



HAL
open science

Utilisation des ouvrages d'art ferroviaires non dédiés à la faune par les ongulés : caractérisation multiscalair des ouvrages, de leurs paramètres techniques à leur contexte paysager

Estelle Ducat

► To cite this version:

Estelle Ducat. Utilisation des ouvrages d'art ferroviaires non dédiés à la faune par les ongulés : caractérisation multiscalair des ouvrages, de leurs paramètres techniques à leur contexte paysager. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04845289

HAL Id: dumas-04845289

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04845289v1>

Submitted on 18 Dec 2024

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.

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes

Année universitaire : 2023-2024

Spécialité : Agronomie

Spécialisation :

Génie de l'Environnement (GE) - Protection et
Aménagement des Milieux et Ecologie Quantitative
(PAM-EQ)

Mémoire de fin d'études

d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Utilisation des ouvrages d'art ferroviaires non dédiés à la faune par les ongulés : caractérisation multiscalaire des ouvrages, de leurs paramètres techniques à leur contexte paysager

Par : Estelle DUCAT



Soutenu à Rennes le 17 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Manuel Plantegenest

Maître de stage : Tess Heydorff-Decaux

Enseignant référent : Loïs Morel

Autres membres du jury :

Fabien Verniest, membre du jury extérieur

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Céline Clauzel, sans qui ce stage de fin d'études n'aurait pas vu le jour, pour sa disponibilité, son aide incommensurable et ses remarques plus pertinentes les unes que les autres. Ma gratitude envers Tess Heydorff-Decaux est difficilement mesurable, tant elle m'a apporté au niveau professionnel et personnel, que ce soit sur le terrain, au laboratoire ou pendant la phase de rédaction de ce mémoire.

Je remercie plus globalement l'équipe du laboratoire LADYSS du campus Condorcet pour leur accueil et leur bienveillance, en particulier Bénédicte Macgregor, Olivia Gardella ainsi que les doctorants et autres stagiaires avec lesquels j'ai eu l'honneur de partager un bureau et sans qui les journées au laboratoire et plus globalement la vie dans la capitale auraient été bien moroses.

Je remercie également Laura Clevenot et Anne Petit de SNCF Réseau pour leur disponibilité et leur aide, ainsi que Thomas Dubos du Groupe Mammalogique Breton (GMB), Christine Saint-Andrieux et Aurélie Barboiron du Réseau Ongulés Sauvages pour leur aide dans la prise en compte des densités des populations d'ongulés dans cette étude.

Je suis également très reconnaissante envers l'équipe enseignante de la spécialisation GE PAM-EQ et particulièrement envers Loïs Morel, tuteur de ce stage, pour sa disponibilité lorsque de nombreux questionnements voyaient le jour. Je remercie aussi mes camarades de classe pour la bienveillance et l'entraide qui ont régné lors de cette année scolaire.

Table des matières

Glossaire.....	0
Liste des abréviations.....	0
Liste des illustrations.....	0
Liste des annexes.....	0
I-Introduction.....	1
II- Matériels et Méthodes.....	6
a-Zone d'étude.....	6
b-Caractérisation des ouvrages d'art.....	7
c-Utilisation de pièges photographiques.....	11
d-Utilisation d'une intelligence artificielle.....	12
e-Comptabilisation des passages des ongulés.....	13
III-Résultats.....	16
a-Typologie multivariée des ouvrages d'art.....	16
b-Description des vidéos obtenues grâce aux pièges photographiques.....	18
c-Analyse de l'efficacité de DeepFaune.....	20
d-Analyse de la fréquentation des ongulés aux abords des ouvrages.....	22
e-Analyse du nombre de passages des ongulés.....	24
IV- Discussion.....	25
a-Une variété d'ouvrages d'art ferroviaire difficile à capturer.....	25
b- Retour d'expérience sur l'utilisation des pièges photographiques.....	26
c-Une performance adéquate mais optimisable de DeepFaune.....	27
d-Mise en perspective des facteurs influençant les approches et les passages des grands ongulés dans les ouvrages non dédiés.....	28
V-Conclusion.....	30
Bibliographie.....	31
Annexes.....	36

Glossaire

Deep-Learning (ou apprentissage profond) : sous-domaine de l'intelligence artificielle qui utilise des réseaux neuronaux pour résoudre des tâches complexes.

Ligne classique : toute voie ferrée n'étant pas une ligne à grande vitesse et ne permettant pas la circulation de trains à plus de 200 km/h.

Open source : méthode d'ingénierie logicielle qui consiste à développer un logiciel, ou des composants logiciels, et de laisser en libre accès le code source produit.

Ouvrage carrossable : ouvrage d'art suffisamment large et adapté à la circulation de véhicules.

Ouvrage d'art : constructions de grande importance entraînées par l'établissement d'une voie de communication routière, ferroviaire ou fluviale.

Liste des abréviations

AFDM : Analyse Factorielle de Données Multiples

AIC : Critère d'Information d'Akaike

AUC : Area Under the Curve ou aire sous la courbe

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

Carte SD : Carte Secure Digital

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

GMB : Groupe Mammalogique Breton

IA : Intelligence Artificielle

INEE : Institut National d'Ecologie et d'Environnement

LED : Light-Emitting Diode ou diode électroluminescente

POSV : Petit ouvrage sous voies

PRA : Pont rail

PRO : Pont route

ROC : Receiver Operating Characteristic ou caractéristique de fonctionnement du récepteur

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer français

VIF : Facteur d'Inflation de la Variance

χ^2 : Khi carré

Liste des illustrations

Liste des figures :

<u>Figure 1 (a) et (b)</u> : Photographies d'un écopont dans le parc national de Banff au Canada (a) et d'un tunnel à amphibien dans le parc national de Doñana en Espagne (b).....	1
<u>Figure 2</u> : Graphique du nombre de prélèvements annuels issus des tableaux de chasse au niveau national pour les populations de sanglier, chevreuil et cerf.....	3
<u>Figure 3</u> : Taux d'usage des ouvrages d'art par le chevreuil et l'élan en fonction de l'ouverture de l'ouvrage d'art.....	4
<u>Figure 4</u> : Nombre de passages par des élan (a) et des chevreuils (b) dans des ouvrages mixtes par rapport au volume de trafic de véhicules.....	6
<u>Figure 5</u> : Carte de la localisation des 40 ouvrages d'art étudiés.....	7
<u>Figure 6</u> : Mesures réalisées sur les ouvrages d'art (exemple de l'ouvrage 75292)	7
<u>Figure 7</u> : Schéma des zones prospectées pour la caractérisation de la végétation.....	8
<u>Figure 8</u> : Dendrogramme de classification des ouvrages en fonction de la végétation appétente pour les ongulés, présente à leurs alentours.....	9
<u>Figure 9</u> : Planning de l'équipement et de la maintenance de chaque lot.....	11
<u>Figure 10</u> : Positions possibles des pièges photographiques pour la détection de faune aux alentours des ouvrages de franchissement non dédiés.....	11
<u>Figure 11</u> : Schéma du processus d'échantillonnage aléatoire stratifié.....	13
<u>Figure 12</u> : Schéma de la zone d'entrée de l'ouvrage.....	14
<u>Figure 13</u> : Graphique du nombre de vidéos à date et heure correctes ou incorrectes par session.....	14
<u>Figure 14</u> : Graphique des individus et des modalités de l'AFMD.....	16
<u>Figure 15</u> : Cercle des corrélations des variables quantitatives de l'AFMD.....	17
<u>Figure 16</u> : Plan factoriel de l'AFMD.....	18
<u>Figure 17 (a) et (b)</u> : Histogramme avec barres d'erreur du nombre moyen de vidéos prises par mois et par lot (a) et histogramme du nombre total de vidéos par ouvrage (b).....	19
<u>Figure 18</u> : Diagramme circulaire de la proportion des différents groupes prédits par Deepfaune dans le jeu de données de vidéos.....	19
<u>Figure 19</u> : Diagramme circulaire de la proportion des différents groupes d'animaux prédits par DeepFaune.....	19
<u>Figure 20</u> : Histogramme du nombre de vidéos par classe prédite par DeepFaune et par classe identifiée à la main.....	20
<u>Figure 21</u> : Matrice de confusion entre les classes prédites par DeepFaune et les classes identifiées à la main.....	21

<u>Figure 22 (a) et (b)</u> : Courbes ROC et AUC associées pour la prédiction “vehicle” (a) et pour la prédiction “wild boar” (b).....	21
<u>Figure 23</u> : Histogramme de la précision de DeepFaune en fonction du moment de la journée..	22
<u>Figure 24</u> : Histogramme du nombre moyen d’observations d’ongulés aux alentours des ouvrages par cluster.....	22
<u>Figure 25</u> : Coefficients et leur p-value associée estimés par le modèle pour chaque facteur...	23
<u>Figure 26</u> : Histogramme de la contribution des variables locales et paysagères à la réduction de la déviance.....	23
<u>Figure 27</u> : Graphique de la fréquentation des ouvrages par les ongulés et les humains en fonction de l’heure de la journée.....	24
<u>Figure 28</u> : Histogramme du nombre passages par ouvrage.....	24
<u>Figure 29</u> : Carte des zones de présence du cerf élaphe sur la zone d’étude	26
<u>Figure 30</u> : Nombre de vidéos sur lesquelles les classes ont été entraînées et leur score de précision associé.....	28

Liste des tableaux :

<u>Tableau 1</u> : Variables explicatives prises en compte pour l’étude.....	10
<u>Tableau 2</u> : Résultat des tests réalisés sur les facteurs principaux.....	25

Liste des annexes

[Annexe I](#) : Fiche ouvrage utilisée pour les relevés des caractéristiques techniques des ouvrages

[Annexe II](#) : Synthèse bibliographique du régime alimentaire et espèces appétantes des grands ongulés présents en Bretagne

[Annexe III](#) : Fiche de relevé afin de caractériser la végétation aux alentours des ouvrages

[Annexe IV](#) : Typologie des barrières vectorisées

[Annexe V](#) : Caractéristiques techniques du piège photographique Browning Spec Ops Elite HP5

[Annexe VI](#) : Classes identifiables par DeepFaune

[Annexe VII](#) : Illustration des différents comportements des animaux face aux ouvrages d'art

[Annexe VIII](#) : Illustration de chaque cluster de la CAH

[Annexe IX](#) : Tableau des tests statistiques simples réalisés sur chaque variable afin de déterminer leur influence sur les passages des ongulés dans les ouvrages

I-Introduction

Les continuités écologiques sont indispensables à la survie de nombreuses espèces. Elles se définissent comme l'ensemble des éléments constituant un réseau écologique et correspondent aux réservoirs de biodiversité, aux couloirs écologiques ainsi qu'aux cours d'eau et canaux, permettant aux espèces animales comme végétales d'accéder aux zones indispensables à leur croissance, leur reproduction et leur alimentation (Dehouck et Amsallem, 2018).

Les infrastructures linéaires de transport comme les routes, les autoroutes et les voies ferrées peuvent constituer des barrières à ces continuités, en fragmentant les habitats et réduisant la surface des patches continus d'habitat (Jackson, 2000 ; Coulon et al., 2006 ; Tarabon et al., 2022). Elles réduisent également la qualité de l'habitat, à cause de diverses pollutions qui émanent de la construction et de l'utilisation de ces structures, ainsi qu'à cause de la favorisation d'espèces exotiques envahissantes (Jackson, 2000). Ces infrastructures engendrent une perte de surface d'habitat, causée directement par l'emprise même de la structure ou indirectement lorsqu'un phénomène d'évitement des zones à leurs alentours est observé, à cause du bruit et de la fréquentation humaine (Jackson, 2000). Lorsque ce phénomène d'évitement n'est pas présent, les collisions sur les infrastructures peuvent représenter une source importante de mortalité et causer une perte de population pour les animaux (González-Gallina et al., 2013 ; Tarabon et al., 2022), ce qui peut mener à l'impossibilité pour des populations d'accéder à des zones vitales d'habitat (Singer et Doherty, 1985). Ces barrières peuvent également empêcher les mouvements des individus et ainsi subdiviser les populations, ce qui peut entraîner l'extinction des populations par perte de matériel génétique (Jackson, 2000 ; Barrientos et Borda-de-Água, 2017 ; Tarabon et al., 2022).

Afin de rétablir les continuités écologiques et diminuer les impacts cités précédemment, la construction de passages à faune qui passent au-dessus ou en dessous des infrastructures de transport, combinée à la pose de grillages, est devenue de plus en plus commune ces 30 dernières années (Rytwinski et al., 2016 ; Seiler and Bhardwaj, 2020 ; Tarabon et al., 2022). La construction de ces passages est plus ou moins efficace en fonction de leur localisation et de leur spécificité aux espèces visées (Billon et al., 2021).

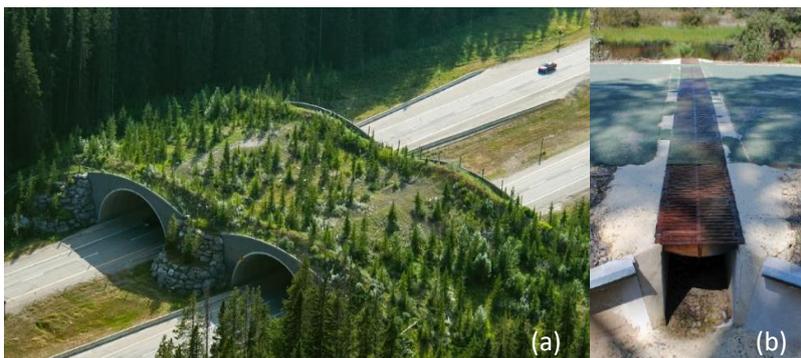


Figure 1 (a) et (b) : Photographies d'un écopont dans le parc national de Banff au Canada (a) et d'un tunnel à amphibien dans le parc national de Doñana en Espagne (b).

Photographes : Ross MacDonald (a) et Joaquim Pedro (b)

En effet, les passages dédiés à la faune doivent être adaptés aux espèces : un grand passage à faune végétalisé (Figure 1a) vise à faciliter les mouvements des populations de grande faune (Donaldson, 2006 ; Braden et al., 2008) et potentiellement de moyenne faune comme les carnivores, les petits mammifères et les reptiles qui bénéficient des mêmes types d'aménagements (Grilo, Bissonette, and Santos-Reis 2009). Des ponceaux (Figure

1b) peuvent être aménagés pour la petite faune comme les amphibiens, qui ne représentent pas

un danger pour les véhicules mais qui souffrent de fortes mortalités dues aux infrastructures de transport (Clevenger, Chruszcz and Gunson, 2001).

Ces passages sont généralement construits au plus proche de couloirs écologiques reconnus par des experts ou déterminés par rapport à la composition du paysage (Clevenger et al., 2002, Cushman et al., 2014, Wierzchowski et al., 2019). Plus récemment, la modélisation des réseaux écologiques est apparue comme une solution plus efficace et moins coûteuse afin d'identifier les couloirs écologiques et d'en déduire les emplacements idéaux pour des passages à faune (Gurrutxaga and Saura, 2014 ; Tarabon et al, 2022).

Des passages au niveau des infrastructures existent également et sont plus communs (Beben, 2012). Par exemple, des portions de routes de 200 ou 500 mètres non grillagées peuvent permettre aux animaux de traverser la route et sont souvent couplées à des panneaux d'avertissement voire des limitations de vitesse pour les usagers (Beben, 2012). Des systèmes d'effarouchement visuels ou sonores permettent de faciliter les traversées des animaux en effrayant les animaux qui se situent potentiellement à proximité de l'infrastructure de transport lorsqu'un véhicule approche (Babińska-Werka et al., 2015 ; Bacs et al., 2017).

Les impacts des infrastructures ferroviaires ont tendance à être mis au même niveau que ceux des routes et autoroutes, probablement à cause du fait que l'étendue du réseau routier dans le monde excède largement celle du réseau ferroviaire (Barrientos et al., 2019). Ce dernier est pourtant constitué de plus d'un million de kilomètres de voies ferrées et est en pleine expansion (Railway Statistics Group, 2024). Cependant, de nombreuses spécificités du ferroviaire induisent des impacts différents sur l'environnement : le trafic sur les voies ferrées est plus faible et à des intervalles plus longs que sur les routes, mais les trains se déplacent à une vitesse plus élevée que les voitures, ce qui impacte différemment le comportement des animaux aux abords des voies. La structure d'une voie ferrée diffère aussi beaucoup d'une route, surtout dans le cas des voies ferrées électriques qui possèdent des caténaires et des fils électriques au-dessus de la voie, ce qui peut impacter d'autres espèces, comme les espèces d'avifaune, mais qui limite l'impact des pollutions sur l'environnement alentour (Borda-de-Água et al., 2017 ; Barrientos et al., 2019).

En France, SNCF Réseau est le principal gestionnaire du réseau ferroviaire, avec 28 000 kilomètres de voies ferrées, incluant 2 600 kilomètres de lignes à grande vitesse (Railway Statistics Group, 2024). L'âge de ce réseau est en moyenne de 30 ans, mais la majorité des lignes ont été construites pendant les XIX^e et XX^e siècles (SNCF Réseau, 2022), sont dites "classiques" et ne présentent aucun aménagement spécifique pour rétablir les continuités écologiques. Ces lignes n'étant pas clôturées pour la majorité, les animaux passent régulièrement sur les voies et les collisions sont fréquentes. Entre 2015 et 2022, une moyenne de 1 500 accidents avec la faune sauvage sur les voies ferrées a été dénombrée, ce qui a impacté environ 8 600 trains et a représenté un total de 200 000 minutes perdues par an (SNCF Réseau, 2022). 75% de ces accidents sont en lien avec les grands ongulés, principalement le sanglier (*Sus scrofa*), et les cervidés (chevreuil (*Capreolus capreolus*) et cerf élaphe (*Cervus elaphus*)) (SNCF Réseau, 2022). Au-delà des enjeux écologiques, ces collisions engendrent de forts coûts économiques, avec l'immobilisation et la réparation des trains, la compensation pour les voyageurs à cause des retards engendrés et la mise en place d'alternatives de transport (Bison et Loison, 2022) : SNCF Réseau estime à 100 000 euros le coût d'une collision entre un ongulé et un train à grande vitesse. Un risque important pour la sécurité du personnel et des passagers est également présent avec le risque de déraillement lors d'une collision (Bison et Loison, 2022).

Les lignes classiques ne possèdent pas de passages dédiés à la faune, mais de nombreux ouvrages d'arts ferroviaires, qui sont des constructions de grande importance entrainées par l'établissement d'une voie de communication routière, ferroviaire ou fluviale (Brito et al., 2023), non dédiés existent sur ces lignes. Il en existe différents types notamment des ponts rail (PRA), des petits ouvrages sous voies (POSV), des ponts route (PRO), des passerelles, des viaducs et des tunnels (Brito et al., 2023). Il a été observé que ces ouvrages, bien que non dédiés à la faune, étaient plus ou moins empruntés par la faune sauvage lors de leurs déplacements. Cette utilisation, et donc la connectivité écologique que ces ouvrages apportent, semble nettement sous-estimée au vu du nombre de tels ouvrages (Seiler et Olsson, 2009). Ils pourraient par ailleurs être améliorés dans les cas où ils sont peu ou moyennement efficaces (Seiler et Olsson, 2009 ; Pradines, 2019), ce qui serait économiquement bénéfique étant donné que la construction d'ouvrages dédiés est très coûteuse, surtout s'ils n'ont pas été pris en compte dans la construction de l'infrastructure (Sijtsma et al., 2020 ; Tarabon et al., 2022). De plus, plusieurs petits passages seraient plus efficaces qu'un seul grand passage pour le même investissement (Karlson et al., 2017 ; Tarabon et al., 2022). Afin d'aménager ces passages non dédiés, une bonne connaissance du comportement de chaque espèce est nécessaire pour identifier les facteurs régissant leur utilisation des ouvrages d'arts, car elles ont toutes des réactions différentes aux infrastructures (Glista et al., 2009 ; Pichard et al., 2018).

C'est dans ce contexte qu'il convient d'étudier spécifiquement l'utilisation des ouvrages d'arts non dédiés à la faune par les ongulés, puisque nous avons vu que ce sont eux qui induisent le plus de problématiques économiques pour les gestionnaires ferroviaires et sécuritaires pour les usagers. De plus, d'après plusieurs études se penchant sur l'utilisation des ouvrages d'art non dédiés à la faune, ils seraient le clade des mammifères qui les utilisent le moins (SNCF Réseau, 2015 ; Pichard et al., 2018 ; Mata Estacio et al., 2001 ; Seiler et Olsson, 2009 ; Rodriguez et al., 1996). Il est important de mentionner que les enjeux écologiques sont moindres pour ces espèces dont les populations sont en nette augmentation depuis des années, qui sont régulées via des plans de chasse (Figure 2) (Carpio et al., 2020) et dont la taille des populations n'est pas impactée par les collisions (Foreman, 1998, Steiner et al., 2014 ; Apollonio et al., 2010).

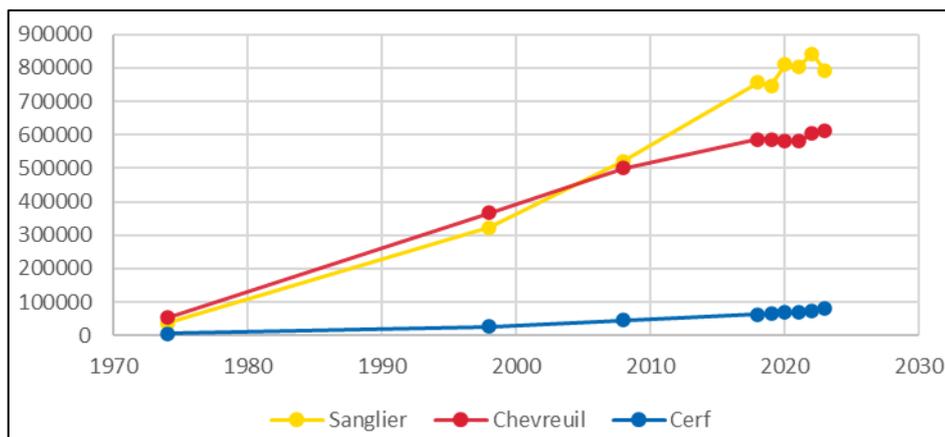


Figure 2 : Graphique du nombre de prélèvements annuels issus des tableaux de chasse au niveau national pour les populations de sanglier, chevreuil et cerf

Source : Prélèvements ongulés sauvages - Réseau Ongulés sauvages

La problématique développée dans ce mémoire se rapporte donc à l'**identification des facteurs qui peuvent influencer à différentes échelles les passages des ongulés dans les**

ouvrages d'art ferroviaires non dédiés à la faune, afin de pouvoir aboutir à des recommandations d'aménagements d'ouvrages existants, pour améliorer l'utilisation de ces passages par les ongulés afin de diminuer les collisions sur les voies ferrées. Cette problématique s'insère dans un travail de doctorat portant sur la transparence écologique du réseau ferroviaire, les continuités écologiques et les mesures d'atténuation du risque de collision avec les ongulés sauvages, réalisé par Tess Heydorff-Decaux sous la direction de Céline Clauzel du laboratoire LADYSS conjointement avec SNCF Réseau.

Les missions réalisées pendant ce stage, afin de répondre à cette problématique, ont été les suivantes :

- Réaliser un état des lieux des études ayant abordé le sujet afin de faire ressortir les facteurs à prendre en compte lors de cette étude réalisée en Bretagne, présenté ci-après en introduction ;
- Elaborer les protocoles pour récolter les données sur le terrain ou à partir de bases de données en ligne et fournir un appui sur le terrain pour le suivi par piège photographique des ongulés, qui seront décrits dans le chapitre matériels et méthodes ;
- Faire le lien entre les données d'ongulés et les facteurs multiscalaires des ouvrages pouvant les influencer, et analyser les résultats, qui seront présentés dans le chapitre résultats et confrontés aux hypothèses émises lors de l'état de l'art dans la partie discussion.

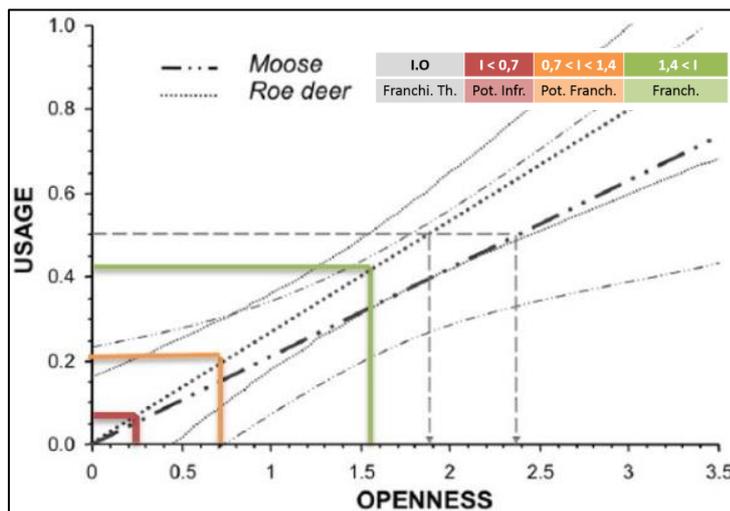


Figure 3 : Taux d'usage des ouvrages d'art par le chevreuil et l'élan en fonction de l'ouverture de l'ouvrage d'art (Pradines, 2019 ; Olbrich, 1984)

Dans la littérature disponible concernant les facteurs influençant le passage des ongulés dans les ouvrages d'art non dédiés à la faune, le paramètre principal qui semble poser problème aux grands ongulés est la dimension de l'ouvrage, notamment la hauteur puisqu'ils fréquentent peu les passages inférieurs à 2 mètres et ceux avec une largeur inférieure à 3,5 mètres (SNCF Réseau, 2015 ; Mata Estacio et al., 2001 ; Seiler et Olsson, 2009). Ils préféreraient les ouvrages d'au moins 11,5 mètres de large et haut de 5 mètres (Bhardwaj et al., 2020) mais des ouvrages de 4,5 mètres par 3,5 mètres paraissent suffisants pour le passage du cerf

élaphe en Occitanie (D'Ambly et Carpentier, 2022). Ils optent généralement pour une ouverture ((Largeur x Hauteur)/Longueur) plutôt grande (Figure 3) (Clevenger et Waltho, 2005). La longueur joue effectivement un rôle par son effet tunnel qui impacte la visibilité de l'animal si celle-ci est trop grande (Pichard et al., 2018).

La localisation du passage au sein de la matrice de l'habitat joue un grand rôle dans l'utilisation des ouvrages d'arts par les grands ongulés, notamment en lien avec le guidage de cette faune vers l'ouvrage. Ce guidage est peu existant sur les voies ferrées classiques non clôturées ou qui ne disposent ni de haies ni d'arbres d'alignement et engendre ainsi une utilisation des ouvrages plus faible (SNCF Réseau, 2015). La présence de végétation aux abords

de l'ouvrage favoriserait les espèces comme le cerf qui évolue dans un milieu forestier et qui sont plus craintifs aux abords d'ouvrages en milieu ouvert (Clevenger et al., 2001 ; Seiler et Olsson, 2009). Le matériau au sol de ces ouvrages d'art est déterminant pour certaines espèces et les ongulés semblent préférer des sols en matériau naturel comme la terre (Jaeger et al., 2005 ; SNCF Réseau, 2015 ; Pichard et al., 2018).

Le type d'ouvrage peut cependant affecter différemment les préférences des ongulés. Même si de manière générale ils semblent préférer dans cet ordre, les viaducs, les passages supérieurs et enfin les passages inférieurs, ces animaux optent pour des passages plus courts, plus étroits et moins végétalisés lorsque ceux-ci sont supérieurs et ne sont pas affectés par les barrières (Denneboom et al., 2021). En revanche, pour les passages inférieurs, les ongulés penchent plutôt pour les ouvrages qui sont plus larges, végétalisés et qui possèdent des barrières (Dodd et al., 2007 ; Huijser et al., 2016). Dans les viaducs, ils semblent dérangés par le passage de ruisseaux (Denneboom et al., 2021).

Le principal défaut des ouvrages d'arts non dédiés à la faune est qu'ils sont construits pour des usages humains. Les ouvrages les plus fréquentés par des Hommes sont ceux qui sont les plus évités par les ongulés (Jaeger et al., 2005). Par exemple, à partir de 1 000 véhicules par jour, le chevreuil fréquente moins les infrastructures et au-delà de 4 000 véhicules par jour, il les évite totalement (Alsace Nature, 2008 ; Pichard et al., 2018). Le type d'usager qui fréquente les ouvrages d'art a son importance puisque les ongulés utilisent moins les ouvrages utilisés par des randonneurs pédestres ou équestres que par des véhicules motorisés (Clevenger et Waltho, 2000 ; Stankowich, 2008). Cela peut s'expliquer par la tendance des humains à approcher la faune sauvage dans leur habitat ou par la chasse (Stankowich, 2008 ; Pichard et al., 2018). Les ongulés sont également sensibles à la fréquence du passage des véhicules, et tolèrent mieux les passages de train à heure fixe que les passages aléatoires de véhicules isolés (Dutilleux et Fontaine, 2015). Le bruit qui résulte de cette fréquentation impacte la faune sauvage de manière différente si le bruit est chronique ou ponctuel. Un bruit chronique d'au moins 60 dB est beaucoup plus impactant et peut provoquer un stress élevé qui induira plus d'évitement (Barber et al., 2010). L'éclairage artificiel des ouvrages influe négativement l'utilisation des ouvrages d'art par les ongulés (Pichard et al., 2018 ; D'Ambly et Carpentier, 2022). L'anthropisation aux alentours de l'ouvrage impacte également l'utilisation des ouvrages par les ongulés puisque la faune sauvage évite globalement les ouvrages lorsque les alentours sont perçus comme risqués (Denneboom et al., 2021). Les densités de populations et la perméabilité du paysage alentour jouent beaucoup sur le nombre d'approches d'individus animaux au niveau de chaque ouvrage, d'où l'importance de recenser les approches en même temps que les passages dans les ouvrages (Denneboom et al., 2021)

L'utilisation des ouvrages d'art par les ongulés dépend aussi fortement de leur cycle biologique spécifique et de leurs besoins de déplacement qui en découlent en fonction de la période de l'année ou du moment de la journée. Le cerf élaphe est ainsi plus actif et à même de se déplacer à l'aube et au crépuscule (Pépin et al., 2009 ; Steiner et al., 2014). Ce comportement semble cependant provenir d'une adaptation au dérangement humain puisqu'une étude dans un parc sans perturbation humaine montre que le cerf est principalement actif en journée (Kamler et al., 2007). Le chevreuil montre les mêmes comportements journaliers, mais avec une plasticité plus importante (Figure 4) (Cagnacci et al., 2011 ; Steiner et al., 2014).

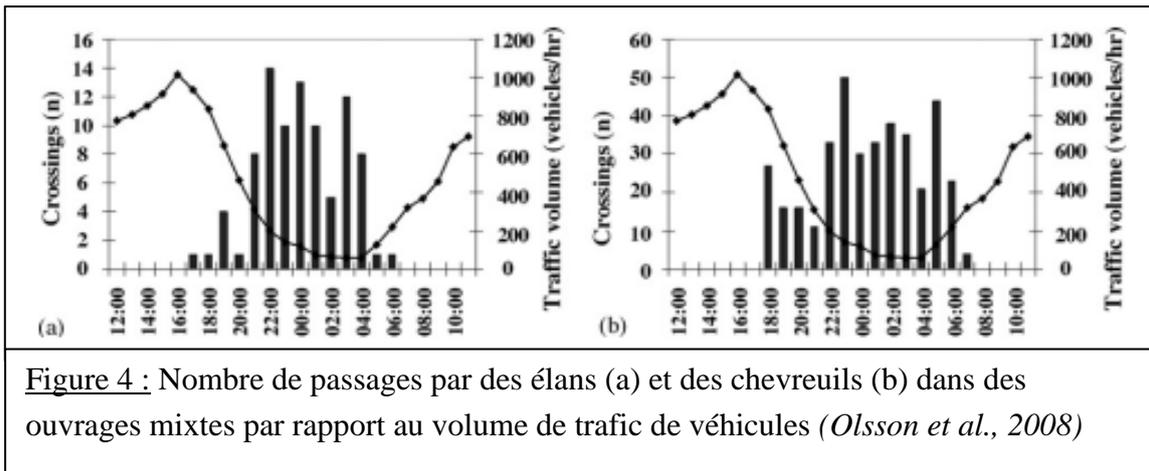


Figure 4 : Nombre de passages par des élan (a) et des chevreuils (b) dans des ouvrages mixtes par rapport au volume de trafic de véhicules (Olsson et al., 2008)

Les périodes de rut de chaque espèce engendrent aussi des déplacements plus importants (Langbein, 2007 ; Barthelmess et Brooks, 2010), ce qui peut affecter le nombre d’approches au niveau des ouvrages d’art et inciter les animaux à prendre des passages qu’ils ne prendraient pas en temps normal, augmentant ainsi le nombre de passages.

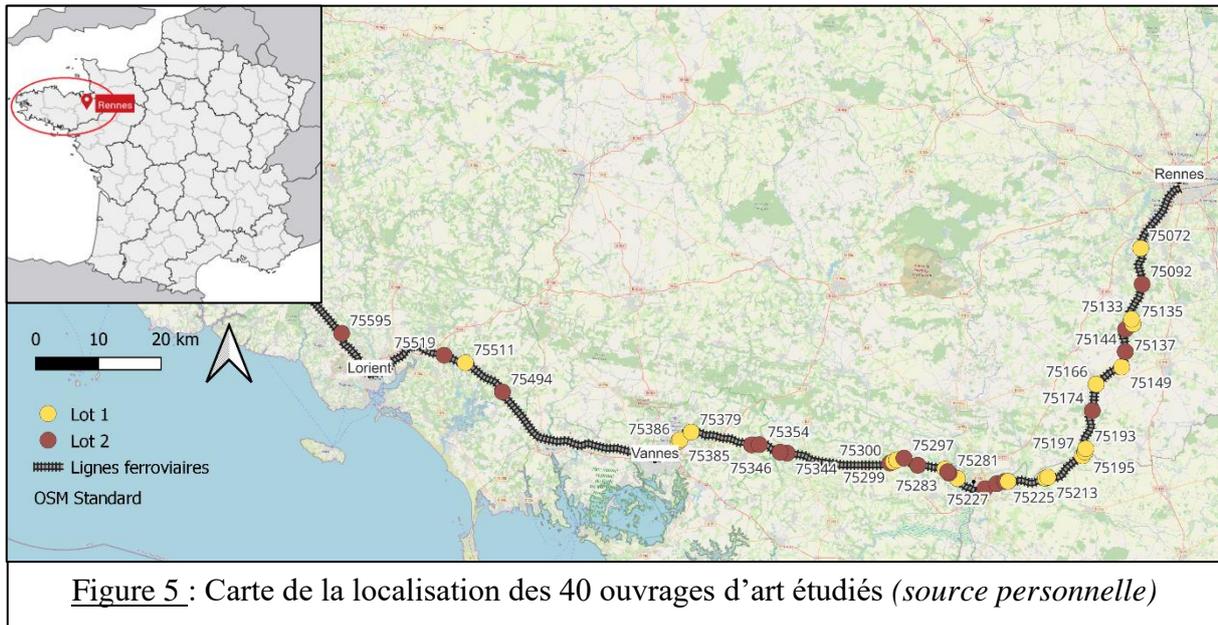
A partir de la littérature disponible, on émet donc un certain nombre d’hypothèses : **Le type d’ouvrage a-t-il un impact sur les passages des ongulés dans les ouvrages non dédiés à la faune ? Si oui, l’impact est-il positif pour les ouvrages supérieurs ? La hauteur, la largeur, le substrat de type naturel et une bonne perméabilité du paysage ont-ils également un impact positif sur le nombre de passages ? Les périodes de rut ou de déplacements plus importants entraînent-elles un accroissement de passages ? La présence d’eau, la longueur et la présence humaine ont-elles un impact négatif sur l’utilisation des ouvrages ? On émet également l’hypothèse que l’impact de barrières et du type de végétation dépend du type d’ouvrage d’art et que les ouvrages traversés sont spécifiques à certaines espèces.**

II- Matériels et Méthodes

a-Zone d’étude

La zone étudiée pour répondre aux questions posées en introduction se situe en Bretagne, sur les lignes 470000 et 468000 reliant Rennes à Quimper. Cette ligne de 242 km est une ligne “classique” et n’est pas clôturée, ce qui contribue à en faire une des plus accidentogènes de France en termes de collisions avec les animaux (Le Lay, 2019). L’échantillonnage des ouvrages d’art non dédiés à la faune a été réalisé par Tess Heydorff-Decaux à partir de PIGC, une application interne à la SNCF qui recense tous les ouvrages d’art présents sur le réseau. Parmi les 248 ouvrages sur la ligne étudiée, une présélection a été réalisée en retenant les ouvrages susceptibles de permettre le passage d’animaux (les canalisations ont par exemple été écartées), et qui sont accessibles via la voie publique pour poser les pièges et assurer la maintenance de ces derniers. Les ouvrages retenus sont regroupés selon leur taille (supérieure ou inférieure à trois mètres de large), la présence ou absence de collisions dans un rayon de 300 mètres autour de l’ouvrage, et selon la valeur de connectivité fonctionnelle du paysage environnant, modélisée par Tess Heydorff-Decaux. Seuls les ouvrages en dehors des villes, accessibles sans passer par la voie ferrée et sans autorisation spécifique ont été retenus

afin de faire l'échantillonnage. 40 ouvrages d'arts ont ainsi été sélectionnés (Figure 5) grâce à un échantillonnage aléatoire stratifié et seuls trois types d'ouvrages d'art ont été retenus : les PRA, PRO et POSV de plus d'un mètre de large.



b- Caractérisation des ouvrages d'art



Figure 6 : Mesures réalisées sur les ouvrages d'art (exemple de l'ouvrage 75292) (source personnelle)

Les protocoles d'obtention des variables explicatives sont exposés ci-après. Cette étude étant de nature exploratoire, le nombre de variables potentiellement explicatives est très grand et seules les variables ayant nécessité l'élaboration d'un protocole poussé et des efforts considérables, notamment sur le terrain, seront développés. Lors des sessions de terrain en mars et avril, les ouvrages à équiper ont fait l'objet d'une description de leurs caractéristiques techniques. Les mesures réalisées ne dépendant pas de la saisonnalité, deux sessions de terrain ont été nécessaires afin de caractériser les 40 ouvrages, tout en assurant l'équipement du lot en question. Ainsi le lot 1 a été prospecté entre le 12 et 15 mars et le lot 2 entre le 15 et le 19 avril. Une fiche ouvrage consultable en [annexe I](#) créée

spécialement pour cette étude permettait la collecte des dimensions de l'ouvrage (hauteur, largeur, longueur) et des murets lorsqu'ils étaient présents (longueur de chaque muret et distance maximale qui les sépare) (Figure 6). Ces mesures ont été effectuées grâce à un télémètre laser de modèle Magnusson IM25 sans fil lorsque les conditions météorologiques permettaient de voir le faisceau lumineux ou grâce à un double décimètre Talia Plast ruban fibre de verre, dans des conditions trop lumineuses. Deux personnes étaient nécessaires pour réaliser ces mesures afin qu'une personne puisse servir de cible à viser avec le télémètre ou pour utiliser le décimètre de manière précise.

Étaient également relevées, la nature du substrat à l'intérieur de l'ouvrage, la présence d'aménagements dans l'ouvrage comme des trottoirs, des banquettes ou des rigoles, la présence d'eau ainsi que sa hauteur au moment du relevé. La covisibilité, qui s'évalue en se plaçant à cinq mètres de distance d'une extrémité de l'ouvrage, à un mètre de hauteur, et en annotant s'il est possible de voir l'autre extrémité du passage, ainsi que la présence d'éclairage artificiel ont été écartées de la liste des variables explicatives. En effet, tous les ouvrages présentaient une bonne covisibilité et aucun dispositif d'éclairage artificiel à proximité.

Des photographies de chaque côté de l'ouvrage ainsi que de l'intérieur ont été prises avec des smartphones personnels à des fins d'illustration. Les côtés de l'entrée et de la sortie des ouvrages ont été nommés côté 1 et côté 2 pour pouvoir les différencier, le côté 1 étant le côté au nord de la voie ferrée, ou à l'est de celle-ci lorsqu'elle est dans un axe nord-sud, comme dans le cas des ouvrages 75092, 75135, 75144 et 75193.

Un protocole de caractérisation de la végétation appétante pour les ongulés a été conçu afin de tester si la présence de ressource alimentaire aux alentours des ouvrages pourrait être un facteur expliquant les passages des grands ongulés dans les ouvrages. Celui-ci a été réalisé en prenant en compte une certaine contrainte de temps étant donné que 40 ouvrages d'art devaient être prospectés en 4 jours de terrain entre le 21 et le 24 mai. Il a été choisi de prospecter tous les ouvrages en une seule session de terrain pour que les relevés soient comparables, ce qui n'aurait pas été le cas si la moitié des relevés avaient été faits avec un mois de décalage. Des recherches bibliographiques approfondies sur le régime alimentaire de chaque espèce d'ongulés présente en Bretagne ont permis d'établir une liste de groupes végétaux à prospecter sur le terrain afin de gagner du temps, disponibles en [annexe II](#). Leur pourcentage de recouvrement de chaque côté dans un rayon de 20 mètres et à l'intérieur de l'ouvrage étaient ainsi relevés (Figure 7).

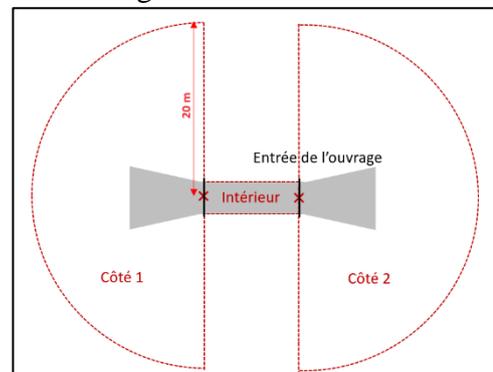


Figure 7 : Schéma des zones prospectées pour la caractérisation de la végétation (*source personnelle*)

Une photographie de chaque surface de relevé a également été prise pour illustrer les différents types de végétation aux abords des ouvrages. Le relevé a été fait grâce à une fiche de caractérisation de la végétation ([Annexe III](#)) remplie pour chaque ouvrage. La limite des 20 mètres était matérialisée sur le terrain grâce à des piquets afin d'avoir des repères pour l'estimation du pourcentage de recouvrement de chaque groupe végétal. Une catégorie "espèces exotiques envahissantes" a été ajoutée à la demande de SNCF Réseau, afin de relever, en même temps, la présence ou l'absence de certaines espèces exotiques envahissantes qui peuvent causer des dommages au niveau des voies ferroviaires.

L'analyse des pourcentages de recouvrement de chaque groupe de végétation appétente pour les ongulés via la distance euclidienne et une matrice de similarité, a permis d'aboutir à une classification des ouvrages en fonction de cette végétation. Trois groupes d'ouvrages ont été retenus au vu de la littérature : ouvrages présentant de la végétation appétente pour les ongulés de milieu **ouvert**, **mixte** et de **sous-bois** (Figure 8). Il a été choisi de regrouper les 3 derniers groupes en un même groupe "sous-bois" puisque d'après la littérature (Clevenger et al., 2001 ; Seiler et Olsson, 2009) l'ouverture du milieu aurait un impact sur les passages des ongulés.

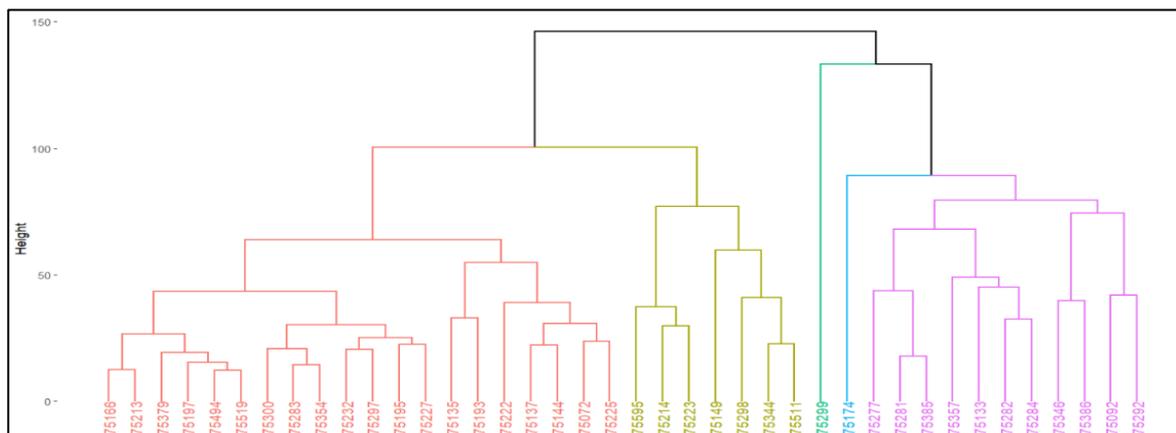


Figure 8 : Dendrogramme de classification des ouvrages en fonction de la végétation appétente pour les ongulés, présente à leurs alentours. De gauche à droite, les groupes correspondent à un milieu ouvert, milieu mixte, forêt de noisetier, forêt de charme et châtaignier, sous-bois. (source personnelle)

Pour le groupe “mixte”, il est intéressant de noter que la mixité du type de végétation peut se trouver du même côté de l’ouvrage avec des zones plutôt ouvertes et fermées, ou bien se trouver de part et d’autre de l’ouvrage, par exemple avec un côté caractérisé de milieu de sous-bois et l’autre côté comme milieu ouvert. Il est donc intéressant d’évaluer l’homogénéité de la végétation entre les deux côtés de l’ouvrage via un coefficient de corrélation afin d’en évaluer le rôle dans l’utilisation des ouvrages par les ongulés.

Lors des relevés des paramètres techniques des ouvrages, les données relatives aux barrières ont été collectées, catégorisées et vectorisées. L’objectif était de relever tous les éléments pouvant faire office d’obstacle ou de guide pour les grands ongulés dans un rayon de 50 mètres autour de l’ouvrage. Les différents types d’éléments retenus ainsi qu’une brève description de ceux-ci figurent en [annexe IV](#). Afin d’avoir un relevé précis de ces éléments, ils ont été vectorisés grâce à l’application Qfield via un formulaire créé sous Qgis dans le but de retranscrire leur positionnement dans l’espace par rapport à l’ouvrage. Leur longueur était ainsi automatiquement calculée grâce à la couche vectrice, la hauteur et le type de barrière était également relevés grâce au formulaire.

Ces données ont servi de base à l’élaboration d’un indice d’imperméabilité des barrières aux ongulés, en fonction de leur matériau de construction, de la taille de la maille les constituant, de leur hauteur et de leur enfouissement. Cet indice a des valeurs allant de 4 à 12, une valeur de 4 étant facilement traversable par les animaux et 12 impossible à traverser pour les animaux. Un score barrière permet alors de caractériser chacun des ouvrages, calculé avec la formule suivante :

$$\text{Score Barrière} = \sum_{b=1}^n K_b \cdot l_b$$

Avec n le nombre total de segments de barrières différents autour d’un ouvrage, K_b l’indice d’imperméabilité de la barrière b et l_b la longueur de la barrière b

Une variable qualitative de continuité ou non entre l’ouvrage et les barrières est aussi retenue, puisqu’une continuité entre des barrières et l’ouvrage peut servir de guide pour les animaux pour s’engouffrer dans la zone d’entrée de l’ouvrage.

Un tableau résumant toutes les variables potentiellement explicatives prises en compte dans cette étude est présenté ci-dessous (Tableau 1). Une étude des corrélations de Pearson des variables a permis d’écarter les variables notées d’un astérisque (*) de l’étude. A partir de toutes

ces variables, sauf *id_ouvrage* et *realisations_roe* qui ont été ajoutées à l'analyse en tant que variables supplémentaires, une analyse factorielle de données multiples (AFDM) a été réalisée afin de réaliser une classification ascendante hiérarchique (CAH) à partir de ses résultats et ainsi faire ressortir des groupes d'ouvrages se ressemblant de manière multivariée et multiscale.

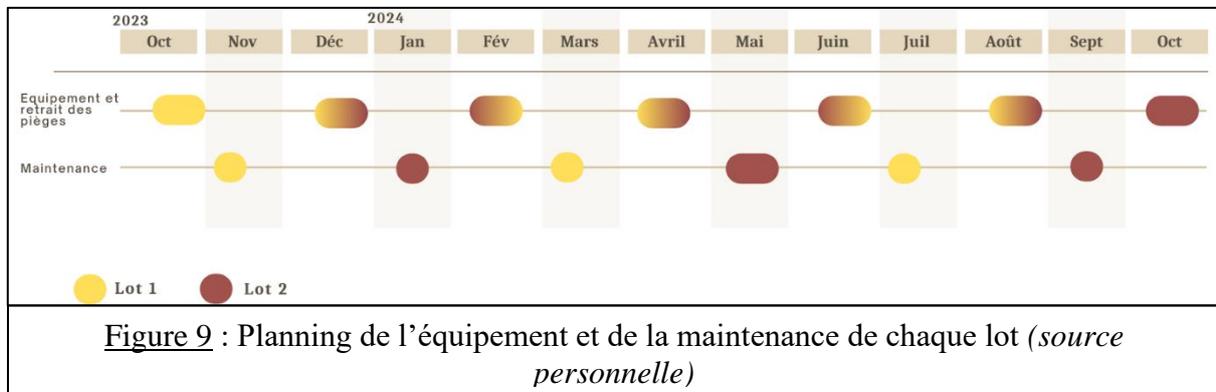
Tableau 1 : Variables explicatives prises en compte pour l'étude (*source personnelle*)

Type de variable	Nom de la variable	Description de la variable	Type de variable	Source de la variable
Variables Locales	id_ouvrage	Identifiant unique de l'ouvrage	Facteur	SNCF Réseau
	type	Type d'ouvrage d'art selon la typologie SNCF (PRO, PRA ou POSV)	Facteur à 3 catégories	SNCF Réseau
	H	Hauteur de l'ouvrage d'art	Quantitative	Terrain
	L	Largeur de l'ouvrage d'art (sans prise en compte des potentiels murets)	Quantitative	Terrain
	l	Longueur de l'ouvrage (sans prise en compte des murets)	Quantitative	Terrain
	ouverture	Rapport entre longueur, Largeur et hauteur de l'ouvrage	Quantitative	Terrain
	presence_murets	Présence de murets ou non aux ouvertures des ouvrages	Binaire	Terrain
	substrat	Type de matériau au sol dans les ouvrages (naturel, mixte ou artificiel)	Facteur à 3 catégories	Terrain
	amenagement	présence ou non d'aménagement dans l'ouvrage de type hydraulique ou banquettes par exemple	Binaire	Terrain
	eau*	hauteur d'eau à l'intérieur de l'ouvrage au moment du relevé	Quantitative	Terrain
	continuite_ouvrage-guide	Continuité entre les murets de l'ouvrage ou l'ouvrage en lui-même et une barrière	Binaire	Terrain
	score_barrière	score calculé en fonction du linéaire de barrière et de l'imperméabilité aux animaux de chaque barrière	Quantitative	Terrain
	delta h*	Différence de hauteur entre la voie ferrée et le paysage alentour, autour de l'ouvrage	Quantitative	Calcul sous QGIS via le MNT RGE ALTI® 1m
	pente*	valeur de la pente	Quantitative	Calcul sous QGIS via le MNT RGE ALTI® 1m
	freq_hum_moy	Fréquence moyenne journalière du passage d'humains à pied, à vélo ou à cheval au niveau de l'ouvrage	Quantitative	Calcul à partir des vidéos SNCF Réseau
freq_veh_moy	Fréquence moyenne journalière du passage de véhicules motorisés au niveau de l'ouvrage	Quantitative	Calcul à partir des vidéos SNCF Réseau	
naturalite_pot	Valeur de la naturalité potentielle dans le pixel de 20m sur lequel se trouve l'ouvrage	Quantitative	Calcul sous QGIS via couches CartNat	
type_vege	Type de milieu aux alentours de l'ouvrage (demi-cercles de 20m de part et d'autre de l'entrée de l'ouvrage)	facteur à 3 catégories	Terrain	
correlation_vege	Corrélation ou similarité de la végétation appétante pour les ongulés entre les deux côtés d'un même ouvrage	Quantitative	Terrain	
Variables paysagères	moyenne_500m*	Moyenne de la naturalité potentielle dans un rayon de 500m de l'ouvrage	Quantitative	Calcul sous QGIS via couches CartNat
	trame_mam	Localisation de l'ouvrage sur une trame importante, majeure ou en dehors d'une trame pour les mammifères, d'après la carte Trame mammifères du Groupe Mammalogique Breton	facteur à 3 catégories	Trame Mammifères de Bretagne – Groupe Mammalogique Breton, 2020
	dist_trame_maj	Distance de l'ouvrage à une trame majeure pour les mammifères	Quantitative	Calcul sous QGIS via Trame Mammifères de Bretagne – Groupe Mammalogique Breton, 2020
	densite_bois_500m	Densité de boisements dans un rayon de 500m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_bois_5000m	Densité de boisements dans un rayon de 5000m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_friches_fourres_landes_500m	Densité de friches, fourrés et landes dans un rayon de 500m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_friches_fourres_landes_5000m	Densité de friches, fourrés et landes dans un rayon de 5000m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_cultures_500m	Densité de cultures dans un rayon de 500m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_cultures_5000m*	Densité de cultures dans un rayon de 5000m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_bati_500m	Densité du bâti dans un rayon de 500m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_bati_5000m	Densité du bâti dans un rayon de 5000m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_prairies_500m	Densité des prairies dans un rayon de 500m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	densite_prairies_5000m*	Densité des prairies dans un rayon de 5000m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	dist_bois	Distance entre l'ouvrage et le boisement le plus proche	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	dist_route	Distance entre l'ouvrage et la route la plus proche	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	dist_urb	Distance entre l'ouvrage et le bâti le plus proche	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	dist_culture	Distance entre l'ouvrage et la culture la plus proche	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	dist_prairie	Distance entre l'ouvrage et la prairie la plus proche	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	indice_div_milieux_500m	Indice de Shannon de la diversité des milieux dans un rayon de 500m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
	indice_div_milieux_5000m*	Indice de Shannon de la diversité des milieux dans un rayon de 5000m autour de l'ouvrage	Quantitative	Cartes CGTVB et MOS
realisations_roe	Réalisations des tableaux de chasse en 2021 au niveau de la commune pour les chevreuils	Quantitative	Réseau Ongulés sauvages OFB-FNC-FDC, Bilan d'activité 2020 FDC 35	
realisations_boar*	Réalisations des tableaux de chasse en 2020 au niveau de la commune pour les sangliers	Quantitative	Réseau Ongulés sauvages OFB-FNC-FDC, Bilan d'activité 2020 FDC 35	

c-Utilisation de pièges photographiques

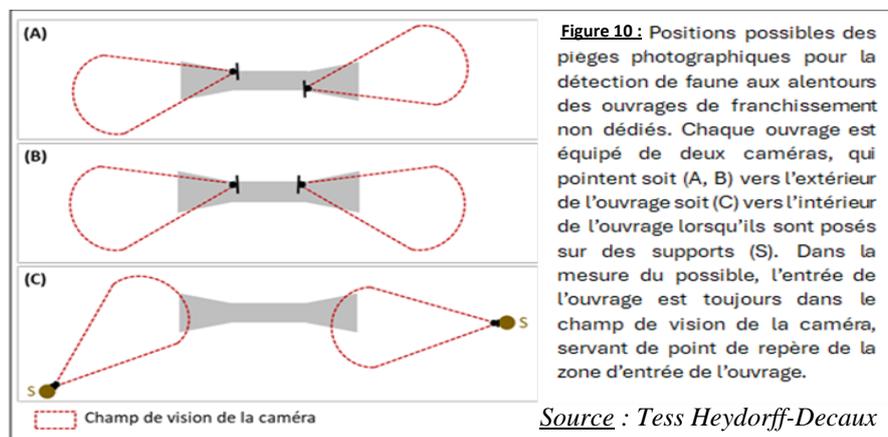
Les pièges photographiques sont de plus en plus courants pour étudier la faune sauvage. Ils permettent un suivi non invasif de cette faune à un endroit donné grâce à une technologie de déclenchement automatique via un capteur à infrarouge, qui détecte les changements brusques de température ou de mouvement entre un animal et le paysage dans le champ de vision de la caméra. Ce suivi est efficace aussi bien de jour que de nuit grâce à un flash LED infrarouge qui permet la production d'images ou de vidéos en noir et blanc.

Le protocole inclut l'équipement de chacun des 40 ouvrages par deux pièges photographiques de modèle Browning Spec Ops Elite HP5 dont la fiche technique se trouve en [annexe V](#). 40 pièges étant à disposition pour la thèse de Tess Heydorff-Decaux, les ouvrages sont séparés en deux lots et équipés par période de 2 mois de manière alternée (Figure 9). Le suivi des ouvrages étant prévu pendant un an, chaque lot est équipé pendant 6 mois au total afin de minimiser l'effet de saisonnalité tout en gardant une charge de travail de terrain supportable.



Les sessions de maintenance permettent de vérifier si les caméras sont toujours présentes et fonctionnelles (positionnement, végétation devant les capteurs, batterie). Les cartes SD sont systématiquement remplacées afin de minimiser le risque de perte de données en cas de vol. L'étude dans sa totalité est divisée en 12 sessions, ce qui correspond à un an de suivi où une session équivaut à un mois de données. A la fin de l'étude, chaque lot comptabilisera donc 6 mois de données réparties sur un an.

Concernant l'équipement des ouvrages, les pièges sont disposés de chaque côté des ouvrages et leur positionnement dépend du type d'ouvrage et de son environnement immédiat (Figure 10). Pour les PRO, les pièges sont équipés sur les garde-corps. Pour les POSV et les PRA, ils sont soit équipés sur des arbres permettant un point de vue direct de l'entrée ou la sortie de l'ouvrage ou sur les garde-corps supérieurs lorsqu'aucun arbre n'est présent.



Le paramétrage des pièges avant chaque pose est primordial, afin d'assurer la qualité des vidéos qui constituent la base des données de l'étude. Chaque piège est paramétré pour prendre des vidéos de cinq secondes lors du déclenchement de l'appareil, avec un temps de latence d'une seconde en cas de détections successives. La date et l'heure sont systématiquement vérifiées étant donné qu'un changement de piles les remet en valeur par défaut au 1er janvier 2020. Lors de la pose des pièges, ceux-ci sont disposés dans des boîtes en métal sécurisées par un cadenas, attachés au support grâce à une sangle et la boîte en métal contenant le piège est sécurisée au support même grâce à un antivol.

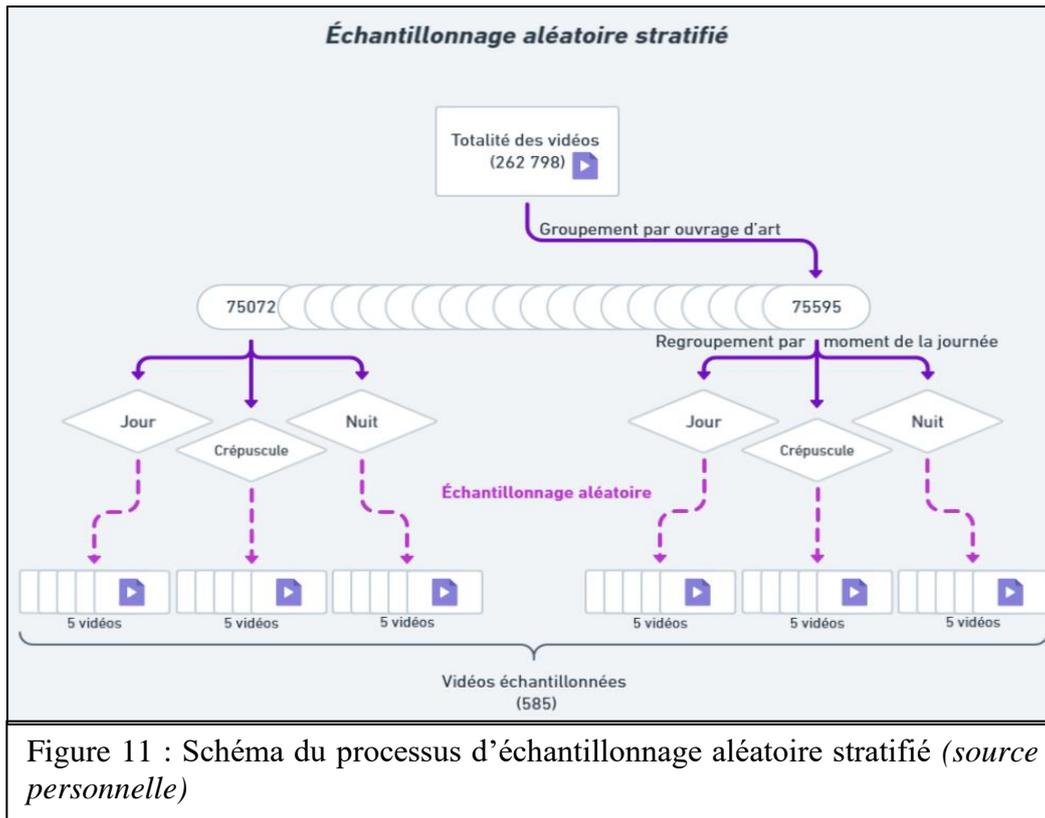
d-Utilisation d'une intelligence artificielle

L'initiative DeepFaune est un projet porté par Simon Chamailé-Jammes et Vincent Miele dépendants de l'Institut National d'Ecologie et d'Environnement (INEE) du CNRS. Cette initiative vise à développer un modèle de classification d'espèces métropolitaines françaises, basé sur du deep-learning et accessible via un logiciel gratuit et open source, pouvant fonctionner localement sur un ordinateur (Rigoudy et al., 2023). 26 espèces animales ou groupes taxonomiques peuvent être reconnus grâce au modèle ([Annexe VI](#)). Les vidéos sur lesquelles aucun animal n'est détecté sont qualifiées de "empty" et lorsque le score de confiance d'identification est en dessous d'un seuil défini par l'utilisateur, la vidéo est classée "undefined" (Rigoudy et al., 2023).

L'utilisation d'un modèle de classification a été choisie pour cette étude au vu de la grande quantité de vidéos prévues d'être collectées en un an de prospections avec 40 pièges photographiques, rendant l'identification manuelle trop chronophage. DeepFaune étant entraîné sur la faune française, possédant une bonne précision de prédiction pour les ongulés présents en Bretagne et étant à l'initiative d'un autre institut du CNRS, son utilisation semblait particulièrement adaptée. De plus, DeepFaune peut fonctionner localement sur un ordinateur, ce qui permet de respecter les termes de confidentialité au niveau des vidéos collectées appartenant à SNCF Réseau.

Afin d'évaluer la précision des prédictions de DeepFaune dans cette étude particulièrement, un plan d'échantillonnage a été pensé (Figure 11). Un échantillonnage aléatoire stratifié du tableau contenant toutes les données exportées par DeepFaune a été choisi afin que tous les ouvrages d'art prospectés et tous les moments de la journée soient représentés de la même manière, pour tester si ces facteurs avaient un impact sur les prédictions réalisées par l'intelligence artificielle (IA). Le tableau de départ contient l'identifiant unique de chaque vidéo, la date et l'heure à laquelle elle a été prise, la prédiction du modèle associée et le score de confiance associé à cette prédiction. Les moments de la journée ont été regroupés en "crépuscule" regroupant les heures de transition entre le jour et la nuit moyennes sur la durée de collecte des données soit entre 7h00 et 8h59 pour l'aube et 18h et 19h59 pour le crépuscule. Le groupe "jour" regroupe les vidéos prises entre 9h et 17h59 et "nuit" le reste des horaires.

Cinq vidéos par groupe ont été choisies afin de représenter un travail à la main réalisable et convenable puisque cela implique de visionner les 585 vidéos et de déterminer le groupe de ce qui s'y trouve. L'échantillonnage en lui-même a été réalisé grâce aux packages R *dplyr* et *sampling* (fonction *sample_n*), respectivement pour grouper les vidéos et les choisir aléatoirement.



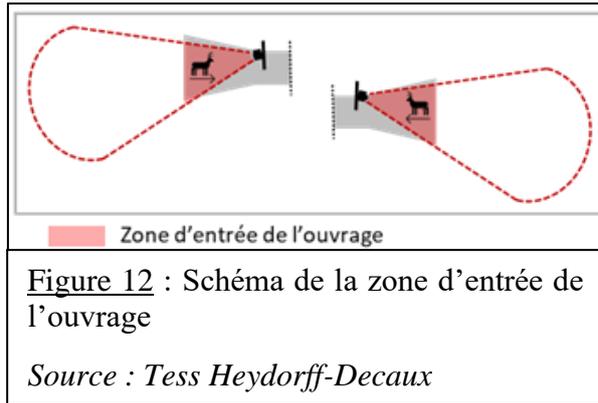
Après ce processus, la liste de vidéos est extraite et un script python permet de regrouper toutes les vidéos sélectionnées parmi toutes les vidéos stockées par session et par carte SD dans un seul et même dossier. Toutes les vidéos sont ensuite visionnées à la main et une colonne "true_class" contenant l'identification humaine est créée et remplie manuellement pour chaque vidéo.

Afin de caractériser la performance globale de DeepFaune, le kappa, qui est une mesure de l'accord entre les prédictions du modèle et les classes réelles, ajustée pour tenir compte de l'accord attendu par hasard et la précision (ou accuracy), qui permet de visualiser le nombre de prédictions correctes parmi toutes les prédictions, sont calculés. Afin d'étudier plus précisément la précision de DeepFaune par classe, une matrice de confusion est créée grâce à *confusionMatrix* du package *caret*. Ceci permet de calculer des scores de confiance par classe, qui permettent de tracer une courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), qui montre graphiquement le taux de vrais positifs en fonction du taux de faux positifs à différents seuils de décision pour une classe précise. L'AUC ou Area Under the Curve est la surface sous la courbe ROC. Elle est calculée afin de connaître la performance de classification pour chaque classe, sachant qu'une AUC de 1 indique un classificateur parfait, tandis qu'une AUC de 0.5 indique un classificateur aléatoire. Pour analyser les performances de DeepFaune en fonction du moment de la journée et du site d'étude, des tests du khi carré (χ^2) sont réalisés.

e-Comptabilisation des passages des ongulés

La comptabilisation des passages des ongulés se base sur les vidéos prises par les pièges photographiques et traitées par DeepFaune. Seules les vidéos ayant été prédites comme une espèce d'ongulés ont été extraites et regardées une à une à la main par Tess Heydorff-Decaux.

Plusieurs types de comportements ont ainsi été relevés et sont illustrés en [annexe VII](#). Une **approche** correspond à un animal qui a déclenché le piège photographique. Une **entrée** correspond à un individu filmé dans la zone d'entrée de l'ouvrage et se dirigeant vers l'intérieur de celui-ci. La zone d'entrée est définie pour chacun des ouvrages et correspond à la zone entre les murets de l'ouvrage lorsqu'ils existent (Figure 12). Une **sortie** est qualifiée par l'enregistrement d'un animal dans la zone d'entrée de l'ouvrage et se dirigeant vers l'extérieur de celui-ci (donc dos à l'ouvrage). Une **rétractation** se définit par une double détection d'un animal par une même caméra, se dirigeant vers l'intérieur puis vers l'extérieur de l'ouvrage dans un délai de 15 minutes, sans que la deuxième caméra ne le détecte. Une **traversée réussie** est l'accumulation d'une approche et d'une sortie enregistrée par la deuxième caméra sur un même ouvrage, dans un délai de 15 minutes, dans le cas idéal. Si la deuxième caméra ne détecte pas de sortie mais que la première ne détecte pas de rétractation dans un délai de 15 minutes, la traversée est également considérée comme réussie. L'inverse est également considéré comme traversée réussie, si l'animal est filmé en train de sortir de l'ouvrage et qu'il n'a pas été détecté en train d'y entrer ni par la première caméra, ni par la deuxième.



Afin de compléter les séquences (suite de vidéos correspondant à une seule visite), et classer correctement les comportements relatifs aux passages, un script R a été conçu afin de vérifier, à la main également, toutes les vidéos classées comme vides ou indéfinies à plus ou moins une heure de chaque vidéo correctement identifiée. Pour cela, un travail de gestion des dates et horaires des vidéos a été nécessaire puisque de nombreux pièges n'avaient pas été remis à l'heure lors de changements de batteries. Dans le cas le plus simple, comme les pièges photographiques sont posés par paire sur un même ouvrage et sont posés en même temps lors

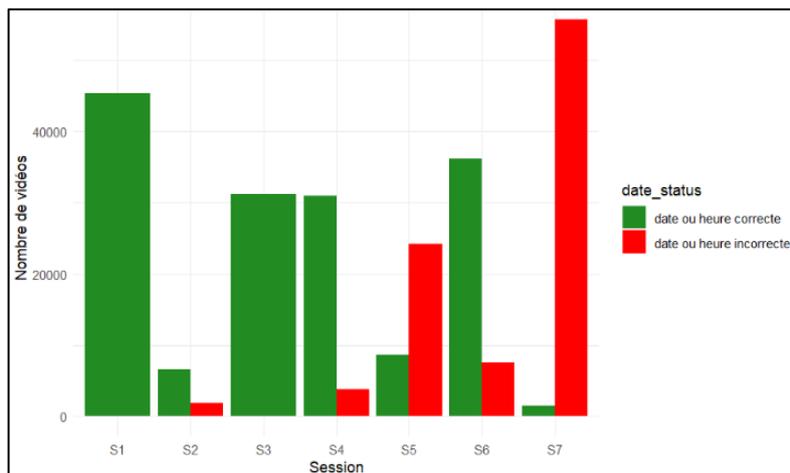


Figure 13 : Graphique du nombre de vidéos à date et heure correctes ou incorrectes par session (source personnelle)

des équipements, une synchronisation entre les deux pièges était donc possible. Lorsque le piège d'en face était également déréglé ou était défectueux, la consultation de diverses fiches de terrain ou photographies permettait d'avoir la date et l'heure à laquelle le piège avait été posé à une session donnée. De plus, les pièges étaient réglés à l'heure d'été, toute l'année, ce qui a mené à des confusions sur le réglage de l'horaire lors de la session 7 (Figure 13). Ce travail a donc été réalisé indépendamment pour chacune des sessions,

sous R grâce à la fonction permettant de gérer les dates *as.POSIXct*, disponible dans les packages de base de R.

Pour les analyses statistiques, les approches ont tout d'abord été étudiées puisque chaque passage dans un ouvrage nécessite une approche et comprendre les facteurs influençant les passages implique de comprendre avant tout quels ouvrages sont fréquentés par les grands ongulés. Des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés pour voir si le nombre d'approches est différent selon le type d'ouvrage. Un modèle linéaire généralisé avec loi de Poisson a été utilisé (fonction *glm* sous R) pour modéliser le nombre d'approches d'ongulés en fonction des différents facteurs mentionnés en partie b (Tableau 1). Le meilleur modèle a été choisi en fonction du critère d'information d'Akaike (AIC) via la fonction *step* sous R et en prenant en compte les facteurs d'inflation de la variance (VIF) grâce à la fonction *vif* du package *car*. Une partition de variance a ensuite été réalisée afin de comparer la contribution entre les variables locales et paysagères à l'explication du nombre d'approches.

Des tests simples comme des tests de Student, Wilcoxon ou Fisher ont été réalisés afin de déterminer les facteurs ayant une influence sur les passages des ongulés, étant donné que trop peu de passages avaient eu lieu pour pouvoir réaliser une modélisation.

III-Résultats

a-Typologie multivariée des ouvrages d'art

L'AFDM permet de constater que les deux premières dimensions ne représentent que 27.73% de la variabilité de l'information (Figure 14). Grâce aux valeurs de contribution et de \cos^2 , on remarque que ce sont la largeur, la fréquentation moyenne journalière de véhicules et le type PRO qui sont les mieux représentés et contribuent le plus à la première dimension.

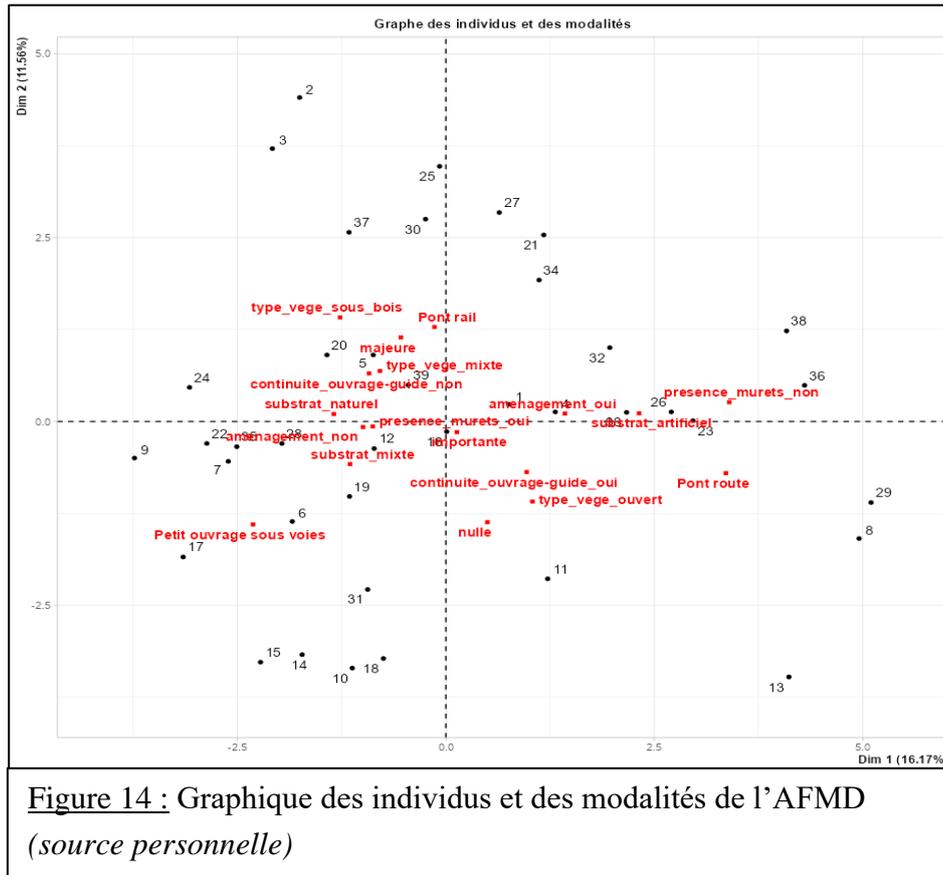
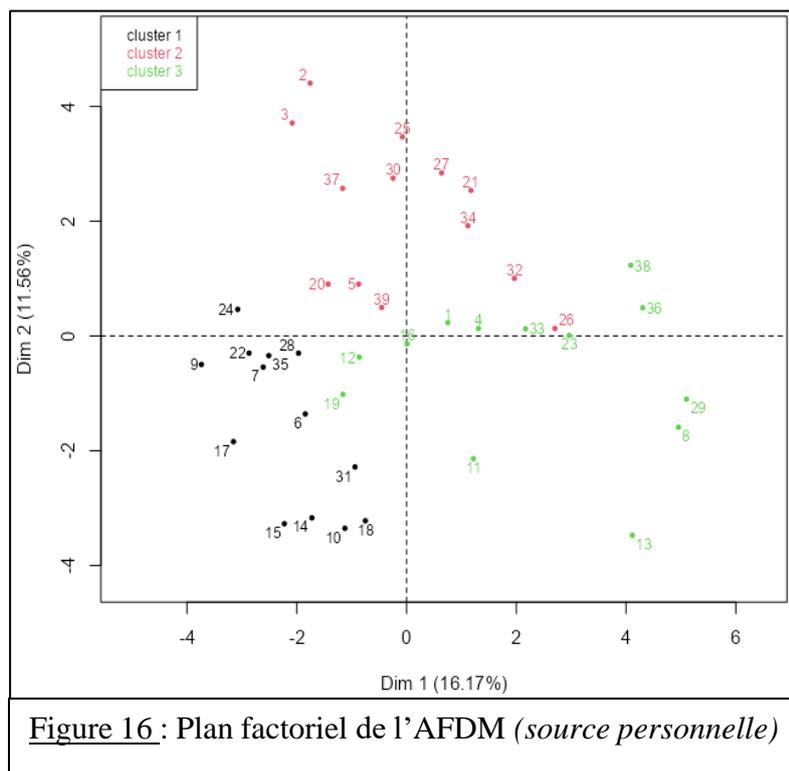


Figure 14 : Graphique des individus et des modalités de l'AFMD
(source personnelle)

Pour la deuxième dimension, ce sont la hauteur, le type de végétation "sous-bois" et la densité de boisement aux alentours de l'ouvrage qui la caractérisent le mieux et pour la troisième dimension la naturalité potentielle au niveau de l'ouvrage et le type PRA sont les plus caractérisants.



Pour la CAH, trois groupes distincts sont retenus (Figure 16). Il est possible de caractériser chacun de ces groupes en fonction de leur positionnement par rapport aux axes décrits dans l'AFDM précédemment. Le cluster 1, illustré en [annexe VIII](#), regroupe majoritairement des ouvrages POSV ayant un paysage ouvert et bâti mais possédant localement une naturalité potentielle élevée. Seul l'ouvrage 18 (75227) appartenant à ce groupe n'est pas un POSV mais un PRA.

Le cluster 2 se positionnant sur le haut de l'axe 1 (Figure 16), possède des caractéristiques de milieux fermés avec une forte densité de boisements, un fort indice de diversité des milieux aux alentours de l'ouvrage ainsi que peu de bâti. On y retrouve exclusivement des PRA mais avec des taux d'anthropisation différents : l'ouvrage 26 (75297) présente une anthropisation plus importante avec un score barrière important et un substrat artificiel alors que le 20 (75277) présente un substrat naturel. Enfin, le cluster 3 présente globalement une anthropisation importante et les ouvrages sont majoritairement de type PRO. Le substrat est majoritairement artificiel et le type de végétation plutôt ouvert. Il est donc peu surprenant que ce groupe contienne les ouvrages qui sont les plus éloignés d'une trame majeure pour les mammifères.

b-Description des vidéos obtenues grâce aux pièges photographiques

Entre le 23 octobre 2023 et le 18 avril 2024, 262 798 vidéos ont été enregistrées par les pièges photographiques. Durant ces six mois, des données ont été perdues puisque deux caméras ont été défectueuses (en sessions S4 et S5) et trois pièges ont été volés malgré les mesures de sécurité en place (un en S5 et deux en S7). 39 ouvrages ont donc au final été équipés lors de cette période de l'étude, puisqu'un ouvrage n'a pas été équipé pour cause de caméras défectueuses. L'effort d'échantillonnage, qui se définit comme étant le nombre de nuit-pièges ou le nombre total de sites de pose de pièges photographiques multiplié par le nombre de jours de pose, est 13 884 nuit-pièges pour cette étude. De par la nature du protocole, le lot 1 a cumulé quatre mois de suivi et le lot 2, deux mois de suivi continus.

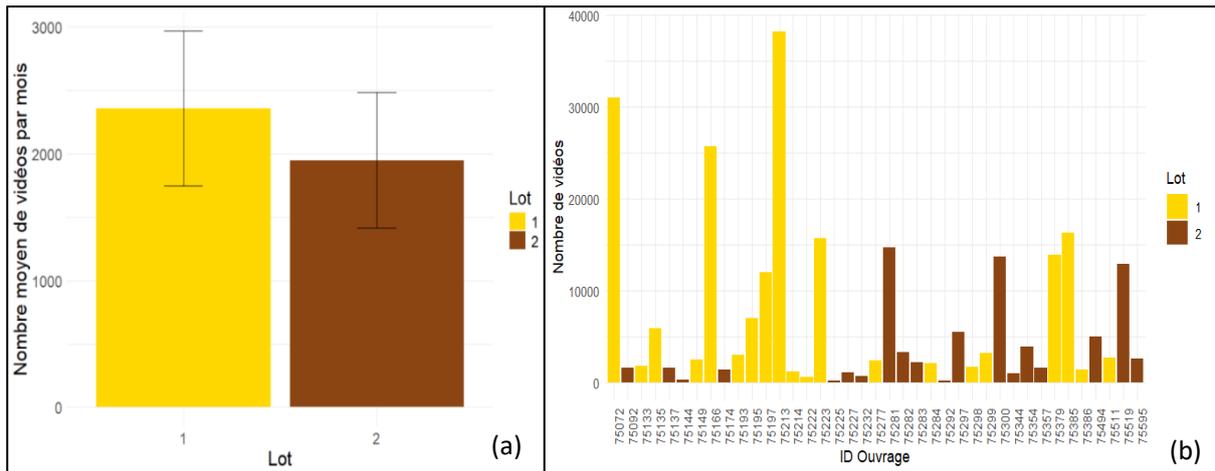


Figure 17 (a) et (b) : Histogramme avec barres d'erreur du nombre moyen de vidéos prises par mois et par lot (a) et histogramme du nombre total de vidéos par ouvrage (b) (source personnelle)

On remarque qu'en moyenne mensuelle le lot 1 a effectivement capturé plus de vidéos que le lot 2, même si cela n'est pas significatif (Figure 17a). Dans le détail, seuls 3 ouvrages sont responsables de cette moyenne plus élevée (Figure 17b).

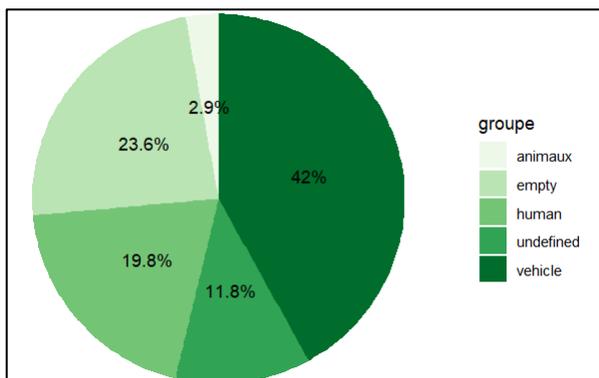


Figure 18 : Diagramme circulaire de la proportion des différents groupes prédits par DeepFaune dans le jeu de données de vidéos (source personnelle)

20 classes différentes ont été prédites par l'intelligence artificielle et les vidéos montrant des animaux sont très minoritaires avec seulement 3% du jeu de données et la majorité des vidéos présentent des véhicules ou des humains avec 62% du jeu de données. Le reste des vidéos est soit non identifié par DeepFaune ou ne montre rien (Figure 18).

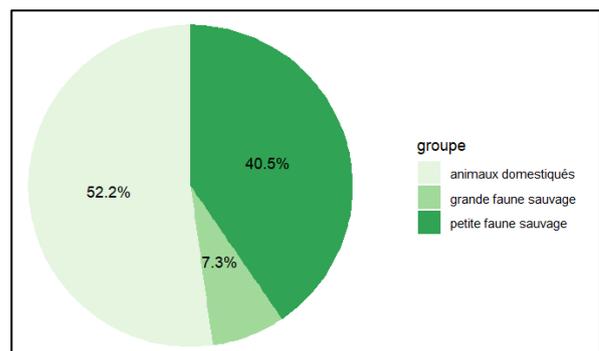


Figure 19 : Diagramme circulaire de la proportion des différents groupes d'animaux prédits par DeepFaune (source personnelle)

Au niveau des animaux, la grande faune sauvage qui nous intéresse dans cette étude ne représente que 7.3 % des animaux identifiés soit 0.2 % du nombre de vidéos totales. De la famille des ongulés, seuls des chevreuils et des sangliers ont été capturés par les pièges sur cette période d'étude (Figure 19).

c-Analyse de l'efficacité de Deepfaune

Les vidéos échantillonnées ont été prises entre le 26 octobre 2023 et le 17 avril 2024 ce qui représente quasiment la totalité de la période de l'étude. Le jeu de données obtenu présente 17 classes pour les classes prédites et 19 pour les vraies classes (Figure 20).

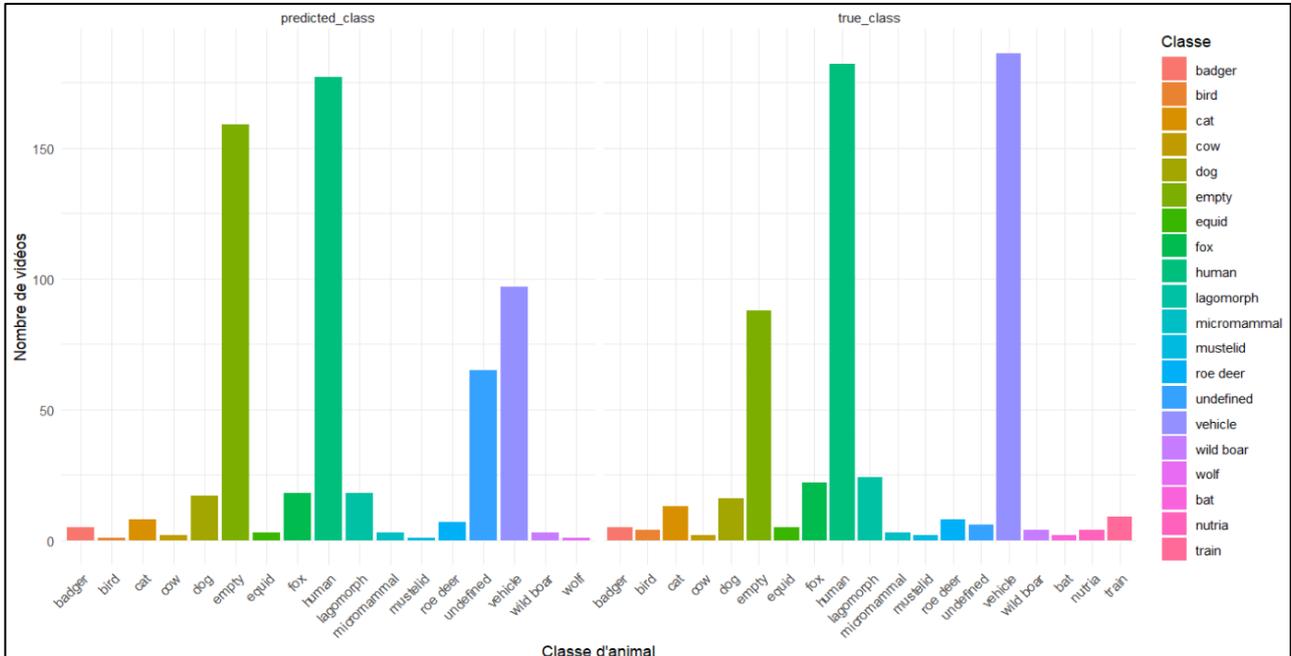


Figure 20 : Histogramme du nombre de vidéos par classe prédite par DeepFaune et par classe identifiée à la main (*source personnelle*)

On remarque également que le nombre de vidéos pour certaines classes comme “empty”, “undefined” et “vehicle” diffèrent fortement entre les classes prédites par DeepFaune et les vraies classes. Il est donc intéressant d’analyser la performance du modèle à prédire les classes des vidéos. Le kappa est ici de 0.6252 et la précision du modèle est de 0.6974 avec un intervalle de confiance entre 0.6584 et 0.7344. Environ 70% des vidéos sont donc bien classées par DeepFaune. 30% sont globalement incorrectement classées ce qui peut être problématique mais une étude plus approfondie de la précision par classe est nécessaire.

La matrice de confusion représente en diagonale les classes qui ont été classées correctement et les valeurs hors diagonale indiquent le nombre de mauvais classements pour chaque classe, et avec quelle classe elle a été confondue (Figure 21). On remarque que les humains ont été particulièrement bien classés mais ont tout de même parfois été classés comme “undefined”, “vehicle” ou “empty”. Au contraire, les véhicules ont été très souvent confondus avec des vidéos vides ou indéfinies et avec quelques humains. Les animaux semblent cependant être relativement bien reconnus.

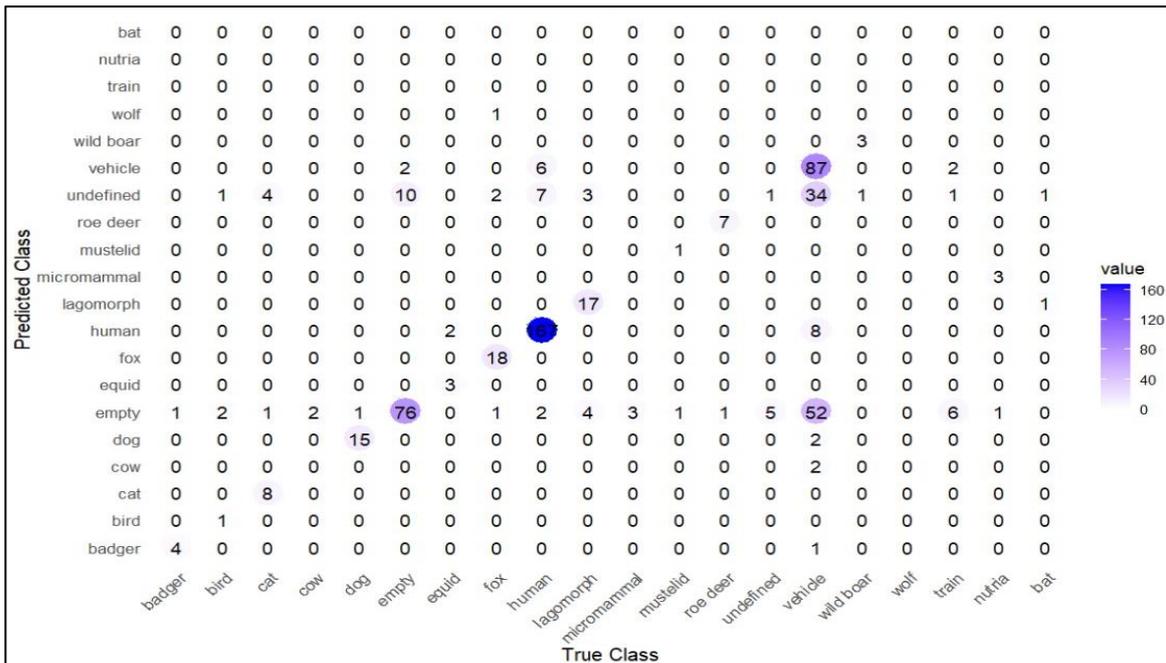


Figure 21 : Matrice de confusion entre les classes prédites par DeepFaune et les classes identifiées à la main (*source personnelle*)

Deepfaune fait part d'un score de confiance moyen très élevé (0.992) pour ses prédictions correctes avec un écart-type de 0.0293. Le score de confiance moyen pour les prédictions incorrectes est de 0.762 avec un écart type de 0.319, ce qui est relativement élevé.

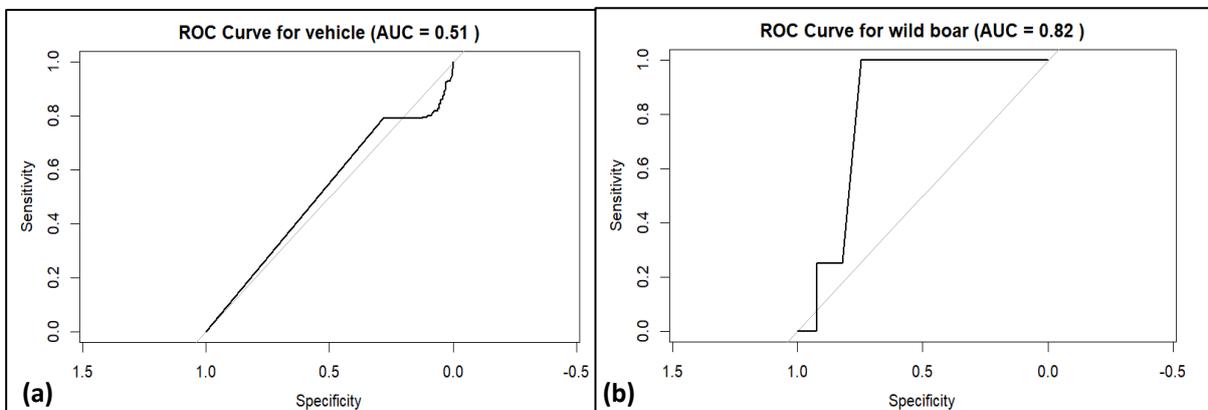


Figure 22 (a) et (b): Courbes ROC et AUC associées pour la prédiction “vehicle” (a) et pour la prédiction “wild boar” (b) (*source personnelle*)

On remarque ainsi que la qualité de la classification dépend fortement de la classe en question puisque l’AUC pour les véhicules indique une classification quasiment aléatoire (Figure 22a) alors que pour les sangliers, elle indique une très bonne classification (Figure 22b).



Figure 23 : Histogramme de la précision de DeepFaune en fonction du moment de la journée (*source personnelle*)

Lors du crépuscule et de la nuit, la précision du modèle semble être affectée par rapport au jour (Figure 23) et le test du χ^2 permet de montrer que l'association est significative (p-value = 6.614e-09). On observe que pendant la journée, le taux de bonnes identifications est significativement élevé (coefficient de 4.78) et que pendant la nuit il est significativement bas (coefficient de -5.73).

De manière similaire, on observe que le taux de bonnes identifications dépend fortement significativement du site (p-value = 1.597e-10). Dans le détail, DeepFaune prédit les classes des animaux particulièrement bien sur les ouvrages 75092, 75133, 75225, 75277, 75284 et particulièrement mal sur les ouvrages 75072, 75223, 75385, 75511 et 75519.

d-Analyse de la fréquentation des ongulés aux abords des ouvrages

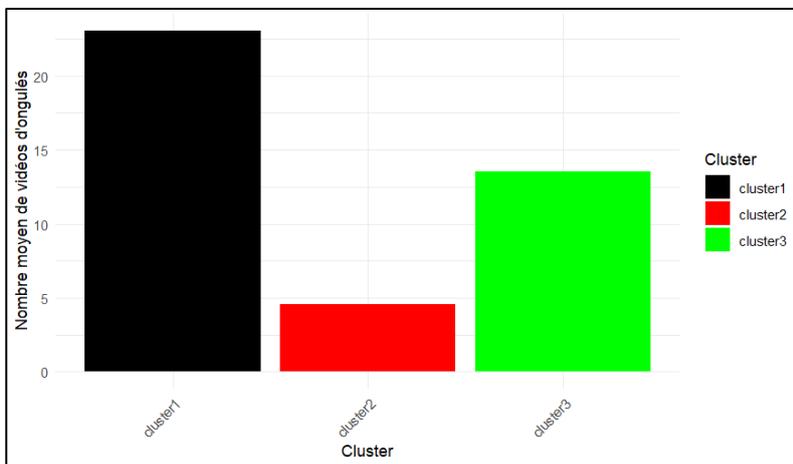


Figure 24 : Histogramme du nombre moyen d'observations d'ongulés aux alentours des ouvrages par cluster (*source personnelle*)

Dans cette étude, des ongulés ont été observés aux alentours de 29 ouvrages sur les 39 prospectés pendant les 6 mois. On remarque sur la figure 24 que les alentours des ouvrages du cluster 1 semblent être beaucoup plus visités par les ongulés. Pour rappel, ces ouvrages sont majoritairement des POSV ayant un paysage ouvert et bâti mais possédant localement une naturalité potentielle élevée. Cette différence n'est cependant pas significative (test de Kruskal-Wallis : p-value = 0.1154) et

on ne peut donc pas dire que le type d'ouvrage selon la typologie multivariée présentée précédemment a un effet sur la fréquentation des ongulés aux abords des ouvrages.

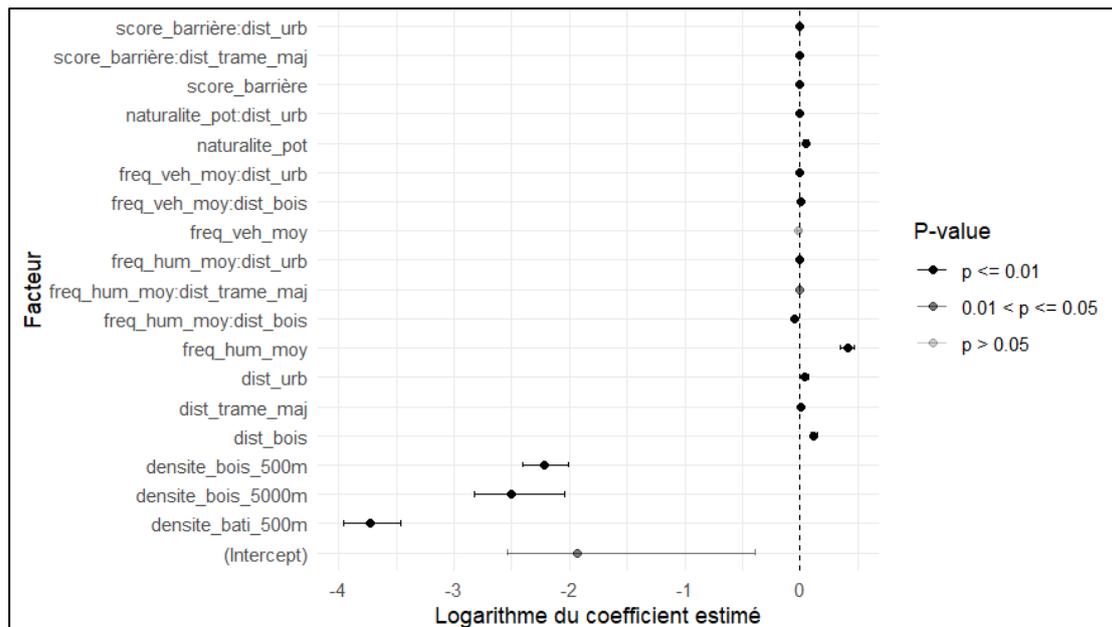


Figure 25 : Coefficients et leur p-value associée, estimés par le modèle pour chaque facteur (*source personnelle*)

Pour l'influence des facteurs en question, on observe sur la figure 25 que la densité du bâti et du boisement dans un rayon de 5000m, la densité de boisement dans un rayon de 500m et le score barrière impacte significativement négativement le nombre d'ongulés qui fréquentent les ouvrages. La fréquentation humaine moyenne journalière, la naturalité potentielle locale, la distance à une trame majeure pour les mammifères, au boisement le plus proche et au bâti le plus proche ont un impact significativement positif sur le nombre d'ongulés aux alentours des ouvrages. De nombreuses interactions ont un effet significatif sur les approches mais seules score_barrière:dist_urb, freq_veh_moy:dist_bois ont un effet positif.

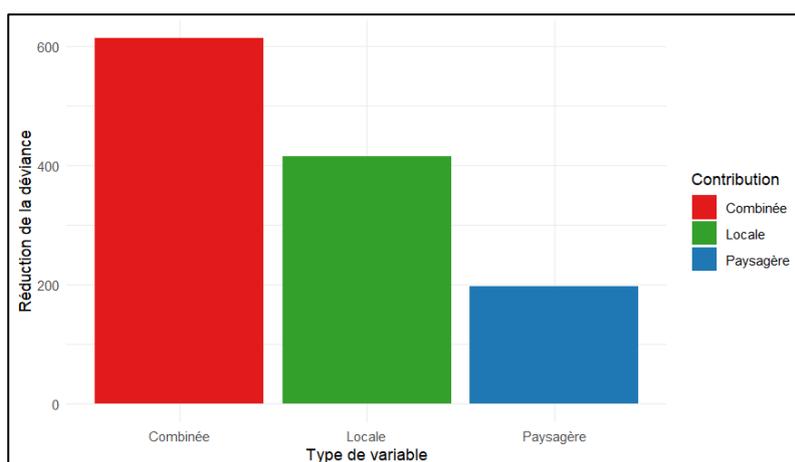


Figure 26 : Histogramme de la contribution des variables locales et paysagères à la réduction de la déviance (*source personnelle*)

Une partition de variance permet de déterminer plus globalement si ce sont plutôt des variables locales ou paysagères qui contribuent à l'explication du nombre d'ongulés aux abords des ouvrages. Pour ce modèle, on observe que les deux groupes de variables contribuent fortement à l'explication de la variable réponse (Figure 26)

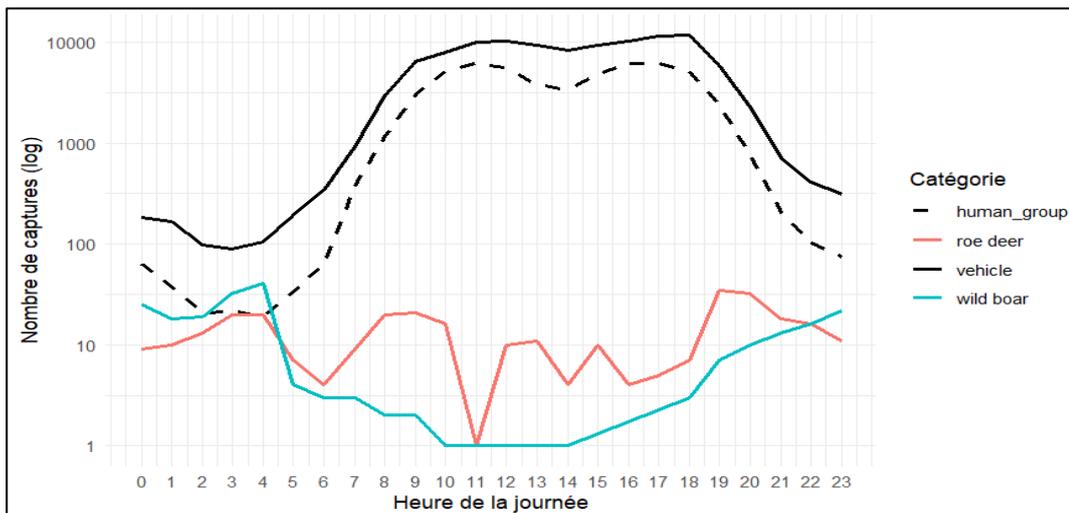


Figure 27 : Graphique de la fréquentation des ouvrages par les ongulés et les humains en fonction de l'heure de la journée (source personnelle)

L'analyse des temporalités de fréquentation permet de souligner que les ongulés ont tendance à fréquenter les ouvrages aux moments où les véhicules et les piétons les fréquentent le moins. Ceci est moins marqué pour le chevreuil, qui fréquente les ouvrages également en journée (Figure 27).

e-Analyse du nombre de passages des ongulés

Des passages d'ongulés ont été observés dans seulement quatre ouvrages sur les 39 équipés. Sur ces quatre ouvrages, une grande hétérogénéité dans le nombre de passages et l'espèce concernée peut être observée (Figure 28). De nombreux passages ont été recensés sur l'ouvrage 75135. Seulement 4 passages pour les sangliers ont été dénombrés alors que 65 passages l'ont été pour les chevreuils. Il est aussi intéressant de noter que les sangliers et les chevreuils ne passent pas par les mêmes ouvrages alors que pour trois ouvrages sur les quatre, les deux espèces ont été observées aux alentours de ces ouvrages.

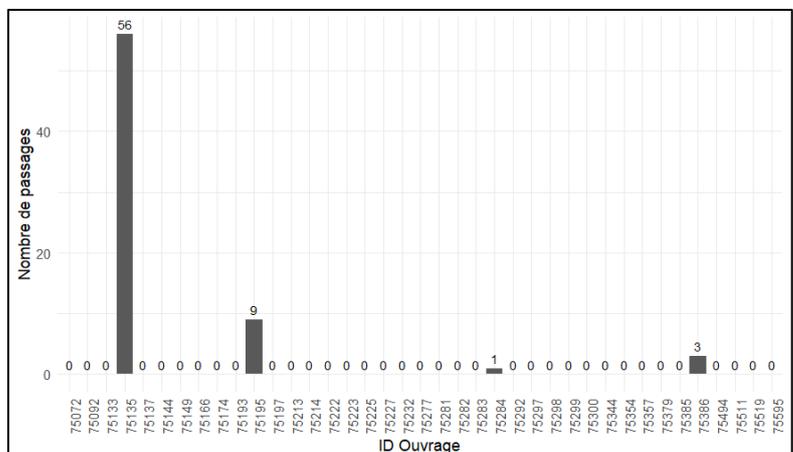


Figure 28 : Histogramme du nombre passages par ouvrage (source personnelle)

Si on compare les ouvrages qui sont utilisés par les ongulés avec les groupes d'ouvrages réalisés précédemment, les ouvrages 4 (75135) et 11 (75195) font partie du cluster 3, qui correspond aux ouvrages avec un fort taux d'anthropisation, une forte fréquentation de véhicules, un score barrière fort et les ouvrages sont majoritairement des PRO. Les ouvrages 24 (75284) et 35(75386) se trouvent dans le cluster 1, qui pour rappel, regroupe majoritairement

des ouvrages POSV ayant un paysage ouvert et bâti mais possédant localement une naturalité potentielle élevée. On remarque que le test de significativité pour le cluster n'est pas significatif.

Les résultats des tests sur chaque facteur en lien direct avec les hypothèses émises en introductions sont résumés dans le tableau 2, les résultats des tests sur tous les facteurs sont disponibles en [annexe IX](#). Seule la hauteur a un effet significatif sur les passages.

Tableau 2 : Résultat des tests réalisés sur les facteurs principaux (<i>source personnelle</i>)					
Facteur	P-value test de Shapiro-Wilk	Test réalisé	Résultat	P-value	
type	\	Test exact de Fisher	non significatif	0.09115	
H	0.2576	T test	significatif	0.002918	
1	5.273e-07	Test de Wilcoxon	non significatif	0.9446	
L	0.00147	Test de Wilcoxon	non significatif	0.4873	
ouverture	0.006666	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6069	
presence_murets	\	Test exact de Fisher	non significatif	0.5628	
substrat	\	Test exact de Fisher	non significatif	0.09471	
eau	1.152e-12	Test de Wilcoxon	non significatif	0.5553	
continuite_ouvrage-guide	\	Test exact de Fisher	non significatif	0.3416	
score_barrière	0.03368	Test de Wilcoxon	non significatif	0.8408	
freq_hum_moy	5.876e-05	Test de Wilcoxon	non significatif	0.5765	
freq_veh_moy	2.736e-09	Test de Wilcoxon	non significatif	0.4311	
type_vege	\	Test exact de Fisher	non significatif	0.6396	
densite_bati_500m	1.147e-07	Test de Wilcoxon	non significatif	0.2666	
densite_bati_5000m	0.0001019	Test de Wilcoxon	non significatif	0.8759	
dist_route	1.043e-10	Test de Wilcoxon	non significatif	0.7199	
dist_urb	0.002076	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6601	

IV- Discussion

a- Une variété d'ouvrages d'art ferroviaire difficile à capturer

Les dimensions 1 et 2 de l'AFMD ne présentent que moins d'un tiers de la variabilité totale des ouvrages, ce qui peut s'expliquer par le grand nombre de variables utilisées pour réaliser cette analyse factorielle. Par conséquent certaines variables sont mal projetées sur ce plan, ce qui est le cas pour les variables supplémentaires du nombre d'ongulés aux abords des ouvrages et du nombre de passages. Ceci s'observe également sur les dimensions 3,4 et 5 ce qui atteste de la complexité des variables que l'on s'essaye à expliquer. Les résultats liés à la classification sont donc à prendre avec précaution puisque les groupes ne prennent en compte qu'une partie de la variabilité totale des ouvrages.

De plus, les clusters créés se rapprochent fortement des types d'ouvrages selon la typologie de la SNCF, ceci peut s'expliquer par la forte contribution des variables de dimension des ouvrages aux axes 1 et 2 et au fait que la typologie PRO, PRA et POSV se base également sur des critères de dimensions puisqu'un POSV est un PRA de moins de 2 mètres de large et que les PRO n'ont pas de hauteur. Afin d'améliorer ce groupement, il serait possible de prendre en compte moins de variables, notamment ne garder que des variables qui s'avèrent influencer les approches ou les passages.

b- Retour d'expérience sur l'utilisation des pièges photographiques

Au vu de l'effort d'échantillonnage et du nombre de vidéos, on peut considérer que les ouvrages ont été suffisamment prospectés pour estimer si les animaux passent régulièrement dans les ouvrages. A titre de comparaison, pour l'étude des passages de la grande faune dans les ouvrages d'art dans le cadre de l'étude Via Fauna (Pradines, 2019), les pièges photographiques n'étaient laissés que trois semaines. Cependant pour évaluer les effets saisonniers et dénombrer les passages, un an de suivi au minimum est recommandé. Cette méthode de suivi est courante dans ce contexte (SNCF Réseau, 2015, D'Ambly, Carpentier, 2022, Pradines, 2019) même si certaines études, utilisent plutôt des pièges à empreintes (Bhardwaj et al., 2020 ; Rodriguez et al., 1996). En effet, les pièges photographiques ont des désavantages. Ils aboutissent à une grande quantité de photographies qu'il faut pouvoir analyser, peuvent se déclencher de manière impromptue en cas de mauvaises conditions météorologiques, comme observé lors de cette étude notamment lors de la tempête Ciaran qui a touché la Bretagne fin 2023, et peuvent être volées, ce qui a également été le cas de trois caméras pendant cette étude. Le manque de dispositif de fixation approprié peut aussi mener à des angles de vue différents entre les ouvrages, parfois limitant la détection d'animaux.

Malgré cela, les apports des pièges photographiques au vu des objectifs de l'étude à long terme au travers de la thèse de Tess Heydorff-Decaux en font la meilleure méthode possible à adopter. Elle pourrait être améliorée en confectionnant un dispositif de fixation spécifique aux ouvrages d'art qui permettrait d'homogénéiser les angles de vues et de réduire le temps de pose des pièges ou alors en choisissant des caméras qui diffusent les images en temps réel pour ne pas perdre de données dans l'éventualité de vol.

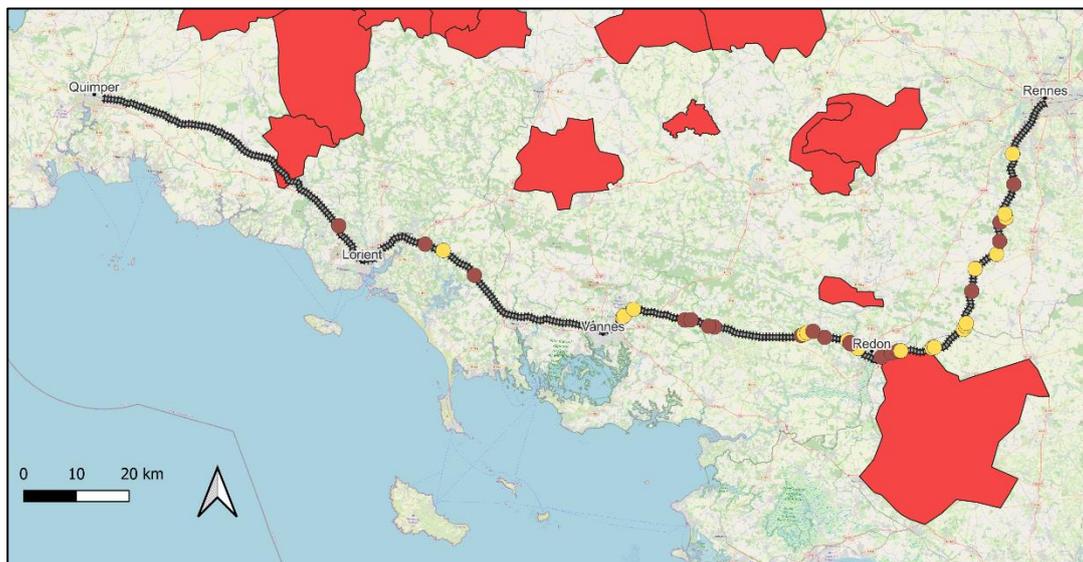


Figure 29 : Carte des zones de présence du cerf élaphe sur la zone d'étude
(source personnelle)

Seulement deux espèces d'ongulés sur trois présentes en Bretagne ont été capturées par les pièges photographiques, ce qui peut s'expliquer par la faible présence du cerf élaphe dans les zones prospectées (Figure 29). La grande part de véhicules et d'humains dans le jeu de données s'explique par le fait qu'une grande partie des ouvrages sélectionnés étaient carrossables ou facilement accessibles à pied. La grande proportion d'animaux domestiques en

découle, puisque souvent, les piétons promènent leur chien, qui peut être reconnu en premier par DeepFaune, ou apparaître seul sur la vidéo. La présence d'urbanisation ou de fermes aux alentours des ouvrages pouvait jouer grandement sur l'apparition de chats ou de bétail sur les vidéos. La proportion de vidéos "empty" dues à des déclenchements des caméras pour causes météorologiques est comparable à d'autres études utilisant des pièges photographiques (Ducat, 2023). La grande proportion de petite faune sauvage par rapport à la grande s'explique par le nombre d'espèces ou classes incluses dans cette catégorie, qui sont abondantes en Bretagne comme le renard ou les lagomorphes.

c- Une performance adéquate mais optimisable de DeepFaune

Le choix de l'utilisation d'une IA s'est globalement avéré judicieux par rapport au nombre de vidéos amassées et son efficacité à classer correctement les vidéos à 70%. La différence du nombre de classes prédites par le modèle et à la main s'explique par des prédictions erronées du modèle pour des classes qui étaient représentées par peu de vidéos comme "wolf" ou des classes qui n'étaient pas prédites par DeepFaune dans cet échantillon comme "nutria". "train" et "bat" ne sont pas des classes sur lesquelles ce modèle a été entraîné mais les éléments déclenchant les vidéos ne pouvaient être classés dans les classes déjà existantes. Avant d'attribuer une identification à la vidéo, DeepFaune passe par une étape de détection où l'animal ou l'objet qui a déclenché le piège est encadré. Si aucune détection n'est réalisée, la vidéo est classée "empty". Le grand nombre de vidéos classées incorrectement dans cette classe atteste d'une certaine faiblesse à détecter certains éléments, surtout des voitures d'après la matrice de confusion mais aussi de nombreux animaux comme des oiseaux, des lagomorphes ou des vaches.

Le score de confiance élevé pour les prédictions correctes montre que lorsque DeepFaune prédit une classe avec un score de confiance élevé, il est très fortement probable qu'il ne se trompe pas. Ceci est réglable dans les fonctionnalités de DeepFaune puisqu'en dessous d'un score de confiance défini par l'utilisateur (ici 0.8), la prédiction est automatiquement "undefined", d'où la grande quantité de vidéos classées ainsi. Le score de confiance moyen pour les prédictions incorrectes est également relativement élevé, ce qui indique une surconfiance du modèle puisqu'il est assez sûr de lui, même quand il se trompe. Cela pourrait venir du fait que la classe "undefined" est attribuée même lorsque le score de confiance est relativement élevé.

Les capacités de ce modèle à identifier certaines classes comme les véhicules sont limitées d'après l'AUC qui indique une classification quasi-aléatoire pour cette classe. Dans cette étude qui s'intéresse principalement à la faune et particulièrement aux ongulés, avoir une mauvaise classification des voitures n'est pas spécialement problématique tant que les classes d'intérêt sont identifiées de manière fiable. Cependant, cela peut affecter certaines variables explicatives puisque la fréquentation moyenne journalière de véhicules a été calculée en fonction du nombre de véhicules identifiés par l'intelligence artificielle. On suppose donc une certaine sous-estimation de cette variable.

La meilleure capacité de DeepFaune à identifier les animaux, surtout les ongulés, peut s'expliquer par le grand nombre de photos pour la grande faune dans le pool d'entraînement du modèle.

Class	N Training	N Validation	Precision	Recall
badger	9263	1227	0.96	0.98
ibex	6168	756	0.83	0.97
red deer	130753	11468	0.96	0.96
chamois	113527	14465	0.99	0.96
cat	5013	926	0.90	0.94
goat	3459	235	0.83	0.93
roe deer	81923	8167	0.95	0.95
dog	9413	1202	0.94	0.93
squirrel	4771	576	0.94	0.98
equid	1211	80	0.91	0.99
genet	340	52	0.89	0.92
hedgehog	231	2	0.50	1.00
lagomorph	4655	764	0.94	0.96
wolf	7096	959	0.87	0.96
lynx	806	89	0.95	1.00
marmot	1934	228	0.95	0.98
micromammal	3265	444	0.99	1.00
mouflon	967	72	0.60	0.96
sheep	113691	15566	1.00	0.99
mustelid	4515	619	0.87	0.95
bird	26575	4069	0.99	0.99
bear	6672	1362	0.91	0.98
nutria	382	63	0.94	0.97
fox	47064	4558	0.98	0.95
wild boar	70616	13300	0.98	0.99
cow	44773	7241	0.99	1.00

Figure 30 : Nombre de vidéos sur lesquelles les classes ont été entraînées et leur score de précision associé (Rigoudy et al., 2023)

Les ongulés ont effectivement bénéficié d'un très grand nombre d'images lors de l'entraînement et la validation, alors que les micromammifères et les ragondins ont été entraînés sur relativement peu d'images. Ceci explique les confusions pour le peu de vidéos montrant réellement des ragondins et des micromammifères (Figure 30). De plus, la plupart des photos utilisées pour l'entraînement ont été prises dans des zones peu urbanisées, ce qui explique le fort taux d'erreur pour les voitures et autres éléments anthropiques.

Ceci est en lien avec les faibles performances de nuit puisque de nombreux véhicules sont présents de nuit, avec leurs phares qui créent des reflets dans l'objectif de la caméra et qui induisent encore plus le modèle en erreur. Les éléments anthropiques comme des panneaux, des caténaires ou des routes, visibles sur certains ouvrages peuvent expliquer la faible performance sur certains ouvrages.

Le kappa indique que le modèle peut être considéré comme "modéré à bon" selon l'échelle de Landis et Koch mais une marge d'amélioration est possible. Afin d'améliorer le modèle, à l'échelle de l'étude, il serait possible de tester un seuil de score de confiance plus bas à partir duquel DeepFaune classerait les vidéos comme indéfinies, afin d'abaisser la surconfiance du modèle lorsqu'il classe les vidéos incorrectement. A l'échelle du modèle en lui-même, envoyer les vidéos de voitures et de trains aux porteurs du projet, pourrait permettre d'entraîner le modèle à des milieux routiers et ferroviaires, surtout de nuit. Les vidéos de micromammifères et de ragondins pourraient également être envoyées pour entraîner le modèle sur plus d'images de ces animaux. Il est également possible de proposer une nouvelle classe pour les chauves-souris qui peuvent également apparaître sur des enregistrements de pièges photographiques.

De plus, l'interface utilisateur nécessite une grande part d'attention puisqu'il faut attendre qu'un dossier de photos ou vidéos soit complètement identifié pour pouvoir sélectionner le dossier suivant. Une automatisation du processus applicable à de grands jeux de données serait la bienvenue. La reconnaissance multi-individus et multi-espèces serait aussi appréciable, puisqu'il est actuellement impossible pour DeepFaune de détecter plusieurs individus sur une même vidéo.

d-Mise en perspective des facteurs influençant les approches et les passages des grands ongulés dans les ouvrages non dédiés

La prise en compte du nombre d'approches des ouvrages et non uniquement le nombre de passages dans les ouvrages est important d'après Denneboom et al., 2021 afin de pouvoir estimer l'efficacité des ouvrages à permettre le passage des animaux. D'après les résultats, les animaux ont tendance à fréquenter plus régulièrement les POSV qui sont par nature non

carrossables et présentent donc une fréquence de véhicules très faible. Ceci est cohérent avec les coefficients associés aux variables du modèle linéaire généralisé, puisque même si la fréquentation journalière moyenne des véhicules n'est pas significative, une forte densité de bâti dans les 500m de l'ouvrage impacte significativement et fortement le nombre d'ongulés approchant des ouvrages. Il en va de même pour la distance au bâti le plus proche, qui lorsqu'elle augmente, a un impact positif sur le nombre d'ongulés approchant les ouvrages. Il en ressort donc que la présence humaine à l'échelle du paysage impacte négativement les approches des grands ongulés aux ouvrages d'art, qui perçoivent le paysage de ces ouvrages comme risqué (Denneboom et al., 2021).

On observe un effet significatif positif de la fréquence journalière moyenne de piétons aux abords des ouvrages, ce qui peut paraître contre-intuitif. Cependant, les piétons ont tendance à se promener sur des sentiers peu ou pas empruntés par des véhicules pour des soucis de sécurité et de tranquillité. On observe également que les animaux fréquentent les ouvrages lors d'une temporalité différente des humains afin de les éviter, ce qui correspond aux tendances évoquées par Steiner et al., 2014.

Il est surprenant d'observer que la proximité de boisement, la densité de boisement aux alentours des ouvrages à 500 et 5000 mètres aient un impact négatif sur la fréquentation des ongulés ; mais comme mentionné dans l'étude de Clevenger and Waltho en 2005, il est attendu que les ongulés préfèrent les ouvrages sans boisements puisque les milieux ouverts facilitent l'évitement de prédateurs et la fuite. Le score barrière impacte significativement et négativement les approches aux ouvrages ce qui montre que peu de barrières sur ces lignes ont une fonction de guide pour la faune sauvage mais constituent plutôt des obstacles à proximité des ouvrages qui impactent la perméabilité du paysage local (Denneboom et al., 2021).

Les interactions ont été incluses dans le modèle afin de pouvoir modéliser certains ouvrages, notamment le 75386, qui semblaient ne pouvoir être correctement modélisés avec les effets simples uniquement. Certaines interactions sont difficilement interprétables écologiquement mais au niveau des interactions significatives positives, le score barrière et la distance à l'urbanisation favorisent le nombre d'approches lorsque le score barrière est moyen mais loin de l'urbanisation. Lorsque le score barrière est élevé et proche du bâti, le nombre d'approches réduit drastiquement. Ceci fait part de la variabilité du type de barrières présentes, qui sont généralement plus nombreuses et imperméables autour d'habitations et plus perméables plus on s'éloigne du bâti comme les clôtures. L'impact positif de l'interaction entre la fréquentation moyenne des véhicules et la distance au boisement le plus proche peut être en lien avec la plasticité comportementale des ongulés. Proche de boisements, une moyenne relativement faible de voitures engendre un faible nombre d'approches, alors que plus on s'éloigne des boisements, un plus grand nombre de voitures par jour est nécessaire pour faire baisser le nombre d'approches des ongulés. On peut penser que dans un environnement où la fuite est possible, les ongulés tolèrent plus de dérangement que dans un milieu fermé.

Concernant les passages, le nombre d'ouvrages effectivement utilisés par les ongulés est beaucoup plus faible qu'escompté. Cela peut être dû à la saisonnalité, aux caractéristiques des ouvrages ou de leur paysage mais il est aussi possible que les vidéos de 5 secondes ne permettent pas de correctement visualiser les entrées et sorties des ongulés. Souvent les vidéos se coupaient alors que l'animal était arrêté au milieu du cadre et la suite du mouvement n'était pas capturée par les pièges.

On remarque tout de même que l'hypothèse de spécificité des passages aux espèces est confirmée, puisque chaque ouvrage traversé ne l'a été que par une des deux espèces

d'ongulés, malgré avoir été pour la plupart approchés par les deux espèces.

Aucun effet du groupement des ouvrages n'est observé sur les passages, ce qui peut être dû au faible nombre d'ouvrages traversés par les ongulés mais également au fait que ces groupes ne fassent part que d'un tiers à peine de la variabilité inter-ouvrages. Au niveau des facteurs, la hauteur de l'ouvrage impacte significativement les passages comme mentionné en introduction (SNCF Réseau, 2015). Les ouvrages traversés font tous plus de 2 mètres de haut étant donné que deux ouvrages sont des PRO et n'ont pas de hauteur et que les deux POSV traversés font respectivement 2.1 et 2.39 mètres de haut. Tous les autres facteurs n'ayant pas d'impact significatif sur le nombre de passages il est impossible de confirmer ou d'infirmer toutes les autres hypothèses émises en introduction.

Il est donc indispensable de continuer à récolter des données sur les passages, que ce soit sur les mêmes passages à une saisonnalité différente ou bien sur de nouveaux passages, afin de tester ces facteurs sur plus d'ouvrages étant utilisés. C'est ce qui est prévu dans le cadre de la thèse de Tess Heydorff-Decaux puisque les 39 ouvrages analysés dans ce rapport et un ouvrage supplémentaire seront prospectés jusqu'en octobre 2024. Pour améliorer la détection des passages, il serait possible de rajouter un piège photographique à l'intérieur des ouvrages, surtout quand les autres pièges sont dirigés vers les alentours de l'ouvrage et ne permettent pas de visualiser clairement l'entrée ou la sortie d'un animal de l'intérieur de l'ouvrage. Des vidéos plus longues permettraient aussi de mieux visualiser le comportement des animaux mais le stockage des vidéos serait problématique.

V-Conclusion

Afin de limiter l'effet barrière des voies ferrées et réduire le nombre de collisions avec les grands ongulés, les ouvrages d'art ferroviaires non dédiés à la faune sauvage apparaissent bel et bien comme une solution au vu de leur utilisation par ces mammifères. Si des aménagements étaient réalisés afin d'optimiser leur efficacité, les efforts devraient se focaliser sur des ouvrages que les ongulés approchent. C'est-à-dire, d'après cette étude, des ouvrages présentant un paysage plutôt ouvert, mais avec peu de bâti. La quantité de barrières imperméables aux alentours de l'ouvrage doit être faible afin de laisser libre cours aux déplacements des ongulés vers l'ouvrage. La fréquentation humaine des ouvrages ne semble pas poser problème tant que les ongulés peuvent utiliser les ouvrages aux moments où ils ne sont pas utilisés par les humains.

Quant à l'efficacité des ouvrages à permettre le passage des ongulés, les ouvrages prospectés dans cette étude se sont avérés peu efficaces étant donné que seuls 4 ouvrages sur les 29 approchés régulièrement par des ongulés ont permis des passages. Face à aussi peu de données, seule la hauteur s'est montrée être un élément déterminant dans le passage des ongulés. Il est donc primordial de continuer à prospecter ces ouvrages, ainsi que des ouvrages supplémentaires, dans le cadre de la thèse de Tess Heydorff-Decaux, afin d'obtenir plus de passages et de données. Cela permettra de faire ressortir d'autres facteurs déterminants dans le passage des ongulés et ainsi aboutir à des recommandations opérationnelles plus précises.

Pour aller plus loin, il serait également possible de tester l'influence de tous les facteurs sur les approches et les passages de la petite faune, qui a aussi été capturée par les pièges photographiques. Le même protocole et les mêmes analyses pourraient être réalisés sur ces espèces, qui utilisent les ouvrages non dédiés à la faune visiblement plus souvent que les grands ongulés.

Bibliographie

Alsace Nature (2008) Infrastructures et continuités écologiques | Trame verte et bleue. Disponible sur : <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/infrastructures-continuites-ecologiques-0> (Consulté le 22 janvier 2024)

Apollonio M, Putman R, Anderson R (2010) European Ungulates and Their Management in the 21st Century. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/292384232_European_Ungulates_and_Their_Management_in_the_21st_Century (Consulté le 22 janvier 2024)

Babińska-Werka J, Krauze-Gryz D, Wasilewski M, Jasińska K (2015) Effectiveness of an acoustic wildlife warning device using natural calls to reduce the risk of train collisions with animals. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **38**: 6–14

Backs JAJ, Nychka JA, St. Clair CC (2017) Warning systems triggered by trains could reduce collisions with wildlife. *Ecological Engineering* **106**: 563–569

Barber JR, Crooks KR, Fristrup KM (2010) The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends Ecol Evol* **25**: 180–189

Barrientos R, Ascensão F, Beja P, Pereira HM, Borda-de-Água L (2019) Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences. *European journal of wildlife research* **65**: 1–9

Barrientos R, Borda de Agua L (2017) Railways as Barriers for Wildlife: Current Knowledge. *Railway Ecology*. pp 43–64

Barthelmess EL, Brooks MS (2010) The influence of body-size and diet on road-kill trends in mammals. *Biodivers Conserv* **19**: 1611–1629

Beben D (2012) Crossings for Animals – an Effective Method of Wild Fauna Conservation, DOI : 10.3846/16486897.2012.662753

Bhardwaj M, Olsson M, Seiler A (2020) Ungulate use of non-wildlife underpasses. *Journal of Environmental Management* **273**: 111095

Billon L, Lacoste N de (2021) Bilan de la mise en œuvre du protocole Collisions en DIR Méditerranée. Analyse des données récoltées de 2017 à 2020. 67 pages

Bison M, Loison A (2022) Les ongulés sauvages de France métropolitaine. Fonctions écologiques, services écosystémiques et contraintes. *La Documentation Française*

Borda de Agua L, Barrientos R, Beja P, Pereira H (2017) Railway Ecology. *Railway Ecology*. DOI : 10.1007/978-3-319-57496-7

Braden AW, Parker ID, Lopez RR, Silvy NJ, Davis DS, Owen CB (2008) Effects of US 1 Project on Florida Key Deer Mortality. *The Journal of Wildlife Management* **72**: 354–359

- Brito J-M, Villanueva P, Mathey T** (2023) Ouvrages d'art, Parcours Système Ferroviaire. SNCF (document interne)
- Cagnacci F, Focardi S, Heurich M, Stache A, Hewison A, Morellet N, Kjellander P, Linnell J, Mysterud A, Neteler M, et al** (2011) Partial migration in roe deer: Migratory and resident tactics are end points of a behavioural gradient determined by ecological factors. *Oikos* **120**: 1790–1802
- Carpio AJ, Apollonio M, Acevedo P** (2020) Wild ungulate overabundance in Europe : contexts, causes, monitoring and management recommendations
- Clevenger A, Chruszcz B, Gunson K** (2001) Highway Mitigation Fencing Reduces Wildlife-Vehicle Collisions. *Wildlife Society Bulletin* **29**: 646–653
- Clevenger AP, Waltho N** (2000) Factors Influencing the Effectiveness of Wildlife Underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada. *Conservation Biology* **14**: 47–56
- Clevenger AP, Waltho N** (2005) Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals. *Biological Conservation* **121**: 453–464
- Clevenger AP, Wierzchowski J, Chruszcz B, Gunson K** (2002) GIS-Generated, Expert-Based Models for Identifying Wildlife Habitat Linkages and Planning Mitigation Passages. *Conservation Biology* **16**: 503–514
- Coulon A, Guillot G, Cosson J-F, Angibault JMA, Aulagnier S, Cargnelutti B, Galan M, Hewison AJM** (2006) Genetic structure is influenced by landscape features: empirical evidence from a roe deer population. *Molecular Ecology* **15**: 1669–1679
- Cushman SA, Max T, Meneses N, Evans LM, Ferrier S, Honchak B, Whitham TG, Allan GJ** (2014) Landscape genetic connectivity in a riparian foundation tree is jointly driven by climatic gradients and river networks. *Ecological Applications* **24**: 1000–1014
- D'AMBLY M, CARPENTIER A** (2022) Evaluation de l'utilisation des ouvrages d'art non-dédiés par la faune sauvage sur l'autoroute A64 (département de la Haute-Garonne).
- DEHOUCK H, AMSALLEM J** (2018) Analyse des méthodes de précision des continuités écologiques à l'échelle locale en France.
- Denneboom D, Bar-Massada A, Shwartz A** (2021) Factors affecting usage of crossing structures by wildlife – A systematic review and meta-analysis. *Science of The Total Environment* **777**: 146061
- Dodd NL, Gagnon JW, Boe S, Schweinsburg RE** (2007) Role of Fencing in Promoting Wildlife Underpass Use and Highway Permeability.
- Donaldson BM** (2006) A toolkit of measures for reducing animal-vehicle collisions.

Ducat E (2023) Mission report : Camera trapping carnivores in Niah National Park during monsoon season

Dutilleux G, Fontaine A (2015) Bruit routier et faune sauvage. DOI :10.13140/RG.2.1.4020.4007

Forman RTT (1998) Road ecology: A solution for the giant embracing us. *Landscape Ecology* **13**: III–V

Glista D, DeVault T, DeWoody J (2009) A review of mitigation measures for reducing wildlife mortality on roadways. *Landscape and Urban Planning* **91**: 1–7

González-Gallina A, Benitez G (2013) Road Ecology Studies for Mexico: a Review. *Oecologia Australis* **17**: 175–190

Grilo C, Bissonette J, Santos-Reis M (2009) Spatial-Temporal Patterns in Mediterranean Carnivore Road Casualties: Consequences for Mitigation. *Biological Conservation* **142**: 301–313

Gurrutxaga M, Saura S (2014) Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environmental Conservation* **41**: 157–164

Huijser MP, Fairbank ER, Camel-Means W, Graham J, Watson V, Basting P, Becker D (2016) Effectiveness of short sections of wildlife fencing and crossing structures along highways in reducing wildlife–vehicle collisions and providing safe crossing opportunities for large mammals. *Biological Conservation* **197**: 61–68

Jackson S (2000) *Wildlife Movement and Populations*.

Jaeger JAG, Bowman J, Brennan J, Fahrig L, Bert D, Bouchard J, Charbonneau N, Frank K, Gruber B, von Toschanowitz KT (2005) Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modelling* **185**: 329–348

Kamler J, Jedrzejewska B, Jedrzejewski W (2007) Activity Patterns of Red Deer in Białowieża National Park, Poland. *Journal of Mammalogy* **88**: 508–514

Karlson M, Seiler A, Mörtberg U (2017) The effect of fauna passages and landscape characteristics on barrier mitigation success. *Ecological Engineering* **105**: 211–220

Langbein J (2007) National Deer-Vehicle Collisions Project.

LE LAY M (2019) Mieux connaître les collisions, SNCF Réseau (document interne)

Mata Estacio C, Hervás Bengoechea I, Herranz Barrera J, Suárez Cardona F, Malo Arrazola JE (2001) Effectiveness of wildlife crossing structures and adapted culverts in a highway in Northwest Spain.

Olbrich P (1984) Untersuchung der Wirksamkeit von Wildwarnreflektoren und der Eignung von Wilddurchlässen.

Olsson M, Widén P, Larkin J (2008) Effectiveness of a highway overpass to promote landscape connectivity and movement of moose and roe deer in Sweden DOI : 10.1016/j.landurbplan.2007.10.006.

Pépin D, Morellet N, Goulard M (2009) Seasonal and daily walking activity patterns of free-ranging adult red deer (*Cervus elaphus*) at the individual level. *European Journal of Wildlife Research* **55**: 479–486

Pichard, Anasthasia Sanchez-De, Anne-Claire De Rouck, Mathieu Gilleron (2018) Critères éco-éthologiques à prendre en compte pour la restauration des continuités écologiques au droit des ouvrages de franchissement d'infrastructures de transport.

Pradines L (2019) Evaluer et améliorer la perméabilité écologique des ouvrages d'art non dédiés à la faune sauvage.

Railway Statistics Group (2024) Railway Statistics Synopsis.

Rigoudy N, Dussert G, Benyoub A, Besnard A, Birck C, Boyer J, Bollet Y, Bunz Y, Caussimont G, Chetouane E, et al (2023) The DeepFaune initiative : a collaborative effort towards the automatic identification of French fauna in camera-trap images. DOI : 2022.03.15.484324

Rodriguez A, Crema G, Delibes M (1996) Use of Non-Wildlife Passages Across a High Speed Railway by Terrestrial Vertebrates. *The Journal of Applied Ecology* **33**: 1527

Rytwinski T, Soanes K, Jaeger JAG, Fahrig L, Findlay CS, Houlihan J, Ree R van der, Grift EA van der (2016) How Effective Is Road Mitigation at Reducing Road-Kill : A Meta-Analysis. *PLOS ONE* **11**: e0166941

Seiler A, Bhardwaj M (2020) Wildlife and Traffic : An Inevitable but Not Unsolvable Problem? pp 171–190

Seiler A, Olsson M (2009) Are non-wildlife passages effective passages for wildlife? DOI: 10.13140/RG.2.1.1155.6009

Sijtsma FJ, van der Veen E, van Hinsberg A, Pouwels R, Bekker R, van Dijk RE, Grutters M, Klaassen R, Krijn M, Mouissie M, et al (2020) Ecological impact and cost-effectiveness of wildlife crossings in a highly fragmented landscape: a multi-method approach. *Landscape Ecol* **35**: 1701–1720

Singer FJ, Doherty JL (1985) Managing Mountain Goats at a Highway Crossing. *Wildlife Society Bulletin* (1973-2006) **13**: 469–477

SNCF Réseau (2015) Programme « TRANS-FER » : Analyse et rétablissement de la transparence écologique des infrastructures ferroviaires (document interne)

SNCF Réseau (2022) Impacts grand gibier (document interne)

Stankowich T (2008) Ungulate flight responses to human disturbance: A review and meta-analysis. *Biological Conservation* **141**: 2159–2173

Steiner W, Leisch F, Hackländer K (2014) A review on the temporal pattern of deer–vehicle accidents : Impact of seasonal, diurnal and lunar effects in cervids. *Accident Analysis & Prevention* **66**: 168–181

Tarabon S, Godet C, Coskun T, Clauzel C (2022) Coupling spatial modeling with expert opinion approaches to restore multispecies connectivity of major transportation infrastructure. *Landscape and Urban Planning* **221**: 104371

Wierzchowski J, Kučas A, Balčiauskas L (2019) Application of Least-Cost Movement Modeling in Planning Wildlife Mitigation Measures along Transport Corridors: Case Study of Forests and Moose in Lithuania. *Forests* **10**: 831

Annexes

Annexe I : Fiche ouvrage utilisée pour les relevés des caractéristiques techniques des ouvrages

Fiche ouvrage

Remplie par :

 Date :	 ID ouvrage :	 Côté 1 :
Heure:	Type :	Intérieur :
Temps passé :		Côté 2 :

Dimensions :

Ouvrage : Hauteur :
 Largeur :
 Longueur :

Murets :
(Si existants)

Coté 1

Largeur :
Longueur 1 :
Longueur 2 :

Coté 2

Largeur :
Longueur 1 :
Longueur 2 :

Guides :

Présence de guide : Oui Non
(rayon de 50m)

Vectorisation SIG : Oui Non

Critères sensoriels :

Covisibilité :

En se plaçant à 5m de distance d'une extrémité de l'ouvrage, à 1m de hauteur, il est possible de voir l'autre extrémité du passage : Oui Non



Présence d'éclairage artificiel : Oui Non Type :

Substrat au sol :

Elément principal : enrobé / béton / pavés / PVC / cailloux ($\varnothing > 1\text{cm}$) / cailloux ($\varnothing < 1\text{cm}$) / terre
($>50\%$ de recouvrement)

Autre aménagement : Trottoirs bilatéraux / Trottoir unilatéral / Autre :

Si présence d'eau, Hauteur :

Présence de nombreuses caches (pierres, rondins de bois, végétaux...à moins de 5m les uns des autres) permettant aux petits animaux de se cacher lors de la traversée Oui Non

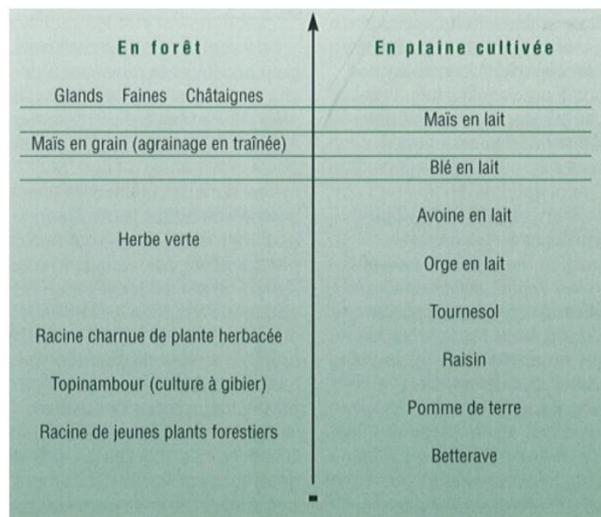
Remarques :

Synthèse du régime alimentaire et espèces appétantes des grands ongulés présents en Bretagne

-Le sanglier (*Sus scrofa*) :

Le sanglier est une espèce omnivore opportuniste dont au moins 95% du régime alimentaire est composé de matière végétale et dont la part animale, d'au plus 5% et composée de petits invertébrés, particulièrement de lombriciens, est systématiquement consommée pour subvenir aux besoins protéiques de l'animal (Baubet *et al.*, 2008).

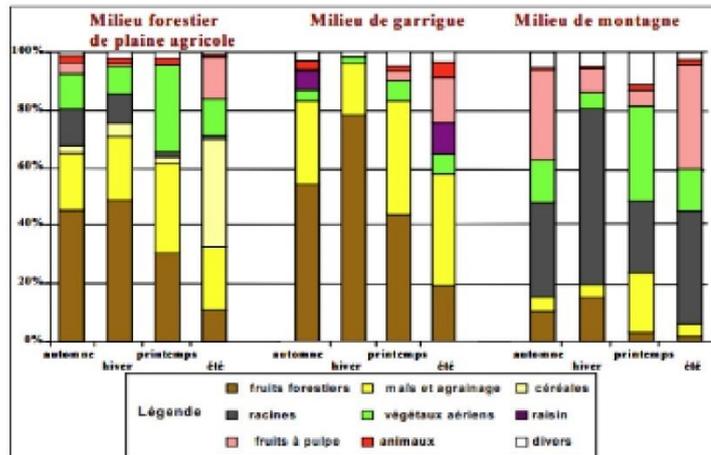
La composition du bol alimentaire est monophasique chez cette espèce puisqu'un seul aliment représente au moins 60% de chaque repas, mais qui peut dépasser les 85% (Baubet *et al.*, 2008). Lorsqu'ils sont disponibles en quantité suffisante dans le milieu, ce sont les fruits forestiers comme les glands, les faines ou les châtaignes qui représentent cette part de l'alimentation puisque ce sont les aliments les plus appétents pour le sanglier (Baubet *et al.*, 2008 ; Brandt *et al.*, 2006 ; Vassant, 1997).



Echelle des préférences alimentaires du sanglier (Vassant, 1997)

En cas d'insuffisance de ces fruits forestiers, d'autres fruits, notamment à pulpe, peuvent être consommés en grande quantité, mais un fort attrait pour les céréales comme le maïs, le blé ou l'avoine est notable, surtout dans les milieux de plaines agricoles où elles sont disponibles (Baubet *et al.*, 2008, Vassant, 1997).

La disponibilité de ces aliments varie fortement en fonction de la saison ce qui impacte le régime alimentaire de cette espèce au cours de l'année (Baubet *et al.*, 2008).



Descriptif des régimes alimentaires saisonniers moyens de sangliers pour 3 types d'habitat (Baubet et al., 2008)

Lors du printemps, les végétaux herbacés verts sont consommés de manière plus prépondérante étant donné que les fruits et les céréales sont moins disponibles (Baubet et al., 2008). En cas d'absence de tous ces aliments de prédilection pour le sanglier, celui-ci se reporte sur les ressources alimentaires disponibles en permanence, soit les tiges ou les organes végétaux souterrains comme les racines et les bulbes (Baubet et al., 2008).

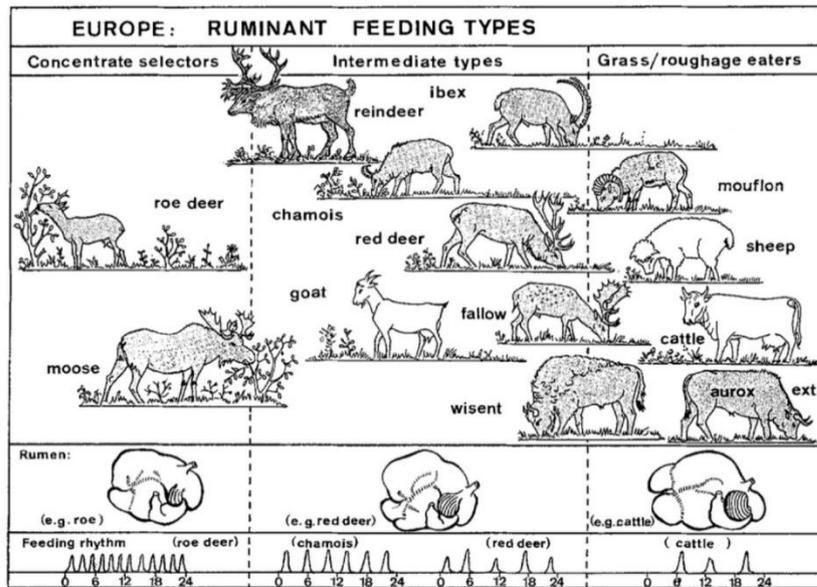
Au niveau des distances à parcourir pour satisfaire leur régime alimentaire, les sangliers se déplacent relativement peu par rapport aux autres ongulés et parcourent souvent moins de cinq kilomètres à vol d'oiseau entre leur bauge initiale du jour et le point le plus éloigné du parcours alimentaire (Baubet et al., 2008). Ce parcours a par ailleurs tendance à être en forme de boucle, en partant de la bauge, en rejoignant une source d'alimentation abondante où la prospection dure entre une et plusieurs heures avant de rejoindre une bauge proche de celle de départ voire la même (Baubet et al., 2008 ; Janeau et al., 1995).

Le sanglier est de manière globale une espèce sédentaire, jusqu'à 90% des animaux marqués sont recapturés à moins de 10 km du lieu de marquage (Baubet et al., 2008). Les mâles ont tendance à aller plus loin que les femelles et ont un domaine de bauge deux à trois fois supérieur à celui des femelles, qui s'étend de 400 à 2000 ha (Baubet et al., 2008). En moyenne, le domaine vital des mâles est de 2000 ha et de 1000 ha pour les femelles (Efese, 2022)

Cela est tout de même variable en fonction des conditions de vie, notamment en fonction du milieu et du caractère chassé ou non de la population dont fait partie l'individu (Baubet et al., 2008).

-Le chevreuil (*Capreolus capreolus*) :

Le chevreuil est un herbivore ruminant qui est classé parmi les brouteurs ou "browsers" dont le régime alimentaire est composé à plus de 90% par des dicotylédones, que ce soit leurs feuilles, tiges, fleurs, fruits ou bourgeons. Les espèces consommées sont de haute qualité énergétique et cette espèce est capable de digérer les composés toxiques et de défense des plantes comme les tanins, grâce à des composés produits par leurs glandes salivaires (Efese, 2022 ; Austin et al. 1989, McArthur et al. 1995).



Classification des grands herbivores européens selon leur régime alimentaire et la morpho-physiologie de leur rumen (Efese, 2022 ; Hofmann, 1989)

Cependant, en fonction des milieux où vit cette espèce, les graminées (monocotylédones) peuvent contribuer fortement au bol alimentaire des chevreuils, notamment en milieu ouvert où elles sont plus abondantes et plus nutritives qu'en milieu forestier (Abbas *et al.*, 2013). Les choix du chevreuil se portent tout de même en priorité sur les espèces ligneuses lorsque celles-ci sont disponibles (Goffin et De Crombrughe, 1976)

Les plantes qui composent le régime alimentaire du chevreuil peuvent être classées en 10 groupes: les **graminoïdes** (graminées, carex, joncs), les **herbacées** (herbe à robert et fraisiers sauvages (Goffin et De Crombrughe, 1976), les **fougères**, les **champignons**, les **semi-ligneux** (ronces (*Rubus sp.*), rosiers (*Rosa sp.*), lierre (*Hedera helix*), chèvrefeuille des bois (*Lonicera periclymenum*), ajonc d'europe (*Ulex europaeus*) et les groseilliers (*Ribes sp.*)), les **sous-arbrisseaux** (myrtille (*Vaccinium myrtillus*) et bruyères: *Calluna sp.* et *Erica sp.*), les **broutis de conifères** (aiguilles, branches et germes du sapin et pin sylvestre (Saïd *et al.*, 2012) ainsi que l'épicéa (Goffin et De Crombrughe, 1976)), les **broutis de feuillus** (branches, germes, fruits, feuilles de chêne pédonculé et sessile et de charme (Saïd *et al.*, 2012), de noisetier, frêne, hêtre, peuplier tremble, saule, bouleau, sorbier des oiseleurs, érables, *Tilia sp.*, *Sambucus sp.* (sureau), *Cornus sanguinea* (cornouiller sanguin) et *Alnus glutinosa* (aulne glutineux) (Goffin et De Crombrughe, 1976)), les **plantes cultivées** (seigle, orge, blé, pommes de terre, betteraves, maïs, luzerne, colza et trèfle) et **autres** (mousses et ce qui rentre pas dans le reste comme le houx (*Ilex aquifolium*))(Cornelis *et al.*, 1999).

ESPÈCES HERBACÉES

Geranium robertianum L.
Fragaria vesca L.

ESPÈCES LIGNEUSES

Vaccinium myrtillus L.
Calluna vulgaris (L.) Hull
Rubus sp.
Corylus avellana L.
Fraxinus excelsior L.
Quercus sp.
Fagus sylvatica L.
Populus tremula L.

Salix sp.
Carpinus betulus L.
Betula sp.
Sorbus aucuparia L.
Acer sp.
Picea abies (L.) Karst.
Pinus sp.
Abies alba Mill.

Liste des espèces vitales pour le chevreuil selon Goffin et De Crombrughe, 1976

Les variations observées dans le régime alimentaire de cette espèce sont principalement expliquées par le milieu dans lequel elle vit et par la saisonnalité (Cornelis *et al.*, 1999 ; Tixier et Duncan, 1996). Le chevreuil semble être granivore ou frugivore lorsque des graines et fruits sont suffisamment abondants, mais il devient brouteur si ces préférences alimentaires sont rares (Tixier et Duncan, 1996)

Habitat	Graminoids	Herbs	Ferns	Fungi	Half-woody plants	Dwarf shrubs	Coniferous browse	Deciduous browse	Cultivated plants	Others
Agricultural area	4.59	7.41	0.00	0.17	0.84	0.00	1.86	16.25	68.51	0.37
Coniferous forest	15.59	11.29	4.66	0.42	1.50	44.07	20.57	0.00	0.00	1.90
Deciduous forest	2.26	12.79	1.00	0.91	37.72	3.06	5.04	30.26	0.05	6.91
Mixed forest	3.91	8.38	0.59	2.36	27.46	18.05	5.17	17.62	1.48	14.98

Moyennes pondérées des choix alimentaires du chevreuil par habitat (en %) (Cornelis *et al.*, 1999)

Season	Graminoids	Herbs	Ferns	Fungi	Half-woody plants	Dwarf shrubs	Coniferous browse	Deciduous browse	Cultivated plants	Others
Spring	10.12	14.50	0.57	0.51	19.56	12.59	3.95	16.48	11.66	10.06
Summer	2.97	16.80	1.60	1.04	20.26	10.51	1.27	24.23	10.24	11.07
Autumn	3.74	7.86	1.29	3.94	22.58	17.93	3.40	20.39	8.62	10.24
Winter	5.22	4.80	0.96	0.54	19.57	17.01	11.60	12.64	20.94	6.71
Yearly weighted average	5.32	9.34	1.08	1.41	20.38	15.29	6.54	17.17	14.58	8.88

Moyennes pondérées des choix alimentaires du chevreuil par saison (en %) (Cornelis *et al.*, 1999)

The average proportions of the dietary components in roe deer stomach contents from the main habitats, by season. The sources are those listed in Table II.

Habitat	Number of studies	Season	Seeds and fruits	Cultivated forbs	Wild forbs	Graminoids	Conifers	Heather	Bilberry	Trees and shrubs	Brambles	Ivy	Fungi	Dead leaves	Other and unidentified
Farmland	4	winter	41.66	11.78	14.25	16.00	2.08	0.00	0.00	8.62	2.08	3.77	0.18	0.00	0.06
	1	spring	12.80	2.10	29.20	27.80	2.00	0.00	0.00	23.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.80
	3	summer	60.35	11.60	18.69	2.58	0.00	0.00	0.00	4.75	0.54	0.00	0.00	0.00	1.66
	2	autumn	27.09	22.12	5.53	7.95	0.45	0.00	0.00	27.80	6.02	1.06	2.13	0.00	0.01
Conifer woodlands	5	winter	2.09	0.00	10.14	8.58	28.10	16.47	9.71	13.87	6.18	0.06	0.95	0.60	1.86
	4	spring	0.00	0.00	29.68	13.40	4.20	8.93	7.88	23.61	1.35	0.00	3.55	0.00	3.63
	4	summer	1.41	0.00	42.31	7.69	6.73	10.20	7.64	11.71	5.51	0.08	2.76	0.00	1.59
	4	autumn	0.00	0.00	17.04	5.12	3.80	18.34	11.94	21.25	5.63	0.00	5.16	0.00	7.47
Woodland and farmland	4	winter	34.74	0.03	6.72	6.32	10.93	2.45	0.01	18.46	5.17	7.26	0.76	0.08	6.90
	4	spring	5.62	0.00	20.63	9.89	11.46	1.64	0.33	29.81	9.76	3.93	0.96	0.00	6.82
	3	summer	7.50	0.05	33.56	1.42	0.01	2.03	0.00	26.72	11.65	5.53	1.16	0.00	10.35
	3	autumn	30.84	0.40	4.64	1.94	0.82	5.70	0.00	29.02	8.37	2.88	7.46	0.05	8.63
Deciduous woodlands	9	winter	3.21	0.00	1.31	1.72	10.37	1.25	0.06	13.94	39.07	19.13	1.19	2.53	4.96
	1	spring	0.00	0.00	18.40	8.40	1.60	2.80	4.80	28.60	28.40	6.20	0.60	0.01	5.21
	7	summer	2.73	0.00	10.49	1.83	0.66	0.31	3.81	31.41	29.99	10.13	1.66	0.27	6.40
	8	autumn	16.75	0.00	1.73	0.48	2.07	4.39	0.80	32.48	15.54	14.20	2.27	1.38	7.63

Proportions moyennes des composants alimentaires du régime du chevreuil en fonction des habitats et de la saison (Tixier et Duncan, 1996)

Les saisons regroupent les mois de avril, mai et juin pour le printemps ; juillet, août et septembre pour l'été ; octobre, novembre et décembre pour l'automne et janvier, février et mars pour l'hiver (Cornelis *et al.*, 1999).

La taille du domaine vital du chevreuil dépend de la masse corporelle de chaque individu puisque les besoins énergétiques en dépendent chez les cervidés (Ofstad *et al.*, 2016 ; Efese, 2022), mais aussi des ressources, de leur homogénéité, du paysage et des différents risques présents dans ce paysage (Seigle-Ferrand *et al.*, 2021). Par rapport à ces ressources, d’après l’hypothèse de la productivité de l’habitat de Harestad et Bunnell de 1979, plus les ressources sont diversifiées et de bonne qualité dans un habitat, plus les individus auraient des domaines vitaux restreints puisqu’ils auraient moins de difficulté à combler leurs besoins énergétiques. Dans des milieux pauvres, le domaine vital du chevreuil peut donc atteindre jusqu’à 100 hectares mais peut se restreindre à 25 hectares en milieu riche (Savouré-Soubelet *et al.* 2021 ; Efese, 2022 ; CNPF, 2014)

-Le cerf (*Cervus elaphus*) :

Le cerf est un herbivore ruminant qui est classé parmi les espèces intermédiaires ou “intermediate feeders” (Hoffman, 1989 ; Gebert et Verheyden-Tixier, 2001) dont le régime alimentaire est composé majoritairement d’herbacées (*Oxalis acetosella* (pain de coucou), *Juncus effusus* (jonc épars), *Rumex* sp. (oseille), *Potentilla* sp.(potentille)(Goffin et De Crombrughe, 1976)) et particulièrement de graminées et de dicotylédones (Efese, 2022). Il préfère les aliments produisant une quantité de masse contrairement au chevreuil qui sélectionne les espèces les plus énergétiquement concentrées (Goffin et De Crombrughe, 1976 ; Jensen, 1968). La plupart de l’année, les préférences de cette espèce se portent avant tout sur les graminées, les carex, les sous-arbrisseaux (myrtille et callune), les ronces et les broutis de feuillus (bouleau verruqueux et pubescent, hêtre, genévrier commun, saules, sorbier des oiseleurs et genêt à balais, *Acer* sp., charme, frêne commun, *Quercus* sp., aulne glutineux, peuplier tremble, *Crataegus* sp., *Sambucus* sp.) mais en hiver, ce sont les broutis de résineux (*Pinus* sp., *Picea abies*) qui dominent le régime alimentaire du cerf (Saïd *et. al*, 2012 ; Goffin et De Crombrughe, 1976).

ESPÈCES HERBACÉES

Deschampsia flexuosa (L.) Trin.
Deschampsia cespitosa (L.) Beauv.
Luzula sp.
Dactylis glomerata L.
Poa sp.
Agrostis sp.
Festuca sp.
Carex sp.

ESPÈCES LIGNEUSES

Vaccinium myrtillus L.
Calluna vulgaris (L.) Hull
Rubus sp.
Picea abies (L.) Karst.
Pinus sp.
Betula sp.
Fagus sylvatica L.
Juniperus communis L.
Abies alba Mill.
Salix sp.
Sorbus aucuparia L.
Sarothamnus scoparius (L.) Wimmer
ex Koch

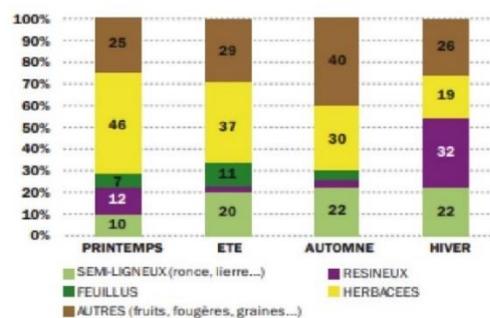
Liste des espèces vitales pour le cerf selon Goffin et De Crombrughe, 1976

Coniferous trees: <i>Abies alba</i> <i>Picea abies</i> <i>Picea excelsior</i> Needles of <i>Pinus silvestris</i> <i>Pinus mugo</i> <i>Pinus nigra</i> <i>Pinus silvestris</i> <i>Pinus</i> sp. Shoots of <i>Pinus silvestris</i> Unidentified conifers	Leaves of deciduous trees: <i>Acer</i> sp. <i>Aesculus hippocastanum</i> <i>Alnus glutinosa</i> <i>Arbutus unedo</i> <i>Berberis vulgaris</i> <i>Betula</i> sp. <i>Betula verrucosa</i> <i>Carpinus betulus</i> <i>Cistus ladaniferus</i> <i>Cistus salvifolius</i> <i>Cornus</i> sp. <i>Corylus avellana</i> <i>Cystisus scoparius</i> <i>Dorycnium subfruticosum</i> <i>Evonymus europaea</i> <i>Fagus sylvatica</i> <i>Frangula alnus</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Halinium ocyroides</i> <i>Halinium umbellatum</i> <i>Malus silvestris</i> <i>Padus serotina</i> <i>Phillyrea angustifolia</i> <i>Populus</i> sp. <i>Populus tremula</i> <i>Prunus serotina</i> <i>Quercus faginea</i> <i>Quercus pyrenaica</i> <i>Quercus robur</i> <i>Quercus rotundifolia</i> <i>Salix cinerea</i> <i>Salix</i> sp. <i>Ulex</i> sp. Unidentified shrubs Unidentified deciduous trees	Leaves of dwarf-shrubs: <i>Erica umbellata</i> <i>Erica arborea</i> <i>Juniperus communis</i> <i>Lavandula stoechas</i> <i>Sarothamnus</i> sp. <i>Thymus</i> sp. Labiatae sp. <i>Viscum album</i> Undeterminable dwarf-shrubs Grass & sedges: <i>Avena barbata</i> <i>Avena sativa</i> <i>Calamagrostis arundinaceae</i> <i>Mnium</i> sp. <i>Carex</i> sp. <i>Cynodon dactylon</i> <i>Dactylis glomerata</i> <i>Deschampsia flexuosa</i> <i>Elymus caput-medusae</i> Unidentified mosses <i>Festuca</i> sp. <i>Holcus lanatus</i> <i>Juncus</i> sp. <i>Lolium perenne</i> <i>Luzula</i> sp. <i>Milium effusum</i> Unidentified grass & sedges Seeds + fruits: Cultivated seeds (maize) Fruits of trees (acorn, wild apple, wild pear, beech-nut) Unidentified seeds & fruits	Forbs: <i>Aegopodium podagraria</i> <i>Ajuga reptans</i> <i>Asarum europaeum</i> <i>Asphodelus microcarpus</i> <i>Asparagus</i> sp. <i>Bartsia trixago</i> <i>Caltha palustris</i> <i>Cirsium oleraceum</i> <i>Cuscuta</i> sp. <i>Galeobdolon luteum</i> <i>Hedysarum</i> sp. <i>Helichrysum stoechas</i> <i>Hepatica nobilis</i> <i>Lupinus polyphyllus</i> <i>Medicago minima</i> <i>Mycelis muralis</i> <i>Ornithopus compressus</i> <i>Ornithopus sativus</i> <i>Oxalis acetosella</i> <i>Polygonum dumentorum</i> <i>Poterium magnolii</i> <i>Ranunculus</i> sp. <i>Rumex bucefalophorus</i> <i>Rumex pulcher</i> <i>Scabiosa</i> sp. <i>Stellaria holostea</i> <i>Trifolium angustifolium</i> <i>Trifolium repens</i> <i>Trifolium stellatum</i> <i>Trifolium striatum</i> Compositae sp. Liliaceae sp. Umbelliferae sp. <i>Urtica dioica</i> <i>Zazintha</i> sp. Unidentified forbs	Cultivated forbs: <i>Brassica napus</i> Pulp of Red Beet <i>Solanum tuberosum</i> Unidentified cultivated forbs Mosses, Lichens & Fungi: <i>Aorchynchium zetterstedti</i> Bryophyta <i>Cladonia</i> sp. <i>Dicranum undulatum</i> <i>Entodon schreberi</i> Filicales <i>Mnium</i> sp. <i>Polytrichum commune</i> <i>Polytrichum</i> sp. Unidentified fungi Unidentified lichens Unidentified mosses Others: Dead leaves (Oak, Hornbeam, Beech) Roots of grass Roots of trees Unidentified
---	--	--	---	--

Liste des espèces végétales composant le régime alimentaire du cerf élaphe européen (Gebert et Verheyden-Tixier, 2001)

Concernant les variations dans le régime alimentaire du cerf, tout comme pour le chevreuil, l'habitat et la saison sont les causes majeures de différences de consommation surtout de sous-arbrisseaux, de broutis de conifères et de feuillus, de ronce, d'herbacées de graines et de fruits (Goffin et De Crombrughe, 1976)

Source D. Delorme ONCFS



Evolution saisonnière de l'alimentation du cerf (CNPF, 2014)

Les variations du domaine vital du cerf sont semblables à celles du chevreuil mais en moyenne le cerf possède un grand domaine vital qui s'étend de plusieurs centaines à des milliers d'hectares (de 500 à 2000 hectares en moyenne) (Efese, 2022 ; CNPF, 2014).

Bibliographie :

- Abbas F, Picot D, Merlet J, Cargnelutti B, Lourtet B, Angibault J-M, Daufresne T, Aulagnier S, Verheyden H** (2013) A typical browser, the roe deer, may consume substantial quantities of grasses in open landscapes. *Eur J Wildl Res* **59**: 69–75
- Austin PJ, Suchar LA, Robbins CT, Hagerman AE** (1989) Tannin-binding proteins in saliva of deer and their absence in saliva of sheep and cattle. *J Chem Ecol* **15**: 1335–1347
- Barthelmess EL, Brooks MS** (2010) The influence of body-size and diet on road-kill trends in mammals. *Biodivers Conserv* **19**: 1611–1629
- Baubet E, Vassant J, Brandt S, Maillard D** (2008) Connaissances sur la biologie du sanglier : Utilisation de l'espace et régime alimentaire. Colloque Sanglier de Rennes
- Brandt S, Baubet E, Vassant J, Servanty S** (2006) Régime alimentaire du Sanglier en milieu forestier de plaine agricole.
- CNPF** (2014) Forêt et cervidés : l'un ne va pas sans l'autre.
- Cornelis J, Casaer J, Hermy M** (1999) Impact of season, habitat and research techniques on diet composition of roe deer (*Capreolus capreolus*): A review. *Journal of Zoology*. doi: [10.1111/j.1469-7998.1999.tb01196.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1999.tb01196.x)
- Efese** (2022) Les ongulés sauvages de France métropolitaine: Fonctions écologiques, services écosystémiques et contraintes.
- Gebert C, Verheyden-Tixier H** (2001) Variations of diet composition of Red Deer (*Cervus elaphus* L.) in Europe. *Mammal Review* **31**: 189–201
- Goffin RA, Crombrughe S a. D** (1976) Régime alimentaire du cerf (*Cervus elaphus* L.) et du chevreuil (*Capreolus capreolus* L.) et critères de capacité stationnelle de leurs habitats. **40**: 355–376
- Hofmann RR** (1989) Evolutionary steps of ecophysiological adaptation and diversification of ruminants: a comparative view of their digestive system. *Oecologia* **78**: 443–457
- Jensen PV** (1968) Food selection of the Danish Red Deer (*Cervus elaphus* L.) as determined by examination of the rumen content. *Danish Review of Game Biology* **5**:
- McArthur C, Sanson GD, Beal AM** (1995) Salivary proline-rich proteins in mammals: Roles in oral homeostasis and counteracting dietary tannin. *J Chem Ecol* **21**: 663–691
- Saïd S, Richard E, Storms D, Hamann J-L** (2012) une clé pour gérer la relation.
- Tixier H, Duncan P** (1996) Are European roe deer browsers? A review of variations in the composition of their diets. *Revue d'Ecologie (La Terre et la Vie)* **51**: 3–17
- Vassant J** (1997) Agrainage et gestion des populations de sangliers.

Annexe III : Fiche de relevé afin de caractériser la végétation aux alentours des ouvrages

Fiche caractérisation végétation

Remplie par :

		
Date :	ID ouvrage :	maîtrise végétation :
Heure :	image côté 1 :	<input type="checkbox"/> remise à niveau <input type="checkbox"/> déboisement
Temps passé :	image côté 2 :	<input type="checkbox"/> broyage autre :

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Côté 1	Côté 2	Intérieur	Remarque
Arbrisseaux					
<i>Cytisus sp. (scoparius)</i>	Genêt à balais				
Conifères					
<i>Picea sp. (abies)</i>	Epicéas (commun)				
<i>Pinus sp.</i>	Pins				
<i>Abies sp. (alba)</i>	Sapins (blanc)				
<i>Juniperus sp. (communis)</i>	Genevriers (commun)				
Feuillus					
<i>Quercus sp.</i>	Chênes				
<i>Castanea sp.</i>	Chataigniers				
<i>Fraxinus sp. (excelsior)</i>	Frênes (élevé)				
<i>Corylus sp. (avellana)</i>	Noisetiers (commun)				
<i>Fagus sp. (sylvatica)</i>	Hêtres (commun)				
<i>Populus sp. (tremula)</i>	Peuplier (tremble)				
<i>Salix sp.</i>	Saules				
<i>Carpinus sp. (betulus)</i>	Charmes (commun)				
<i>Betula sp.</i>	Bouleaux				
<i>Sorbus sp. (aucuparia)</i>	Sorbiers (des oiseleurs)				
<i>Acer sp.</i>	Erables				
Graminoïdes					
<i>Festuca sp.</i>	Fétuques				
<i>Agrostis sp.</i>	Agrostis				
<i>Poa sp.</i>	Pâturins				
<i>Dactylis sp. (glomerata)</i>	Dactyles				
<i>Luzula sp.</i>	Luzules				
<i>Deschampsia sp.</i>	Deschampsia				
<i>Poaceae (famille qui comprend 780 genres)</i>	Graminées				
<i>Carex sp.</i>	Laïches				
<i>Juncus sp.</i>	Joncs				

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Côté 1	Côté 2	Intérieur	Remarque
Phorbes (toutes les herbacées non graminoides)					
<i>Geranium sp. (robertianum)</i>	Herbe à robert				
<i>Fragaria vesca</i>	Fraisier des bois				
Semi-ligneux					
<i>Rubus sp.</i>	Ronces				
<i>Rosa sp.</i>	Rosiers				
<i>Hedera Helix</i>	Lierre grimpant				
<i>Lonicera periclymenum</i>	Chèvrefeuille des bois				
<i>Ulex europeaus</i>	Ajonc d'europe				
<i>Ribes sp.</i>	Groseilliers				
Sous-arbrisseaux					
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Myrtille				
<i>Calluna sp. (vulgaris)</i>	Callunes				
<i>Erica sp.</i>	Bruyères				
Autres					
<i>Ilex aquifolium</i>	Houx				
Plantes cultivées					
Espèces exotiques envahissantes					
<i>Reynoutria japonica</i>	Renouée du japon				
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Robinier faux-acacia				
<i>Ailanthus altissima</i>	Ailante				
<i>Acacia dealbata</i>	Mimosa argenté				

Remarques :

Typologie des barrières rencontrées

Haies



H1: Haie pénétrable

- Haie relativement dense de hauteur variable qui serait une barrière en cas de motivation faible de la part des animaux mais tout de même traversable dans des conditions de pénurie alimentaire, de dispersion ou de fuite.



H2: Haie impénétrable

- Haie très dense de hauteur variable qui ne serait pas traversable même dans des conditions de motivation élevée de la part des ongulés. Parfois doublée d'un grillage qui bouche les éventuelles trouées dans une haie pénétrable.

Barrières de sécurité



S1: Garde corps routier

- Barrière de sécurité souvent présente aux extrémités des ponts-route, de hauteur inférieure à 1m et présentant un espace entre le sol et la barrière qui peut être utilisé par les espèces d'ongulés pour franchir l'obstacle.



S2: Garde corps ouvrage

- Barrière de sécurité systématiquement présentes au dessus des ponts-rail pour la sécurité des agents ferroviaires, de hauteur supérieure à 1m mais pénétrable entre les barreaux. La probabilité de traversée par un animal est cependant très faible au vu du vide présent d'un côté de la barrière.



S3: Barrière escaliers

- Barrière de sécurité souvent présente lorsque des escaliers sont à disposition des agents ferroviaires pour atteindre les rails. Ce même type de barrière peut aussi délimiter des zones. De hauteur de 1,10m et présentant des espaces entre ses barreaux, ce type de barrière semble facilement traversable.



S4: Grillage pont route

- Grillage de sécurité systématiquement présent sur la partie centrale des ponts-route. la probabilité qu'un animal traverse est nulle au vu du vide présent de l'autre côté, de sa hauteur de 1m70 et de ses mailles très fines.



S5: Grillage SNCF Type 2

- Grillage de sécurité qui est une clôture soudée à panneaux rigides, souvent mis en place afin d'interdire un accès aux hommes ou aux animaux. Il a une hauteur se situant entre 2m et 2m50 et possède des mailles de 20cm x 6cm au maximum et est donc très efficace pour limiter le passage des ongulés.

Barrières de délimitation

DC1-x: Clôture à x fils non conducteurs

- Clôture d'élevage qui peut également représenter une barrière pour la faune sauvage si celle-ci a peu de motivation pour la traverser. Facilement traversable cependant au vu de sa hauteur dépassant rarement 1m, son matériau peu robuste et l'espace présent entre le fil et le sol.

DC2-x: Clôture à x fils barbelés

- Clôture d'élevage qui peut également représenter une barrière pour la faune sauvage si celle-ci a peu de motivation pour la traverser. Assez facilement traversable cependant, au vu de sa hauteur inférieure à 1m50, son matériau moyennement robuste, l'espace présent entre le ou les fils et le sol ainsi que le manque d'efficacité des pics face à la peau épaisse des ongulés. La littérature avertit tout de même sur la possibilité que les cervidés se retrouvent coincés dans les fils barbelés, ce qui peut engendrer une mort directe ou indirecte (Harrington et Conover, 2006)

DC3-x: Clôture à x fils électriques

- Clôture d'élevage qui peut également représenter une barrière pour la faune sauvage si celle-ci a peu de motivation pour la traverser. Elle reste traversable cependant, au vu de sa hauteur inférieure à 1m10 et de l'espace présent entre le ou les fils et le sol. Elles seraient moins efficaces sur les chevreuils que les cerfs puisqu'ils ont une peau assez épaisse pour ne percevoir aucun effet d'une décharge non létale pour un être humain (Cederlund et al., 1998). De plus, les cervidés sont des animaux capables d'apprentissage en observant leurs pairs et peuvent ainsi apprendre à traverser ou au contraire à respecter des clôtures électriques.

DG1: Grillage simple torsion

- Grillage souvent présent aux alentours d'habitations afin de délimiter leur propriété. Lorsque bien entretenu, il peut être efficace pour constituer un obstacles aux ongulés, dans la limite de sa hauteur qui dépasse rarement 1,5m et du fait qu'il soit rarement enfoui.

DG2: Grillage en rouleaux soudés

- Grillage souvent présent aux alentours d'habitations afin de délimiter leur propriété. Lorsque bien entretenu, il peut être efficace pour constituer un obstacles aux ongulés, dans la limite de sa hauteur qui dépasse rarement 1,5m et du fait qu'il soit rarement enfoui.





DM1: Muret en pierre

- Muret pouvant être présent aux alentours d'habitations, près d'ouvrages d'art ou constituant des ruines. La hauteur étant variable, il peut être plus ou moins facilement franchi par le saut ou grâce à la végétation se développant sur ce type de muret.



DM2: Muret en béton

- Muret pouvant être présent aux alentours d'habitations, de routes sous forme de trottoirs ou près d'ouvrages d'art et quasiment systématiquement au niveau des gardes corps des ponts-rail afin de les ancrer dans le sol et de les rehausser en fonction de la pente. Sa hauteur étant variable, il peut être plus ou moins facilement franchi par le saut.

Barrières naturelles



N1: Rocher

- Élément naturel pouvant constituer une barrière selon sa forme et sa hauteur.

N2: Falaise

- Élément naturel pouvant constituer une barrière selon sa forme et sa hauteur.

Combinaisons



Type 1 + Type 2

- Dans de nombreux cas, deux types de barrières ou plus sont combinés et créent ainsi des barrières plus difficiles à traverser pour les ongulées. Par exemple des haies doublées de grillages ou barbelés, des murets surmontés de grillages, des arbres poussant sur des murets en pierre...

Annexe V : Caractéristiques techniques du piège photographique Browning Spec Ops Elite HP5 (Source : Browning® trail cameras)



24 Megapixels	2" Color Viewing Screen
Video Options: 1920 x 1080p FHD Videos with Sound (5 sec.-2 min. length)	Adjustable Trigger Speed (0.1 - 0.7 Seconds)
0.5 Second Recovery Time Between Images	Infrared LED Illumination at Night

- Imperceptible Infrared LED Illumination at Night
- Adjustable IR Flash (Power Save, Fast Motion, Long Range)
- 30m IR Flash Range
- HDR Night Images (High Dynamic Range)
- 1920 x 1080 FHD Videos with Sound (5 sec. - 2 min. length)
- Adjustable 0.1 - 0.7 Second Trigger Speed
- Adjustable Detection Range up to 25m.
- Illuma-Smart Technology Automatically adjusts IR Flash for Perfect Night Photos
- Smart IR Video
- Selectable Start / Stop Image Timer
- Long Battery Life from 8 AA Batteries (Not Included)
- Battery Meter Compatible with Alkaline, Rechargeable and Lithium Batteries
- Programmable Picture Delay (1 sec. – 60 min.)
- Picture info bar displays: Time, Date, Temperature, Moon Phase, Barometric Pressure, Camera ID
- Multilingual Programming Menu
- 12 volt External Power Jack
- Support up to 512GB SDXC Memory Card (not included)
- ¼" -20 Tripod Socket
- Compact Case Size 5" x 3.5" x 2"
- Metal Tree Mount Bracket

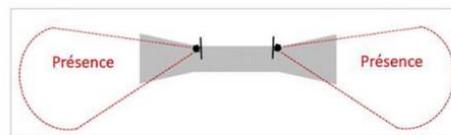
Annexe VI : Classes identifiables par DeepFaune

- European badger (*Meles meles*)
- bear (*Ursus arctos*)
- bird
- chamois (alpine, *Rupicapra rupicapra*, and Pyrenean, *Rupicapra pyrenaica*)
- cat (domestic *Felis catus* and wild)
- cow (*Bos Taurus*)
- dog (*Canis familiaris*)
- equidae
- red fox (*Vulpes vulpes*)
- common genet (*Genetta genetta*)
- goat (*Capra* sp.)
- hedgehog (*Erinaceus europaeus*)
- ibex (*Capra ibex*, alpine only)
- lagomorph
- lynx (*Felix lynx*)
- marmot (*Marmota marmota*)
- micromammal
- mustelidae
- mouflon (*Ovis gmelini*)
- nutria (*Myocastor coypus*)
- red deer (*Cervus elaphus*)
- roe deer (*Capreolus capreolus*)
- sheep (*Ovis aries*)
- squirrel (*Sciurus vulgaris*)
- wild boar (*Sus scrofa*)
- wolf (*Canis lupus lupus*)
- empty
- unidentified

Annexe VII : Illustration des différents comportements des animaux face aux ouvrages d'art



Approche
Individu qui entre dans le champ de détection de la caméra
→ Plusieurs designs selon les ouvrages et les possibilités de pose des caméras



I - Traversée réussie

I.1. L'animal passe la zone d'entrée (définie pour chaque ouvrage) en direction de l'intérieur de l'ouvrage (**entrée**)

ET

I.2.A. L'animal est détecté par la seconde caméra en direction de l'extérieur de l'ouvrage dans les 15 minutes suivantes (**sortie**)

OU

I.2.B. L'animal n'est pas redétecté par cette caméra allant dans la direction inverse dans les 15 minutes suivantes

II - Rétractation

L'animal est détecté deux fois par la même caméra, allant successivement vers l'intérieur de l'ouvrage puis en direction de l'extérieur de l'ouvrage, à moins de 15 minutes d'intervalle

ET

L'animal n'est pas détecté par la deuxième caméra, allant en direction de l'extérieur de l'ouvrage

Détection 1

↓

Détection 2

©Tess Heydorff-Decaux

exemple **entrée**



exemple **sortie**



Annexe VIII : Illustration de chaque cluster de la CAH (*source personnelle*)

Cluster 1



ouvrage POSV 24 (75284)



ouvrage PRA 18 (75227)



ouvrage POSV 9 (75174)

Cluster 2



ouvrage PRA 2 (75092)



ouvrage PRA 20 (75277)



ouvrage PRA 26 (75297)

Cluster 3



ouvrage PRA 19 (75232)



ouvrage PRO 8 (75166)



ouvrage PRO 13 (75213)



ouvrage PRA 38 (75511)

Annexe IX : Tableau des tests statistiques simples réalisés sur chaque variable afin de déterminer leur influence sur les passages des ongulés dans les ouvrages

facteur	type de test réalisé	résultat	p value	p value test de Shapiro-Wilk
type	Test exact de Fisher	non significatif	0.09115	
cluster	Test exact de Fisher	non significatif	0.5192	
H	T test	significatif	0.002918	0.2576
l	Test de Wilcoxon	non significatif	0.9446	5.273e-07
L	Test de Wilcoxon	non significatif	0.4873	0.00147
ouverture	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6069	0.006666
présence_murets	Test exact de Fisher	non significatif	0.5628	
substrat	Test exact de Fisher	non significatif	0.09471	
aménagement	Test exact de Fisher	non significatif	0.2864	
eau*	Test de Wilcoxon	non significatif	0.5553	1.152e-12
continuite_ouvrage_guide	Test exact de Fisher	non significatif	0.3416	
score_barrière	Test de Wilcoxon	non significatif	0.8408	0.03368
delta h*	Test de Wilcoxon	non significatif	0.05433	0.0003398
pente*	Test de Wilcoxon	significatif	0.04639	2.521e-06
freq_hum_moy	Test de Wilcoxon	non significatif	0.5765	5.876e-05
freq_veh_moy	Test de Wilcoxon	non significatif	0.4311	2.736e-09
naturalité_pot	Test de Wilcoxon	non significatif	0.3188	5.96e-08
moyenne_500m*	T test	non significatif	0.8482	0.7846
trame_mam	Test exact de Fisher	non significatif	0.8004	
dist_trame_maj	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6053	1.078e-07
densité_bois_500m	Test de Wilcoxon	non significatif	1	0.03662
type_vege	Test exact de Fisher	non significatif	0.6396	
correlation_vege	T test	non significatif	0.1797	0.4717
densite_bois_5000m	T test	non significatif	0.6051	0.2002
densite_friches_fourres_landes_500m	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6854	1.199e-06
densite_friches_fourres_landes_5000m	T test	non significatif	0.5324	0.08071
densite_cultures_500m	T test	non significatif	0.8973	0.09348
densite_cultures_5000m*	T test	non significatif	0.7145	0.2278
densite_bati_500m	Test de Wilcoxon	non significatif	0.2666	1.147e-07
densite_bati_5000m	Test de Wilcoxon	non significatif	0.8759	0.0001019
densite_prairies_500m	Test de Wilcoxon	non significatif	0.8408	0.0001902
densite_prairies_5000m*	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6715	0.01144
dist_bois	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6214	3.521e-11
dist_route	Test de Wilcoxon	non significatif	0.7199	1.043e-10
dist_urb	Test de Wilcoxon	non significatif	0.6601	0.002076
dist_culture	Test de Wilcoxon	non significatif	0.7811	1.164e-05
dist_prairie	Test de Wilcoxon	non significatif	0.9077	4.011e-06
indice_div_milieus_500m	T test	non significatif	0.2695	0.1289
indice_div_milieus_5000m*	T test	non significatif	0.6877	0.1171
realisations_roe	Test de Wilcoxon	non significatif	0.7985	0.0041
realisations_boar*	Test de Wilcoxon	non significatif	0.3277	4.013e-05

	Diplôme : Ingénieur agronome Spécialité : Génie de l'Environnement (GE) Spécialisation / option : Protection et Aménagement des Milieux et Ecologie Quantitative (PAM-EQ) Enseignant référent : Loïs Morel
Auteur(s) : Estelle Ducat Date de naissance* : 17/03/2000	Organisme d'accueil : CNRS Délégation de Meudon Adresse : 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon
Nb pages : 30 Annexe(s) :9	Maître de stage : Céline Clauzel
Année de soutenance : 2024	
Titre français : Utilisation des ouvrages d'art ferroviaires non dédiés à la faune par les ongulés : caractérisation multiscalaire des ouvrages, de leurs paramètres techniques à leur contexte paysager Titre anglais : Use of railway non-wildlife overpasses and underpasses by ungulates : a multiscale characterization, from technical aspects to landscape context	
Résumé (1600 caractères maximum) : Les infrastructures linéaires de transport comme les voies ferrées constituent des barrières aux continuités écologiques et induisent notamment des problèmes de collisions avec la faune sauvage, celles impliquant des ongulés étant les plus impactantes économiquement pour les gestionnaires ferroviaires. Le rôle des ouvrages d'art non dédiés à la faune dans l'amélioration des continuités écologiques et la diminution du nombre de collisions est exploré dans cette étude au travers de facteurs locaux et paysagers. Il en ressort principalement que les ouvrages étudiés ne permettent pas suffisamment de passages par les ongulés, ce qui rend impossible l'évaluation de l'impact des facteurs autres que la hauteur de l'ouvrage, sur les passages des ongulés. Le nombre d'approches est cependant favorisé par l'ouverture du milieu autour de l'ouvrage, peu d'urbanisation, une naturalité potentielle élevée et peu de barrières pouvant faire obstacle aux animaux. Une prolongation des prospections sur les ouvrages est recommandée dans le but d'apporter des réponses précises quant aux facteurs ayant une influence sur les passages des ongulés dans ces ouvrages.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Linear transport infrastructures such as railways act as barriers to ecological connectivity and can cause, among others, wildlife collisions which are the most economically impactful for railway managers when involving ungulates. The role of non-wildlife overpasses and underpasses in improving ecological connectivity and reducing the risk of collisions is evaluated in this study, through local and landscape-scale factors. The findings mainly show that the assessed structures are not used enough by ungulates, making it impossible to evaluate the impact of factors other than the height of the structure on ungulate crossings. However, the number of approaches is correlated to the openness of the landscape, low amounts of urbanization, high potential wilderness, and few fences that could challenge animal movements. Continued monitoring of the structures is recommended to provide clearer insights into the factors influencing ungulate crossings through these structures.	
Mots-clés : ongulés, passages non-dédiés, ouvrage d'art, ferroviaire, continuités écologiques Key Words : ungulates, underpasses, overpasses, non-wildlife, railway ecology, ecological connectivity	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires