; ici un seul scénario est représenté. Vue de la MN de synthèse	18
Incohérence entre l'implantation d'un mur antibruit et la plateforme projet. Vue de la MN de synthèse .....	19
Objet mur acoustique à l'export.....	19
Illustration des LOD à gauche (Norme de CityGML, 2012) et des LODt à droite (BIMForum, 2014).....	21
Comparaison des concepts explicites (+) et implicites (-) portés par les LOD et LODt (0 signifie que les concepts ne sont pas gérés par les LOD ou LODt). Figure extraite de (C. Tolmer, Castaing, Morand, & Diab, 2015).....	21
Plan d'Avant-Projet Sommaire : (1) la géométrie du tracé routier est parfaitement définie et détaillée (LOD et LODt élevés) ; (2) pour les bassins (cercles bleus), on a déjà fixé assez précisément leur nombre, leur volume, leur implantation spatiale, leur géométrie (principalement au travers de la proportion réglementaire entre largeur et longueur) et vérifié la faisabilité technique : seule la complexité de la forme géométrique n'est pas précise (LOD moyen et LODt élevé), (3) les études hydrauliques d'écoulement des eaux naturelles sont précises à cette phase, mais leur représentation est schématique (LOD faible et LODt élevé).....	22
Liens entre les Systèmes et les objets (le type de trait n'a pas de signification, il sert seulement à faciliter la lecture ; les boîtes avec un point d'exclamation indiquent que la géométrie est « complexe » : elle n'est pas unique et peut varier selon le LODt de l'objet (avancement de la conception) et le LOD demandé pour une utilisation particulière, ici une étude acoustique.....	23
Schéma de prise en compte des données acoustiques en fonction des espèces .....	33

Étude prospective du flux d'informations entre la modélisation du bruit et de la faune au cours de la conception d'un éco-pont.....	35
Principe du flux d'information envisagé entre les écologues et les acousticiens pour une étude visant à concevoir un éco-pont. ....	36
Processus récurrent de transformation des données dans un projet de conception d'infrastructure. Ce diagramme générique peut s'appliquer aux données de nombreux métiers d'un projet. Extrait de (C. Tolmer, 2016) .....	38
Modélisation d'éléments urbains en CityGML dans l'outil CadnaA (source du modèle CityGML : <a href="http://www.citygml.org/?id=1539">http://www.citygml.org/?id=1539</a> ) .....	38
Objet MNT.....	42
Objet Plateforme existante .....	43
Objet Plateforme projet .....	44
Objet Bâtiment existant .....	45
Objet Interface de tranchée couverte existante .....	46
Objet Interface tranchée couverte projet .....	46
Objet Mur acoustique projet.....	47
Objet Récepteur acoustique.....	48
Objet Isophone.....	49
Relevé topographique par méthode Lidar et socle 3D réaliste (ASF – A63).....	57
Exemple de conception et de réalisation de dérivation définitive de cours d'eau – Projet SEA (plans Autocad et schéma de principe en 2D) .....	58
Modèle numérique de terrain 3D (Autocad) .....	58
Flux WMS des DREAL sur orthophotos de l'IGN .....	59
Exemple de carte de synthèse des enjeux faune .....	59
Processus de construction de l'éco-pont (formalisme inspiré par UML & SADT) .....	60
Schéma de données pour la conception de l'éco-pont .....	61
Étapes-données-logiciels .....	61
Intégration du projet sur un socle 3D .....	62
Modélisation et visualisation des aménagements écologiques .....	63
Visualisation du modèle avec FZK Viewer .....	63
Schéma de production des métriques de la connectivité structurelle.....	67
Exemples de photographies nocturnes prises par un photo-piège .....	68
Exemple de carte produite sur avis d'expert motivé par les résultats d'inventaires et de l'occupation du sol (d'après Marchis, 2013) .....	69
Schéma de production des métriques de connectivité à partir de données de suivi de terrain actuellement utilisées.....	69
Schéma de production des métriques de connectivité à partir d'outils de modélisation.....	70
Prise d'un échantillon pour l'analyse génétique de l'individu par swap .....	71
Exemple de Capture-Marquage-Recapture :.....	71
À gauche, un Orthetrum bleuisse marqué au feutre. ....	71
À droite, un triton palmé marqué avec un implant visuel en élastomère et illustration d'un prélèvement non invasif de génétique sur un crapaud accoucheur. ....	71
Exemple de localisation des surfaces de compensation autour de la A63 .....	76
Évolution des suivis au cours de terrain du projet d'ITT.....	82
Exemple des acteurs impliqués sur le projet SEA.....	85
Repérage des parcelles de compensation sur un socle 3D (couleur par propriétaire).....	86
Visualisation des parcelles de compensation à proximité de l'infrastructure, et de la limite du domaine public autoroutier.....	87
Exemples de fichiers Excel.....	89

<b>Schéma de données pour l'historisation des parcelles de compensation .....</b>	<b>90</b>
<b>Un processus à base de connaissances et de simulation (d'après Jolivet 2014).....</b>	<b>93</b>
<b>Sources de données pour décrire le paysage © Jolivet 2014 .....</b>	<b>94</b>
<b>Analyse des préférences pour l'espace vital d'un renard © Jolivet 2014 .....</b>	<b>94</b>
<b>Analyse des traces : obstacles, zones d'attractions et franchissement © Jolivet 2014 .....</b>	<b>95</b>
<b>L'espace vu par un individu d'une espèce © Jolivet 2014 .....</b>	<b>96</b>
<b>Attributs et méthodes d'un agent-animal (Jolivet 2014) .....</b>	<b>97</b>
<b>Méthodes pour contourner un obstacle pour d'atteindre une destination (Jolivet 2014) .....</b>	<b>98</b>
<b>Simulation de déplacements d'un agent-renard en zone périurbaine (Jolivet 2014) .....</b>	<b>99</b>
<b>Simulation de déplacements d'un agent-renard en fixant les points de départ (Jolivet 2014).....</b>	<b>100</b>
<b>Ajout d'une infrastructure et d'aménagements pour étudier les déplacements (Jolivet 2014).....</b>	<b>101</b>
<b>Carte des nouveaux déplacements des animaux.....</b>	<b>101</b>
<b>Les abords des infrastructures .....</b>	<b>103</b>
<b>Sources pour construire des trames (Brouard-Masson et Miquel, 2011).....</b>	<b>109</b>
<b>Dessin des TVB dans un Scot. Identification des obstacles et des menaces (sources CETE - Est ) .....</b>	<b>111</b>