



HAL
open science

Analyse expérimentale des traversées d'une infrastructure routière par la petite faune : Suivi photo et vidéo des hamstéroducts

Jonathan Jumeau, Yves Handrich

► **To cite this version:**

Jonathan Jumeau, Yves Handrich. Analyse expérimentale des traversées d'une infrastructure routière par la petite faune : Suivi photo et vidéo des hamstéroducts. [Rapport de recherche] DREAL Alsace; CNRS IPHC Strasbourg. 2016. hal-01406451

HAL Id: hal-01406451

<https://hal.science/hal-01406451>

Submitted on 1 Dec 2016

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

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

DREAL Alsace
Service TRANSPORTS

Pôle Maitrise d'Ouvrage

CNRS - DEPE

Septembre 2013

Analyse expérimentale des traversées d'une infrastructure routière par la petite faune

Suivi photo et vidéo des hamstéroducts



UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Jumeau J ; Handrich Y

Référence des Intervenants

<i>Jumeau Jonathan</i>	<i>DREAL PMO - CNRS DEPE</i>	<i>06 07 62 33 63</i>
<i>Handrich Yves</i>	<i>CNRS DEPE</i>	<i>03 88 10 69 32</i>

Handrich Yves



Jumeau Jonathan



Le 28 Octobre 2013



Sommaire des parties

	Page
Introduction	6
Matériel et méthode	12
<i>A) Zone d'étude</i>	12
<i>B) Système Photo</i>	12
<i>C) Système Vidéo</i>	14
<i>D) Données</i>	16
Résultats	20
<i>A) Efficacité des systèmes utilisés</i>	20
<i>B) Bilan global spécifique</i>	26
1) Qui traverse ?	26
2) A quelle fréquence ?	26
3) Quand ?	28
4) Où ?	32
5) Comment ?	34
6) Anecdotes	36
Discussion	38
Conclusion	46
Bibliographie	48



Sommaire des illustrations

A : Impacts liés à la construction d'une nouvelle route	7
B : Augmentation de la densité du réseau routier national 1970-2001	9
C : Les différents types de passages empruntables par la faune	9
D : Emplacement de la zone d'étude	11
E : Emplacement des passages à faune équipés	13
F : Type et coefficient d'ouverture des hamstéroducts	15
G : Géométrie des hamstéroducts	15
H : Profil en travers d'un hamstéroduct	15
I : Photos de différents passages à faune suivis	15
J : Système de suivi d'un hamstéroduct	17
K : Répartition des différents évènements dus aux mulots	21
L : Signification des ratios et évènements détectés	23
M : Courbe d'efficacité des ratios photographiques	23
N : Comportement de fuite et de méfiance vis-à-vis du dispositif de suivi	23
O : Nombre d'évènements totaux et de refus avant et après le jour du relevé des médias	24
P : Nombre d'évènements de carnivores et temps de décision avant et après le jour du relevé des médias	24
Q : Courbe de relation entre temps de suivi et biodiversité observée	25
R : Quelques animaux observés	27
S : Répartition par espèce des types d'évènements	27
T : Répartition horaire des évènements	29
U : Répartition horaire par espèce des évènements	29
V : Résultats des tests statistiques sur l'effet de la météo	30
W : Courbe de relation entre avancement de l'année et le nombre d'évènements	31
X : Variation saisonnière par espèce des évènements	31
Y : Utilisation spécifique des différents types de passage	33
Z : Utilisation globale des différents hamstéroducts	33
AA : Vitesse de traversée des hamstéroducts par espèce	35



Lexique

- CETE : Centre d'Etude Technique et de l'Equipement
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
- CVF : Collision véhicule-faune
- DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- PAF : Passage à faune
- SCOT : Schéma de Cohérence Territoriale
- TVB : Trame Verte et Bleue



Introduction

La modification des habitats est la principale cause du déclin de la biodiversité (Convention sur la diversité biologique 2010). Ce changement de l'environnement s'opère le plus souvent par la destruction directe de l'habitat, conduisant à une diminution progressive de la taille et de la qualité des milieux de vie, ou encore par la fragmentation du paysage qui induit une augmentation des taux de consanguinité et de la dérive génétique (Fahrig, 2003 ; Mata et al., 2008 ; Glista 2009). Selon l'écologie du paysage, ces milieux hétérogènes sont composés d'une matrice inhospitalière incluant des zones refuges abritant les différentes espèces (Ricklefs & Miller, 2009). Enrayer le déclin de la biodiversité liée à la fragmentation revient ainsi à former un réseau écologique entre les zones refuges ; il s'agit du concept de corridor écologique permettant la dispersion des individus et les échanges génétiques entre populations isolées (Hardy et al., 2003).

A l'échelle régionale et parfois internationale, le rétablissement des continuités écologiques s'effectue selon des plans d'aménagement et de gestion des espaces tels que les SCOT (Schéma de cohérence territoriale) et le concept français de trame verte et bleue (TVB). Ces plans d'action nationaux s'insèrent dans le projet de réseau européen Natura 2000 (Scoters 2012). A l'échelle locale, la cohérence écologique des corridors entre les zones refuges est souvent mise en défaut par les linéaires artificiels tels que les routes, les canaux, les voies ferrées ou les lignes électriques créant une discontinuité des paysages (Mortelliti et al., 2010).

Le problème posé par ces différentes infrastructures est complexe car ces dernières endossent différentes fonctions écologiques, pas toujours néfastes. Un linéaire peut ainsi jouer un rôle négatif, tels que celui de puits (zone d'extinction), de barrière (non franchissement), de filtre (sélection des espèces pouvant franchir le linéaire), tous néfastes à la biodiversité ; ou positif, tels celui de corridor (dispersion longitudinale de reptiles le long des talus des voies ferrées) ou même d'habitat (Munguira & Thomas, 1992 ; Spelleberg, 1998). Les linéaires sont ainsi souvent inclus dans les espaces vitaux des espèces. Par exemple, un canal peut servir d'habitat pour de nombreuses espèces aquatiques, jouant un rôle important dans la cohérence territoriale de la trame bleue, tant en étant un puits (berge non aménagées pour la remontée de toute une diversité de faune), un filtre (certaines espèces volantes d'insectes) et une barrière (Peris & Morales, 2004). Aussi, la problématique posée par ces infrastructures est d'autant plus complexe qu'elles sont directement utilisées par l'homme pour le transport et l'acheminement des énergies et données (McCollister & Manen, 2010).



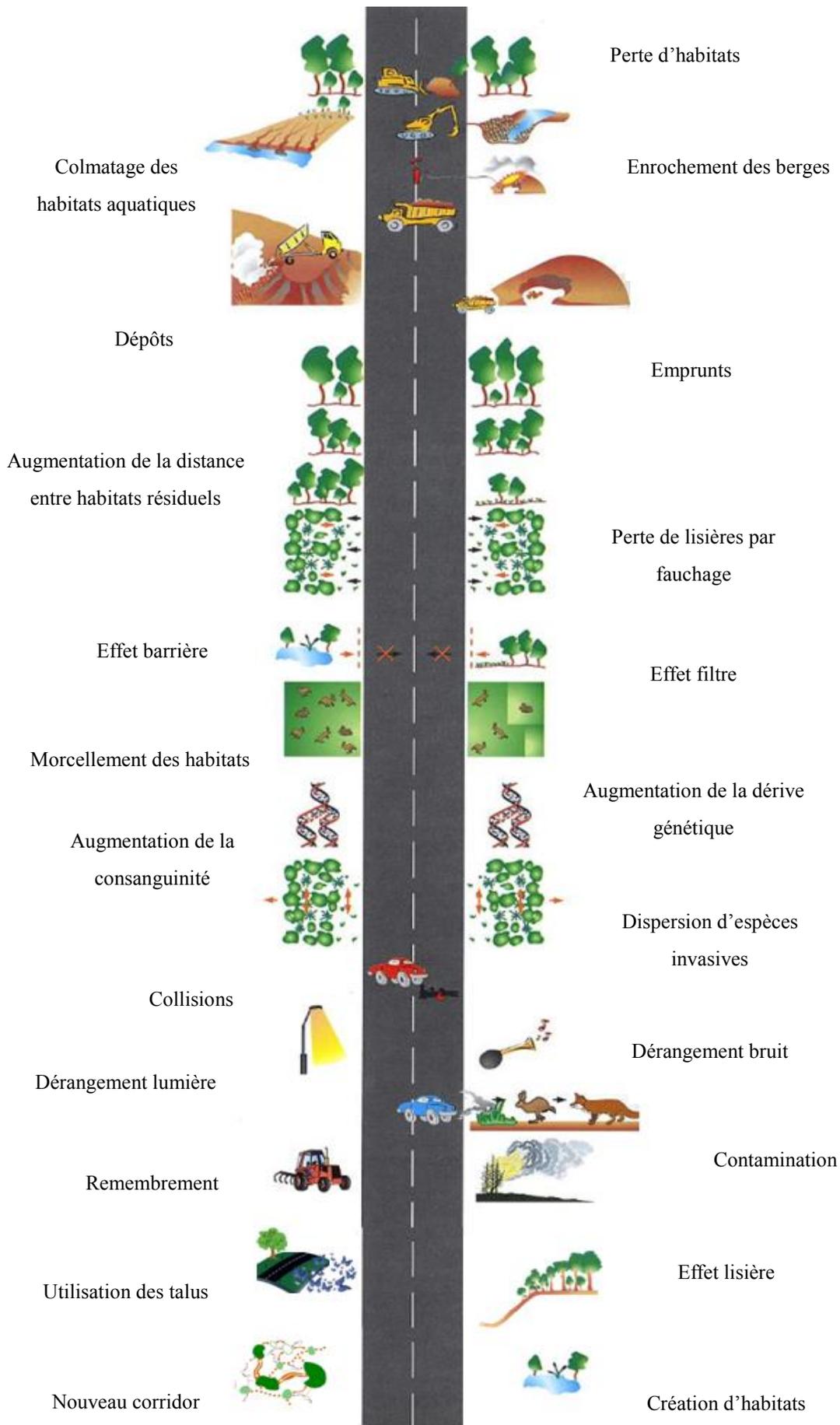


Fig A : Impacts liés à la construction d'une nouvelle route. Adapté de Setra 2006.

Parmi les infrastructures fragmentant le paysage, le réseau routier est un acteur majeur. Il endosse tous les rôles écologiques, constitue les linéaires les plus développés et joue un rôle économique crucial dans les sociétés humaines (Forman 1999, McGregor et al 2007). Permettre le franchissement de ces linéaires par la biodiversité est indispensable pour une cohérence écologique territoriale pertinente à toute échelle. Ainsi, la discipline qu'est l'écologie de la route (ou Road Ecology) a vu le jour et étudie la transparence écologique d'une voie par l'analyse des passages transversaux et des collisions véhicules-faune (Bissonette & Adair, 2008 ; Clevenger, 2005).

Depuis les années 1980, la densité des routes et du trafic routier a très fortement augmenté en France (Fig C), ce qui a induit une politique de gestion des paysages par l'apparition de mesures visant à réduire les impacts négatifs du réseau routier français. Le pays fut par ailleurs pionnier dans la réalisation de passages à faune, les premiers ouvrages datant des années soixante (Carsignol et al., 2006). Au départ, ces passages à faune (PAF) consistaient en des ponts végétalisés visant à assurer les traversées du grand gibier. De nos jours, il existe différents types de PAF adaptés selon les besoins et les espèces (Glista et al., 2009 ; Carsignol et al., 2005). On peut ainsi distinguer les PAF supérieurs (écoponts) des différents passages inférieurs (sous la route), ou encore les passages spécifiques et les passages mixtes (qui ont plusieurs rôles, dont les traversées faunistiques) (figure D).

L'existence des PAF devient d'autant plus indispensable que se sont développés, par soucis de sécurité, des clôtures anti-faune le long des voies rapides. Grâce à ces grillages, les espèces animales comme les usagers de la route sont protégés des accidents véhicule-faune (CVF) mais ils rendent logiquement le linéaire moins perméable aux transferts génétiques entre populations (Clevenger et al., 2001). Historiquement, peu d'études scientifiques se sont réellement intéressées à l'impact des passages à faune et il a fallu du temps pour que l'on comprenne l'intérêt d'entreprendre ce type d'étude afin d'améliorer leur efficacité. De nos jours, de nombreux suivis sont effectués après la création d'un passage (Navas & Rosell, 2005 ; Vignon, 2005,) mais sont assurés presque systématiquement par des bureaux d'étude à des fins non scientifiques. Aussi, il n'existe pas encore réellement de méthodologie suffisamment affinée en termes d'efficacité et de coût concernant le suivi des passages (Malo et al., 2006).

En 2009 fut initiée par la DREAL la construction du raccordement entre l'A35 (Voie Rapide du Piémont des Vosges entre Ebersheim et Enztheim), et l'A352. Les problèmes de circulation de la RN422, constamment saturée, ont motivé la déclaration d'utilité publique du projet le 27 septembre 2003 (DUP du 27/09/03). Toutefois son tracé fut positionné sur une zone contenant une espèce protégée à haute valeur patrimoniale en Alsace : le hamster commun (*Cricetus cricetus*), localement appelé Grand hamster.



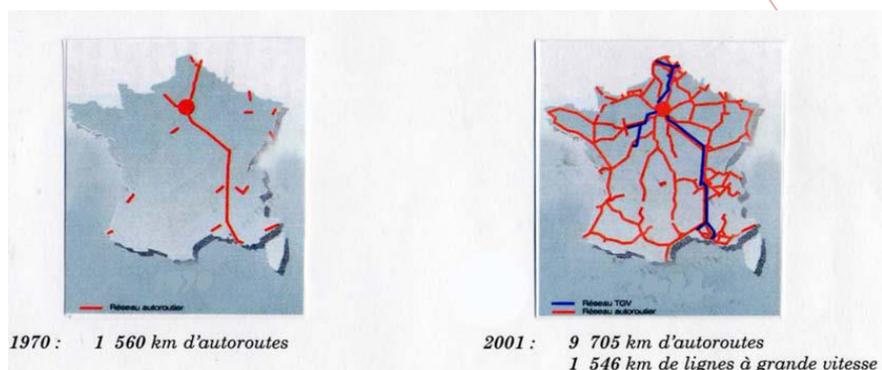


Fig B : Augmentation de la densité du réseau routier français de 1970 à 2001. Carsignol 2006.



Buse d'assainissement



Passage petite faune



Passage spécifique amphibien



Passage mixte



Passage forestier/agricole



Passage inférieur grande faune



Passage supérieur



Pont écologique



Viaduc

Fig C : Les différents types de passages empruntables par la faune. Carsignol et al. 2005

Des mesures compensatoires ont ainsi été programmées afin de minimiser l'impact du raccordement sur les populations locales de hamster commun, telles que des subventions agricoles pour permettre la culture de luzerne (couvert végétal considéré favorable au hamster commun) par les agriculteurs sans perte économique par rapport aux traditionnels champs de maïs (Dreal ; 2008). Parmi les mesures de réduction des impacts, 8 passages inférieurs spécifiques ont été installés. Leurs dimensions adaptées a priori au hamster commun ont inspiré l'appellation de hamstéroduct (Dreal ; 2006).

L'arrêté ministériel du 24/11/08 autorisant la destruction du milieu favorable au hamster commun demande à la DREAL Alsace, maître d'ouvrage de l'opération, d'effectuer une étude portant sur l'efficacité des passages à faune installés sous le raccordement. La DREAL a ainsi fait appel au CNRS Strasbourgeois afin de réaliser ce suivi scientifique. Les fruits de cette collaboration sont détaillés dans ce rapport, faisant le bilan après un suivi d'une année entière.

Les objectifs premiers de l'étude se divisent en 3 enjeux :

- (1) Créer et valider un système pertinent et automatisé de suivi des passages à faune à l'aide de la technologie.
- (2) Etablir la pertinence écologique des hamstéroducts : y'a-t-il des traversées de faune, quelle faune, éventuellement de hamster commun ?
- (3) Comprendre les modalités (où, quand, comment ?) des traversées d'animaux ainsi que les refus.



Héron cendré sous passage OA1-S





Fig D : Emplacement de la zone d'étude : le raccordement A35-A352.

Crédits : Google map© et photo 4-vents



Matériel et méthode

A/ Zone d'étude

Onze passages inférieurs situés au niveau du raccordement A35-A352 (Duttlenheim, Alsace) ont été suivis. Il s'agit de 8 hamstéroducts de différentes géométries et de 3 passages agricoles. Les 11 passages ont été divisés en trois groupes statistiques selon leur coefficient d'ouverture ($C = \text{hauteur} * \text{largeur} / \text{longueur}$; Gordon & Anderson, 2003). Il s'agit des groupes Petit pour $C < 1$, Moyen pour $1 < C < 3$ et Grand pour $3 < C$ (voir figure G).

B/ Système photo

Le suivi des passages a été assuré par deux systèmes différents. Tout d'abord un système de suivi par pièges photographiques. Il s'agit d'appareils autonomes en termes d'énergie (batterie interne), de détection et de déclenchement. Le modèle utilisé est le Reconyx HyperFire HC600, choisi pour ses caractéristiques techniques : il est déclaré par le constructeur inaudible (dans les fréquences de perception humaine), invisible (flash Infra-rouge lointain à 940nm), à haute autonomie (plus d'un an) et est très rapide au déclenchement (0,2 secondes entre détection et prise photo). Il s'agit actuellement, à notre connaissance, du piège photographique le plus performant du marché ; qui devient progressivement d'ailleurs le plus utilisé pour ce type de suivis.

Un piège photographique a été installé au plafond de chaque entrée de buse, orienté vers l'extérieur et situé entre 1,50 et 2m de l'extrémité. Chaque piège est fixé par un rail conçu par le CNRS qui permet de tirer l'appareil depuis l'extérieur sans intervenir dans le tunnel et ainsi éviter de laisser trop d'odeurs pouvant effrayer la petite faune et faciliter la récupération des cartes mémoires. Les données relevées par le piège photo sont les horaires de passage (à la seconde) et la température ambiante. La détermination des espèces ainsi que leur provenance et destination (pour chaque extrémité de tunnel) a été à la charge de l'observateur. Ce travail étant long, un des objectifs annexes de l'étude fut d'élaborer avec le CETE de l'Est un logiciel d'aide au dépouillement.

Le déclenchement du piège ne s'effectue que si l'appareil enregistre simultanément une variation thermique et un mouvement. La sensibilité du détecteur est paramétrable, et dépend du ratio entre l'importance donnée au détecteur thermique et celle donnée au détecteur de mouvement. Les PAF inférieurs constituant des microenvironnements particuliers, l'efficacité des différents ratios a été testée en comparant les événements détectés avec les événements obtenus via le système vidéo, à raison d'une semaine par ratio sur 6 pièges photographiques, répartis dans les hamstéroducts H1, H2 et H3.



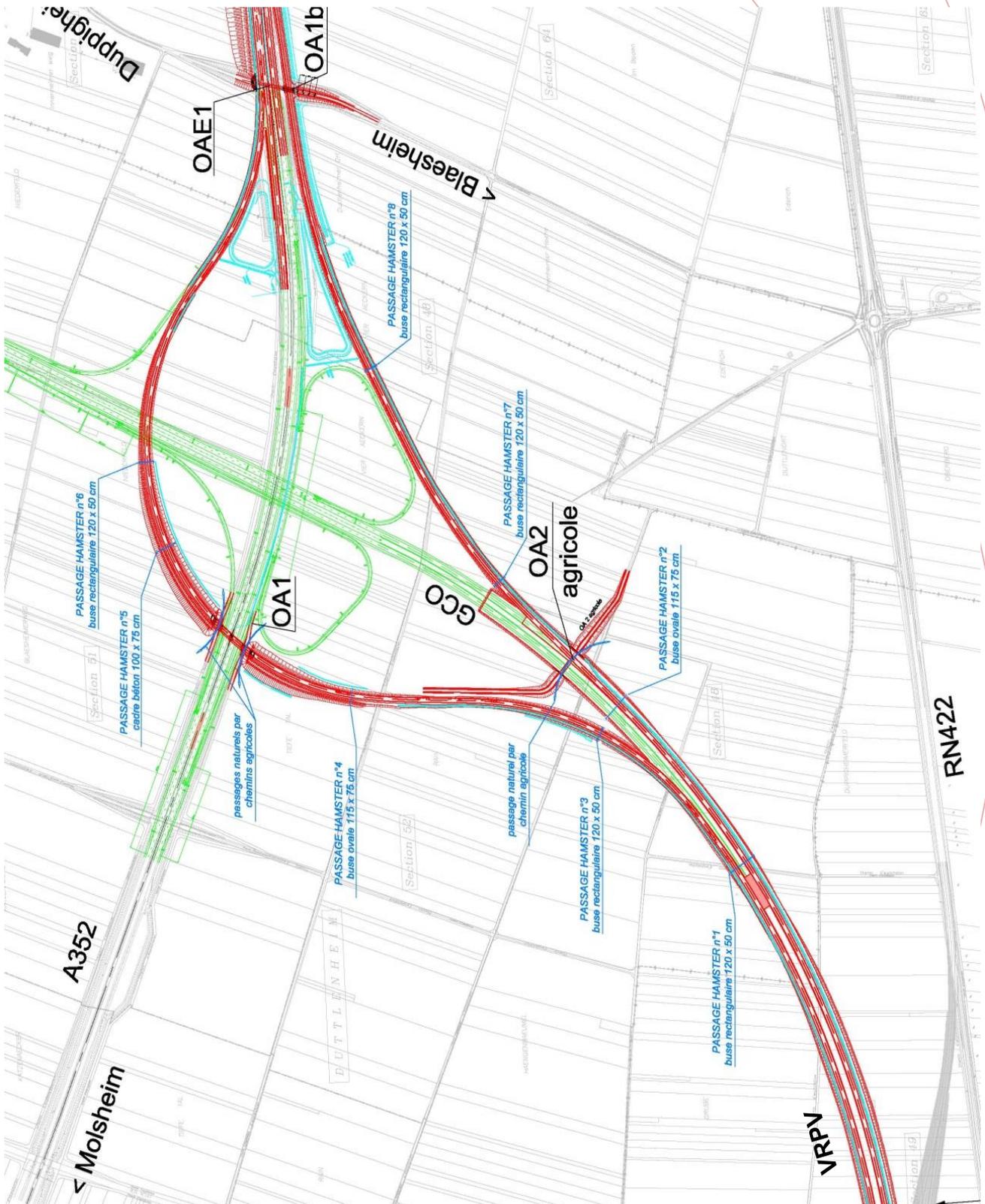


Fig E : Emplacement des passages. Bleu : Hamstéroducts, Rouge : VRPV, Vert : futur GCO.

R/ L'A352 schématisée en gris est déjà construite

C/ Système vidéo

Le système vidéo était quant à lui constitué de seize caméras vidéos IP (résolution 650 lignes) couplées à 16 projecteurs infra-rouge (infrarouge lointain, éloignées d'un mètre des caméras afin d'éviter l'installation de toiles d'araignées devant les objectifs, voir Fig. K), reliés à un unique serveur d'enregistrement (distance de la caméra au serveur de 5 à 110m). La longueur d'onde choisie dans l'infrarouge, de 940nm, est réputée invisible pour la plupart des animaux (Newbold, 2007). Seuls trois hamstéroducts et un passage agricole ont été équipés de ce système vidéo. Dans ces 3 PAF spécifiques, une vidéo est couplée à chacun des appareils photos placés aux deux extrémités du tunnel. D'autre part, entre 4 et 6 caméras ont été installées avec une orientation et un espacement permettant de visualiser les deux entrées et l'intégralité du tunnel. Le dispositif vidéo du passage agricole est constitué de deux caméras positionnées au plafond à 6 mètres du sol installées à l'extrémité Nord-Ouest du tunnel.

Pour l'ensemble des caméras, le serveur a été programmé en mode « enregistrement continu », sachant qu'un programme interne au serveur effectue par ailleurs, en post-enregistrement, une détection des événements. Ainsi, l'intégralité des enregistrements est conservée tout en permettant de mesurer l'efficacité du détecteur de mouvement du serveur. Il était en effet essentiel de conserver l'intégralité des enregistrements pour tester l'efficacité des pièges photographiques.

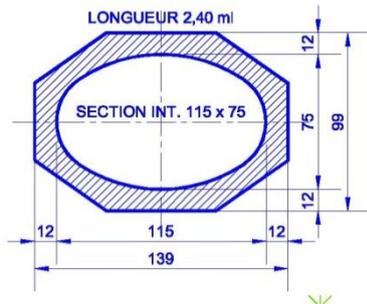
Chaque PAF équipé de la série de caméra vidéo a été divisé en sections correspondant à la distance entre chaque caméra. La vitesse moyenne de déplacement des individus a pu ainsi être mesurée pour chaque section traversée. A l'entrée des 4 ouvrages équipés, le comportement des animaux vis-à-vis du déclenchement de l'appareil photo a également été relevé. Dans l'ouvrage agricole, le nombre d'individus empruntant les trottoirs est comparé au nombre d'individus empruntant la chaussée centrale.



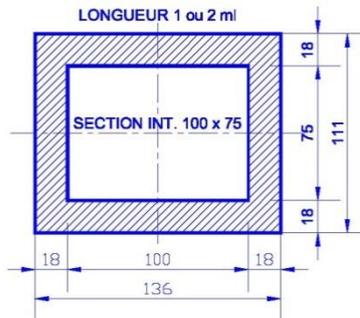
N° Passage	Type	C	Groupe	N° Passage	Type	C	Groupe
1	Rectangulaire	1.2	Moyen	5	Cadre	2.1	Moyen
2	Tuyau	1.7	Moyen	6	Rectangulaire	2.6	Moyen
3	Rectangulaire	2.5	Moyen	7	Rectangulaire	2.5	Moyen
4	Mini	0.9	Petit	8	Mini	0.9	Petit
OA1-N	OA	187	Grand	OA1-S	OA	600	Grand
OA2	OA	53.5	Grand				

Fig F : Géométrie, type et coefficient d'ouverture des 11 passages à faune et agricoles étudiés. OA signifie Ouvrage Agricole.

TUYAU EN BETON
type Moduloval ou similaire



CADRE EN BETON



BUSE RECTANGULAIRE
type Vogel Béton ou similaire

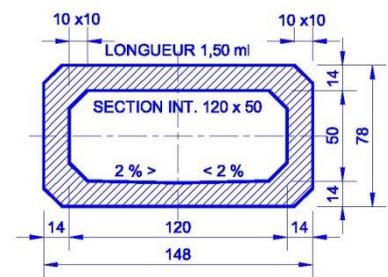


Fig G : Géométrie des hamstéroducts. Un quatrième type appelé « mini » est de forme rectangulaire et possède les dimensions suivantes : 60 x40 cm

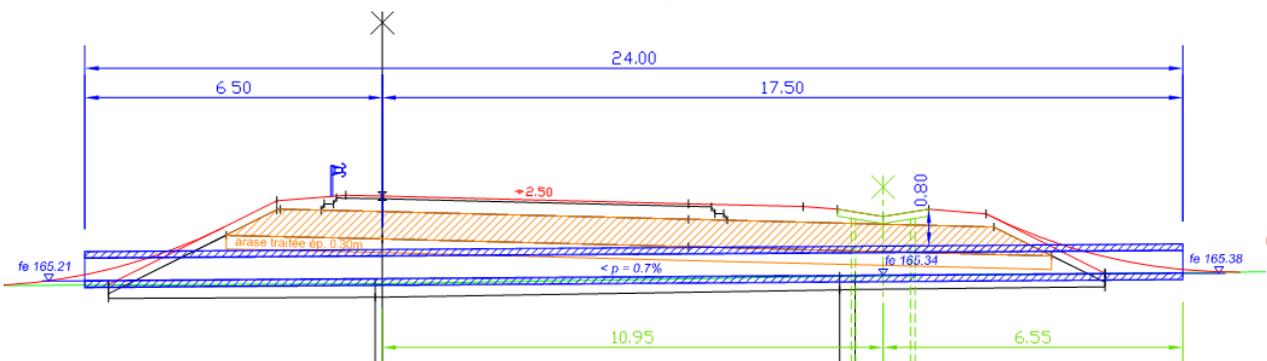


Fig H : Profil en travers du hamstéroduct n°7. Le passage (en bleu) se situe sous la route (en noir).



H2

H8

H3

OA1 - S

OA2

H5

Fig I : Photos de différents passages.

D/ Données, types de données et analyses

Les données enregistrées par les systèmes (photos et vidéos) ont été analysées et réparties en « évènements ». Un « évènement » est défini comme la présence d'un animal situé dans l'environnement immédiat d'un passage à faune. Nous avons distingué dans la présente étude cinq types distincts d'évènements liés au comportement de traversée ou de non-traversée des individus :

- 1) **Refus** : L'individu ne s'engage pas dans le tunnel à plus d'un mètre de profondeur.
- 2) **Traversée partielle** : L'individu s'engage dans le tunnel à plus d'un mètre de profondeur et ressort par la même entrée (demi-tour).
- 3) **Traversée certaine** : L'individu s'engage dans le tunnel d'un côté et ressort de l'autre.
- 4) **Traversée incertaine** : L'individu s'engage dans le tunnel à plus d'un mètre de profondeur mais n'a pas été détecté par la suite.
- 5) **Aller-retour** : l'individu effectue deux traversées complètes et en sens contraire dans le même passage et en moins de 10 minutes.

La récupération des données n'était effectuée que toutes les deux semaines afin de limiter les perturbations tout en permettant la sauvegarde régulière des photos. Le prélèvement des données de chaque appareil photos consistait dans un premier temps à déverrouiller les cadenas, à sortir l'appareil via le rail de suspension, puis de remplacer la carte mémoire (2Go). L'heure locale du relevé était notée afin de corriger le temps et les décalages temporels éventuels entre les appareils photos du même tunnel. La récupération des données vidéo consistait à échanger le serveur d'enregistrement en place avec un second serveur identique afin de pouvoir effectuer la sauvegarde en toute sécurité et sans perte de temps au retour au bureau. La voiture n'a été utilisée que sur les chemins fréquentés par les engins agricoles pour ne pas endommager le milieu adjacent aux hamstéroducts (situés entre 10m et 800m de la route la plus proche). Cette récupération tous les quinze jours prenait en moyenne 3 heures sur place. La sauvegarde des données brutes sur l'ordinateur du bureau prenait entre 30 minutes et une heure selon le volume des photos récupérées (entre 100Mo et 5Go), pour un volume total, après un an de suivi de 85Go.

Les données météo locales (température, humidité, Humidex, vent et pluviosité) étaient accessibles sur les sites de diffusion meteociel.net et Infoclimat.fr, la station d'Entzheim étant située 2 km au Nord-Est du raccordement (Humidex = relation entre température et le point de rosé traduisant de l'inconfort dû aux variables météorologiques. Il s'agit d'un indice sans dimension défini par la formule $H = \text{température de l'air} + 0,5555 * (6,11 \times e^{5417,7530 * (1/273,16 - 1/\text{Point de rosée en Kelvins})} - 10)$). Il a été étudié si ces différentes données ont eu un impact sur le nombre d'évènements.



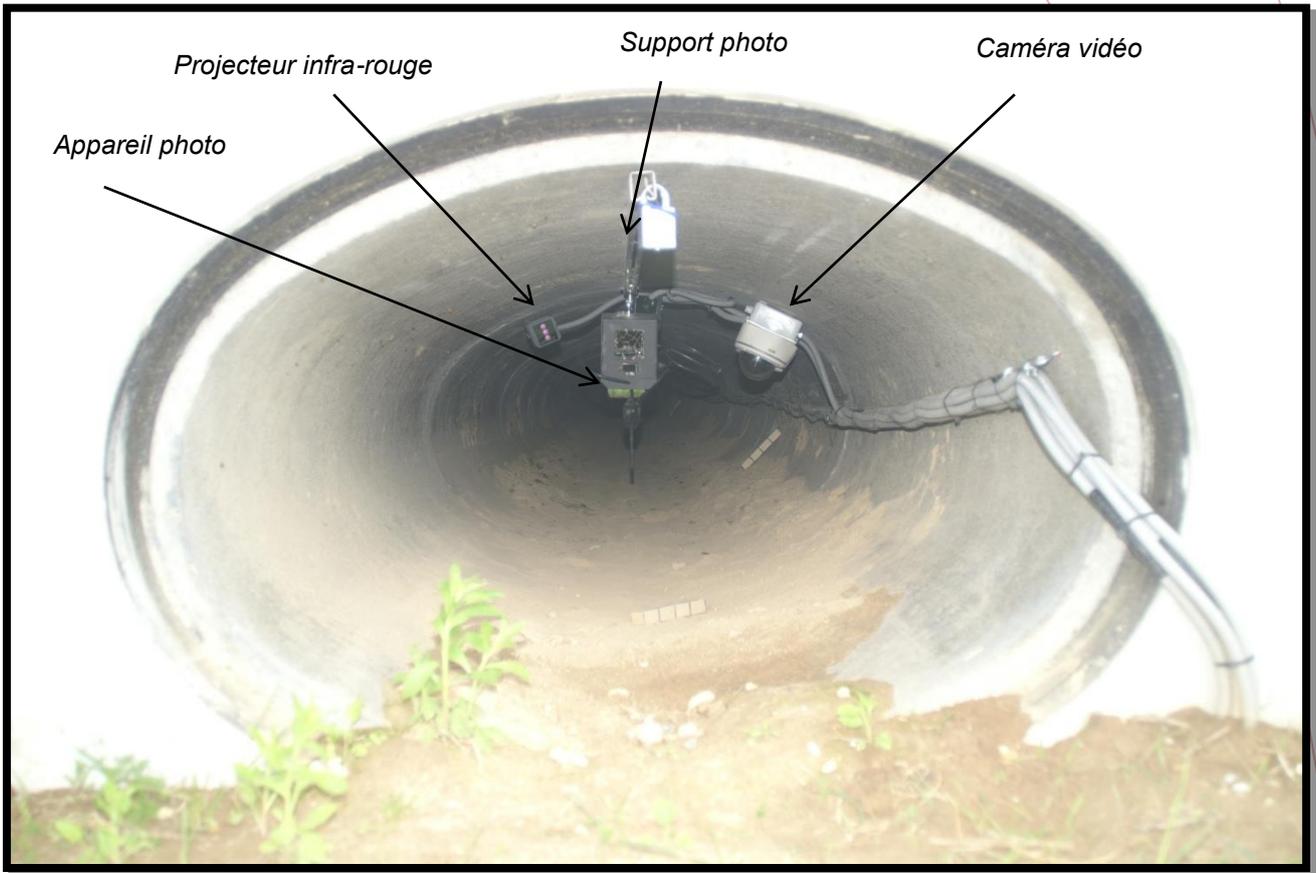
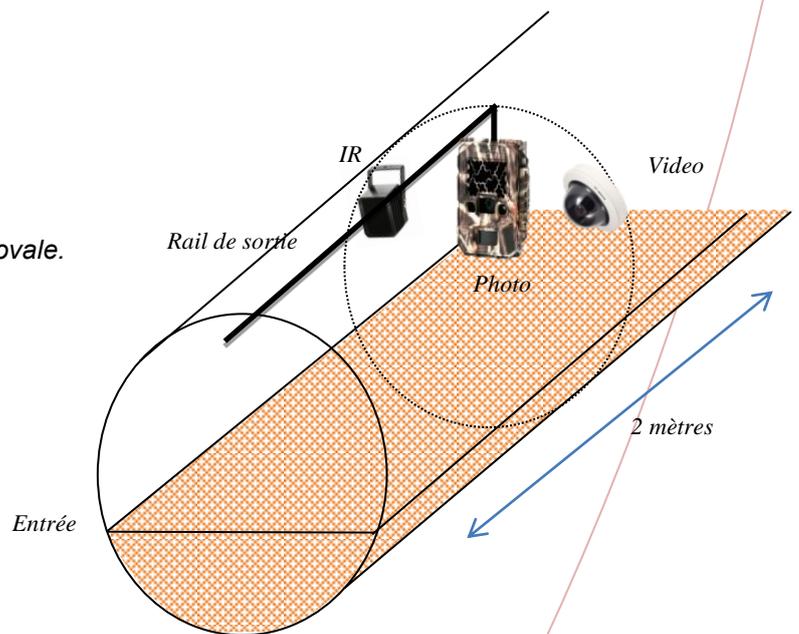


Fig J : Système de suivi d'un hamstéroduct ovale.



La température à l'intérieur des hamstéroducts et celle mesurée par la station météo d'Entzheim ont été comparées et utilisées afin d'en étudier l'influence sur le nombre d'évènements et le type d'espèces observées.

Statistiques :

L'unité statistique qui a été utilisée dans la présente étude est le « nombre d'évènements par jour, par passage souterrain (et dans certains cas par espèce) ». Afin de limiter l'effet individuel, un intervalle de 10 minutes entre deux évènements a été appliqué : dans le cas où plusieurs évènements qui concernent la même espèce sont enregistrés en moins de 10 minutes, seul le dernier a été pris en compte dans l'analyse statistique. Cette approche a été utilisée pour les mulots et campagnols, pouvant être visibles de nombreuses fois en un temps restreint dans un même passage (quelquefois plus de 10 évènements en moins de 10mn).

Afin d'éviter un éventuel biais lié à l'avancée de l'année dans les tests statistiques menés, le nombre d'évènements par semaine a été réajusté par la régression obtenue entre le nombre d'évènements par semaine et par espèce et l'avancée de l'année.

La normalité et l'homoscédasticité des données (évènement de passage) ont été préalablement vérifiées pour chaque test paramétrique utilisé (Levene et Shapiro-Francia Test). Lors de comparaisons multiples, une correction de Bonferroni a été appliquée. Le seuil de décision est fixé à 5%. Les logiciels qui ont été utilisés sont XL Stat Pro 7.5 et Minitab 16.



Belette devant passage H7



Page laissée blanche intentionnellement



Résultats

A) Efficacité des systèmes techniques utilisés :

○ **Généralités**

Au total, 424 270 photos ont été prises par 20 appareils du 10/05/2012 au 17/06/2013 (403 jours) pour 38 139 évènements, soit approximativement un évènement pour six photos. Sur un échantillon de 40 000 clichés, 38 760 étaient des clichés contenant un animal (rapport d'utilité observé de 96,9%). Sur 247 clichés vides, la vidéo a relevé que 16% étaient des déclenchements intempestifs (sans présence animale) et que 84% étaient bien dues à des animaux mais hors champ. Le rapport d'utilité réel a donc en fait été de 99.51%. Sur 1 000 clichés, environ 31 photos seront vides mais seules 5 seront réellement des déclenchements intempestifs.

○ **Correction individuelle**

Sur les 38 139 évènements analysés, 30.39% ont été considérés comme redondants au vue du critère des 10 minutes. Les analyses statistiques ont donc été effectuées sur 26 548 évènements.

○ **Validation de la caractérisation de la catégorie de traversée**

Les différents évènements communs à la vidéo et à la photo ont été comparés. Seuls les évènements des mulots, espèce représentant 82% de l'ensemble des évènements ont été étudiés afin de conserver un nombre statistiquement fiable de données (Tab K). Sur 66 traversées considérées 'incertaines' d'après les pièges photos et qui furent comparées à la vidéo, 55 étaient bien des traversées (83%) et 11 des refus (17%). Sur 82 refus, 75 l'étaient vraiment (91,5%). Sur 12 engagements partiels, seuls 4 l'étaient vraiment. Sur 37 engagements visualisés à la vidéo, 25 ont été considérés comme des engagements par la photo (sous-estimation de 48%) et 12 comme des refus. Sur 185 évènements obtenus avec le système photo et comparés à la vidéo, le taux d'erreur fut de 22.2%. Ces erreurs ont été principalement dues aux évènements possédant un nombre restreint de clichés et concernaient essentiellement les mulots et campagnols, souvent trop rapides pour obtenir plus d'une photo.



	Refus		Trav. Partielles		Trav. Certaines		Trav. Incertaines		Aller-retours	
Observé	8025	36.7%	2878	13.2%	3384	15.5%	6712	30.7%	871	4%
Estimé	8581	43.9%	720	3.3%	10698	48.9%	0	0%	871	4%

Tab K : Répartition des évènements des mulots

- **Ratios**

Il s'agissait de tester l'efficacité de détection des passages d'animaux par les pièges photos selon le ratio choisi (proportion entre une détection par analyse de variation de contenu des pixels, ou détection par un faisceau infra-rouge). Pour cela, deux mois et demi de vidéo ont été analysés systématiquement (40 jours d'été et 37 jours d'hiver). 515 évènements ont été enregistrés par les pièges photos et la vidéo pendant les jours d'été, pour 213 évènements en hiver. Sur ces 728 évènements, l'efficacité de détection par le système photo dépendait fortement du ratio utilisé. Comme le montrent les figures L et M), le mode High fut le plus efficace quel que soit la saison, permettant de détecter l'ensemble des espèces. De façon significative, les modes Medium Low et Low (détection par infrarouge majoritaire) ont été inefficaces pour détecter les espèces de petites tailles, la majorité des évènements détectés par les pièges photos étant alors réduite aux chats, renards et blaireaux. Le seul effet saisonnier significatif démontré a concerné le mode Medium-High, plus efficace en été (KW, $p < 0,001$).

- **Evènements non détectés**

Pendant 37 jours d'analyse vidéo, pendant lesquels les pièges photos ont été paramétrés en mode High, 126 évènements ont été enregistrés par les caméras. Sur ces 126 évènements vidéo, seulement 83 ont été détectés par le système photo (55% d'efficacité). Néanmoins, 93% des évènements non détectés ont été dus à des passages de micromammifères : seuls 3 concernaient des petits carnivores.

- **Habitude au système de suivi**

Dans les six premières semaines après l'installation du dispositif de suivi, des comportements de crainte ou de curiosité vis-à-vis du système ont été observés de la part des blaireaux et renards (Fig N). Les quatre premières semaines, sept des 29 carnivores ayant été aperçus ont fui pendant la prise des photographies (15%) et 10 (22%) ont directement observé l'appareil photo puis ont soit reniflé, soit contourné le piège. Ces comportements ont progressivement diminué avant de disparaître à la 5^{ème} semaine. Au cours des semaines suivantes (semaines 7 à 58), de rares évènements de dérangement ont été observés et concernaient uniquement des blaireaux dans les passages inférieurs du groupe « Petit ». Notons que lors de l'émergence des renardeaux l'année suivante, aucun n'a fui devant l'appareil photo, alors qu'ils utilisaient forcément ces passages souterrains pour la première fois.



Ratio	Part liée au détecteur de mouvement (%)	Part liée au détecteur thermique (%)	Evènements détectés Été (%)	Evènements détectés Hiver (%)
Low	20	80	0	3
Medium-Low	40	60	2	18
Medium	50	50	4	28
Medium-High	60	40	97	2
High	80	20	100	100

Fig L : Signification des différents ratios proposés pour paramétrer le mode de détection des mouvements par les pièges photos et efficacité des détections obtenus (d'après la vidéo).

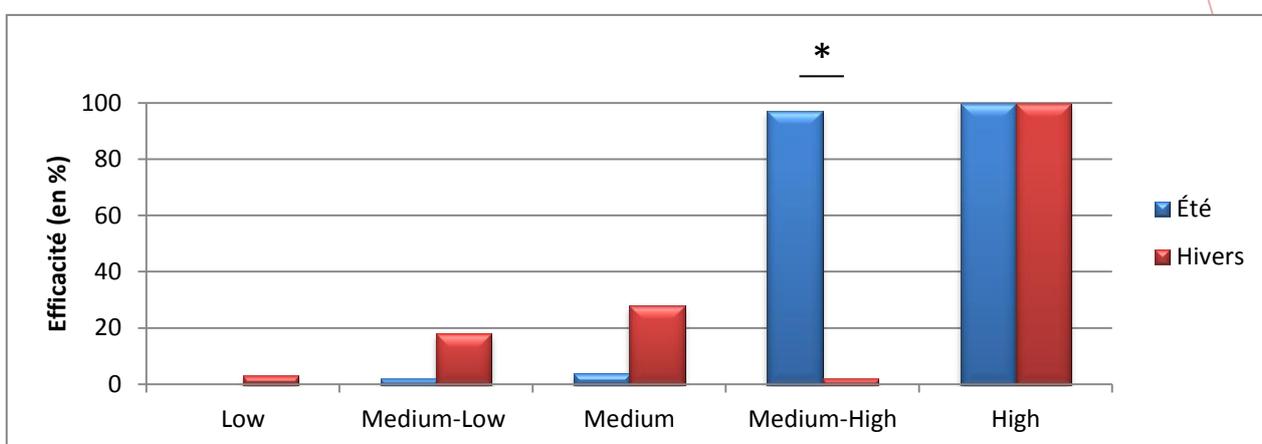


Fig M : Evènements détectés selon le ratio utilisé. Le ratio High est le plus performant quel que soit la saison. Le ratio Medium-High est plus efficace en été (KW, $p < 0,001$).

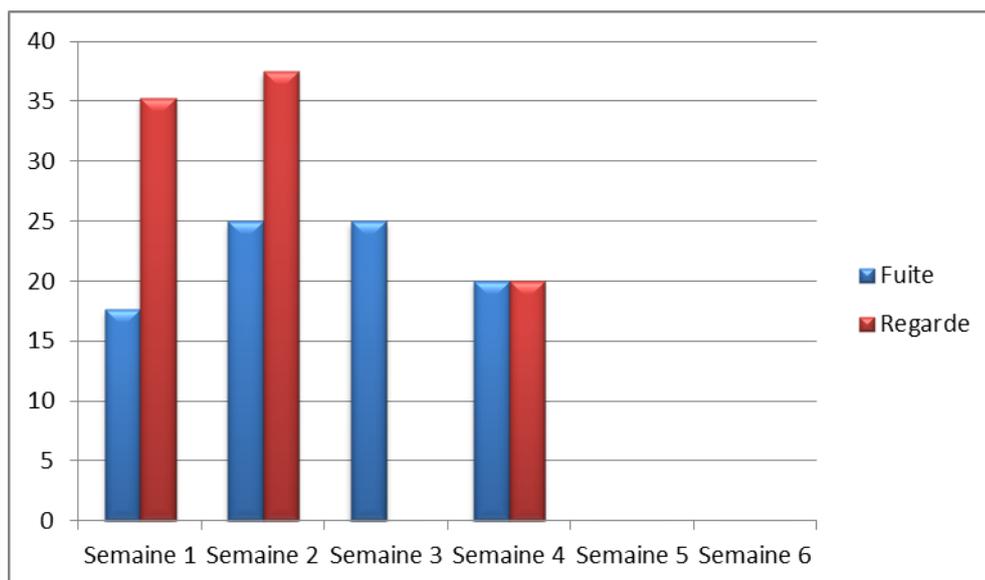


Fig N : Comportement de fuite et de méfiance de la faune vis-à-vis du dispositif de suivi. Trente jours après l'installation des dispositifs, ces comportements cessent totalement.

○ **Temps de suivi par piège photographique**

La corrélation entre la durée du suivi et le pourcentage de biodiversité observée pour chaque piège photographique, et selon la date du début du suivi, montre une relation de type logarithmique avec une biodiversité moyenne observée de 50% atteinte à 26 jours de suivi, 80% à 115 jours et 95% à 216 jours. Les résultats, par date de début de suivi et tous appareils confondus par date de début de suivi, sont présentés en fig Q.

○ **Effet expérimentateur**

Bien que le pourcentage de refus fut maximum le jour du passage, aucune différence significative n'a été observée entre le nombre d'évènements enregistrés durant les 3 jours avant la présence d'un expérimentateur sur le terrain et les 3 jours après (Anova, $p=0,92$).

	Nj-3	Nj-2	Nj-1	NJ	NJ+1	NJ+2	NJ+3
Proportion journalière des évènements totaux (%)	13.4	13.4	13.8	12.3	16.5	15.6	15
% Refus	36.84	34.08	38.17	41.30	37.89	38.38	38.36

Fig O : Nombre d'évènements totaux et de refus avant et après le jour du relevé des médias.

Il y a eu statistiquement moins d'évènements de carnivores la nuit suivant le passage de l'expérimentateur sur le terrain (Anova, $p=0,012$). Il n'y a cependant pas eu de différence significative concernant leur durée de prise de décision, bien qu'elle soit minimale la nuit suivant le passage de l'expérimentateur sur le terrain (Anova, $p=0,57$).

	Nj-3	Nj-2	Nj-1	NJ	NJ+1	NJ+2	NJ+3
Proportion journalière des évènements de carnivores (%)	17.4	13.8	13.9	5	14	11.2	24.8
Temps de prise de décision moyenne (s)	12	7	5	2	3	8	5

Fig P : Nombre d'évènements de carnivores et temps de prise de décision des carnivores avant et après le jour du relevé des médias.



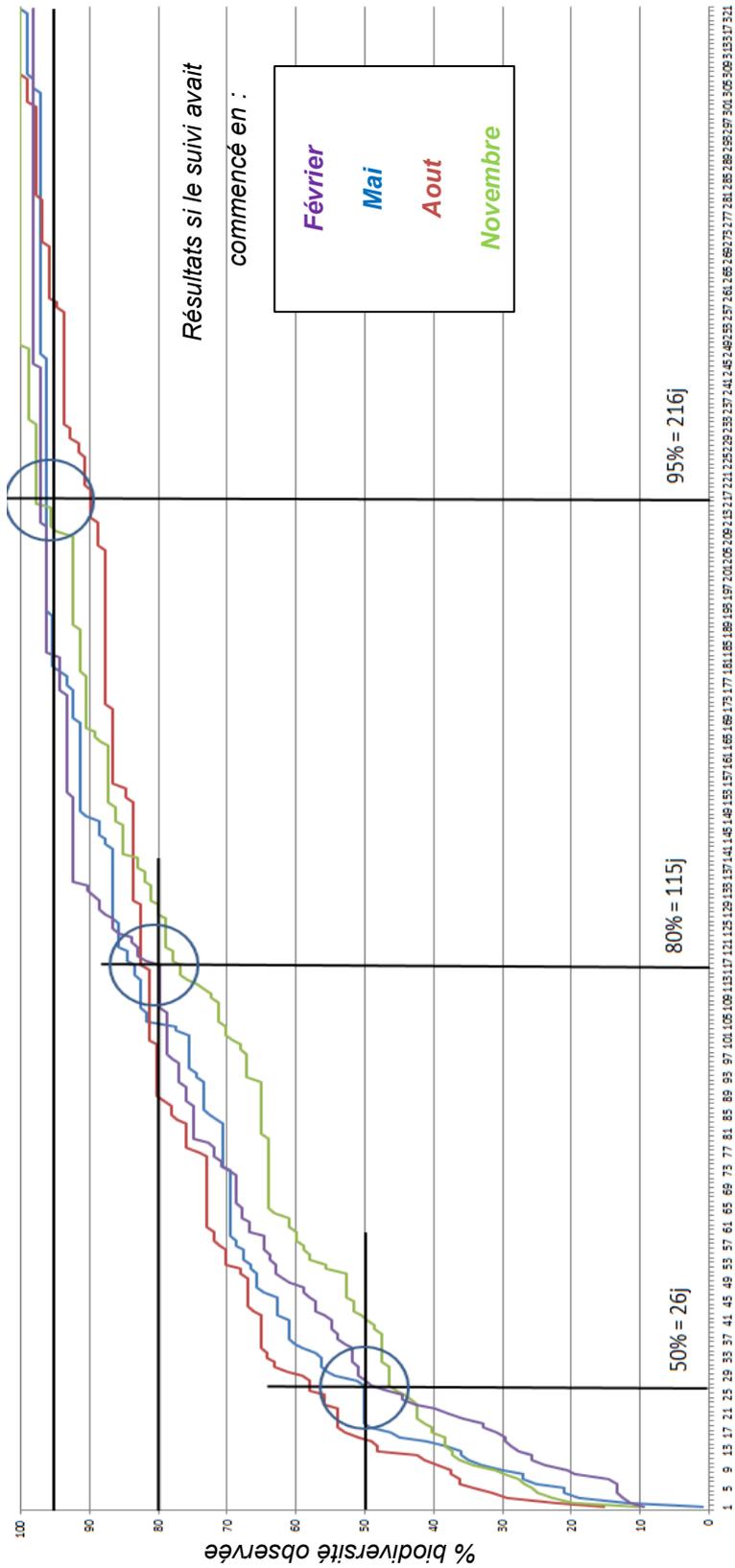


Fig Q : Courbe de relation entre pourcentage de biodiversité observée et durée du suivi photographique.
 A 26 jours, 50% de la biodiversité est observée, à 115 jours, 75% et 95% à 216 jours.

B) Bilan global spécifique

○ 1) Qui traverse ?

Au total, 23 espèces ont été relevées pour 11 ouvrages (hors fréquentation humaine et animaux l'accompagnant). Il s'agit de 2 Mammifères ongulés, le Sanglier (*Sus scrofa*) et le Chevreuil (*Capreolus capreolus*) ; 4 carnivores, le **Blaireau d'Europe** (*Meles meles*), le **Renard roux** (*Vulpes vulpes*), la **Fouine commune** (*Martes foina*), le Putois d'Europe (*Martes putorius*), la **Belette commune** (*Mustela nivalis*) et le **Chat domestique** (*Felis silvestris*) ; d'insectivores tels que le **Hérisson d'Europe** (*Erinaceus europaeus*) et des **musaraignes sp**; des rongeurs tels que le **Lièvre commun** (*Lepus europaeus*), le **Hamster commun** (*Cricetus cricetus*), le **Rat surmulot** (*Rattus norvegicus*), le **Campagnol terrestre** (*Arvicola terrestris*), ainsi que des petits **campagnols** (*Microtus* sp.) et **mulots** (*Apodemus* sp.) ; six Oiseaux, le Héron cendré (*Ardea cinerea*), la Pie bavarde (*Pica pica*), la Bergeronnette grise (*Motacilla alba*), la Grive musicienne (*Turdus philomelos*), le Moineau domestique (*Passer domesticus*) et le Rouge-gorge familier (*Erithacus rubecula*) ; enfin une seule espèce de Reptiles, le **Lézard des souches** (*Lacerta agilis*).

Seules 14 espèces (ou groupe d'espèces, ex. mulots) ont traversé les hamstéroducts (espèces dont le nom vernaculaire est en gras), dont aucun Oiseau. Le chevreuil et les sangliers ont utilisé les passages agricoles mais n'ont été aperçu qu'à une seule reprise à l'entrée des hamstéroducts. Autant d'évènements liés aux humains (piétons & cyclistes) qu'aux animaux ont été observés dans l'ouvrage OA2 en juin 2013. Des jeunes de l'année de renards et blaireaux ont été observés dès fin Avril 2012 et 2013.

- 2) À quelle fréquence ?

○ **Répartition des évènements par type de traversée**

Sans correction, les traversées incertaines représentaient 31% des évènements totaux. Seuls la fouine et le campagnol terrestre ont montré peu de traversées incertaines (10 et 14%). Après correction, les engagements certains représenteraient 44,5% des évènements, contre 48.6% de refus. Cette différence n'a pas été significative (GLM, $p=1$, toutes espèces confondues). Sans correction, les traversées partielles représentaient 12.8%, après correction, 3.2%. Les allers-retours furent minoritaires et concernaient 3.7% des évènements, avec ou sans correction.

La fréquence moyenne des engagements a été de 3,6 traversées par jour et par hamstéroduct. En octobre 2012 cette fréquence fut de 15,75 et en février, 2,67. Le ratio entre engagement et refus a varié au fil de l'année (Anova, $p=0,015$). La part des refus a été plus grande en hiver qu'en été (46% contre 39%).





Fig R : Quelques animaux observés. De gauche à droite : renard roux, mulot, chat domestique, levraut

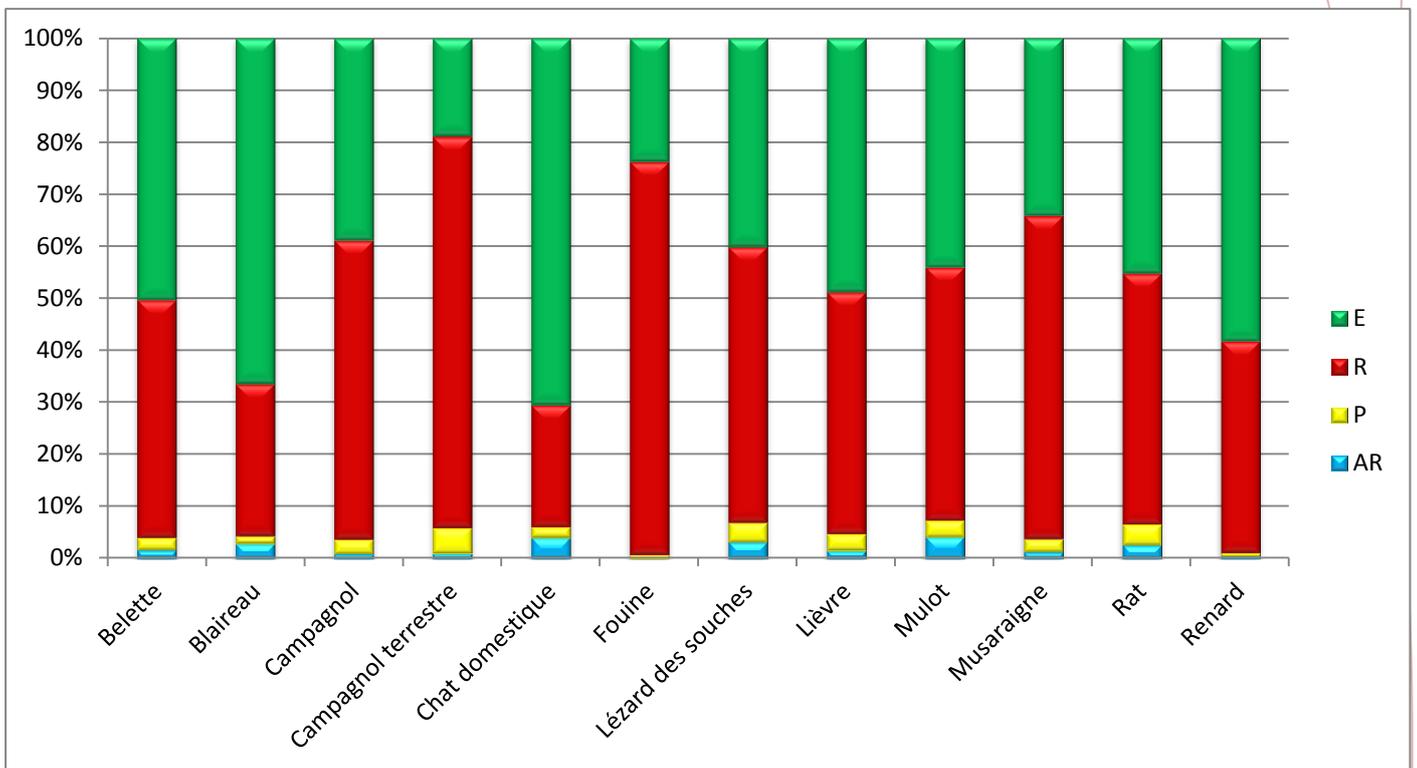


Fig S : Répartition des évènements par espèce. Les engagements et les refus sont les principaux évènements observés et leur proportion varie d'une espèce à l'autre.

La répartition spécifique des évènements en hamstéroduct est graphiquement représentée figure S. Le nombre élevé d'engagements du renard a essentiellement été dû à une famille de renards (mère + 2 renardeaux) en 2013. Avant la sortie du terrier de ces deux renardeaux, les engagements ne représentaient pour l'espèce que 4%. Notons qu'un des deux renardeaux fut retrouvé mort le long d'un chemin sans cause de décès apparente.

Concernant les ouvrages agricoles, seuls des refus et des traversées certaines ont été observés. Les traversées furent plus fréquentes (91%) mais seuls le lièvre et le renard les ont emprunté régulièrement. Le lièvre n'a jamais montré de refus dans les ouvrages agricoles.

- **Fréquences d'utilisation**

Nous avons pu observer sur l'ensemble de l'étude, 8,2 évènements (de toutes catégories) par hamstéroduct et par jour. Durant juin 2013, la fréquentation du passage agricole OA2 fut de 3,5 évènements par jour, soit 1,5 fois moins que la fréquentation des hamstéroducts à la même période. En 2012, la fréquentation moyenne journalière des 3 ouvrages agricoles suivis fut de 0,66 évènements (par jour et par ouvrage).

- **3) Quand ?**

- **Horaires**

Les passages ont principalement été empruntés de nuit avec un maximum de fréquentation vers 23h (GMT+1, fig T). Cela concernait essentiellement les mulots, campagnols et les blaireaux. La répartition horaire des différentes espèces aperçues au moins 20 fois est représentée fig U.

- **Effet saisonnier**

Une relation positive et significative a été observée entre l'avancée de l'année et le nombre d'évènements (GLM, $p < 0,01$). La relation est graphiquement représentée fig W. Le maximal de fréquentation, toutes espèces confondues, fut situé pendant la première quinzaine d'octobre. L'augmentation de la fréquentation des ouvrages (croissance 2012) entre le 10/05/2012 et le 01/10/2012 a été non exponentielle (Kolmogorov-Smirnov, $p = 0,01$). La fréquentation saisonnière des espèces est représentée figure X et montre un décalage de la fréquentation des ouvrages par les espèces, notamment des carnivores. Ceux-ci présentaient des pics de fréquentation étroits qui se sont succédés (par exemple en 2013, Blaireau puis Belette puis Fouine puis Chat domestique) alors que les micro-mammifères possédaient des pics plus élargis qui se sont chevauchés. Dès juillet une décroissance rapide des campagnols présents dans les passages fut observée.



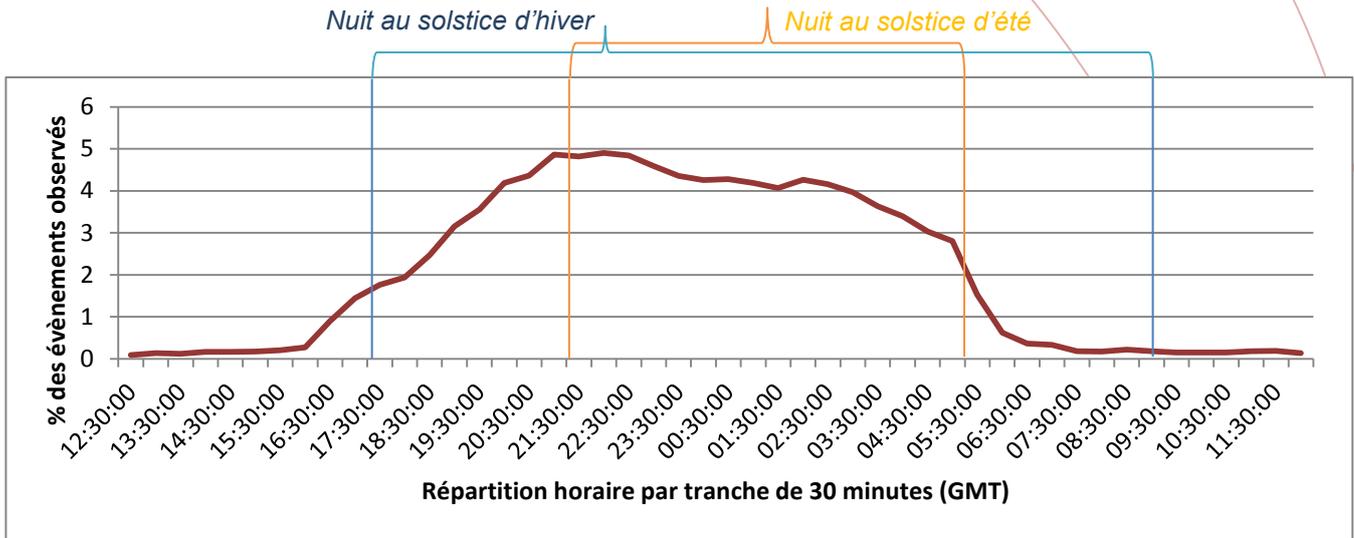


Fig T : Répartition des évènements sur une journée. Les espèces utilisent les passages préférentiellement la nuit avec un maximum d'affluence à 23h (GMT +1).

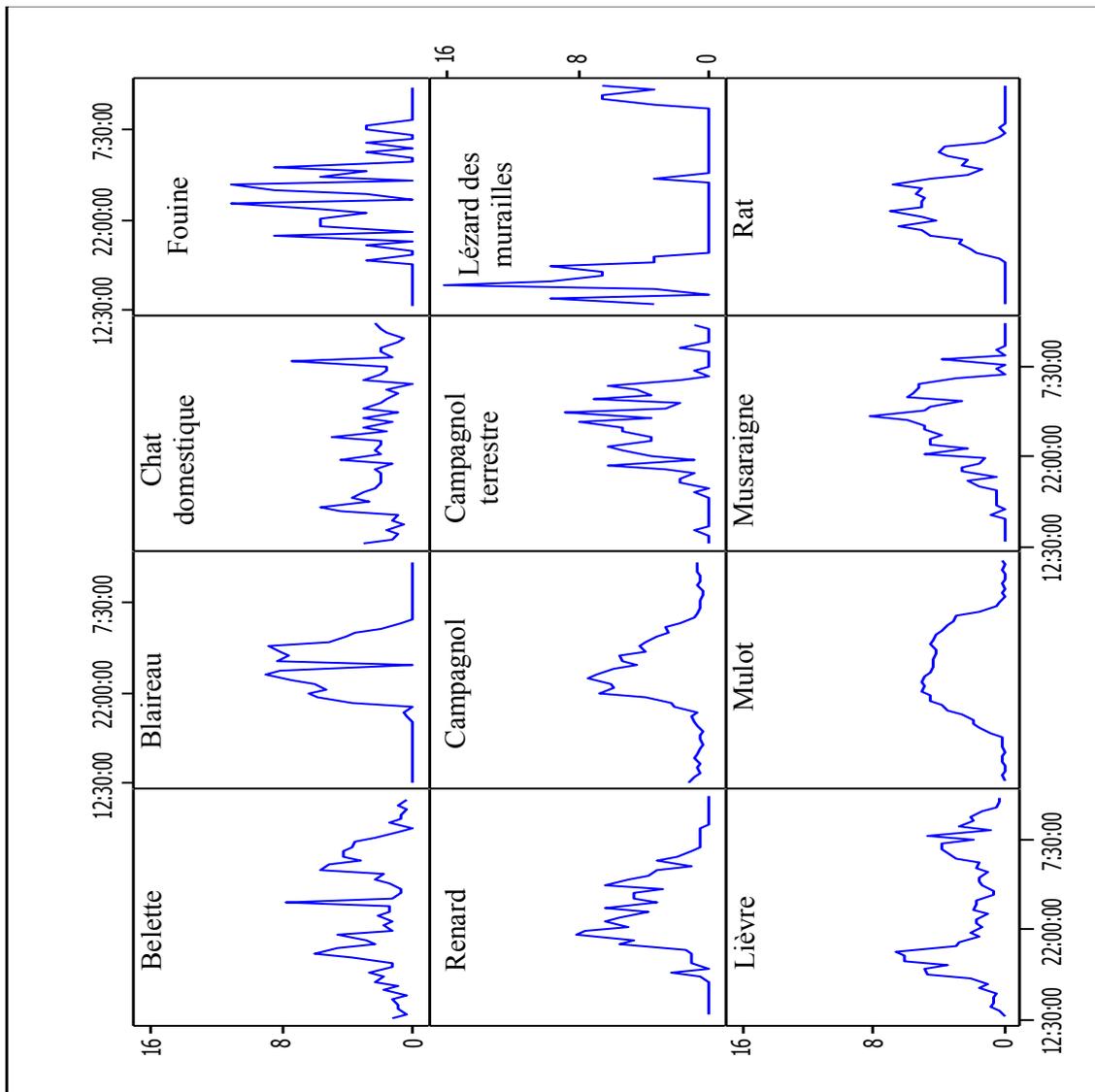


Fig U : Répartition horaire par espèce de la fréquentation des hamstéroducts

○ **Effet pluriannuel & impact du dispositif de suivi**

Les données de fréquentation des micromammifères et des prédateurs obtenues entre les 10 mai et 17 juin, en 2012 et en 2013 ont été comparées. La température du milieu fut définie en co-variable explicative. Il y a statistiquement eu plus d'évènements en 2013 qu'en 2012, que ce soit au niveau des proies ou des prédateurs. (Manova, $p < 0,001$). La température a été plus faible en 2013 (KW, $p = 0,005$).

○ **Effet environnemental**

Une corrélation positive a été mise en évidence entre la température nocturne (enregistrée à l'intérieur des ouvrages ou par la station d'Entzheim) et la fréquentation des ouvrages (Spearman, $p > 0,001$). Il n'a pas été possible de mettre en évidence d'autres effets de la météo locale sur la fréquence d'utilisation des hamstéroducts (fig V). Nous avons également testé l'effet de la différence entre les températures observées pendant l'étude et les températures moyennes enregistrées sur les 5 dernières années afin d'étudier l'effet de températures « hors-normes » sur la fréquentation. Ni les périodes plus froides et ni les périodes plus chaudes que les moyennes de saison n'ont eu d'impacts sur la fréquentation des ouvrages (F test, $p = 0,211$ et $p = 0,306$ respectivement). Remarquons que la nuit, les hamstéroducts ont été plus chauds de 1°C par rapport au milieu environnant. La température de ces hamstéroducts a été également plus stable (Levene, $p < 0,01$). Il y a eu autant d'évènements à la nouvelle et à la pleine lune (KW, $p = 0,689$).

Effet météo	P valeur (F test)	Effet météo	P valeur (F test)
Variation T°	0,211	Humidité	0,306
Humidex	0,211	Pluviométrie	0,731
Force du vent	0,711	« Il a plu ce jour-là »	0,517

Tab V : Résultats des tests de Fisher sur l'effet des variables météorologiques sur la fréquentation des passages (nombre d'évènements toutes catégories par jour et par passage). L'hypothèse H1 est rejetée au seuil de 5% pour chacune des variables.



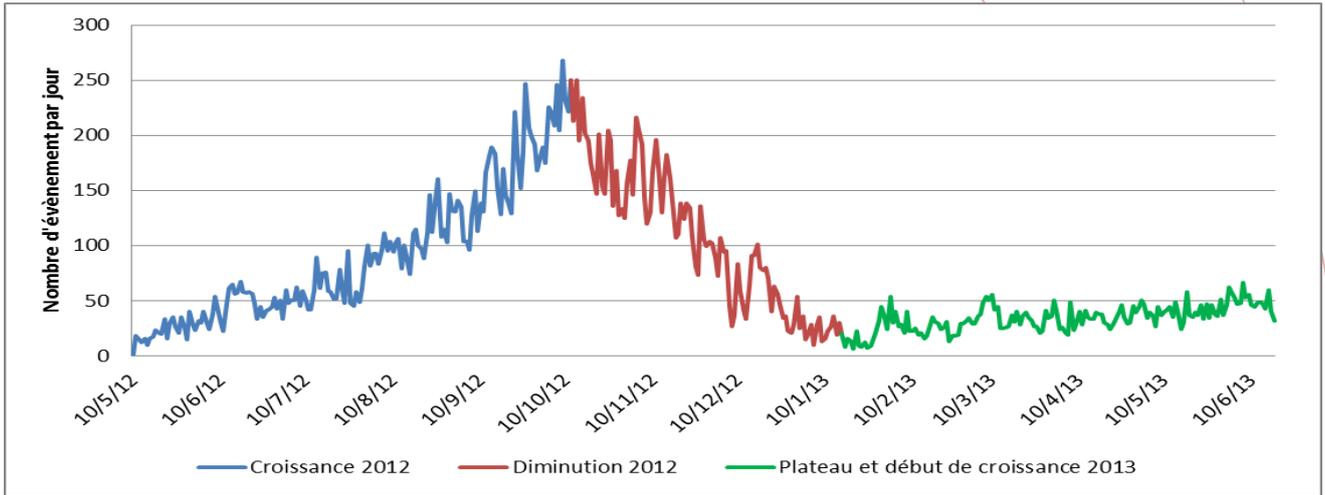


Fig W : Effet de l'avancement de l'année. Le maximum de fréquentation est observé début octobre, le minimum fin janvier.

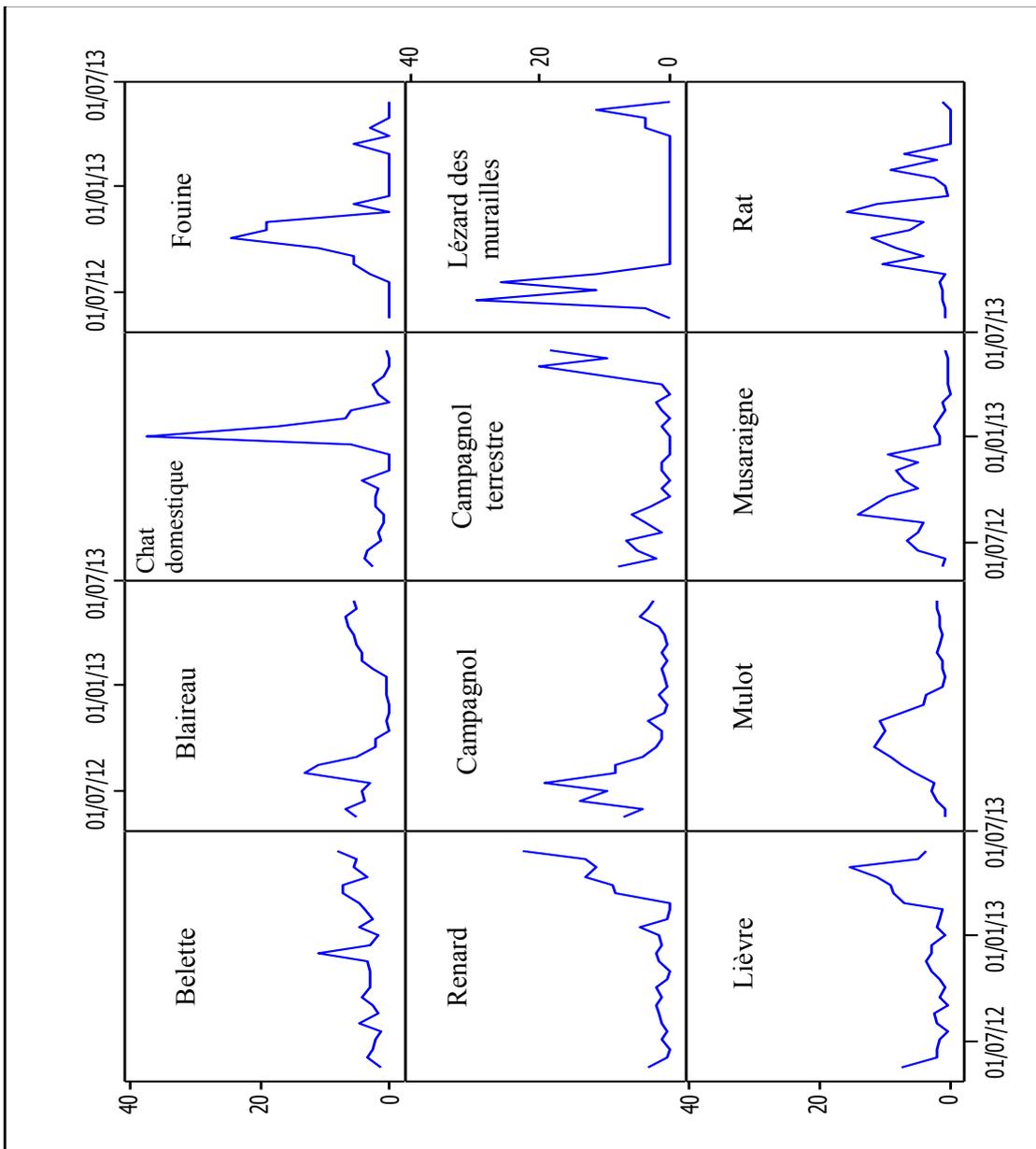


Fig X : Répartition saisonnière par espèce de la fréquentation des hamstéroducts

- 4) Où ?

o *Effet de la taille des passages*

Il y a eu une hétérogénéité dans l'utilisation des types de buses selon l'espèce (GLM log transformation, $p < 0,01$). Une utilisation moyenne des passages Petit inférieure de 15% fut observée mais non significative à l'échelle de l'ensemble de la biodiversité (GLM log transformation, $p = 0,106$). Les résultats ont été similaires en utilisant uniquement les traversées certaines ou en utilisant les traversées incertaines et certaines. La répartition des événements selon le type de passage est représentée figure Y (seules les espèces ayant effectuées au moins 15 traversées y sont considérées). Le **blaireau** et le **lézard des murailles** ont plus souvent été aperçus dans les **petits** ouvrages (KW, $p = 0,029$, $p = 0,003$) et le **rat** plus fréquemment dans les **moyens** (KW, $p = 0,038$, $p = 0,013$). Le **campagnol** a montré une tendance pour **petits** ouvrages (KW, $p = 0,090$), le **campagnol terrestre**, le **lièvre**, le **hérisson** pour les **moyens** ($p = 0,088$, $p = 0,069$, respectivement). Une très faible utilisation du passage H2 (ouvrage de dimension moyenne, seul passage de forme ovale) a été observée (Fig Z). Lors de la période de suivi du passage agricole OA2 (type **Grand**, Juin 2013), une préférence pour cet ouvrage fut observée concernant le **lièvre** (80% en OA2). Les **renards** l'utilisaient autant que le passage H7, passage « moyen » de forme rectangulaire (KW, $p = 0,252$), mais n'ont pas été observés dans les autres passages. Dans les ouvrages OA1-N et OA1-S différents micromammifères ont également été observés mais uniquement sur le talus supérieur qui présente un coefficient d'ouverture similaire aux hamstéroducts.

o *Utilisation de la zone d'étude*

Le nombre de trajets selon la direction de la traversée (NW→SE et SE→NW) était équilibré (Kruskal-Wallis $p = 0,6$). Il n'a pas non plus été possible de mettre en évidence un effet significatif (Kruskal-Wallis, $p = 0,655$) de la direction de traversée par rapport à la position extérieure ou intérieure de la sortie par rapport au raccordement des tronçons de voie rapide (Figure E). Par ailleurs, autant d'événements ont été observés au centre du raccordement qu'en extérieur du raccordement (KW, $p = 0,514$). De façon générale, les micromammifères (campagnols, mulots et musaraignes) arrivaient et repartaient des hamstéroducts en longeant sur une plus ou moins grande distance le grillage adjacent à la route (test T, $p = 0,029$). Une coulée a néanmoins été systématiquement présente en face des hamstéroducts et fut due aux carnivores qui semblaient viser à distance les entrées des tunnels plutôt qu'y parvenir en longeant les clôtures de l'autoroute (test T, $p = 0,015$). Des terriers de blaireaux et de renards ont été recensés au Sud-Est et au Sud-Ouest du raccordement (données ODNAT et observations directes). Un nombre important de terriers de campagnols et de mulots a été observé au centre et autour du raccordement. En 2013, 3 terriers de hamster ont été recensés dans la boucle Nord. En 2012, un hamster a probablement installé un terrier dans la boucle Sud et il est probable que deux terriers étaient présents dans la boucle Nord.



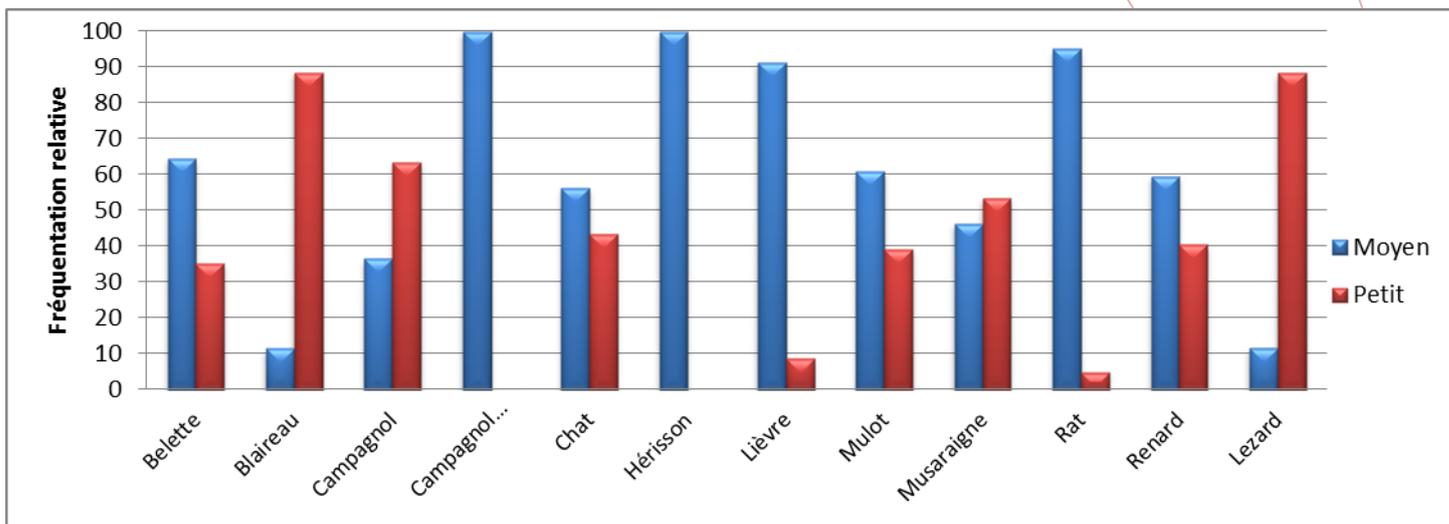


Fig Y : Utilisation spécifique des différents types de passage.

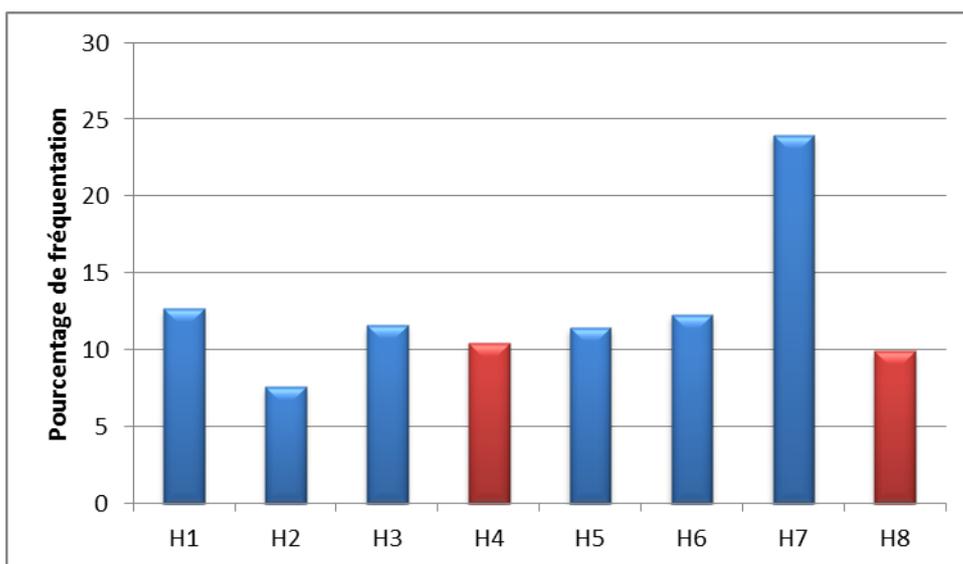


Fig Z : Utilisation globale des différents hamstéroducts

- **5) Comment ?**

○ ***Comportements de traversées hamstéroducts***

Le temps et la vitesse de traversée complète étaient différents selon les espèces (Kruskal-Wallis, $p < 0,01$). L'écart type élevé des vitesses a été dû à une minorité d'évènements à fort effet de levier, correspondant à des individus explorant la buse. La vitesse moyenne, toutes espèces confondues a été d'environ 2 km/h avec un maximum de 18,5 km/h entre les deux ouvertures pour un mulot. La répartition spécifique des vitesses de traversée complète est disponible Figure AA. La vitesse des chats fut homogène durant les traversées (Mann-Whitney, $p = 0,393$). La vitesse des lièvres avait tendance à augmenter pendant la progression vers l'autre extrémité des hamstéroducts (Mann-Whitney, $p = 0,07$). Seules les espèces possédant un nombre d'enregistrements supérieur à 10 ont été utilisées pour ce test.

○ ***Comportements de traversées de l'ouvrage agricole OA2***

Les renards empruntant l'ouvrage s'y engageaient et en ressortaient sans marquer d'arrêt. Un engagement sur deux, le lièvre marquait un arrêt à l'entrée ou à la sortie de l'ouvrage. 91% des traversées observées se sont déroulées sur la chaussée de l'ouvrage contre 9% sur les trottoirs. Seuls quelques renards et les rares micro-mammifères observés (qui ont refusé l'engagement) ont emprunté les trottoirs.

○ ***Durée des prises de décision***

Le temps mis par un individu avant de s'engager au-delà du premier mètre à l'intérieur du conduit (traversée certaine, incertaine ou partielle), ou de finalement ressortir avant le premier mètre (refus) était différent selon les espèces (Kruskal-Wallis, $p = 0,015$). La valeur médiane était de 3 secondes pour les blaireaux, chats, belettes et rats contre 2 secondes pour les campagnols, mulots, lièvres, musaraignes et renards. Seules les espèces où l'on disposait d'un nombre d'évènements supérieur à 15 ont été utilisées pour cette comparaison. La durée de présence dans un passage lors d'une traversée partielle dépendait aussi de l'espèce considérée (Kruskal-Wallis, $p < 0,01$). Les lièvres et les chats domestiques effectuaient souvent un aller-retour sur toute la longueur du passage. Les blaireaux avançaient lentement et exploraient le passage. La durée médiane des engagements partiels de ces trois espèces a été supérieure à 2 minutes. Les mulots, campagnols, campagnols terrestres et belettes ressortaient après demi-tour dans les 4 premiers mètres. La durée médiane des engagements partiels de ces quatre espèces a été inférieure à 1 minute. Seules les espèces ayant au moins 8 traversées partielles ont été statistiquement utilisées. Les durées excédant



Espèce	Vitesse moyenne pour l'ensemble des évènements de traversées (km/h)	Ecart type	Vitesse moyenne maximale entre deux pièges photos (km/h)	Vitesse maximale observée entre deux caméras (km/h)
Blaireau	2.8	1.7	5.6	-
Campagnols	1.8	2.7	13.1	-
Chat	2.8	1.7	5.3	8
Lièvre	2.9	2.6	12.3	8
Mulots	1.6	1.5	18.5	13

Tab AA : Statistiques exploratoires de la vitesse des différentes espèces lors de la traversée d'un hamstéroduct. Le temps utilisé est la durée mise par un individu pour parcourir l'ensemble d'un conduit. L'écart type très élevé indique des comportements de traversée différents : course et exploration entre autre. La vitesse moyenne maximale est mesurée sur toute la longueur du tunnel avec les pièges photos. Les caméras utilisées pour calculer la vitesse maximale observée entre deux caméras sont distantes de 10 mètres. La différence entre vitesse moyenne maximale et vitesse maximale observée entre deux caméras est due à l'utilisation de données obtenues par la photo dans des hamstéroducts non équipés de caméras vidéo.



Sanglier

Hamster
communBlaireau
d'Europe

5 minutes ont été exclues afin de ne pas considérer les individus utilisant le passage souterrain comme un habitat. Aucune traversée partielle n'a été observée quand plus de la moitié du tunnel était franchie, exceptée chez les lièvres et les chats. Les demi-tours après le premier mètre n'ont jamais été associés à une peur induite par le système vidéo et surviennent toujours après une période d'exploration à allure modérée.

- **6) Anecdotes**

- Durant 2 semaines, une planche a été posée contre la paroi d'un hamstéroduct, formant un tunnel d'une vingtaine de centimètres de diamètre. Plus d'un mulot sur deux y est entré pour traverser le passage.
- Quelques mulots ont emprunté la gouttière formée par les câbles électriques des caméras installée à 20 centimètres durant l'intégralité de leur traversée.
- A deux reprises, un chat domestique a effectué un affut de plusieurs heures dans un hamstéroduct. Malgré sa présence visible depuis l'extérieur, une dizaine de mulots ont été mangés par l'animal qui les avale sans même les croquer.
- Des centaines d'araignées ont installées leurs œufs à l'intérieur des caissons de sécurité des pièges photographiques, au grand bonheur des intervenants lors du relevé des photos. Des guêpes ont fabriqué plusieurs nids sur les hauteurs des hamstéroducts, encore une fois au grand bonheur des intervenants lors du relevé des photos.
- Sur la vingtaine de pièges photographiques utilisés, deux ont été volés durant l'été 2012. Ceux-ci étaient situés dans les ouvrages OA1-N et OA1-S, passages les plus fréquentés par l'homme. Ils n'ont pas été retrouvés sur des sites de vente d'occasion grâce à leur référencement, suggérant un acte de malveillance gratuit.





Chat domestique capturant un mulot



Hérisson
d'Europe



Rat
surmulot



Renard
roux



Fouine



Campagnol sp



Lièvre
commun



Discussion

Avantages et inconvénients techniques du système de suivi utilisé.

- **Pièges photographiques**

Tout d'abord, le problème du flash infra-rouge de l'appareil photo. Il possède d'après le fabricant une longueur d'onde de 940 nm, considérée invisible par les mammifères (Newbold 2007). Pourtant, nos observations démontrent une réaction de curiosité ou de fuite au moment de la prise de photo par différentes espèces dont les blaireaux et les renards. La perception du déclenchement photographique pourrait également être liée aux bruits émis par l'appareil dans les infra-sons ou les ultra-sons, ce qui doit être approfondi.

De toutes les manières, la faune s'y habitue puisqu'après 30 jours, plus aucun comportement de fuite ou de curiosité n'ont été observé. Il faut cependant distinguer les individus naïfs par rapport à l'ouvrage des individus habitués à le traverser. En effet, les renardeaux observés en 2013 ont traversé les ouvrages sans problème. Les individus impactés seraient donc ceux fréquentant l'ouvrage avant la mise en place du système de suivi. Sur la base de ces résultats, une période d'habituation au dispositif de suivi d'un mois est donc conseillée. Un résultat similaire a été montré concernant les pièges Inra à micro-mammifères où la période d'habituation conseillée permet aux animaux de laisser des odeurs familières dans les pièges (*F. Leger ONCFS comm pers*). Il est donc probable que la réaction de la faune vis-à-vis des pièges photographiques ne soit pas seulement due au flash mais également aux odeurs nouvelles apportées lors de son installation, hypothèse appuyée par la diminution du nombre de carnivores la nuit suivant le passage d'un expérimentateur sur le terrain (Fig P).

Un deuxième problème technique concerne l'efficacité du détecteur déclenchant le piège photographique, qui comme nous l'avons expérimenté, reste modérée (45% de micromammifères non détectés). Pourtant, nous avons testé cette efficacité en ayant déterminé au préalable et choisi la meilleure combinaison des deux types de détecteur (mouvement et infrarouge) pour déclencher la prise photographique. Nos tests indiquent clairement la nécessité de paramétrer les pièges photos sur un mode de fonctionnement exploitant fortement le détecteur de mouvement plutôt que le détecteur thermique, que ce soit en hiver ou en été. Avec le meilleur paramétrage à notre disposition des pièges photographiques, environ un animal sur deux reste donc non photographié. Ces événements non enregistrés concernent pour la plupart des mulots apparemment habitués au passage, car courant en ligne droite depuis l'extérieur de la buse. Cette traversée linéaire est semblait-il incompatible avec le déclenchement du dispositif qui fonctionne en zones de détection horizontales. Il faudrait donc repenser le positionnement des pièges photographiques lors d'un suivi



spécifique de ce type de petits animaux très véloces. Les espèces plus grandes sont par contre systématiquement photographiées (>95% de détection). Les seuls événements non détectés chez ces espèces sont situés dans les petits passages, où un problème d'espace disponible a interdit un positionnement optimal de l'appareil par rapport à l'entrée de la buse, entraînant une détection moins efficace, le détecteur étant trop proche de l'entrée du passage. Cette difficulté illustre néanmoins les biais potentiels d'une comparaison entre passages à faune de géométries différentes : une différence de comportement des espèces à la traversée pourrait être due à la géométrie des passages, aux systèmes de suivis ou à leurs interactions.

Malgré ces différentes contraintes techniques, le modèle de piège photographique utilisé reste cependant très efficace. En effet, la plupart des modèles actuels sont sensibles aux mouvements de la végétation et au rayonnement solaire, déclenchant un grand nombre de photos inutiles. Sur 100 photos prises par le Reconyx, 3 seront vierges mais deux d'entre elles auront été déclenchées par un animal trop véloces pour apparaître sur le cliché. Aussi, il s'agit d'un modèle fiable et professionnel du point de vue de sa conception. Toutes les données des photographies sont recensées et ordonnées dans les fichiers exif, faciles à extraire, ce qui n'est pas le cas de tous les appareils disponibles sur le marché.

Le temps d'exploitation et d'analyse des photos est long et psychologiquement fatigant. La mise au point d'un logiciel basé sur la reconnaissance optique des caractères (OCR) et l'extraction des données exif par le CETE de l'Est et financé par la Dreal Alsace a permis un gain de temps considérable. Grâce à ce logiciel nommé « Passage à faune », l'analyse du nombre important de photographies prises chaque année dans les hamstéroducts de la présente étude peut se faire en quelques mois (environ 2000 photos dépouillées par heure via le logiciel contre 400 à la main).

La courbe mettant en relation le pourcentage de biodiversité recensée par les pièges photographiques et la durée du suivi (Figure Q) indique des résultats très différents de ceux de Malo et al. 2006 menés avec des pièges à traces mais uniquement pendant l'été. Lors du premier rapport faisant suite à 4 mois d'étude, nos résultats étaient similaires à ceux de cette étude mentionnée où nous pronostiquions une biodiversité observée de 80% à 26 jours contre 115 jours à présent. Cela montre l'importance d'effectuer des suivis sur une plus longue durée car de nouvelles espèces peuvent apparaître. Notons que notre étude n'a pas pris en compte les espèces d'oiseaux et de la grande faune pour établir ces courbes, car elles ne constituent pas les cibles des hamstéroducts et n'ont souvent été aperçues qu'une seule fois.

- **Système vidéo**

L'utilisation de la vidéo surveillance (dite lourde, Carsignol et al. 2005), apporte des avantages significatifs. Il aurait en effet été impossible sans elle de valider l'efficacité réelle des pièges photographiques utilisés. Ensuite, les comportements enregistrés délivrent des renseignements pertinents sur les modalités d'utilisation des passages par les différentes espèces. Cependant, malgré ces avantages indéniables, ce système est difficile à exploiter et très coûteux, en finance et surtout en temps d'analyse. En effet, le seuil de détection permettant une efficacité optimale en termes de détection d'évènement est très difficile à paramétrer. En effet, les espèces cibles étant petits et très mobiles, le seuil doit être relativement bas. Une telle sensibilité entraîne des fausses-détections dues à la luminosité changeante et à la végétation. Ainsi, pour obtenir le meilleur paramétrage, il faudrait durant 24 heures consécutives et une fois tous les deux mois, régler la sensibilité du détecteur pour chaque tranche horaire. D'autre part, même ce paramétrage optimal, n'entraînant pas de déclenchements artefacts, n'est pas assez sensible pour détecter l'intégralité des évènements. En d'autres termes, le bruit de fond généré par l'image infra-rouge est plus important que les variations d'image entraînées par le mouvement de certaines espèces. Une solution pour mieux apprécier le comportement de la faune serait l'utilisation de projecteurs infra-rouges à 850nm plutôt qu'à 940nm, ce qui permettrait une image avec moins de bruit de fond. Egalement, on pourrait utiliser une source de lumière plus visible afin d'augmenter la qualité d'image mais la réaction de la faune à cette perturbation doit être évaluée.

Remarquons que le modèle de serveur utilisé, bien que répondant parfaitement au cahier des charges fut peu intuitif et difficile à utiliser pour le stockage des données. Cet exemple n'est pas isolé et montre que la vidéosurveillance n'a pas vocation à conserver des séquences au-delà de quelques jours. Nous conseillons donc à tous les utilisateurs souhaitant mener une étude similaire de bien préciser dans leur cahier charge une certaine ergonomie d'utilisation et un transfert rapide des données vers des supports de stockage externes

Avantages et inconvénients de la méthode d'analyse des données

Pour éviter une trop forte redondance des évènements liés à un unique animal, le critère des 10 minutes a été appliqué et aura éliminé plus de 30% des données. On peut s'interroger sur sa fiabilité (méthode trop peu conservatrice ?). Cependant, ce critère a été établi à partir de périodes à faibles densités de traversées (Avril et Mai 2012) où le risque de considérer deux individus comme étant un seul animal était faible. Il a ainsi été facile de mesurer le temps maximal où un micromammifère (ou un carnivore) restait à proximité d'un passage à faune. De plus, il a été rare que deux individus de la même espèce fussent présents sur une même image. Cette perte de données, nécessaire pour effectuer des statistiques plus fiables, suggère un comportement d'allées-



et-venues des micromammifères à l'entrée des hamstéroducts. Les carnivores ont également présenté un tel comportement mais rarement dans un laps de temps si court (souvent sur plusieurs heures), rendant difficile l'utilisation d'un critère similaire de non-redondance des données.

Utilisation des hamstéroducts par la petite faune

Les différents passages à faune du raccordement A35/A352 sont donc bien utilisés et effectivement traversés. En dehors des événements dus aux mulots et aux campagnols, la biodiversité observée est relativement importante (Mata et al. 2007). Ainsi par exemple, tous les petits carnivores présents dans la zone, à part l'hermine (données ODONAT), ont utilisé au moins un de ces 11 passages. Certaines espèces anecdotiques n'ont été observées qu'à une ou deux reprises seulement (par exemple le sanglier, le chevreuil, le héron cendré). Notons aussi qu'aucun oiseau n'a traversé d'un bout à l'autre un passage souterrain. On aurait pu penser que faisan et perdrix puissent utiliser ce type de passage mais aucune de ces espèces de gibiers, principalement terrestres, n'a été observée, bien que présentes dans la zone (obs. directe). Parmi ces espèces les moins observées, notons la présence du hamster commun, qui rappelons-le, a en grande partie motivé l'installation de ces passages à faune. Dix événements liés au hamster commun ont été enregistrés (7 en 2012, 3 en 2013). Notons qu'au moins 2 individus ont traversé les passages afin de s'installer dans les boucles de l'échangeur (dont un individu à 2 reprises) et que plusieurs terriers ont été recensés dans la boucle Nord. Cet espace situé entre deux routes fortement fréquentées constitue donc un milieu habitable pour plusieurs espèces de rongeurs, comme en témoignent le nombre important de terriers de campagnols en ces lieux. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la qualité de l'habitat. En effet, le sol du raccordement est très propice à la construction de terriers et les cultures des deux boucles sont variées (friche, maïs, luzerne, céréale, betterave). Il sera important dans les années qui viennent à ne pas négliger la faune présente à l'intérieur de l'échangeur, en particulier le hamster, en continuant à mener une politique propice aux cultures favorables.

Le mode d'utilisation de la série de passages à faune étudiés fournit une indication favorable sur leur fonctionnalité quant à leur objectif premier : rétablir les continuités écologiques. En effet, les individus des espèces les plus fréquentes (carnivores et rongeurs) circulent partout, dans tous les sens et directions. Il n'y a ainsi, par exemple, aucune différence observée entre le nombre d'événements situés du côté extérieur ou intérieur du raccordement. Autant d'arguments pour appuyer l'idée que ces hamstéroducts participent effectivement au décloisonnement du milieu. Un passage à faune a pour objectif premier de reconnecter génétiquement les populations. Cependant, même si nos observations confortent le rôle bénéfique de ces infrastructures transversales, seule une analyse détaillée de la consanguinité et de la dérive génétique permettrait d'en démontrer la

pertinence, et à moindre échelle temporelle une approche individuelle (Corlatti et al. 2009). En effet, malgré le nombre important de traversées observées, rien ne renseigne sur la proportion d'individus ayant empruntés les ouvrages par rapport aux individus susceptibles de les fréquenter. Il sera intéressant et novateur d'estimer cette proportion si le suivi se poursuit.

L'utilisation des différents passages dépend de plusieurs facteurs dont leur coefficient d'ouverture. La longueur des passages étant similaires, le coefficient sépare *in fine* les buses par la taille de l'entrée ($C = \text{hauteur} \times \text{largeur} / \text{longueur}$, Gordon & Anderson, 2003). Les résultats liés à cette géométrie sont intéressants car cela indique qu'un seul type de passage, par exemple le passage « classique » (ici de taille moyenne), ne semble satisfaire toutes les espèces (Fig Y). Cela confirme des travaux antérieurs indiquant que l'utilisation de plusieurs types de passage à faune est nécessaire pour satisfaire aux exigences de toutes la biodiversité (Mata et al. 2008, McDonald & St Clair 2004, Clevenger & Waltho 2000). Nos résultats indiquent ainsi que les renards (au moins pour les adultes) nécessitent de grands ouvrages, les lièvres et micromammifères des moyens et les blaireaux les plus petits. L'aspect généraliste du chat domestique peut être expliqué par sa probable habitude à s'adapter aux paysages anthropiques. La préférence du blaireau pour les conduits de petite taille pourrait trouver explication par la similarité de diamètre d'ouverture entre ce type de buse et leurs terriers. La préférence des micromammifères pourrait s'expliquer par l'hypothèse de Yanes et al. 1994 indiquant que ces espèces vont préférer les conduits avec peu de prédateurs présents, ici les passages moyen puisque les petits sont régulièrement empruntés par les blaireaux, les grands passages n'offrant pas de cachette et étant utilisés par les renards. D'autre part, seul deux évènements de prédation furent observés (liés à un seul individu) sur l'intégralité du suivi, constituant un argument allant à l'encontre de la théorie Prey-Trap, déjà remise en cause par Ford & Clevenger 2010.

Remarquons qu'aucun effet de périphérie n'est observé. En effet, comme il est souvent admis que les animaux longent les clôtures de l'autoroute, la probabilité d'évènements dans les passages à faune situés aux extrémités du raccordement devrait être plus élevée, ce qui n'a pas été montré ici. Cet absence d'effet de concentration a déjà été observé par Clevenger & Waltho 2004 et pourrait être expliqué par une connaissance forte de l'environnement par les carnivores qui iraient directement vers les PAF sans devoir longer les clôtures, hypothèse appuyée par l'existence systématique de coulées en face des hamstéroducts. La faible utilisation du passage H2 pourrait être expliquée par la présence du dispositif de suivi vidéo, du coffret électrique à proximité ou bien par sa forme ovale, ce qui ne peut être prouvé dans cette étude. La forte concentration des évènements à l'intérieur de la buse H7 est probablement liée à sa position. En effet, il est entouré d'un passage de petite dimension (H8) et d'un ouvrage agricole (OA2). Il concentre ainsi tous les micromammifères préférant le type d'ouvrage Moyen présents autour de l'ouvrage (Fig Z).



L'effet saisonnier est bien visible et l'augmentation rapide durant l'été, bien que non exponentielle, reflète la dynamique de croissance des populations au cours des saisons (Fig W). Notons que Clevenger & Waltho 2003 montrent l'importance de mener ce type de suivi sur plusieurs années afin de mettre en évidence la dynamique d'adaptation des espèces à un nouveau ou à un ancien passage (et au dispositif de suivi) ainsi que la dynamique des populations elles-mêmes. Un premier résultat est donné par la comparaison des mois de Juin 2012 et 2013, indiquant une plus forte fréquentation des ouvrages la seconde année. Cette différence est particulièrement visible concernant l'ouvrage H7 et peut s'expliquer par les pratiques agricoles. En effet, en 2012, le champ à l'intérieur du raccordement faisant face au hamstéroduct était non exploité (couvert végétal hétérogène peu dense) alors qu'en 2013, ce même champ était couvert de luzerne. Ce seul exemple ne saurait répondre de la fluctuation des populations de l'intégralité des zones : l'observation de l'effet pluriannuel ne peut se contenter d'un seul mois. De plus, les dynamiques de populations ne peuvent être appréciées que sur plusieurs années consécutives. Il faudrait donc poursuivre le suivi sur quelques années supplémentaires. Notons le cas particulier du lièvre qui fut fortement observé entre avril et mai de chaque année mais peu en dehors de ces périodes. L'explication probable serait liée à la phénologie de reproduction du lièvre, et au fait que le centre du raccordement aurait pu être utilisé comme lieu de rassemblement pour la période de bouquinage de cette espèce (observations directes). Ce rassemblement saisonnier terminé, les lièvres se seraient dispersés et n'auraient ainsi plus été observés.

Un autre des avantages du suivi détaillé des événements par piège photographique est d'appréhender la rythmicité circadienne de l'activité de la faune locale, surimposée à l'effet saisonnier. Cela reste vrai si les horaires de présence dans les passages à faune sont bien corrélés aux périodes d'activité des différentes espèces, ce qui est le cas ici d'après Le Louarn & Quéré 2003. Le fait qu'aucun effet météo n'ait été mis en évidence, mis à part la température qui traduit de l'avancée de l'année, ne peut être utilisé pour tirer des conclusions générales : une légère différence de température est observée à l'intérieur des hamstéroducts mais il n'est pas possible d'analyser ses conséquences dans cette étude.

Enfin, une part importante de la biodiversité, pourtant utilisatrice des hamstéroducts, n'a pas été étudiée. Il s'agit principalement des invertébrés, espèces très sensibles à la fragmentation du territoire. Il sera nécessaire d'approfondir l'étude en incluant ces espèces dans le protocole d'identification.

Apport des traversées partielles et des refus

Un point important réside dans la modalité d'utilisation des passages en termes de type d'évènements. Malgré une proportion élevée de traversées incertaines (analysée plus bas), on remarque après correction la prédominance des traversées complètes et des refus aux traversées partielles. Ce résultat est, pour les micromammifères, cohérents avec l'analyse de Ng et al. 2003 indiquant que, passés les premiers mètres, les individus traversent systématiquement les passages souterrains en entier. Cependant, les blaireaux se comportent différemment et de trois manières distinctes. Si l'individu se situe dans une buse de type « petit », au vue de la vitesse moyenne de parcours, il la traverse d'un seul tenant sans s'arrêter. Selon que l'animal soit habitué ou non aux dispositifs de suivi, il peut montrer un comportement intéressant. Ainsi, plusieurs individus auraient refusé jusqu'à 6 fois d'entrer dans le passage, à quelques minutes d'intervalles avant de s'engager dans le tunnel. A chaque « tentative », le blaireau faisait un pas de plus dans le passage et ne cessait de fixer l'appareil photo. S'il s'agit d'un passage moyen, le blaireau montre des signes d'exploration, renifle partout et peut à tout moment rebrousser chemin et ressortir du conduit. Ce dernier comportement illustre la relativité de la notion « d'échec » de traversée, car cela dépend de la motivation première de l'individu. Si dans notre problématique de rétablissement des continuités écologiques, le fait qu'un animal fasse demi-tour puisse être considéré comme un échec, c'est sans compter sur la complexité de la plasticité comportementale de certaines espèces généralistes. Ainsi, comme le montre Vereniging Das & Boom 1990, certaines espèces dont le blaireau peuvent inclure un passage à faune dans leur domaine vital. Pour cette espèce, la venue dans un passage souterrain peut correspondre simplement à une visite d'exploration en limite de son domaine vital, pour marquer son territoire, éventuellement s'y reposer et repartir sans le franchir. A l'inverse, si la volonté initiale de l'animal était bien de traverser le passage et qu'il y a renoncé, il faut en trouver les causes.

Parmi les vidéos correspondant à des traversées partielles, aucun individu n'a semblé être effrayé par le système après son engagement dans le tunnel. Les lièvres, lors des traversées partielles, parcourent l'intégralité des passages avant de revenir sur leurs pas. Les éléments motivant ce comportement ne sont pas connus. Concernant les blaireaux, la plupart des traversées partielles ont eu lieu dans les passages de type « petit », non équipés de caméras vidéo. Il n'est donc pas possible d'interpréter leurs demi-tours comme des échecs, des changements de décision intentionnels ou des objectifs fixés dès l'engagement dans le tunnel.

Les refus de traversée ont donc pour la plupart lieu à l'entrée du passage. Ici le problème d'interprétation est de même nature que pour les traversées partielles, on ne peut présupposer l'intention de l'animal. Plusieurs comportements récurrents sont observés. Dans un premier cas,



l'individu traverse en quelques secondes la zone d'entrée de droite à gauche ou de gauche à droite : il s'agit d'un animal longeant le grillage anti-faune et ne montrant visiblement aucune intention d'entrer ou de traverser le passage. Dans un deuxième cas, un individu peut rester quelques secondes, voir quelques minutes dans l'entrée, (montrant des signes d'exploration, de toilettage, de recherche de matériaux pour la construction d'un nid) puis repartir. Comme pour le blaireau, cet animal pourrait uniquement explorer ce milieu un peu plus dégagé sans volonté de le traverser, pour y trouver simplement repos ou refuge. Pour le lézard observé 33 fois, il pourrait s'agir de la recherche d'un avantage thermique. Dans un troisième et dernier cas, un animal arrive dans l'entrée et montre un comportement de fuite au déclenchement du système photographique. Il s'agit ici d'un échec lié au dispositif, que l'intention initiale de l'individu ait été de traverser ou non le passage. Il est difficile de discerner ici si la réaction de méfiance est liée au tunnel lui-même ou aux dispositifs d'enregistrement, ne sachant pas si l'animal a déjà été confronté à un hamstéroduct ou non. Quoiqu'il en soit, ces dispositifs de suivi ont prouvé à la fois leur innocuité et efficacité relatives, vu la forte proportion de traversées complètes observées.



Conclusion

La pertinence des hamstéroducts du raccordement A35/A352 peut être considérée avérée. Ils sont régulièrement utilisés, traversés d'un bout à l'autre, et cela par une biodiversité non négligeable, dont le hamster commun. L'importance de la disponibilité de différents types de passages à proximité a aussi été illustrée. De nos jours, un seul écopont ne suffit plus à satisfaire l'ensemble du spectre faunistique utilisant les passages à faune, le mot est à la diversité. Il est donc conseillé aux maîtres d'œuvres d'alterner les ouvrages Petit et Moyens tous les 300 mètres afin de satisfaire à la plus grande biodiversité et de diminuer le risque de prédation. Cependant, ce conseil est difficile à respecter au vu des coûts et des conditions techniques. En effet, il n'est pas toujours envisageable de creuser un dalot sous une route en déblais. Cette situation est rencontrée concernant le hamster commun où reconnecter ses populations revient à augmenter la perméabilité de l'A352, voie en fort déblai. Explorer la piste de la requalification d'ouvrages agricoles existant est une perspective intéressante pour le hamster et l'ensemble de la biodiversité.

Ensuite, des conclusions techniques ont pu être apportées grâce à l'utilisation parallèle des pièges photographiques et de la vidéo-surveillance, notamment concernant l'efficacité des appareils photos et le dérangement imposé à la faune de par leur présence. Nous conseillons aux écologues et naturalistes de placer au moins 30 jours en amont de l'étude les pièges photographiques afin d'habituer la faune à leur présence. Aussi, 30 jours d'études consécutives semblent suffire à observer 80% de la biodiversité présente mais nous avons montré que le nombre d'individus observés sera sous-estimé concernant les micromammifères.

Enfin, différentes nouvelles problématiques ont été soulevées. Les invertébrés ne sont pas pris en compte malgré leur présence dans les hamstéroducts et la densité des populations adjacentes, notamment des micro-mammifères est ignorée, pourtant nécessaire à des études relatives. Un suivi plus large et sur plusieurs années permettra de répondre à ces questions.





Apports de l'étude à l'enseignement

Cette étude a donné naissance à 2 stages de M1 et un stage de M2 et a donc participé à la formation universitaire des étudiants. Ce sujet, intégrant des problématiques bien réelles auxquelles sont confrontés les ingénieurs écologues du monde entier, est une occasion rare d'étudier autant d'espèces sauvages de nos régions et est un excellent support pédagogique pour illustrer les grandes notions d'écologie et de services écosystémiques.



Tab T : Nos sympathiques intervenants sournoisement mis en valeur par les pièges photographiques



Bibliographie

- Bissonette, J. A. & Adair, W. Restoring habitat permeability to roaded landscapes with isometrically-scaled wildlife crossings. *Biol. Conserv.* **141**, 482–488 (2008).
- Carsignol, J. *et al.* Aménagements et mesures pour la petite faune. *Sétra MEDDE* (2005).
- Carsignol, J. Routes et passages à faune - 40 ans d'évolution. *Sétra MEDDE* (2006).
- Clevenger, A. Conservation value of wildlife crossings: Measures of performance and research directions. *GAMA* **14**, 124–129 (2005).
- Clevenger, A. & Waltho, N. Factors influencing the effectiveness of wildlife underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada. *Conserv. Biol.* **14**, 47–56 (2000).
- Clevenger, A., Chruszcz, B. & Gunson, K. Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildl. Soc. Bull.* **29**, 646–653 (2001).
- Clevenger, A. & Waltho, N. Long term, year round monitoring of wildlife crossing structures and the importance of temporal. *Road Ecology Center, John Muir Institute of the Environment, UC Davis* (2003).
- Clevenger, A. & Waltho, N. Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals. *Biol. Conserv.* **121**, 453–464 (2005).
- Corlatti, L., Hacklaender, K. & Frey-Roos, F. Ability of Wildlife Overpasses to Provide Connectivity and Prevent Genetic Isolation. *Conserv. Biol.* **23**, 548–556 (2009).
- Décret du 22 septembre 2003 déclarant d'utilité publique les travaux de construction du raccordement A35.
- DREAL Alsace Mesures pour la sauvegarde du grand hamster d'Alsace. Pièce B : Conventions avec les exploitants 2006/2008. (2008).
- DREAL Alsace Mesures pour la sauvegarde du grand hamster d'Alsace. Pièce B : Documents relatifs au Grand Hamster d'Alsace. (2006).
- Fahrig, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **34**, 487–515 (2003).
- Ford, A. T. & Clevenger, A. P. Validity of the Prey-Trap Hypothesis for Carnivore-Ungulate Interactions at Wildlife-Crossing Structures. *Conserv. Biol.* **24**, 1679–1685 (2010).
- Forman, R. T. T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conserv. Biol.* **14**, 31–35 (2000).
- Glista, D. J., DeVault, T. L. & DeWoody, J. A. A review of mitigation measures for reducing wildlife mortality on roadways. *Landsc. Urban Plan.* **91**, 1–7 (2009).
- Gordon, K. & Anderson, S. Mule deer use of underpasses in Western and Southeastern Wyoming. *Road Ecology Center, John Muir Institute of the Environment, UC Davis* (2003).
- Hardy, A., Clevenger, A. P., Huijser, M. & Neale, G. An overview of methods and approaches for evaluating the effectiveness of wildlife crossing structures: emphasizing the science in applied science. (2003).
- Le Louarn, H. & Quéré, J.-P. Les Rongeurs de France. (2003).



- Malo, J. E., Hervas, I., Herranz, J., Mata, C. & Suarez, F. How many days to monitor a wildlife passage? Species detection patterns and the estimation of the vertebrate fauna using crossing structures at a motorway. *ICOET 2005 Center for transportation and the environment, NC State University, Raleigh, NC, USA*, (2006).
- Mata, C., Hervas, I., Herranz, J., Suarez, F. & Malo, J. E. Are motorway wildlife passages worth building? Vertebrate use of road-crossing structures on a Spanish motorway. *J. Environ. Manage.* **88**, 407–415 (2008).
- McCollister, M. F. & van Manen, F. T. Effectiveness of Wildlife Underpasses and Fencing to Reduce Wildlife-Vehicle Collisions. *J. Wildl. Manage.* **74**, 1722–1731 (2010).
- McDonald, W. & St Clair, C. Elements that promote highway crossing structure use by small mammals in Banff National Park. *J. Appl. Ecol.* **41**, 82–93 (2004).
- McGregor, R. L., Bender, D. J. & Fahrig, L. Do small mammals avoid roads because of the traffic? *J. Appl. Ecol.* **45**, 117–123 (2008).
- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire Arrêté ministériel du 24/11/08.
- Mortelliti, A. *et al.* Independent effects of habitat loss, habitat fragmentation and structural connectivity on the distribution of two arboreal rodents. *J. Appl. Ecol.* **48**, 153–162 (2011).
- Munguira, M. & Thomas, J. Use of Road Verges by Butterfly and Burnet Populations, and the Effect. *J. Appl. Ecol.* **29**, 316–329 (1992).
- Navas, F. & Rosell, i C. Surveillance de passages de faune et d'autres ouvrages transversaux aux routes. Quelles sont les dimensions des ouvrages utilisés pour les petits et moyens mammifères? (2005).
- Newbold, H. G. & King, C. M. Can a predator see 'invisible' light? Infrared vision in ferrets (*Mustela furo*). *Wildl. Res.* **36**, 309–318 (2009).
- Ng, S., Dole, J., Sauvajot, R., Riley, S. & Valone, T. Use of highway undercrossings by wildlife in southern California. *Biol. Conserv.* **115**, 499–507 (2004).
- Peris, S. & Morales, J. Use of passages across a canal by wild mammals and related mortality. *Eur. J. Wildl. Res.* **50**, 67–72 (2004).
- Ricklefs & Miller. *Ecologie*. De Boeck (2005).
- Scoters Scoters 2000-2016. **16**, (2012).
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010) 3ème édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique. Montréal, 94 pages.
- Spellerberg, I. Ecological effects of roads and traffic: a literature review. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **7**, 317–333 (1998).
- Yanes, M., Velasco, J. & Suarez, F. Permeability of roads and railways to vertebrates - the importance of culverts. *Biol. Conserv.* **71**, 217–222 (1995).
- Vereniging Das & Boom Provisions for badgers against traffic. 15 (1990).
- Vignon, V. Suivi de l'utilisation des passages pour la faune à l'aide de pièges photographiques. **4èmes rencontres 'Routes et petite faune sauvage'**, (2005).

Crédit photo : dinosoria.com, fotoplatforma.pl, campagnols.fr, images-et-photos.com, clipartof.com



Jonathan Jumeau
Dreal Alsace – Pmo
CNRS – IPHC Depe
06 07 62 33 63
Jumeau.jonathan@gmail.com



Yves Handrich
CNRS – IPHC Depe
03 88 10 69 32
yves-jean.handrich@iphc.cnrs.fr

