
Programme CORRIDORS 2016-2020



Identification des corridors forestiers et des passages à faune actifs pour les mammifères terrestres en Champagne-Ardenne

Phase 2 de l'étude de la connectivité forestière fonctionnelle en Champagne-Ardenne

RAPPORT FINAL JUILLET 2020

RESPONSABLE

Rémi Helder

remi.helder@cerfe.com, 03 24 71 16 07, 06 09 49 17 72

Université de Reims-Champagne-Ardenne, Centre de Recherche et de Formation en Eco-éthologie

5 rue de la Héronnière, 08240 Boult-aux-Bois

www.cerfe.com



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de Développement Régional



ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE



Voies
navigables
de France



Direction régionale
de l'Environnement,
de l'Aménagement
et du Logement
CHAMPAGNE-ARDENNE



Fédération Départementale des Chasseurs
de la Marne



Fédération Départementale des Chasseurs
des Ardennes



SOMMAIRE

Sommaire	1
Liste des figures et des tableaux	2
Introduction	7
I. Contexte et objectifs.....	7
II. Modèles d'étude et méthodologie générale	8
1. Modèles d'étude	8
2. Méthodologie générale	9
Identification des barrières chez le cerf élaphe par approche génétique	10
I. Sites d'étude, collecte des échantillons et obtention des profils	11
II. Description des caractéristiques génétiques des populations spatiales.....	13
1. L'outil de mesure, les microsattellites	13
2. Etat de la diversité génétique au sein des sites d'étude.....	13
3. L'autocorrélation spatiale.....	15
4. Les allèles « privés »	16
III. Nombre de populations génétiques, assignation des individus.....	17
1. Les autoroutes	20
2. Canaux et rivière.....	21
3. Les milieux ouverts	22
4. La LGV.....	23
5. Le cumul des barrières.....	24
IV. Individus migrants	24
V. Interprétations, conclusions	25
Identification et caractérisation des transparateurs	27
I. Le suivi par collier GPS	27
1. La Martre	28
2. Le cerf élaphe	55
Identification et caractérisation des transparateurs	80
II. Le suivi des passages potentiels de l'A4 ou la LGV par pièges photographiques.....	80
1. Matériel et Méthodes.....	81
2. Résultats et interprétations.....	86
3. Suivi du passage faune de Villers-en-Argonne sur la LGV.....	114
4. Bilan du volet Pièges-Photographiques	115
Conclusion générale	117
Diffusion	123
Remerciements	124
Annexes.....	127
I. Compléments statistiques- Analyses génétiques cerfs	127
II. Compléments d'analyse sur les déplacements des cerfs et leur rythme d'activité.	130
III. Compléments d'informations pièges photographiques	135

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1. Identification des « zones barrières » au flux génétique chez plusieurs espèces de mammifères terrestres dans l'ex-région Champagne-Ardenne.	7
Figure 2. Modèles d'étude : le Cerf Elaphe (<i>Cervus elaphus</i>) et la Martre des pins (<i>Martes martes</i>).	9
Figure 3. Principe de l'approche génétique pour l'étude de la connectivité du territoire.	11
Figure 4. Localisation des 13 populations géographiques et effectifs des échantillons de cerfs collectés	12
Figure 5. Richesse allélique des 12 locus initialement sélectionnés pour l'analyse génétique des cerfs.	13
Figure 6. Richesses alléliques des différentes populations de cerfs étudiées.	15
Figure 7. Autocorrélation spatiale en fonction des classes de distance séparant les individus.	16
Figure 8. Estimation du nombre de groupes génétiques donnés par STRUCTURE à partir des 520 échantillons	17
Figure 9. Répartition des profils individuels dans chacun des 6 groupes génétiques identifiés.....	19
Figure 10. Structure génétique des populations de cerfs et interprétation en termes de facilité d'échange d'une population à l'autre.....	20
Figure 11. Conclusions déduites des analyses génétiques concernant la perméabilité des canaux.	21
Figure 12. Récapitulatif des échanges génétiques entre massifs séparés par des milieux ouverts, sans ILT.	22
Figure 13. Interprétation possible des échanges entre les populations situées à l'Est du site d'étude.	23
Figure 14. Carte récapitulative des individus dits « migrants » par population d'origine.	25
Figure 15. Représentation schématique de la connectivité du territoire pour les cerfs.	26
Figure 16. Sites d'étude définis pour le suivi GPS de la Martre des pins.	28
Figure 17. Pose de collier GPS sur une martre anesthésiée, puis relâchée.	29
Figure 18. Pistage des martres équipées de colliers GPS pour récupérer les données enregistrées	29
Figure 19. Tri des localisations pour ne garder que les localisations des animaux en déplacement.....	32
Figure 20. Exemples de trajets révélant l'existence de traversées d'ILT en dehors des périodes d'enregistrement des points.....	33
Figure 21. Exemple de trajets aléatoires simulés à partir du trajet réel de Marc du 18 novembre 2018 aux abords du canal de la Marne.....	34
Figure 22. Comparatif du nombre moyen de franchissements observés à celui obtenu dans le cas de trajets simulés.	35
Figure 23. Exemples de 3 occasions de franchissement associées à trois comportements différents.....	35
Figure 24. Trajets de la martre MF3 à proximité du canal des Ardennes et trajets de MM9 révélant deux occasions de franchissement	36
Figure 25. Répartition des comportements des martres lors d'un rapprochement à moins de 50 mètres de la rive d'une ILT.....	37
Figure 26. Localisations de martres aux abords de « petites » voies ferrées montrant leur utilisation pour les déplacements.....	38
Figure 27. Trajets de deux mâles révélant l'existence de zones préférentielles pour la traversée du canal des Ardennes.....	40
Figure 28. Photographies des berges des zones préférentielles utilisées par MM1 et MM2 pour franchir le canal des Ardennes	40
Figure 29. Représentation des trajets de MF8 montrant des traversées du canal à 4 reprises à 4 endroits différents.....	41
Figure 30. Représentation des trajets de la martre MM8 et de ses zones de traversée.....	42
Figure 31. Représentation de 9 trajets de MF10 centrés sur le pont qu'elle utilise fréquemment pour traverser l'autoroute.	43
Figure 32. Images prises au piège photographique installé dans le but d'observer les passages de MF10.....	43
Figure 33. Représentation des 11 trajets de MM4 où figurent deux traversées de l'A4 au même endroit et pour un même trajet.	44

Figure 34. Représentation des 4 trajets de MF13.....	44
Figure 35. Représentation des 8 trajets de MF15.....	45
Figure 36. Buse probablement empruntée au moins une fois par deux martres différentes (MF13 et MF15) pour franchir l'A4.....	45
Figure 37. Exemple caractéristique de trajet dit de plaine céréalière. Il s'agit d'un parcours de 24h de MF1 de 16 km au total.....	46
Figure 38. Illustration de l'attachement important des martres aux éléments arborés présents en plaine céréalière.....	48
Figure 39. Exemples de déplacements (ou passages) entre bois.....	48
Figure 40. Nombre de passages entre deux bois, séparés par des cultures, par catégorie de distance..	49
Figure 41. Distances parcourues par les martres pour passer d'un bois à l'autre en fonction des individus.....	50
Figure 42. Localisations de martres enregistrées lors de passages entre différents bois et des localisations aléatoire.....	50
Figure 43. Répartition des 435 localisations de martres enregistrées et des 435 points aléatoires.....	51
Figure 44. Répartition des 281 localisations de martres enregistrées en milieu ouvert et des 281 points aléatoires.....	51
Figure 45. Exemple de classement des localisations en fonction de l'élément paysager dans lequel elles sont situées.....	52
Figure 46. Localisations observées et aléatoires en fonction de leur distance à la route ou au chemin le plus proche.....	53
Figure 47. Mammifères terrestres retrouvés noyés dans le Canal Latéral à la Marne.....	53
Figure 48. Empreintes de cerfs sur une coulée, traces d'écorçage et piège photographique sécurisé visant une pierre à sel.....	55
Figure 49. Images prises au piège photographique de cerfs.....	56
Figure 50. Localisation des sites d'études concernés par la surveillance photographique et/ou les tentatives de capture des cerfs.....	56
Figure 51. Flécheur sur une chaise d'affût mobile, en tente d'affût et simplement assis au sol en tenue de camouflage.....	57
Figure 52. Pose d'un collier GPS sur un cerf capturé par télé-anesthésie et injection de l'antidote permettant un réveil optimal.....	57
Figure 53. Répartition des 1092 h d'effort de capture de cerfs dans chacun des sites où des tentatives ont eu lieu.....	58
Figure 54. Exemples de tirs n'ayant pas aboutis à la pose d'un collier GPS sur l'animal visé.....	59
Figure 55. Localisation des massifs dans lesquels des cerfs ont été suivis par rapport aux ILT.....	60
Figure 56. Comparaison des distances obtenues par trajet selon la fréquence d'enregistrement des localisations des cerfs.....	62
Figure 57. Distances médianes de déplacement journalier des cerfs dans chaque site d'étude.....	63
Figure 58. Comparatif des distances parcourues entre les sites de Signy-l'Abbaye et Verrières et des superficies des massifs.....	63
Figure 59. Ensemble des localisations heure de la biche « Camille » en forêt de Signy-l'Abbaye.....	64
Figure 60. Ensemble des localisations heure du cerf « Charles » en forêt de Signy-l'Abbaye.....	65
Figure 61. Ensemble des localisations heure du cerf « Cubi » en forêt de Signy-l'Abbaye.....	65
Figure 62. Ensemble des localisations HR (=horaire) du cerf « Coupe » en forêt de Neuvizy.....	66
Figure 63. Ensemble des localisations heure du cerf « César » en forêt de la montagne de Reims.....	67
Figure 64. Ensemble des localisations heure de la biche « Couette » en forêt de Verrières.....	67
Figure 65. Ensemble des localisations horaires du cerf « Cénanar » en forêt de Verrières.....	68
Figure 66. Ensemble des localisations et trajets heure du cerf « Culbute » en forêt de Verrières.....	69
Figure 67. Ensemble des localisations et trajets heure du cerf « Cirage » en forêt de Verrières.....	70
Figure 68. Détail du trajet du 22-23 septembre 2019 au cours duquel Cirage a franchi deux fois l'A4.....	70
Figure 69. Différentes vues du Viaduc de l'Aisne.....	71

Figure 70. Ensemble des localisations du cerfs « Cano » dans le secteur de Signy-l'Abbaye/Thin le Moutier.....	72
Figure 71. Trois trajets réalisés les 19 et 20 octobre et le 22 novembre 2017 entre les massifs de Signy-l'Abbaye et de Thin-le-Moutier.....	72
Figure 72. Déplacements grande distance du cerf Cano entre deux massifs déduits des observations de terrain.	73
Figure 73. Hypothèses pouvant expliquer l'observation d'un cerf équipé aux alentours de Château-Porcien ..	74
Figure 74. Mise en évidence des 23 trajets hors territoire effectués par le cerf « Culbute »	75
Figure 75. Mise en évidence des 18 trajets hors territoire effectués par le cerf « Cirage »	76
Figure 76. trajets réalisés pendant des journées de chasse révélant l'occupation de deux zones « refuge »	77
Figure 77. Comparaison des distances horaires parcourues entre les jours de chasse et les jours sans chasse..	77
Figure 78 Comparaison des distances de déplacement des cerfs entre le jour de chasse + lendemain par rapport aux jours non chassés.	78
Figure 79 : localisation des ponts suivis par piège photographique lors des 4 sessions.....	82
Figure 80. Piège photographique installé sur un pont de la LGV.....	85
Figure 81. Localisation des pièges photographiques posés pour le suivi des ponts argonnais.	85
Figure 82. Photos des cerfs détectés par piégeage photographique.	87
Figure 83. Localisations, nombre et sens de traversée des cerfs observés sur les ouvrages non-dédiés de plaine (LGV et A4).	87
Figure 84. Photographies des ponts empruntés par les cerfs élaphe.	89
Figure 85. Description des observations de cerfs sous le Viaduc de l'Aisne, par classe de sexe et d'âge.	90
Figure 86. Cliché d'un Cerf élaphe mâle adulte franchissant l'autoroute A4 sous le viaduc de l'Aisne.	90
Figure 87. Fréquence d'observation des cerfs sous le Viaduc de l'Aisne par mois.....	91
Figure 88. Photos d'un cerf et d'une biche sous un des passages inférieurs de la Fontaine d'Olive (« Fontaine d'Olive Ouest »).....	91
Figure 89. Photographie d'une biche devant l'ouvrage « Fontaine d'Olive Est » (Argonne).....	92
Figure 90. Comparaison du nombre d'observations de cerfs entre le viaduc et les deux autres ponts (buses) ..	92
Figure 91. Total des observations de cerfs par heure (GMT+1).....	93
Figure 92. Nombre d'espèces de mammifères détecté par pont (A4 et LGV)	96
Figure 93. Description des nombres d'individus détectés selon les variables « position » et « faciès ».....	98
Figure 94. Nombre d'individus et nombre d'espèces détectés par type de pont.	101
Figure 95. Nombre d'espèces détectées en fonction du nombre d'individus, toutes espèces confondues, ayant fréquenté les ouvrages.	101
Figure 96. Localisation des trois ouvrages fréquentés par le plus grand nombre d'espèces de mammifères. ..	103
Figure 97. Rive enherbée de la Vesle sous le pont LGV15 à Saint-Hilaire au Temple (51).....	103
Figure 98. Pont LGV09 et paysage environnant, particulièrement fréquenté malgré la faible couverture boisée à proximité.....	104
Figure 99. Photographie du pont AUT17 à proximité de bois importants.....	105
Figure 100. Localisation des observations de renards roux et nombre d'individus par ouvrage (LGV et A4). ...	106
Figure 101. Photographie d'un Renard roux fréquentant un pont supérieur et d'un pont routier bordé d'un chemin agricole	107
Figure 102. Photographie d'un Lièvre européen fréquentant un pont supérieur.	108
Figure 103. Photographie d'un groupe de blaireaux européens fréquentant le lit de la Vesle à sec.	108
Figure 104. Localisation et nombre d'individus de sangliers fréquentant les ouvrages de l'A4 et de la LGV.....	109
Figure 105. Photographie d'un sanglier franchissant la LGV sous le pont LGV15, dans le lit de la Vesle peu en eau.	110
Figure 106. Chevreuils traversant l'autoroute A4 en utilisant un pont supérieur alors que l'espèce semble préférer les ponts inférieurs.	111
Figure 107. Localisation et nombre de martres détectées sur les ouvrages de l'A4 et de la LGV.	112
Figure 108. Martre des pins fréquentant un pont supérieur (à gauche) et martre observant le pont autoroutier de la Vesle (à droite).	113

Figure 109. Photographie de Chien viverrin sur un pont aux Grandes-Loges (51).	113
Figure 110. Localisation des ouvrages argonnais, notamment le viaduc de la LGV de Villers-en-Argonne.	114
Figure 111. Image satellite du passage à faune de Villers-en-Argonne et du paysage environnant.	114
Figure 112. Carte récapitulative des points de rupture de la connectivité du paysage dans les Ardennes et dans la Marne	118
Figure 113. Représentation géographique des 6 groupes génétiques révélés par l'analyse GENELAND.....	128
Figure 114. Médianes des distances journalières parcourues en fonction des mois de l'année (tout individus confondus).	130
Figure 115. Distances journalières parcourues par Cénanar	131
Figure 116. Distances parcourues par les cerfs (tous individus confondus) en fonction des heures de la journée	131
Figure 117. Distances parcourues en fonction de l'heure de la journée pour chaque animal suivi.	132
Figure 118. Fréquence d'apparition des distances parcourues en 24h par classe de 50 m.	132
Figure 119. Distribution des localisations dans chaque habitat selon l'heure de la journée.	133
Figure 120. Distribution des localisations dans chaque « ilot pur » selon l'heure de la journée.	134
Figure 121. Comparaison des distances de déplacement des cerfs après capture et en temps normal.....	134
Figure 122. Nombre d'individus détectés par heure (GMT+1), tout ? ouvrage ?s confondus (6025 données).	140
Figure 123. Nombre d'individus détectés par heure (GMT+1) en fonction de la fréquentation humaine.....	141
Figure 124. Courbes d'accumulation d'espèces pour quatre ponts (apparition de nouvelles espèces en fonction du temps de suivi).	142
Figure 125. Nombre d'observations de mammifères par mois et par année de suivi.....	143
Figure 126. Nombre de photographies par mois, par année, et par espèce.	143

Tableau 1. Indices calculés de la diversité génétique des 13 populations géographiques de cerfs étudiées.	14
Tableau 2. Récapitulatif du nombre d'allèles privés par population et nombre d'individus porteurs de l'allèle.	16
Tableau 3. Appartenance des individus assignés à un groupe génétique en fonction de leur population géographique d'origine.	18
Tableau 4. Identification du profil génétique des individus « migrants ».	24
Tableau 5. Récapitulatif des sessions de piégeage de martres réalisées aux abords du canal des Ardennes et dans la zone englobant le canal Aisne-Marne, l'autoroute A4, et la LGV.	30
Tableau 6. Récapitulatif des martres capturées dans les différents sites d'étude, du nombre de colliers portés et du nombre de trajets obtenus par martre.	31
Tableau 7. Récapitulatif des franchissements directs et indirects d'ILT.	33
Tableau 8. Récapitulatif des données relatives aux occasions de franchissement, au temps passé près des ILT, aux distances qui y sont effectuées et au nombre de traversées finalement observées.	36
Tableau 9. Récapitulatif des données relatives aux franchissements	39
Tableau 10. Nombre d'individus suivis en plaine céréalière dans les Ardennes et dans la Marne, nombre réel de « trajets de plaine céréalière », et répartition des localisations dans les différents éléments paysagers.	47
Tableau 11. Récapitulatif des trajets obtenus en plaine céréalière, du nombre de passages d'un bois à un autre observés et des statistiques descriptives concernant les distances parcourues entre chaque bois.	49
Tableau 12. Récapitulatif des captures de cerfs, des conditions de tir et des distances parcourues après fléchage.	58
Tableau 13. Récapitulatif des périodes de suivi des cerfs.	60
Tableau 14. Récapitulatif des données sélectionnées de localisation pour chaque animal suivi plus de 6 mois.	61
Tableau 15. Distances médianes parcourues par chacun des cerfs suivis calculées à partir des localisations horaires.	62
Tableau 16. Description des sessions de piégeage photographique.	82
Tableau 17. Modalités de suivi pour les ponts argonnais de l'autoroute A4.	86
Tableau 18. Description des données de Cerfs sur les ponts de plaine.	86
Tableau 19 : Description des ponts empruntés par les cerfs élaphe.	88
Tableau 20. Données de cerfs élaphe sous le pont « Fontaine d'Olive Ouest »	92
Tableau 21. Informations relatives aux quatre sessions de suivi par piégeage photographique.	94
Tableau 22. Nombre de clichés et nombre de sites fréquentés par espèce de mammifères.	95
Tableau 23. Résultats généraux des différents modèles linéaires à effet mixtes par espèce, pour le nombre d'individus et la richesse spécifique.	97
Tableau 24. Nombre d'individus par espèce et par type de pont	100
Tableau 25. Exemple de la répartition du profil génétique de 7 animaux prélevés dans les massifs de Signy-l'Abbaye et du camp militaire de Sissonne.	127
Tableau 26. Caractéristiques des appareils photographiques utilisés.	135
Tableau 27. Comparaison par espèce du Passage à faune de Villers-en-Argonne (suivi par la FDC 51) et des ponts non-dédiés suivis en plaine (étude « Corridors).	144

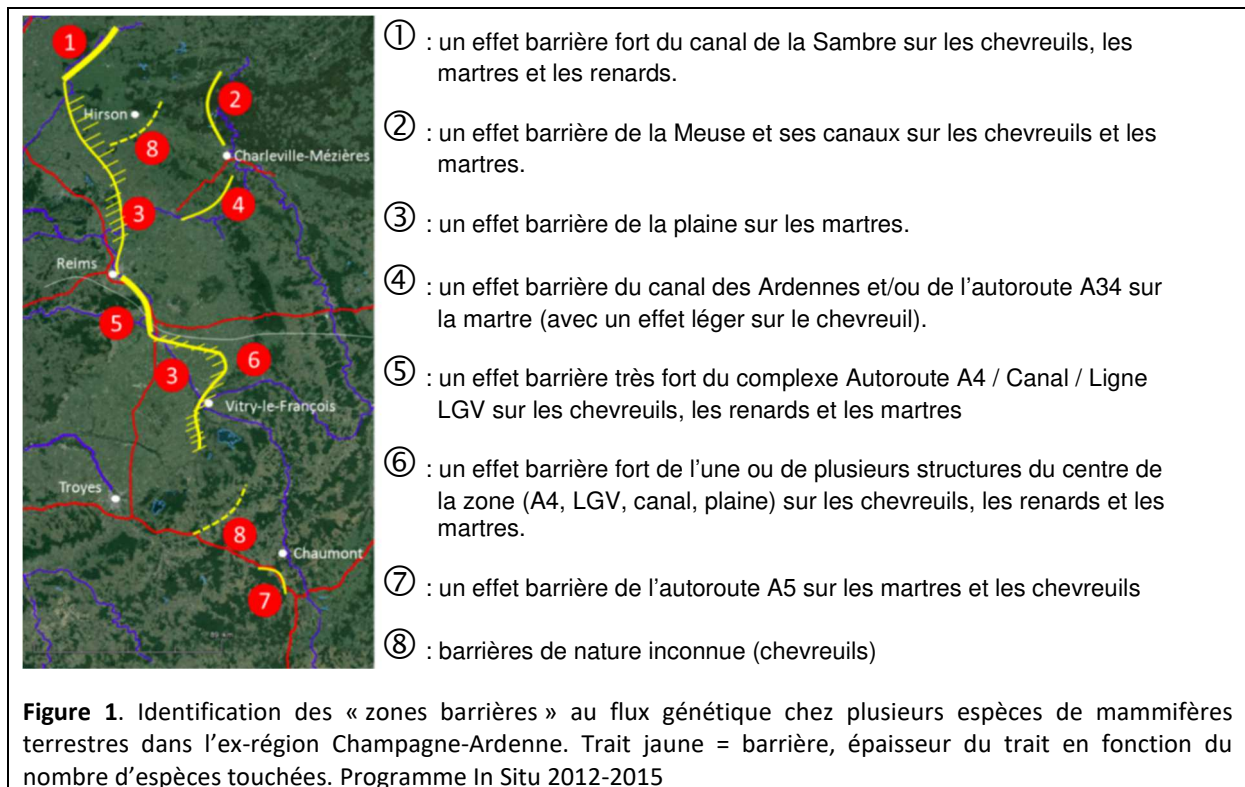
INTRODUCTION

I. Contexte et objectifs

Le brassage génétique est un mécanisme clé pour la survie et l'évolution des populations animales. Il est assuré par les migrations d'individus entre populations lors des phases de dispersion des juvéniles ou les déplacements de reproduction des adultes. Ces déplacements ne doivent donc pas être contrecarrés par les infrastructures linéaires de transport (autoroutes, canaux de navigation, réseau ferré à grande vitesse) ou par la nature anthropique du territoire (urbanisation, paysage issu de culture intensive). Enjeu environnemental majeur, cette problématique est aujourd'hui prise en compte au plan national par la mise en place de la Trame Verte et Bleue (TVB), déclinée en régions par les Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE). Ces politiques visent à assurer le maintien ou la restauration de la connectivité du paysage. Deux éléments clés modulent cette connectivité :

- les barrières qui limitent la connectivité. Ces barrières sont soit linéaires (infrastructures de type autoroutes, canaux, LGV), soit matricielles (par exemple les zones fortement urbanisées ou les grands habitats ouverts pour les espèces forestières).
- les éléments de franchissement qui réduisent les effets de ces barrières (=transparenteurs).

Une première étude de la connectivité forestière du territoire de Champagne-Ardenne, réalisée dans le cadre du programme de recherche « In Situ » conduit par le CERFE entre 2012 et 2015, a mis en évidence l'existence de barrières aux flux génétiques chez différentes espèces de mammifères terrestres (**Figure 1**).



Cette étude a ainsi montré que certaines autoroutes, certains canaux et potentiellement la ligne LGV (barrières linéaires), ainsi que la plaine céréalière (barrière matricielle), limitent les déplacements des chevreuils, des renards et des martres d'un massif forestier à l'autre à des degrés divers. Il est à noter que **si ces barrières réduisent, parfois fortement, les échanges d'individus, elles ne les stoppent pas complètement** puisqu'aucune des populations que nous avons testées ne présente de déficits génétiques trop marqués (population isolée). Ce résultat indique qu'il existe des **zones ou des structures qui permettent leur franchissement** telles que des corridors de type haies et bosquets dans le cas de barrières matricielle chez des espèces forestières, ou d'aménagements dans le cas des infrastructures linéaires de transport (ILT) comme les buses, ponts supérieurs et inférieurs, viaducs, ou encore passages à faune.

C'est sur l'identification et caractérisation de ces éléments de franchissement que porte en grande partie le programme de recherche « Corridors ». Ils sont en effet de première importance pour assurer la connectivité du territoire et leur caractérisation peut permettre de les préserver voire de les multiplier dans les zones les plus fragmentées. Les résultats obtenus seront d'ailleurs mis à disposition des acteurs privés et/ou publics qui façonnent le paysage, pour améliorer l'efficacité des futurs et actuels aménagements qui permettent à la faune sauvage de circuler dans le paysage.

Plus précisément, le programme de recherche « Corridors » a pour objectif de :

1. Renforcer les résultats du programme « In Situ » en identifiant les barrières au déplacement chez une nouvelle espèce, le Cerf élaphe (*Cervus elaphus*).
2. Identifier et caractériser les corridors et les zones de passage préférentielles qui permettent aux individus de franchir les zones qui sont apparues problématiques, chez le Cerf élaphe et la Martre des pins (*Martes martes*).

II. Modèles d'étude et méthodologie générale

1. Modèles d'étude

Les mammifères terrestres n'ont pas la même faculté à circuler dans le paysage selon leurs caractéristiques anatomiques, biologiques et écologiques. Par exemple, un grillage de protection aux abords d'une autoroute aura certainement un impact important sur le déplacement des animaux de grande taille ; une espèce munie de griffes aura sans doute plus de facilité à remonter la berge d'un canal ; une espèce spécialiste d'un type d'habitat va éprouver plus de difficulté à traverser un autre habitat qu'une espèce plus tolérante, etc. Afin d'avoir une vision élargie de la connectivité du territoire, nous avons donc choisi d'étudier deux espèces particulièrement sensibles à la fragmentation du territoire mais qui diffèrent radicalement par leur taille, leur capacité de déplacement, leur mode de vie et leurs exigences écologiques : la Martre des pins (*Martes martes*) et le Cerf Elaphe (*Cervus elaphus*) (**Figure 2**).



Figure 2. Modèles d'étude : le Cerf Elaphe (*Cervus elaphus*) et la Martre des pins (*Martes martes*).

Nos précédents travaux ont montré que la Martre des pins est l'espèce la plus sensible aux éléments barrières par rapport au Hérisson, au Renard, au Chevreuil et au Chat forestier. Il apparaît, entre autres, que la plaine céréalière entrave assez fortement les déplacements des individus. Ces conclusions corroborent les résultats que nous avons déjà obtenus quant à l'exploitation des habitats par la Martre. Les premiers suivis par collier GPS des individus de cette espèce montrent en effet, et contrairement aux chats forestiers, aux blaireaux et aux renards, un évitement très marqué de l'espace ouvert en milieu bocager et une très forte utilisation des haies dans leurs déplacements qu'elles utilisent en qualité de corridor. **Cette espèce constitue donc un modèle idéal pour l'identification des corridors forestiers.**

Le cerf a été intégré dans cette étude pour plusieurs raisons : son expansion démographique et géographique dans notre région, son attachement à l'habitat forestier (au moins en période de repos ou de refuge) et sa grande taille qui le rend théoriquement très sensible aux barrières linéaires. De plus, cette espèce, notamment les mâles, est connue pour sa grande mobilité. Ainsi, les distances parcourues par les individus en dispersion s'élèveraient à 20 km en moyenne, et pourraient même atteindre 60 km. Etablis, les mâles disposeraient de deux zones d'activité saisonnière séparée de 5 à 10 km. Le cerf apparaît donc bien comme **une espèce modèle pour évaluer la connectivité du territoire et pointer les structures et zones qui permettent le franchissement des barrières.**

2. Méthodologie générale

A l'instar du programme In Situ, l'identification des barrières au déplacement chez le cerf élaphe se sont basées sur **l'analyse génétique des populations** réparties de part et d'autre des éléments paysagers susceptibles de freiner la circulation des individus. En effet, si des animaux séparés par un élément du paysage sont génétiquement plus différents qu'attendu, alors nous pouvons poser l'hypothèse que les individus éprouvent des difficultés à le franchir.

Deux méthodes complémentaires ont été utilisées afin d'identifier les corridors et les transparateurs qui permettent aux individus de franchir les zones problématiques. La première consiste à suivre par **collier GPS** les déplacements de martres et de cerfs aux abords de ces zones et la seconde se base sur le **suivi photographique** de certains ponts et tunnels de la LGV et de l'autoroute A4. Les transparateurs identifiés ont ensuite été caractérisés pour dégager les facteurs qui semblent améliorer leur efficacité, par exemple en fonction de la dimension du passage, de sa position (supérieur, inférieur, ...), de la nature du revêtement, de son usage (fréquentation, ...), de sa localisation par rapport à un corridor existant, de la végétation environnante, etc.

**IDENTIFICATION DES BARRIERES CHEZ LE CERF ELAPHE PAR APPROCHE
GENETIQUE**

La connectivité d'un territoire permet à des individus de quitter une population pour en rejoindre une autre et potentiellement, s'y reproduire. Dans ce cas, ces déplacements sont associés à un flux génétique qui assure le brassage génétique par échange d'individus reproducteurs. L'outil génétique vise à évaluer ce flux, qui permet ensuite de déduire si des déplacements ont eu lieu entre les populations testées. Pour ce faire, nous cherchons à savoir si des populations situées de chaque côté d'un élément paysager potentiellement barrière, présentent des profils génétiques comparables (des individus franchissent l'élément) ou différents (les individus ne franchissent pas l'élément) (**Figure 3**).

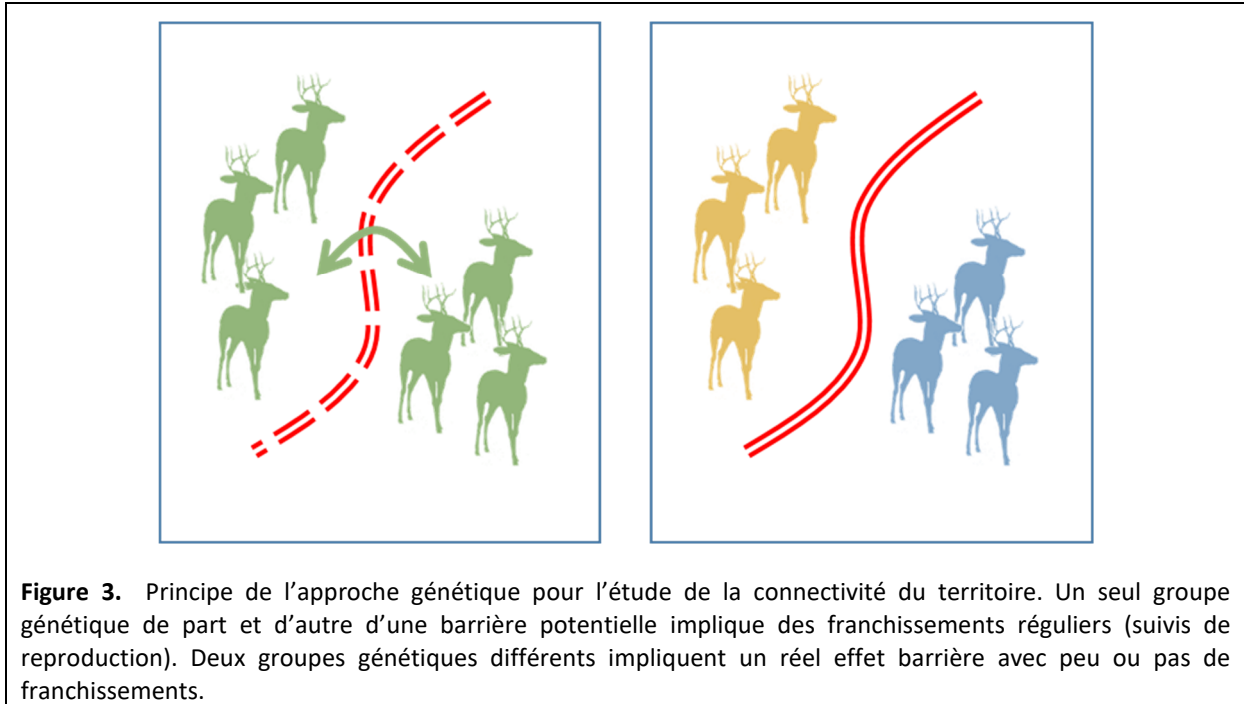


Figure 3. Principe de l'approche génétique pour l'étude de la connectivité du territoire. Un seul groupe génétique de part et d'autre d'une barrière potentielle implique des franchissements réguliers (suivis de reproduction). Deux groupes génétiques différents impliquent un réel effet barrière avec peu ou pas de franchissements.

Toutefois, de nombreux facteurs viennent moduler les résultats et leur interprétation comme l'âge de la barrière, la dynamique de population de l'espèce visée ou la distance qui sépare les populations cibles. Notons enfin que si des groupes montrent une connexion génétique, nos analyses ne nous permettent pas d'identifier les trajets empruntés (corridors) par les individus pour passer d'un groupe à l'autre.

Trois étapes sont nécessaires afin de mener à bien l'analyse génétique des populations de cerfs : la collecte des échantillons, le traitement de ces échantillons en laboratoire afin d'aboutir à un profil génétique individuel, et enfin, les analyses statistiques de ces profils qui permettront de comprendre les flux de gènes dans et entre les populations.

I. Sites d'étude, collecte des échantillons et obtention des profils

Cette analyse était initialement prévue dans les Ardennes et dans la Marne mais au vu des résultats obtenus à mi-parcours de l'étude, de nouveaux sites aux abords de l'Aisne et de la Meuse ont été ajoutés afin d'obtenir les explications concernant certaines observations, notamment la provenance de certains individus - cf. rapport activité n°2.

Au total, nous avons collecté **520 échantillons** répartis dans **13 populations géographiques** – c’est-à-dire des populations séparées les unes des autres par des éléments du paysage, susceptibles de créer une barrière aux déplacements des cerfs. (**Figure 4**). Les échantillons sont des petits bouts de tissu, notamment de peau, prélevés sur des animaux tués à la chasse. Les collectes sont organisées par les fédérations départementales des chasseurs des départements concernés et réalisées par les chasseurs dans les différents massifs. La très grande majorité des échantillons (507) proviennent de massifs forestiers. Quelques individus dits « isolés » ont cependant été prélevés en dehors de ces massifs. Leur provenance est d’autant plus intéressante à définir.

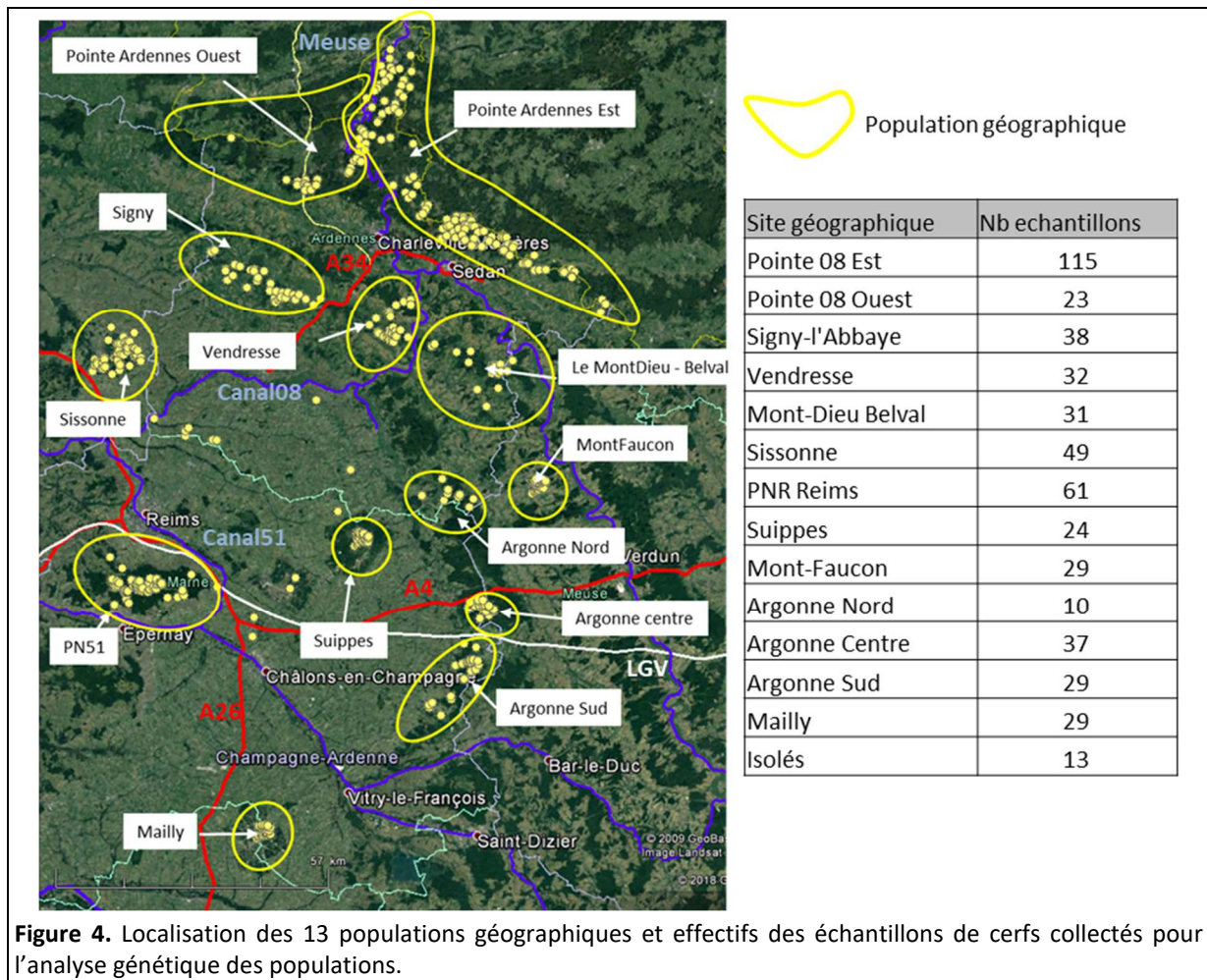


Figure 4. Localisation des 13 populations géographiques et effectifs des échantillons de cerfs collectés pour l’analyse génétique des populations.

Le traitement des échantillons a été conduit par le laboratoire des Pyrénées et des Landes, à Lagor (64). Les étapes importantes sont :

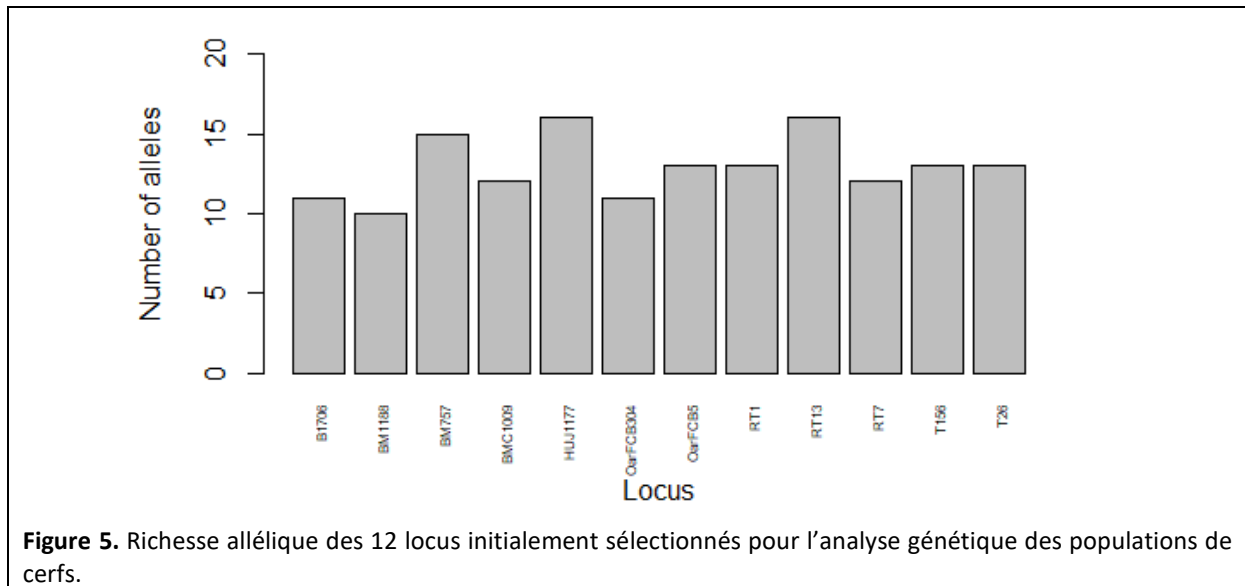
- L’extraction de l’ADN contenu dans les cellules des échantillons
- Le test et l’optimisation d’un jeu de 12 marqueurs microsatellites sur lesquels seront définis les profils génétiques.
- L’amplification de l’ADN sur ce jeu de marqueurs
- Le génotypage des ADN sur séquenceur
- La lecture de ces sorties séquenceurs. Cette lecture est réalisée en double aveugle par l’équipe du CERFE.

C’est seulement à l’issue de ces étapes que sont obtenus les profils génotypiques de chaque échantillon.

II. Description des caractéristiques génétiques des populations spatiales

1. L'outil de mesure, les microsatellites

Pour rappel, les marqueurs moléculaires, ici des microsatellites, sont les gènes que nous avons échantillonnés afin qu'ils représentent la diversité génétique de la population de cerfs. Les allèles sont des versions différentes d'un gène (ou locus) et chaque individu porte deux allèles par gène. L'analyse a été réalisée sur 507 individus répartis dans 13 populations (individus isolés non inclus) et comprends 12 microsatellites. Le nombre total d'allèles observés est de 155, avec entre 10 et 16 allèles par locus (**Figure 5**), ce qui correspond aux observations de diverses populations testées ailleurs en France et en Allemagne (cf. Reiner & al, 2019 pour une revue comparative des données et analyses génétiques chez le cerf).



Pour information, les microsatellites HUJ1177 et RT XX présentent une proportion d'homozygotes plus élevée qu'attendue (logiciel MICROCHECKER - Van Oosterhout et al., 2004) reflétant la présence probable d'allèles nuls, c'est-à-dire des allèles ne pouvant pas être détectés par notre méthode d'analyse. Ils ont donc été exclus des analyses ci-dessous.

2. Etat de la diversité génétique au sein des sites d'étude

La mesure de la diversité génétique permet de savoir si les populations ont subi les effets d'une diminution d'effectif ou une diminution d'échange de gènes entre populations via une fragmentation de leur habitat. En effet, dans ces situations, on observe une perte des allèles rares et l'augmentation du taux d'homozygotie et donc, une réduction globale de la diversité génétique. Les indices classiquement utilisés pour estimer cette diversité génétique sont donc :

- Le taux d'homozygotie : proportion d'individus qui portent deux allèles identiques par locus. Ce facteur induit un risque élevé de subir les effets délétères d'un allèle récessif (qui ne se

serait pas exprimé si l'animal avait été hétérozygote, c'est-à-dire porteur de cet allèle délétère et d'un autre allèle sur le chromosome associé).

- La richesse allélique (A_r) : nombre d'allèles par locus, pondéré par le nombre d'échantillons. A travers cet indice, nous tenons compte de la taille de l'échantillonnage qui conditionne le nombre d'allèles observés (N_a).
- L'indice F_{is} : mesure la déviation par rapport à l'équilibre de Hardy-Weinberg et peut indiquer un phénomène de consanguinité dans la population étudiée.

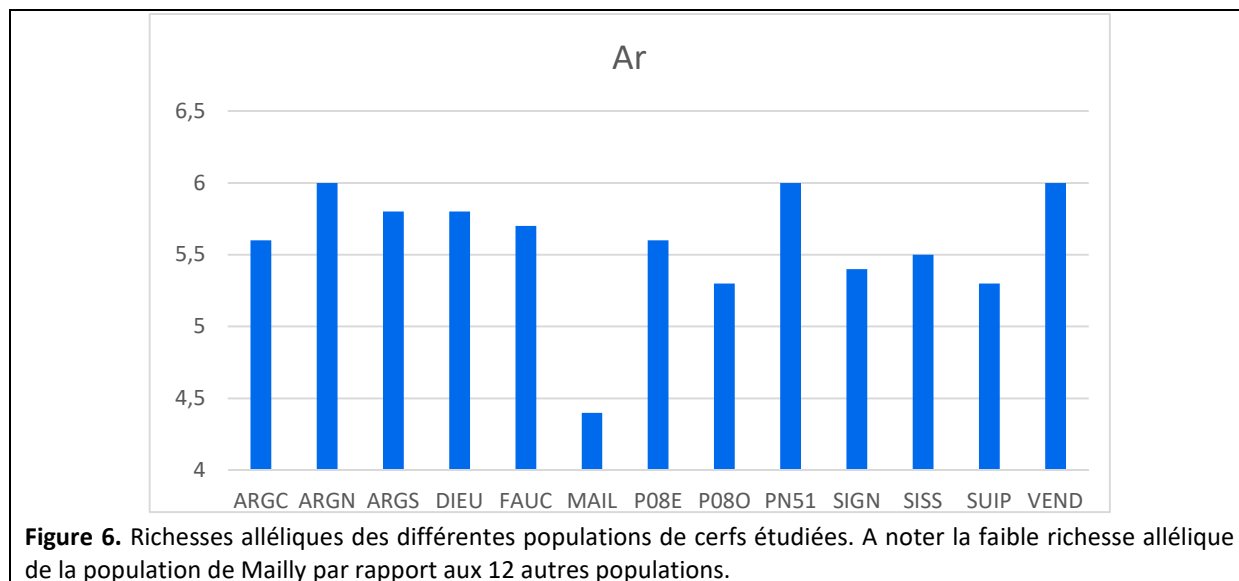
Ces différentes données nous renseignent donc sur la « santé » génétique des populations étudiées et leur possible isolement vis-à-vis des populations voisines (**Tableau 1**).

Tableau 1. Indices calculés de la diversité génétique des 13 populations géographiques de cerfs étudiées.

Pop	N	He	Ho	NA	Ar	Fis	Fis 10loc
ARGC	37	0.75	0.66	7.6	5.6	0.14*	0.05
ARGN	10	0.72	0.74	6.5	6.0	0.02	-0.01
ARGS	29	0.74	0.63	8.3	5.8	0.16*	0.08*
DIEU	31	0.74	0.67	7.8	5.8	0.10*	-0.01
FAUC	29	0.75	0.70	7.9	5.7	0.07	0.04
MAIL	29	0.61	0.57	5.9	4.4	0.08	0.04
P08E	113	0.69	0.61	10.0	5.6	0.12*	0.06*
P08O	25	0.72	0.67	7.1	5.3	0.08	0.01
PN51	61	0.76	0.69	7.9	6.0	0.10*	0.03
SIGN	38	0.73	0.64	7.8	5.4	0.15*	0.04
SISS	49	0.74	0.63	7.4	5.5	0.16*	0.05
SUIP	24	0.71	0.62	7.0	5.3	0.16*	0.06
VEND	32	0.75	0.69	8.6	6.0	0.10*	0.02

En règle générale, nous n'observons pas de résultats marqués dans les analyses de l'hétérozygotie ou de la mesure d'écart à la panmixie (F_{is}) dans les populations testées et la richesse allélique est comparable (entre 5.3 et 6.0) entre la plupart des groupes spatiaux. Nous n'avons donc pas observé de « signes d'alerte » particuliers au sein des populations testées, révélateurs d'un potentiel risque génétique.

Cependant, on observe que la richesse allélique de la population de Mailly présente la plus faible valeur avec une moyenne de 4.4 allèles par locus (**Figure 6**). Si l'on se réfère au taux d'hétérozygotie observé (H_o) sur ce site, il semble peu probable que le groupe soit dans une situation de consanguinité car l'indice F_{is} est assez faible, 4% et non significatif.



Cela suppose donc que les individus présents sur la zone se reproduisent bien entre eux mais que cette zone subit probablement les conséquences d'un isolement géographique, avec un faible apport de nouveaux allèles. Il est donc possible que ce site subisse un effet île, qui traduit une diminution des apports en nouveaux allèles. Ce phénomène pourrait s'expliquer notamment par la présence d'un grillage de 2 mètres de haut qui participerait à l'isolement de la population qui est également bordée d'une autoroute.

Si l'on ne peut pas comparer nos résultats avec ceux obtenus par d'autres études réalisées avec d'autres microsatellites, on constate tout de même que nos populations présentent une richesse allélique de même ordre de grandeur que celles des autres populations testées, notamment dans une étude réalisée en Wallonie. Cette même étude montre une richesse allélique moins forte pour des populations localisées dans l'Indre, la Meurthe et les Côtes d'Armor, d'une grandeur comparable à celle obtenue à Mailly. Nous tenterons de nous procurer quelques échantillons des ADN testés dans cette étude afin de comparer nos résultats.

3. L'autocorrélation spatiale

Pour comprendre la structure génétique d'une ou de plusieurs populations, il est nécessaire d'évaluer la façon dont se différencient les individus en fonction de la distance géographique qui les sépare. En effet, l'isolement par la distance est un processus qui restreint le flux génétique et qui par conséquent, génère une structure génétique, indépendamment de la présence de barrières potentielles. Autrement dit, plus une population est éloignée géographiquement d'une autre, plus elle est différente génétiquement.

Cette corrélation dépend nécessairement du paysage dans lequel les individus évoluent. Cependant, l'étude sur l'échantillonnage global permet d'observer un effet moyen de la dispersion des individus sur la structuration génétique.

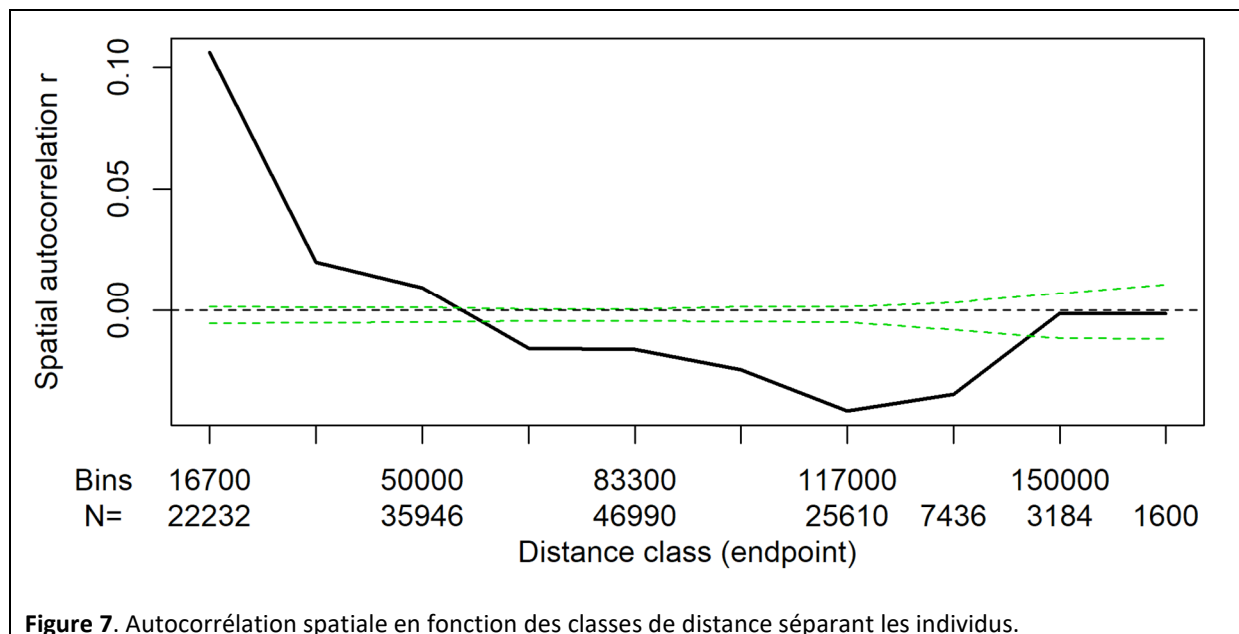


Figure 7. Autocorrélation spatiale en fonction des classes de distance séparant les individus.

Les cerfs se ressemblent génétiquement plus qu'attendu en dessous de 60km (**Figure 7**), puis se différencient au-delà. L'interprétation de ce résultat doit prendre en compte le fait que les individus ont été échantillonnés de façon groupée et non de façon continue sur la surface de notre zone d'étude. Néanmoins, il ressort de ces résultats que les populations de cerfs semblent fortement structurées, avec des déficits d'échange après une relativement courte distance. Si davantage d'échanges de gènes avaient lieu entre individus au-delà de 60km, on aurait dû observer une courbe qui se tient autour d'un indice d'autocorrélation spatiale de 0. Le fait que cette courbe passe directement dans des valeurs négatives indique le patron d'isolement par la distance est marqué et suppose donc que les individus dispersent majoritairement sur des distances inférieures à 60km.

4. Les allèles « privés »

Nous utilisons ici la notion d'allèles privés afin de décrire un autre aspect de la richesse allélique et de la distinction génétique des populations les unes par rapport aux autres. Un allèle privé est un allèle que nous ne trouvons que dans un seul site d'étude. Ce concept peut donc avoir une importance particulière dans le cadre de la conservation de la biodiversité et dans les études de connectivité. La survenue d'un allèle privé peut provenir d'une mutation génétique chez un individu. Nous n'écartons pas également la possibilité qu'un allèle privé puisse être le produit d'une erreur d'amplification pendant la PCR ou de lecture. Par conséquent, nous ne nous intéresserons ici qu'à la présence d'allèles privés présents en plusieurs copies pour discuter des résultats (**Tableau 2**).

Tableau 2. Récapitulatif du nombre d'allèles privés par population et nombre d'individus porteurs de l'allèle.

Population	ARG Cent	ARG Nord	ARG Sud	Mt-DIEU	Mt-FAUC	MAILLY	Pointe 08E	Pointe 08O	PN51	SIGNY	SISSONNE	SUIPPES	VENDRESSE
Nb d'all privés	.	1	.	2	.	2	6	2	2	.	2	.	1
Nb max de porteurs	.	1	.	2	.	6	6	2	7	.	2	.	1

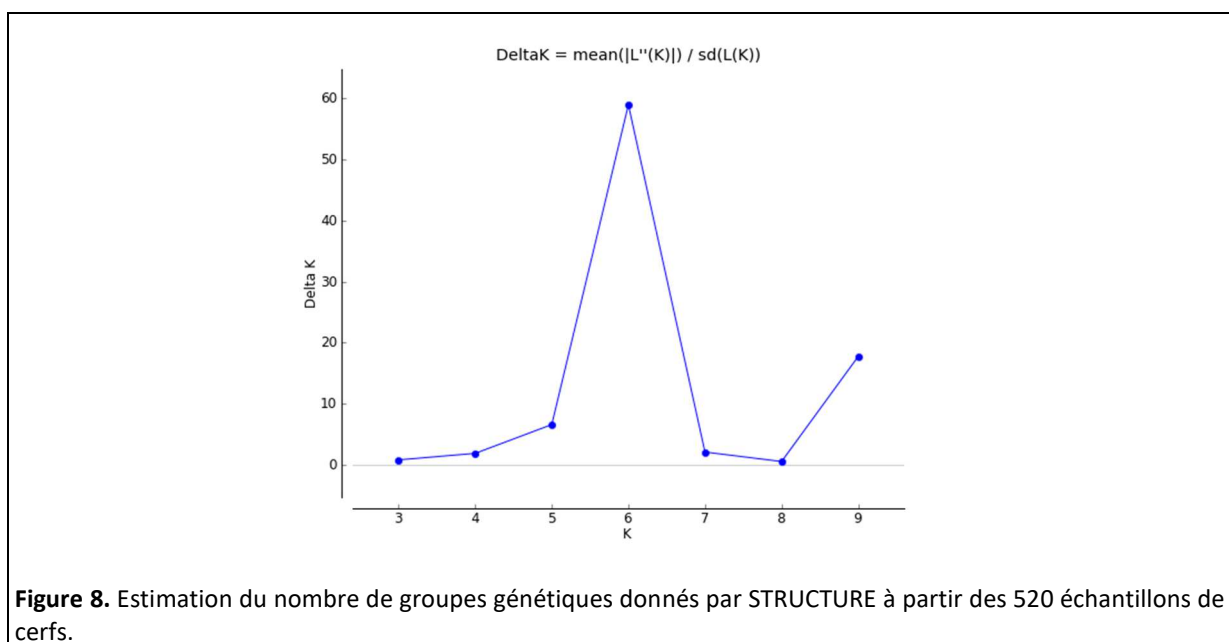
Pour la population Pointe Ardennes Est, six allèles propres à ce groupe, apparaissant chacun entre 1 et 6 fois, sont observés. Cependant, en raison du déséquilibre important de l'échantillonnage, il est délicat d'interpréter cette valeur. Dans les populations de Signy-Sissonne, Vendresse, MontDieu, Pointe Ardennes Ouest et Argonne Nord, les allèles privés propres à chaque population n'apparaissent qu'une à deux fois, et ne sont donc pas exploitables pour l'interprétation. En revanche, dans les populations de Mailly et de Reims, on observe la présence d'un allèle particulier à chacune de ces populations chez plusieurs individus (6 fois pour Mailly et 7 fois pour Reims dont l'effectif est cependant plus important). Ces résultats suggèrent une identité génétique qui se détache du groupe général.

Ces premières données tendent à montrer que, bien que les populations testées ne présentent pas de déficit allélique ou de consanguinité marqués, il se dessine un faible taux d'échange entre ces populations et un possible marquage génétique, notamment dans les populations de Reims et de Mailly.

III. Nombre de populations génétiques, assignation des individus

Pour rappel, nous cherchons à savoir si les cerfs présentent des similarités dans leur ADN en fonction du site dans lequel ils ont été échantillonnés et à comparer les groupes génétiques ainsi constitués. Les analyses consistent donc à regrouper les individus en fonction des allèles dont ils sont porteurs.

Quelles que soient les méthodes statistiques et les logiciels utilisés (STRUCTURE ou GENELAND) (voir ANNEXE I), il en ressort l'existence de **6 groupes génétiques principaux (Figure 8)**. Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus avec la méthode « STRUCTURE » qui ne repose ici que sur la comparaison des profils génétiques individuels sans inclure d'information spatiale.



Afin de déterminer l'appartenance (ou non) de chacun des individus collectés à l'un de ces groupes génétiques, chaque individu est décrit selon le pourcentage d'appartenance de son profil génétique à chacun des 6 groupes génétiques (cf. annexe pour exemple). Afin de présenter des résultats

robustes, nous avons choisi de travailler sur des critères de sélection **très stricts** en ne prenant en compte que les individus dont le **profil génétique est associé à un groupe génétique à au moins 80%**.

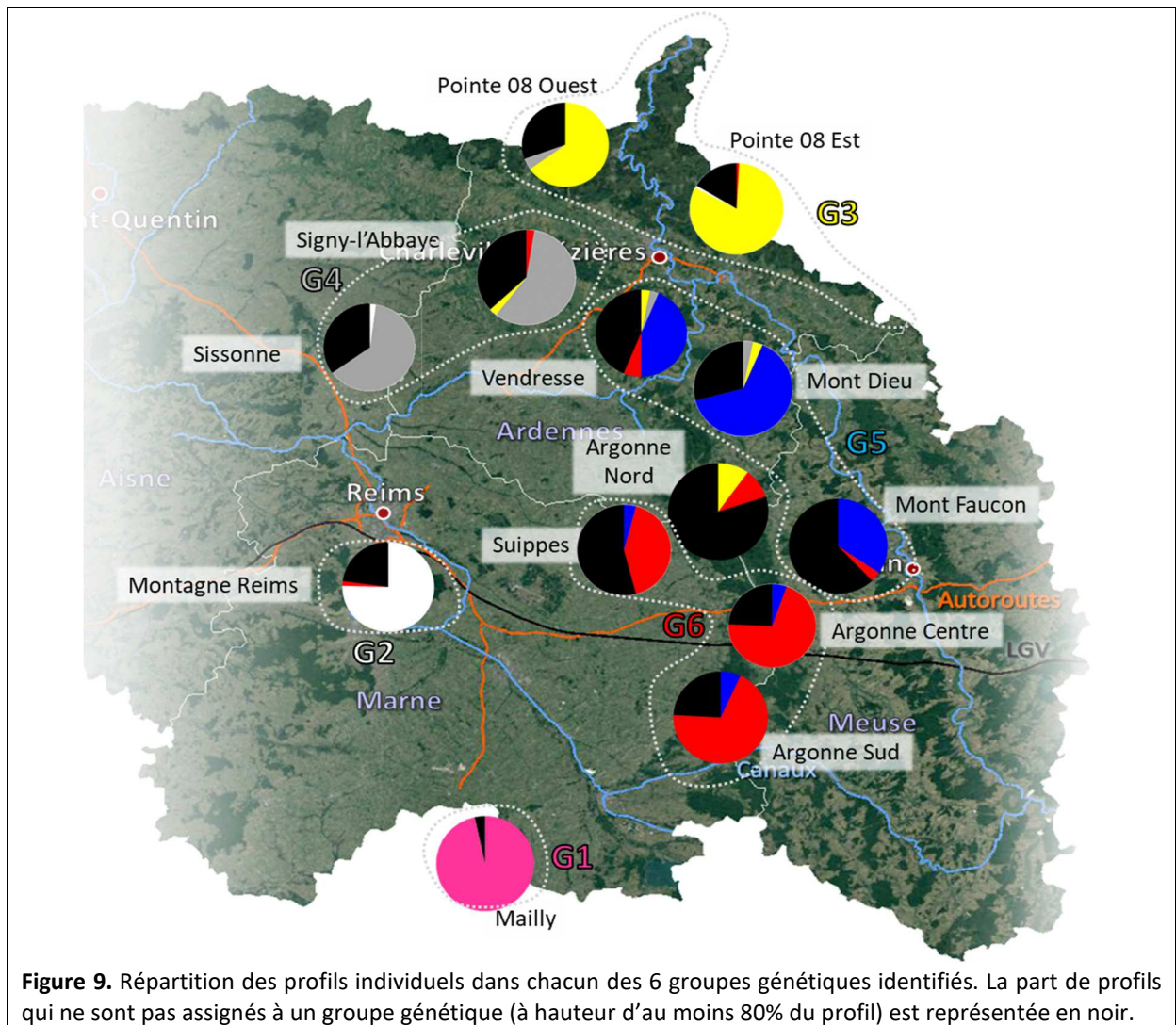
A l'issue des analyses, chaque cerf est ainsi classé dans l'une de ces 3 catégories :

- Résident : individu présentant un profil génétique (> à 80 %) très typique du site géographique dans lequel il a été échantillonné.
- Indéterminé : n'est attribué à aucun groupe génétique (profil < à 80 % dans chaque groupe génétique). Cet individu n'entre pas dans nos analyses.
- Migrant : individu à profil génétique très typique (> à 80%) d'un groupe génétique différent du site géographique dans lequel il a été échantillonné.

Six groupes génétiques ont ainsi été plus ou moins clairement identifiés (**Tableau 3, Figure 10**).

Tableau 3. Appartenance des individus assignés à un groupe génétique en fonction de leur population géographique d'origine.

Site géographique	Nbre total	Profil > 80 %	G1	G2	G3	G4	G5	G6	% résident	% Tous	Gpe
Mailly	29	28	28						96.6	96.6	G1
PN51	61	47		46				1	75.4	77.0	G2
Pointe 08 Est	115	96		1	94			1	81.7	83.5	G3
Pointe 08 Ouest	23	16			15	1			65.2	69.6	
Signy l'Abbaye	38	24			1	22		1	57.9	63.2	G4
Sissonne	49	32		1		31			63.3	65.3	
MontDieu	31	22			1	1	20		64.5	71.0	G5
Vendresse	32	18			1	1	14	2	43.8	56.3	
Mont-Faucon	29	11					10	1	34.5	37.9	
Argonne Centre	37	28					2	26	70.3	75.7	G6
Argonne Sud	29	22					2	20	69.0	75.9	
Suippes	24	11					1	10	41.7	45.8	
Argonne Nord	10	2			1			1	20.0	20.0	?
Total général	507	357	28	48	113	56	49	63			



Les 4 premiers groupes génétiques, de G1 à G4, sont nettement définis avec un pourcentage s'étalant de 60 % à 96 % d'individus résidents - présentant un profil génétique typique de leur population :

- G1- La population de Mailly forme un seul groupe génétique, totalement séparé des autres populations testées.
- G2- La population de la Montagne de Reims (PN51) forme un seul groupe génétique séparé des autres populations.
- G3- Les parties Est et Ouest du massif des Ardennes ne forment qu'un seul et même groupe.
- G4- Les massifs de Signy-l'Abbaye et du camp militaire de Sissonne ne forment qu'un seul groupe génétique.

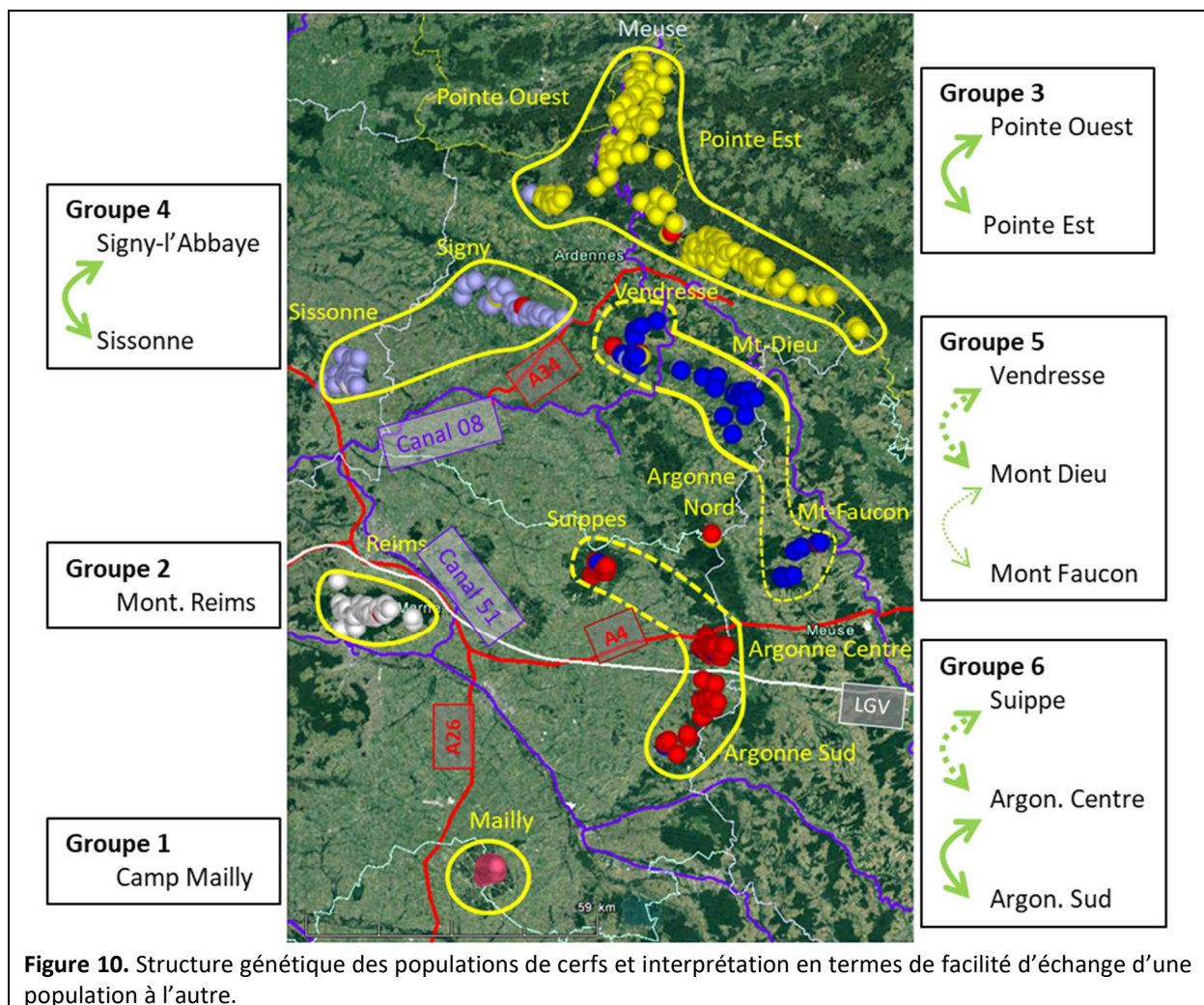
Les deux autres groupes génétiques comprennent des sous-groupes plus ou moins bien définis :

- G5- Si 65% des individus de Mont-Dieu présentent un profil typique de leur population géographique, moins de la moitié des cervidés de Vendresse montre ce même profil génétique. Il est à noter que 4 individus sur les 18 identifiés à Vendresse appartiennent aux populations alentours. Pour ce qui concerne Mont-Faucon, seul un tiers de cette population est identifié comme faisant partie du groupe génétique Mont-Dieu-Vendresse.

G6- Le dernier groupe génétique est composé d'abord des deux populations Argonne Centre et Argonne Sud. La troisième population géographique associée à ce groupe génétique est la population de Suippes. Ici encore, moins de la moitié des individus de Suippes est identifiée comme appartenant à la population Argonne-Suippes.

Avec seulement 20% des individus identifiés, nous n'avons pas pu classer la population Argonne Nord. Ce résultat est peut-être dû au trop faible nombre d'échantillons analysés mais pourrait avoir d'autres explications (population en cours d'installation).

Cette forte structuration génétique montre à la fois des facilités d'échanges entre certaines populations mais implique également l'existence de zones barrières dans le paysage (**Figure 10**). Les éléments du paysage pouvant créer cet effet barrière, à savoir les autoroutes, les canaux (ou les rivières), les milieux ouverts et la LGV sont discutés ci-dessous.



1. Les autoroutes

Au vu de la séparation génétique entre Signy et Vendresse, il semble que l'A34, qui se trouve être la seule barrière potentielle entre les deux sites, limite très fortement les échanges entre ces deux populations de cervidés. Deux individus au profil génétique de Signy-Sissonne ont tout de même été retrouvés à Vendresse et au Mont-Dieu. Toutefois, ces animaux (ou leurs parents) ont pu contourner cette autoroute par le sud pour effectuer ce déplacement en franchissant le canal des Ardennes.

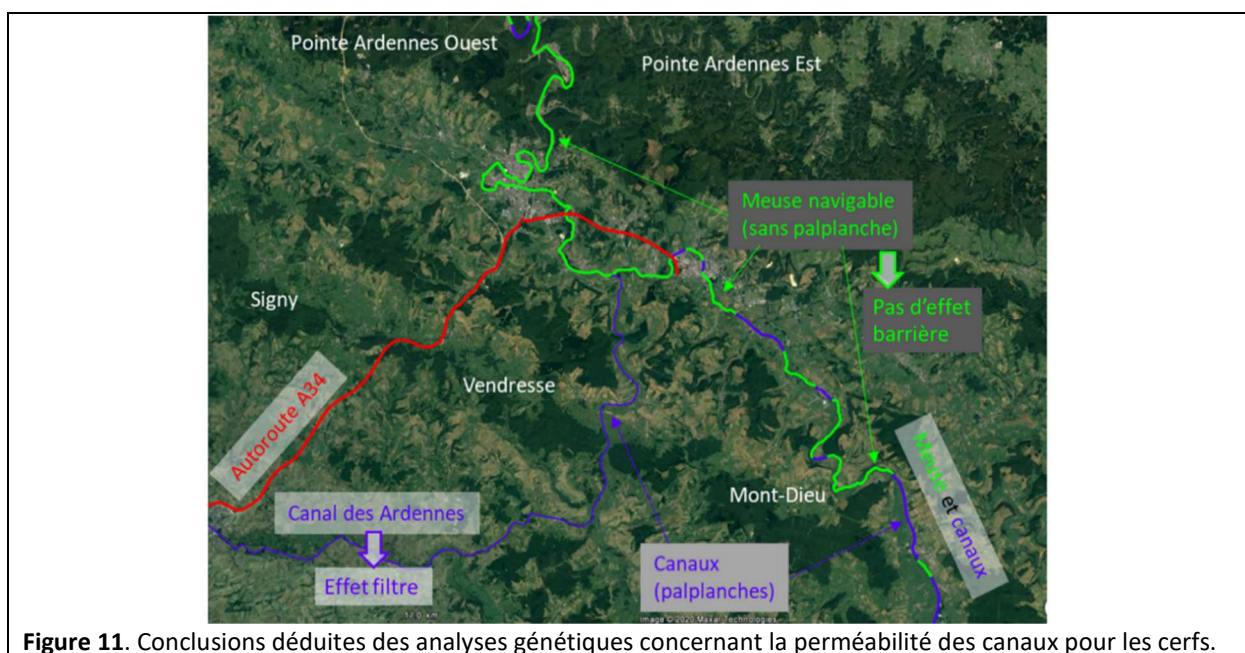
La portion de l'A4 qui sépare les populations situées en Argonne au sud de l'autoroute et Suippes semble, à l'inverse de l'A34, plus perméable au flux de gènes, et donc d'individus, comme le montrent à la fois la connexion entre ces populations et la diffusion des individus « migrants » vers les autres massifs forestiers (voir section IV). Au regard de la faible connexion entre Suippes et l'Argonne, nous supposons toutefois que cette autoroute a un effet filtre assez marqué sur les échanges entre le nord et le sud du massif.

2. Canaux et rivière

On constate moins de brassage génétique entre la population de Vendresse et Mont-Dieu, qui appartiennent pourtant au même groupe génétique, qu'entre les populations au sein d'autres groupes génétiques (par exemple entre Signy et Sissons, ou pointe Ardennes Ouest et Pointe Ardennes Est). Cette moindre ressemblance génétique entre Vendresse et Mont-Dieu pourrait être expliquée par deux hypothèses, non exclusives : le Canal des Ardennes qui sépare les deux zones peut jouer un rôle de filtre, réduisant ainsi les échanges génétiques, ou/et les gènes de population extérieures ont pu venir enrichir la population de Vendresse, qui pourrait alors constituer une population « carrefour », de par l'arrivée, la sédentarisation et la reproduction de nouveaux individus dans le massif. Si le canal a un effet filtre, il n'empêche pas le passage de cerfs puisque Vendresse et Mont-Dieu font partie du même groupe génétique, et que 5 individus « migrants » hors massif identifiés comme appartenant au groupe Signy-Sissons sont localisés au sud de ce canal (voir section IV).

Par ailleurs, les cerfs localisés de part et d'autre de la rivière Meuse en pointe Ardennes ne présentent pas de différence génétique. Cet élément ne constitue donc pas un frein aux déplacements des cerfs. Il est à noter que la Meuse en pointe Ardennes n'est que rarement associée à un canal de navigation.

Enfin, la séparation des populations Pointe Ardennes (notamment Est) et Vendresse/Mont-Dieu/Mont-Faucon pourrait être attribuée à l'autoroute qui relie Charleville-Mézières à Sedan plutôt qu'à la Meuse qui, dans cette zone, est navigable, donc non flanquée de canaux bordés de palplanches (Figure 11).



3. Les milieux ouverts

L'impact des milieux ouverts sur le déplacement des cerfs est très variable (**Figure 12**). Nous posons l'hypothèse que cette variabilité de l'effet pourrait être due à différents facteurs, comme la densité de taches de bois ou l'intensité de la circulation sur des routes non grillagées.

Le milieu ouvert entre Signy et Sissonne est complètement perméable aux déplacements des cerfs, même si l'outil génétique ne nous permet pas de savoir s'il existe des voies ou axes préférentiels de connexion. Des individus assurent donc le flux génétique entre ces deux formations boisées en franchissant régulièrement les 25 km d'espace ouvert qui les séparent.

A l'opposé, le milieu ouvert entre Signy et la Pointe Ardennes semble très limitant en termes de flux génétique. Cet espace est pourtant plus boisé que celui qui sépare Signy et Sissonne. Toutefois, la RN 43, qui sépare les massifs de Signy l'Abbaye et de la Pointe Ardennes, voit passer 8900 véhicules par jour, soit plus de la moitié de la circulation observée sur l'A4 (16 000/jour) en Argonne. Cette circulation de 6 véhicules à la minute pourrait peut-être expliquer la rupture de flux entre la Pointe Ardennes et Signy-Sissonne par un effet répulsif. Il est à noter que nous retrouvons ce même signal de rupture chez les populations de chevreuils (étude In Situ).

Une autre explication pourrait être que les individus de Signy qui parviennent à rejoindre la Pointe Ardennes (et inversement) s'y reproduisent peu, à cause des densités relatives fortes de cerfs résidents dans chacun des massifs, et donc d'une compétition sexuelle importante.

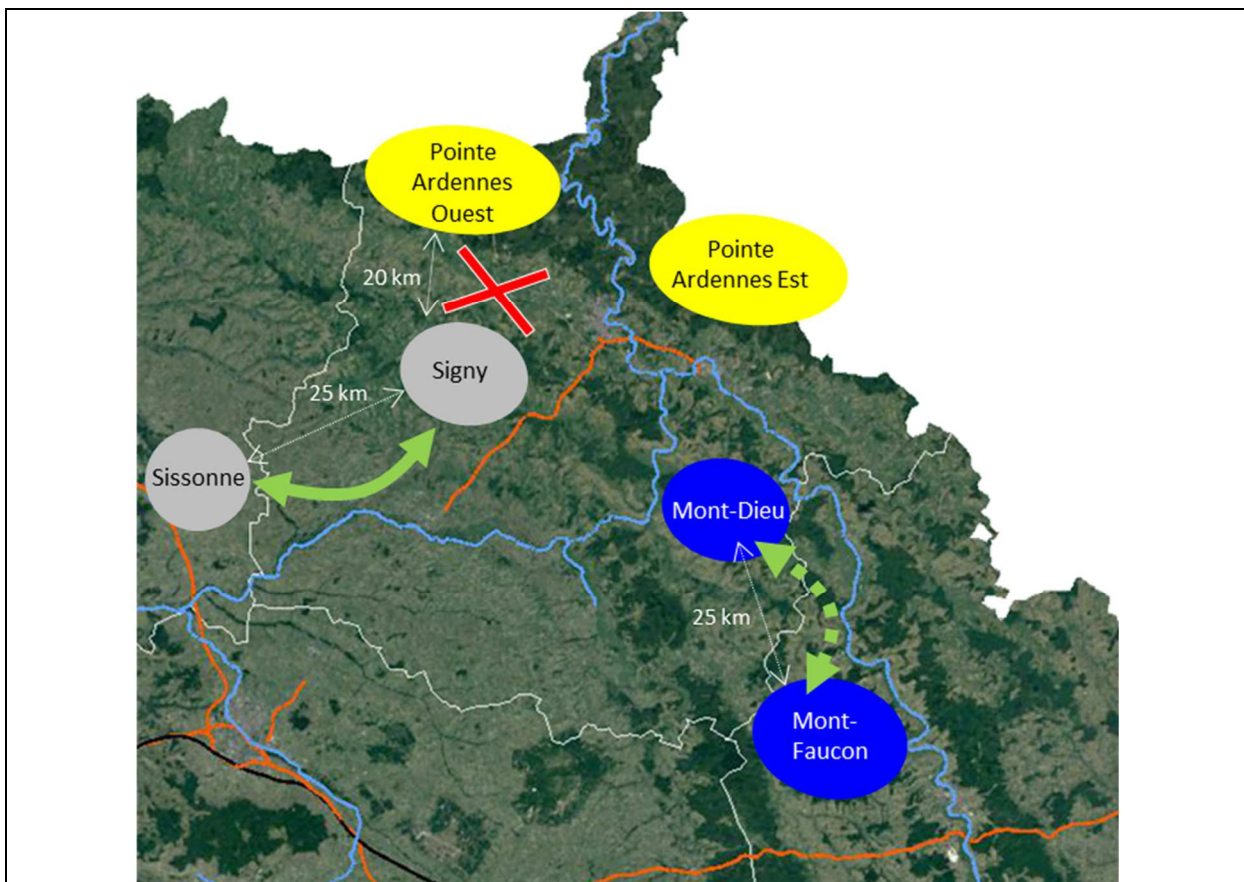
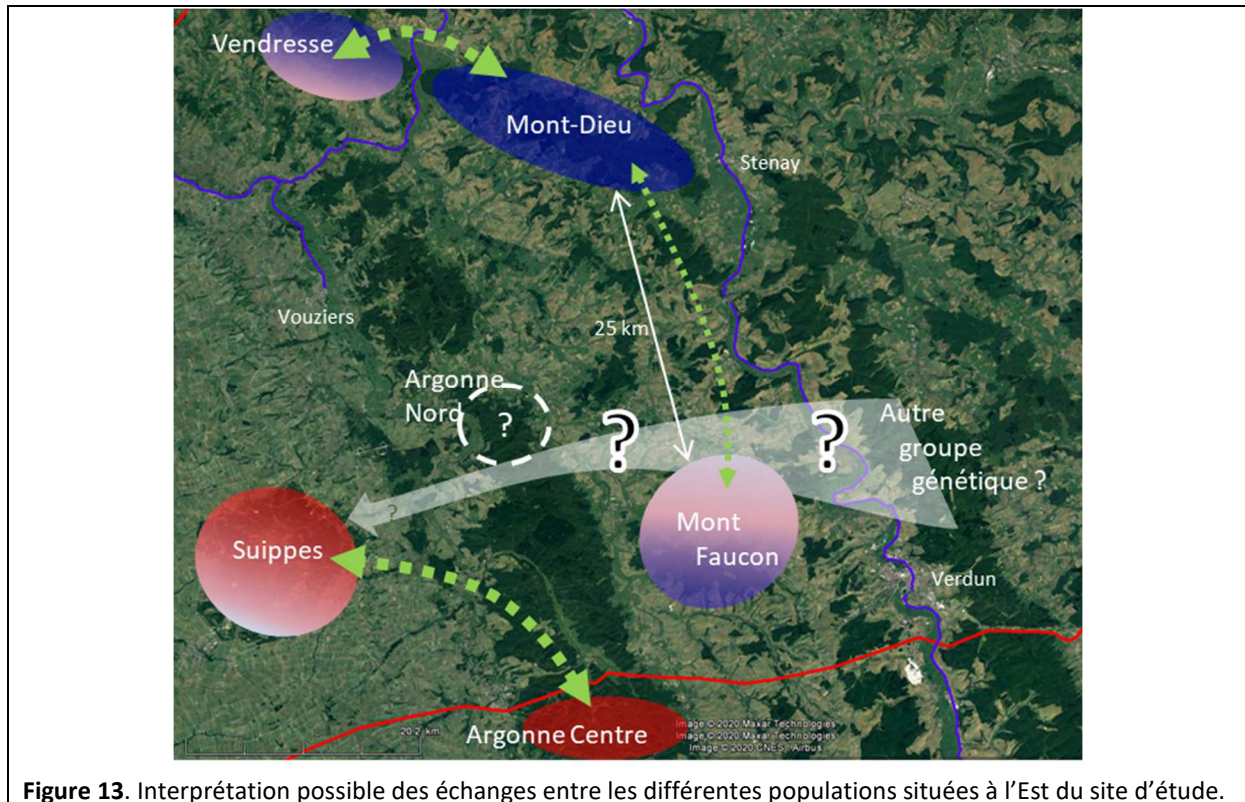


Figure 12. Récapitulatif des échanges génétiques entre massifs séparés par des milieux plus ou moins ouverts, sans ILT.

Comme observé entre les cerfs de Mont-Dieu et Venderesse, les cerfs de Mont-Dieu et de Mont-Faucon font aussi partie du même groupe génétique mais ils sont génétiquement moins proches entre eux que d'autres populations au sein d'un même groupe génétique. Cette sous-structure est difficilement interprétable en termes de barrière. L'espace qui sépare ces deux populations est en effet plutôt boisé et ne comporte pas de route susceptible de freiner le déplacement des cerfs. Une des hypothèses est que cette population de Mont-Faucon, et peut-être celle d'Argonne Nord voire de Suippes, pourrait être alimentée par une autre population non testée dans notre étude, la population de Verdun séparée par le canal de l'Est qui longe partiellement la Meuse dans cette zone (Figure 13).



4. La LGV

Nous ne pouvons pas nous prononcer sur la signification de l'absence de différenciation génétique entre les populations Argonne Sud et Argonne Centre. Celle-ci peut soit signifier que cette infrastructure est trop jeune (2007) pour entraîner un marquage génétique, soit que cette infrastructure est complètement perméable à la circulation des cerfs. Cette dernière hypothèse pourrait apparaître peu réaliste en comparaison des effets « filtre » observés sur les autres infrastructures. Toutefois, la surveillance photographique, réalisée par la FDC51 (B. Lebel), du passage à faune installé sur la LGV montre une bonne utilisation de ce transparent par les cerfs (entre 10 et 30 franchissements/an), notamment en période hivernale.

5. Le cumul des barrières

Sans surprise, le cumul des ILT marque fortement la structure génétique en empêchant les animaux de franchir ces espaces très anthropisés comme c'est le cas pour la montagne de Reims (A4, LGV et canal même si ce dernier est enterré sur 2 km) et pour le camp de Mailly (A26 et canal) qui, de plus, est ceinturé d'un grillage de 2 mètres de haut. Il est à noter que ces résultats sont largement confirmés par les études de la variabilité génétique chez les populations et par la présence marquée d'allèles privés, notamment au sein des populations de Mailly et de Reims.

IV. Individus migrants

Une fois la structure génétique analysée sur l'ensemble du jeu de données, nous avons cherché à identifier génétiquement les individus migrants, c'est-à-dire des individus collectés hors massif forestier (individus « isolés »), et des individus dont le profil génétique ne correspond pas à celui de la zone géographique dans laquelle il a été prélevé. Si, dans ce dernier cas, nous ne pouvons pas certifier que l'individu identifié comme « migrant » a effectivement parcouru la distance entre les deux populations concernées, cet individu est nécessairement issu d'un parent qui a effectué ce parcours.

Les résultats concernant les individus migrants sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4. Identification du profil génétique des individus « migrants ».

Individu collecté à :	Mailly	Signy	Sissonne	Pointe Est	Pte Ouest	Mont-Dieu	Vendresse	Mt Faucon	PNR Reims	Arg. Centre	Arg. Sud	Suippes	Arg. Nord	Hors Massif
Profil génétique de														
Mailly														
Signy-Sissonne					1	1	1							5
Pointe Ardennes		1				1	1						1	
MontDieu-Vend.										2	2	1		
Montagne Reims			1	1										1
Argonne Suippes		1		1			2	1	1				1	1

L'interprétation du tableau ci-dessus montre par exemple qu'un individu prélevé à Signy-l'Abbaye présente un profil fortement associé aux individus de la pointe des Ardennes et un autre individu présente le profil du groupe Argonne-Suippes.

Sur les 13 individus collectés hors massif, 7 ont été identifiés comme appartenant à un des 6 groupes génétiques : 5 de Signy-Sissonne, 1 de Argonne Suippes et 1 de la Montagne de Reims.

L'existence de ces individus « migrants » montre que, même si des barrières limitent fortement les échanges entre les populations de la région, aucune d'entre elles ne semble complètement

hermétique (**Figure 14**), à moins qu'elles ne soient contournées à leurs extrémités (possiblement le cas pour l'autoroute A34 et pour l'Est du canal des Ardennes qui se jette dans la Meuse).

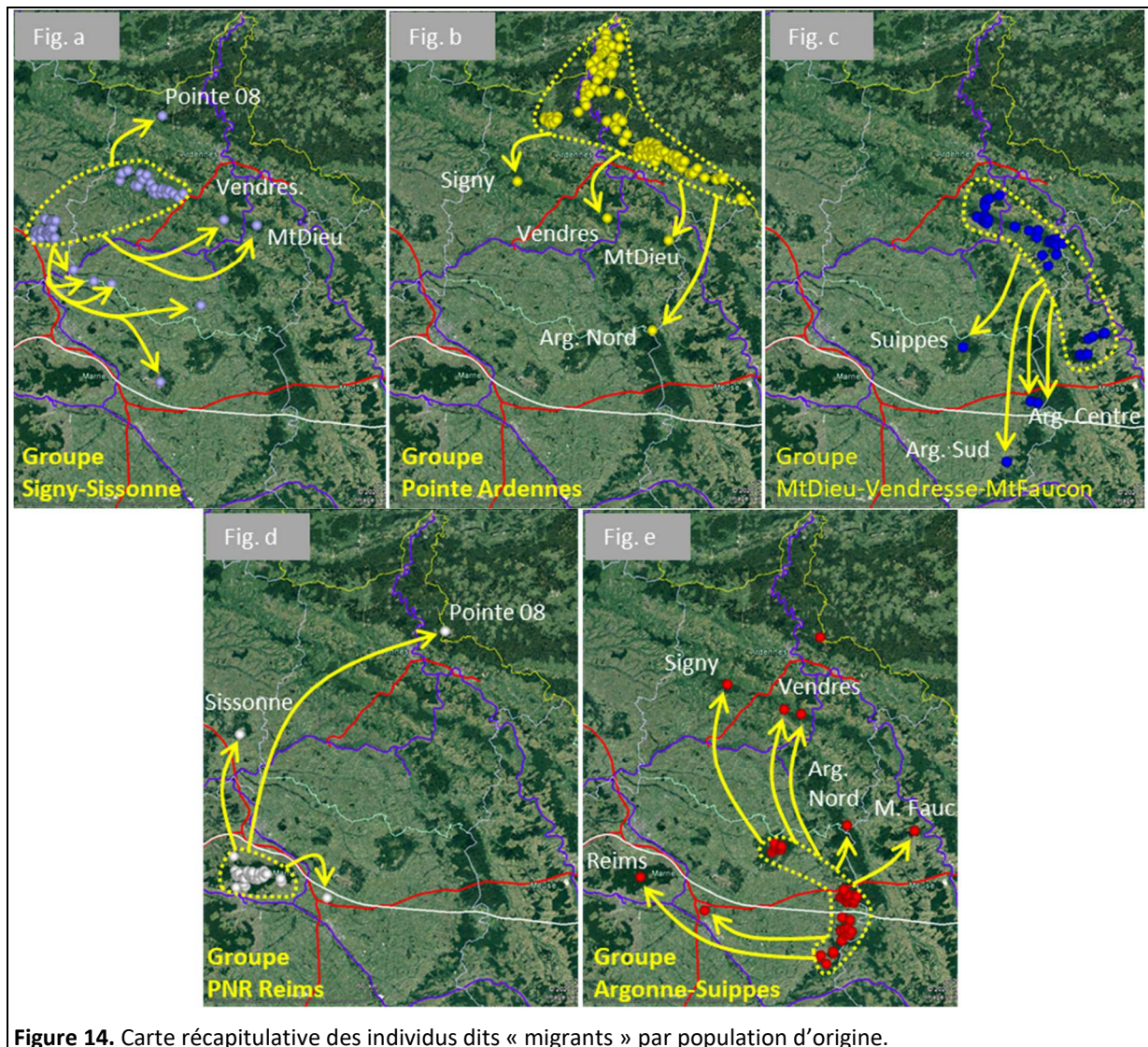


Figure 14. Carte récapitulative des individus dits « migrants » par population d'origine.

Il est par ailleurs à noter que ces données ne nous permettent pas de traduire des taux d'échange entre massifs du fait de leur dépendance aux effectifs d'échantillonnage. Toutefois, la comparaison des populations PNR51 (fig.d) et Argonne-Suippes (fig.e) semble traduire une plus grande facilité de dispersion à partir du massif de l'Argonne par rapport au massif de la Montagne de Reims. Ce résultat est à tempérer par le fait que nous n'avons pas échantillonné de populations à l'ouest de ce dernier.

V. Interprétations, conclusions

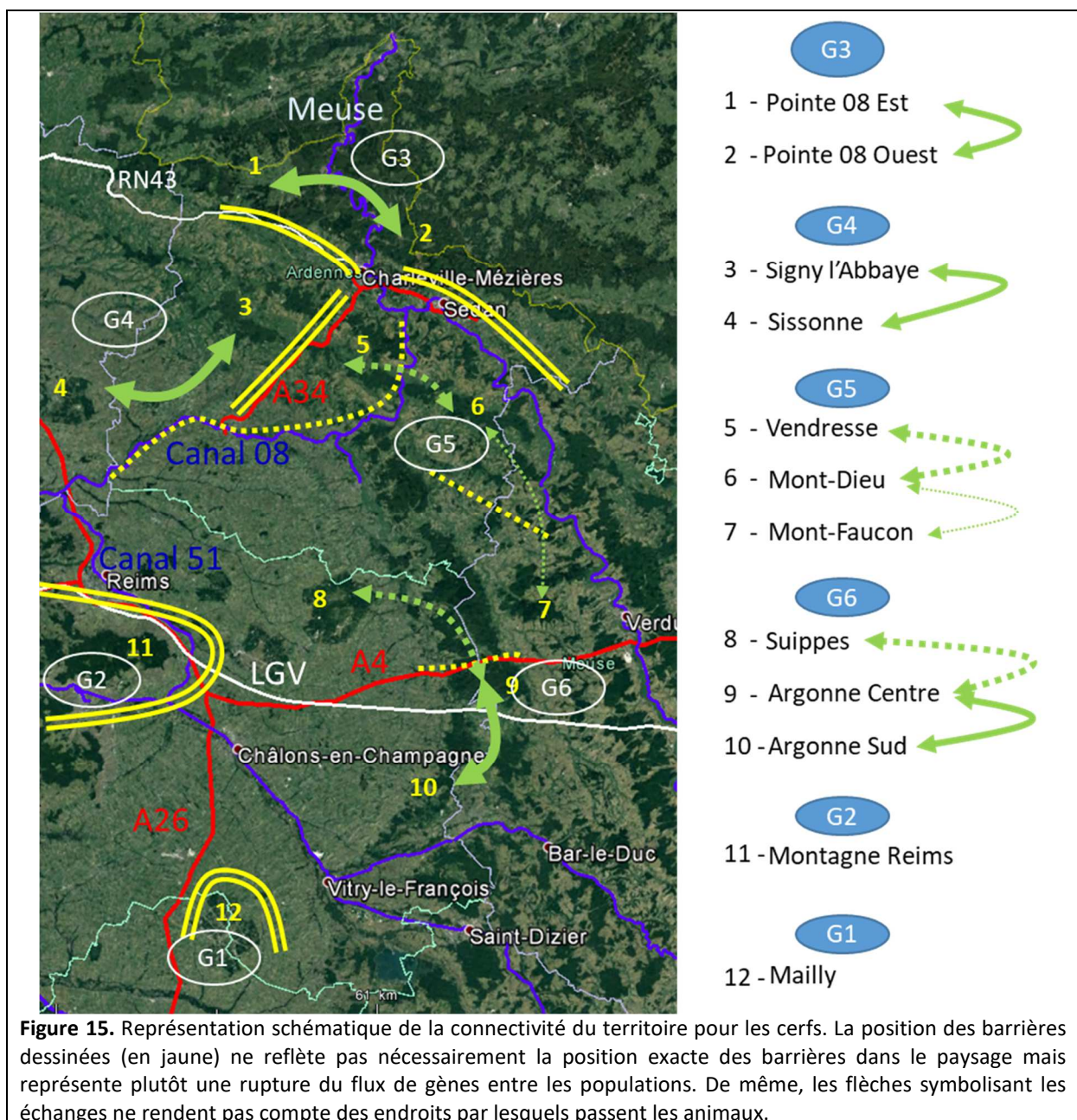
La très forte structuration génétique observée prouve que les flux génétiques entre les populations de cerfs de massifs différents sont, pour la majorité, faibles à très faibles. Au plan théorique, ce résultat peut être expliqué par les hypothèses non exclusives suivantes :

1) Les cerfs sont « par nature » peu mobiles, et par cette habitude sédentaire, ne dispersent que peu entre massifs et donc n'échangent que peu de gènes avec les populations des massifs voisins.

2) Compte tenu du mode particulier de reproduction des cerfs, les individus qui dispersent vers les autres massifs du paysage participent peu à la reproduction.

3) Les déplacements des cerfs sont limités par certaines barrières physiques du paysage que sont l'autoroute, la LGV, les canaux ou par l'absence d'espaces forestiers suffisamment grands pour permettre une connexion de proche en proche (dit de type « pas japonais ») entre deux massifs forestiers.

Au regard, par exemple, des fortes connexions observées entre les populations Pointe Ardennes Est et Ouest et surtout entre les populations de Signy l'Abbaye et de Sissonne, nous considérons que l'hypothèse de l'existence de barrières entre les 6 groupes génétiques joue un rôle prépondérant dans cette structuration génétique. Ainsi, nous considérons que les déplacements des animaux sont fortement limités, notamment par les infrastructures linéaires de transport, même si aucune d'entre elles n'est strictement hermétique (cf. migrants). Il est toutefois à noter que l'impact des ILT est très dépendant du site étudié.



IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES TRANSPARATEURS

I. Le suivi par collier GPS

1. La Martre

a. Sites d'étude et méthodes

➤ Sites d'étude

Le suivi GPS de la Martre des pins a été réalisé dans deux zones comportant des éléments barrière de nature différente dans les Ardennes et dans la Marne (**Figure 16**).

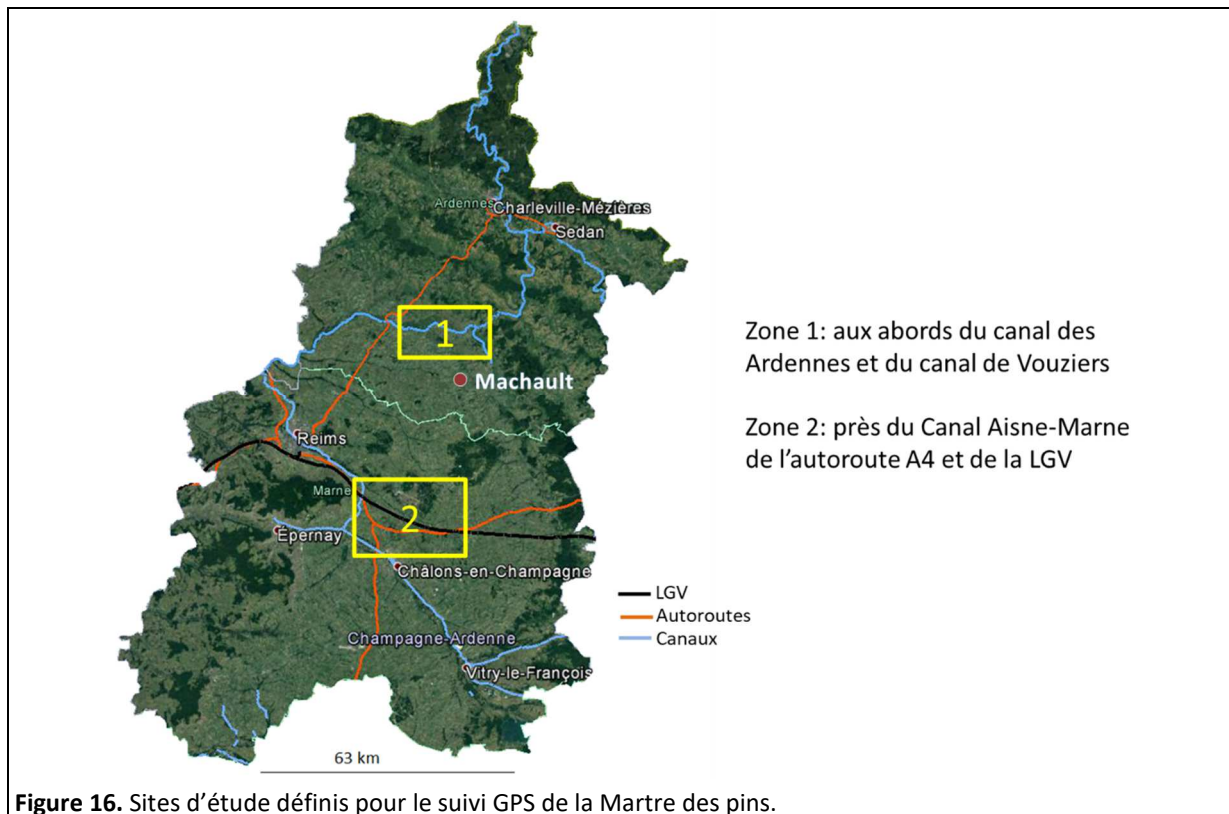


Figure 16. Sites d'étude définis pour le suivi GPS de la Martre des pins.

Une troisième zone d'étude était initialement prévue en plaine céréalière dans le secteur de Machault mais grâce aux données de déplacement obtenues dans les zones 1 et 2 qui comprennent elles aussi des zones de cultures intensives, nous avons pu réaliser des analyses sans avoir à redéployer nos pièges lors d'une nouvelle session.

➤ Capture et manipulation

Pour pouvoir être équipées de colliers GPS, les martres ont dû d'abord être capturées, soit par des piègeurs informés de l'étude qui nous ont prévenu d'une capture accidentelle de martre dans leur piège, soit pendant les sessions de piégeage organisées et réalisées par nos soins. A chacune de ces sessions, entre 25 et 45 cages-pièges à palette (30x30x100cm) ont été posées dans les endroits les plus propices à la capture de l'espèce et appâtées régulièrement à la viande. Les relevés ont eu lieu tous les matins à l'aube.

Les animaux capturés ont été anesthésiés par injection en intramusculaire d'un mélange de kétamine hydrochloride et de médétomidine hydrochloride, équipés de colliers GPS puis relâchés sur leur lieu de capture (**Figure 17**).



Figure 17. Pose de collier GPS sur une martre anesthésiée, puis relâchée.

➤ Acquisition des données

Les colliers sont programmés pour obtenir la localisation des animaux toutes les 5 minutes pendant 24 heures une fois par semaine. Une fois le parcours de l'animal enregistré, le téléchargement des données s'effectue au cours des 24 heures qui suivent, à l'aide d'un récepteur. Il faut alors s'approcher le plus près possible de l'animal pour que le transfert s'effectue (généralement à moins d'1 km). Ce pistage s'effectue à pied, en vélo, en voiture voire en survolant la zone à bord d'ULM multiaxes ou ULM hélicoptère (**Figure 18**).



Figure 18. Pistage des martres équipées de colliers GPS pour récupérer les données enregistrées, à vélo, en voiture ou en ULM.

b. Résultats du piégeage et récapitulatif des données obtenues

Quatre sessions de piégeage ont été réalisées à raison de deux sessions par site. Toutes sessions confondues, les pièges ont été armés durant 390 nuits, chiffre qui correspond donc également au nombre de relevés de pièges effectués (**Tableau 5**). Ces relevés ont été intégralement réalisés par l'équipe du CERFE lors des sessions 1 et 2. Par rapport aux autres sessions, la session 2 a duré plus longtemps que prévu puisque qu'une crue importante de l'Aisne (la rivière courant le long du canal) a empêché l'accès à la plupart des pièges pendant plusieurs semaines. Les sessions 3 et 4 ont très largement bénéficié de l'aide de piégeurs, gardes particuliers et chasseurs. Un grand merci à eux

pour le temps et l'énergie consacrés aux relevés matinaux. En plus de cette aide, plusieurs piégeurs de la zone A4/LGV/Canal 51 se sont impliqués dans l'étude en nous prévenant de la capture de martres dans leurs pièges.

Tableau 5. Récapitulatif des sessions de piégeage de martres réalisées aux abords du canal des Ardennes et dans la zone englobant le canal Aisne-Marne, l'autoroute A4, et la LGV. na=not available=Donnée non disponible.

session	site d'étude	date début	date de fin	durée (mois)	nb moyen pièges	nb de nuits de piégeage	nb martres capturées
1	Site 1	04/01/2017	01/04/2017	2.9	44	56	6
2	Site 1	01/06/2017	04/04/2018	10.2	26	106	5
3	Site 2	04/04/2018	15/08/2018	4.4	27	125	0
4	Site 2	08/01/2019	22/06/2019	5.5	27	103	3
Aide piégeurs	Site 2	21/12/2017	Déc. 2019	24	na	na	11
Total						390	25

Au total, 25 martres ont été équipées de colliers GPS (10 mâles et 15 femelles), y compris les 11 individus capturés par les piégeurs (**Tableau 6**). Neuf d'entre elles ont été recapturées au moins une fois, nous permettant à certaines occasions (fin de vie du collier, bon état de santé général) de prolonger leur suivi en posant un collier neuf.

Grâce aux plusieurs centaines d'heures de pistage effectuées, en voiture ou en ULM, 199 trajets exploitables ont été téléchargés (**Tableau 6**). Nous regrettons de n'avoir aucun trajet pour cinq individus, et le suivi s'est arrêté prématurément pour six autres martres qui ne comptabilisent que trois ou quatre trajets chacune, au lieu des neuf ou 10 attendus. Ces manquements s'expliquent par des défaillances techniques des colliers, par leur retrait anticipé (dysfonctionnement, blessure ou remplacement), la mort des individus ou la difficulté à retrouver les martres particulièrement mobiles.

Tableau 6. Récapitulatif des martres capturées dans les différents sites d'étude, du nombre de colliers portés et du nombre de trajets obtenus par martre. En rouge, les animaux pour lesquels aucun trajet n'a été téléchargé.

N°	Nom	Sexe	Date de capture	Site d'étude	Session de piégeage	Nb colliers portés	Nb trajets obtenus	Distance moyenne parcourue/24h (en mètres)
MM1	Matt	M	05/01/17	Canal 08	1	1	11	6452
MM2	Michka	M	14/02/17	Canal 08	1	2	9	5763
MF1	Macha	F	18/02/17	Canal 08	1	3	13	6866
MF2	Maline	F	19/02/17	Canal 08	1	1	2	5889
MF3	Miracle	F	03/03/17	Canal 08	1	1	8	3906
MF4	Mouette	F	08/03/17	Canal 08	1	1	3	2003
MF5	Manon	F	08/09/17	Canal 08	2	1	11	3834
MM3	Maden	M	15/09/17	Canal 08	2	2	18	4062
MF6	Morue	F	23/09/17	Canal 08	2	1	0	
MF7	Marmott	F	13/10/17	Canal 08	2	1	12	2962
MF8	Mamie	F	12/03/18	Canal 08	2	1	7	3000
MF9	Michèle	F	19/04/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	0	
MM4	Maurice	M	06/08/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	11	5824
MM5	Max	M	27/08/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	3	3444
MM6	Minou	M	29/08/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	0	
MM7	Marcel	M	06/09/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	3	3932
MF10	Méva	F	10/09/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	11	3757
MM8	Marc	M	10/09/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	10	4454
MM9	Milou	M	11/10/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	2	24	3480
MF11	Mélanie	F	22/11/18	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	0	
MM10	Marius	M	15/01/19	A4/LGV/Canal	4	1	4	7008
MF12	Mémère	F	15/01/19	A4/LGV/Canal	4	3	14	7799
MF13	Marie	F	05/03/19	A4/LGV/Canal	aide piégeur	2	4	4193
MF14	Moriane	F	30/03/19	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	0	
MF15	Marino	F	03/04/19	A4/LGV/Canal	4	1	12	2296
MM11	Manu	M	23/07/19	A4/LGV/Canal	aide piégeur	1	9	6011
Total						34	199	4644

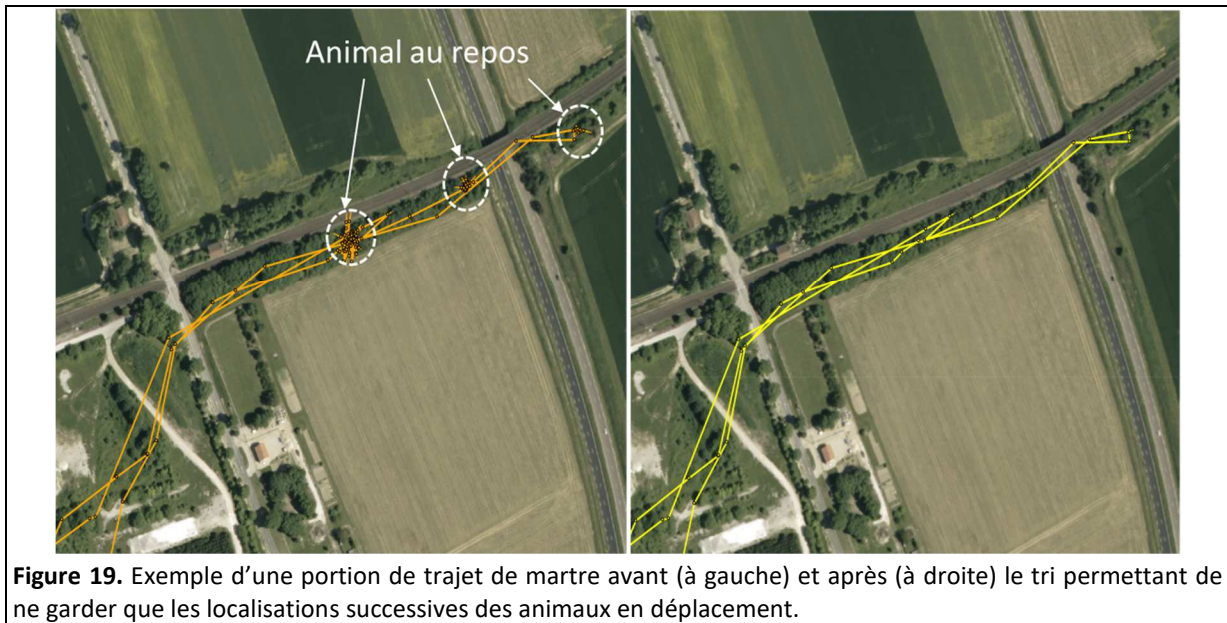
Les résultats qui suivent portent donc uniquement sur les données des 21 individus pour lesquels nous disposons au moins d'un trajet.

c. Précision des localisations, tri des données, préparation des trajets.

Pour chaque localisation obtenue, en plus des coordonnées GPS, un indice de précision et un indice d'activité de l'animal (codé en 0 pour inactif et 1 pour actif) sont également donnés. Grâce à des tests réalisés à partir de colliers laissés immobiles, nous avons pu déterminer une valeur seuil d'indice de précision au-delà de laquelle les points ne sont plus suffisamment précis pour être inclus dans les analyses. Un premier tri a ainsi été réalisé pour supprimer les points peu précis, sur la base de cet indice et suite à une vérification visuelle. Pour information, en moyenne, l'erreur entre une localisation enregistrée et la localisation réelle est de $7,7 \pm 6,0$ mètres avec une médiane de 6,1 mètres, et ce en milieu forestier (les précisions sont optimales en milieu ouvert). Les colliers sont

donc particulièrement performants en comparaison avec ceux actuellement disponibles sur le marché.

Un deuxième tri a été opéré pour discriminer les localisations enregistrées lorsque l'animal était au repos de celles enregistrées lors des déplacements. Grâce à l'indice d'activité 0/1, mais aussi en fonction des angles et des distances séparant les localisations successives, nous avons pu sélectionner uniquement les portions de trajets correspondant à du déplacement. C'est uniquement sur ces portions qu'ont été menées les analyses décrites ci-après (**Figure 19**).



d. Perméabilité des ILT (canaux, autoroutes et LGV)

La perméabilité des ILT a d'abord été estimée par l'observation directe des trajets obtenus, puis en comparant les traversées réellement effectuées avec celles de trajets aléatoires et enfin en examinant le comportement qu'adoptent les individus confrontés aux infrastructures

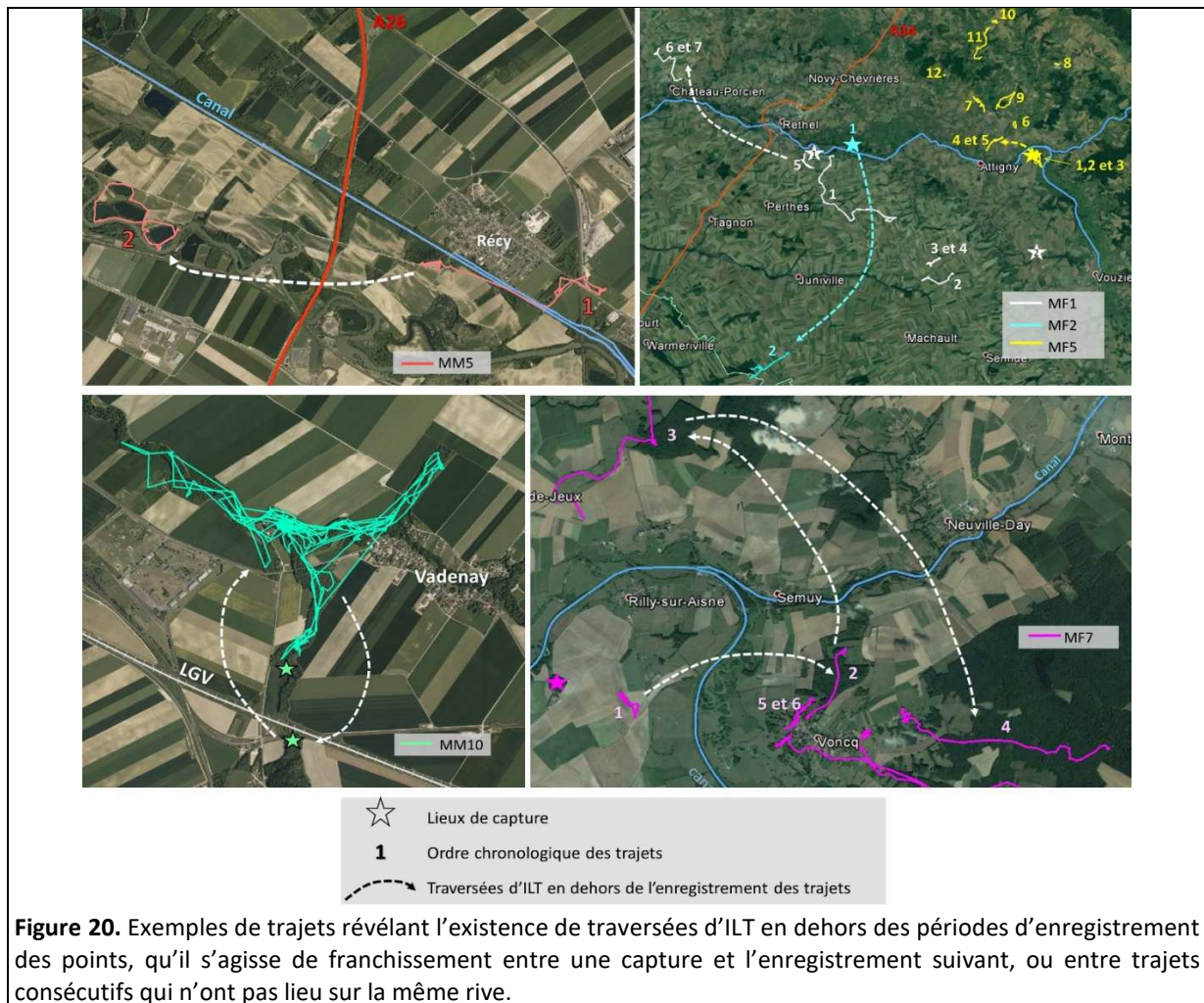
➤ Observations directes

Près des canaux, nous disposons des trajets de 13 individus, dont 11 ont traversé le canal au moins une fois (**Tableau 7**). Inévitablement, les franchissements n'ont pas tous été enregistrés par les colliers GPS (seulement un trajet de 24h par semaine) mais comme l'endroit de la capture et celui de l'enregistrement de certains trajets n'ont pas eu lieu sur la même rive du canal, nous pouvons en déduire qu'ils l'ont effectivement traversé mais sans savoir à quel endroit exactement (**Figure 20**). 26 franchissements ont tout de même eu lieu pendant les périodes d'enregistrement des déplacements, chez cinq individus dont quatre mâles et une femelle (**Tableau 7**).

Concernant les autoroutes, sur six individus qui s'y sont retrouvés à proximité, cinq l'ont franchi au moins une fois, dont un en dehors de la période d'enregistrement des trajets et quatre pour lesquels les franchissements ont été directement enregistrés (31 franchissements au total) (**Tableau 7**). Malgré nos efforts de piégeage à proximité de la LGV, seules deux martres ont été équipées de colliers GPS dans cette zone. Les 18 trajets obtenus chez ces deux individus ne montrent pas de traversée pendant l'enregistrement des points mais le fait que MM10 ait été recapturé une fois de l'autre côté de la LGV puis qu'il soit revenu implique au moins deux franchissements (**Figure 20**).

Tableau 7. Récapitulatif des franchissements directs et indirects d'ILT.

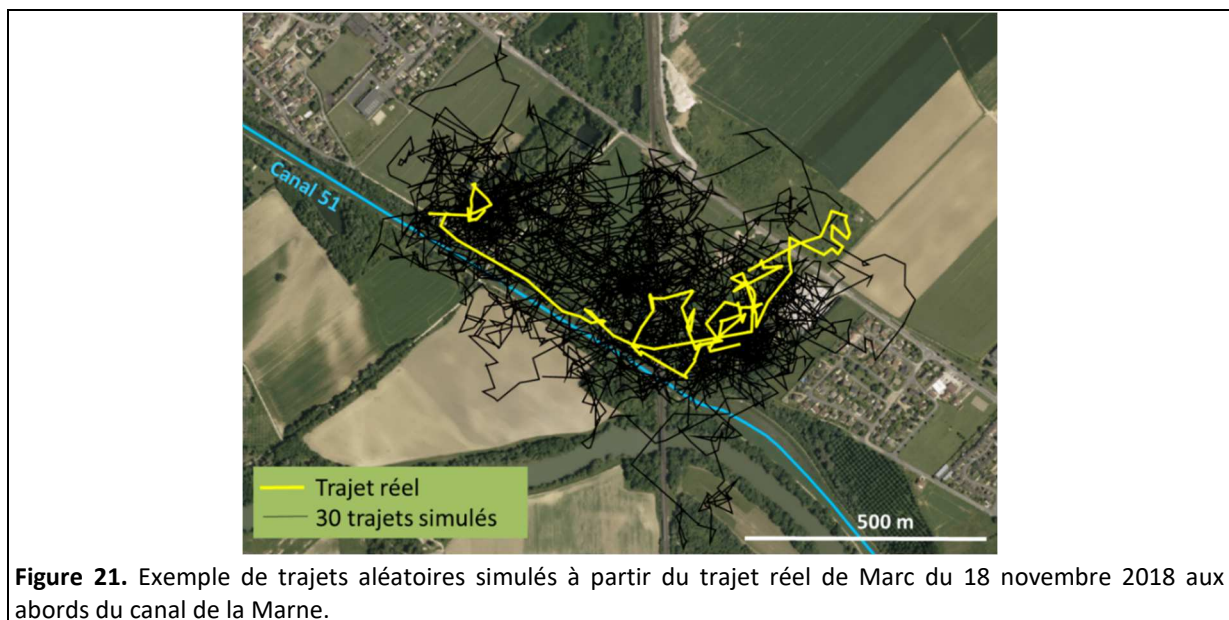
Indiv.	Nom	ILT	Sexe	Nb. franch. Obs.	Nb. franch. déduits
MM1	Matt	C08	M	12	0
MM2	Michka	C08	M	5	0
MF1	Macha	C08	F	0	1
MF2	Maline	C08	F	0	1
MF3	Miracle	C08	F	0	1
MF4	Mouette	C08	F	0	1
MF5	Manon	C08	F	0	1
MM3	Maden	C08	M	0	0
MF7	Marmotte	C08	F	0	3
MF8	Mamie	C08	F	4	0
MM5	Max	C51	M	1	0
MM8	Marc	C51	M	4	0
MM9	Milou	C51	M	0	0
TOTAL CANAUX				26	8
MM4	Maurice	A4	M	2	0
MM5	Max	A26	M	0	1
MF10	Méva	A4	F	25	0
MM9	Milou	A26	M	0	0
MF13	Marie	A4	F	2	0
MF15	Marino	A4	F	2	0
TOTAL AUTOROUTES				31	1
MM10	Marius	LGV	M	0	2
MF12	Mémère	LGV	F	0	0
TOTAL LGV				0	2



Ces observations directes montrent que ni les canaux (tout du moins les portions concernées par le suivi des martres), ni les autoroutes, ni la LGV ne constituent des barrières infranchissables pour les martres. Nous avons par la suite cherché à savoir si ces infrastructures pouvaient néanmoins agir comme un frein aux déplacements des individus.

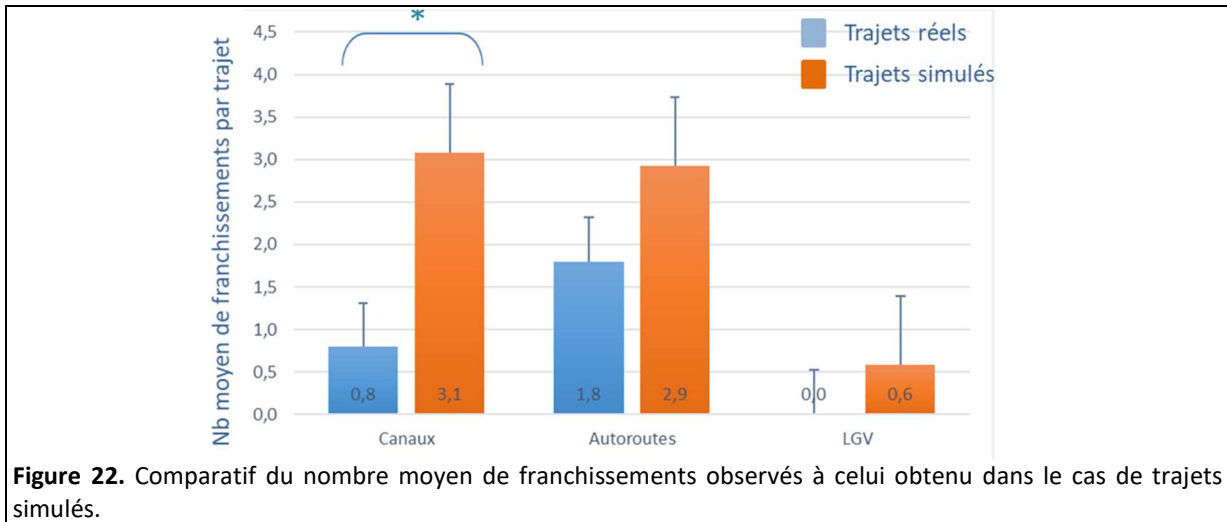
➤ Comparaison des trajets réels à des trajets aléatoires

Des trajets aléatoires ont été simulés à partir des trajets observés, avec pour objectif de comparer le nombre de traversées observées au nombre de traversées théoriques obtenu s'il n'y avait aucun frein au déplacement dans le paysage. 30 trajets aléatoires ont ainsi été créés pour chacun des 199 trajets observés grâce à un SIG, sachant que les points de départ et d'arrivée des trajets simulés sont les mêmes que les trajets réels et que les segments observés sont simplement intervertis les uns par rapport aux autres (un segment = ligne droite reliant deux points successifs) (**Figure 21**).



Pour éviter d'inclure dans les analyses des trajets trop éloignés des ILT, ce qui biaiserait les résultats, seuls les ensembles de trajets (simulés ou non) qui présentent au moins un franchissement ont été gardés. Par exemple, le trajet de Marc du 18 novembre 2018 ne comporte pas de traversée (**Figure 21**) mais comme au moins un de ses 30 trajets simulés présente un franchissement, les 31 trajets sont gardés pour les analyses. 55 trajets réels ont ainsi été retenus, dont 15 aux abords d'une autoroute, 34 près d'un canal, et 6 à proximité de la LGV. Le nombre de franchissements réels observés sur ces 55 trajets a alors été comparé avec celui des 55*30 trajets simulés avec un test de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Par rapport aux trajets réellement observés, 4 fois plus de traversées de canaux ont été comptabilisées dans le cas des trajets simulés (**Figure 22**). Autrement dit, il y a significativement plus de traversées lorsqu'on ne prend pas en compte le paysage et donc la présence de cette ILT ($W = 22500$, $p < 0.01$). Concernant les autoroutes et la LGV, même si le nombre de traversées théorique est supérieur au nombre observé, cette différence n'est pas significative (autoroutes : $W = 3471.5$, $p = 0.8$; LGV : $W = 609$, $p = 0.36$) (figure). Ces résultats permettent donc de conclure à un effet barrière uniquement dans le cas des canaux.

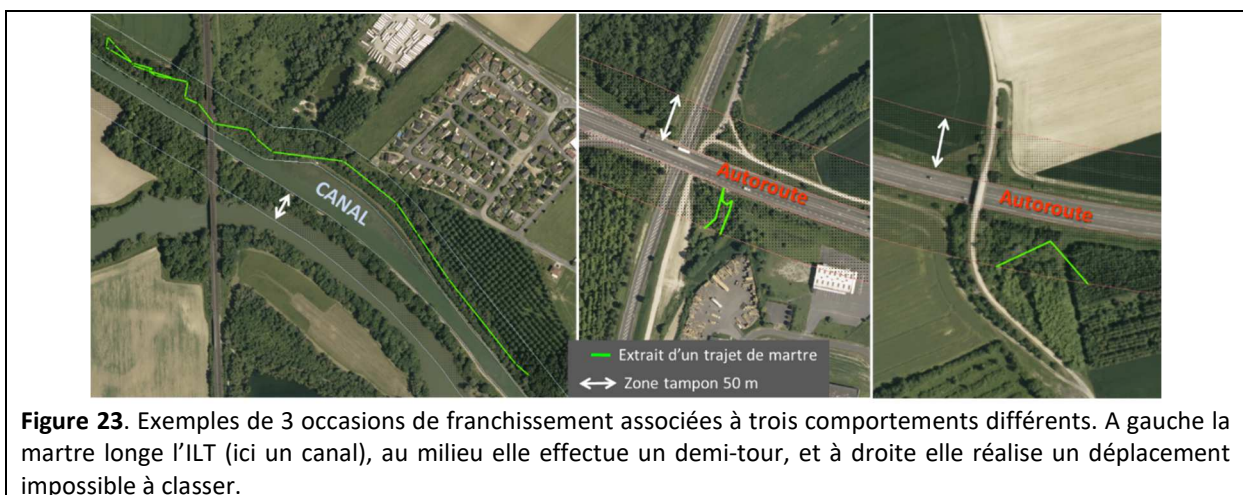


Ces résultats sont à prendre avec précaution puisque les analyses ne prennent pas en compte d'autres éléments du paysage que les ILT. En conditions réelles une martre peut choisir de rester sur une rive car elle y trouve un habitat de qualité, ou encore parce qu'il y a un habitat répulsif de l'autre côté, et pas seulement parce qu'il y a une ILT à franchir. Il est donc difficile de discriminer l'effet qualité de l'habitat de l'effet barrière. Il s'agit donc ici d'une tendance générale lorsque les individus sont confrontés à l'ensemble « mosaïque d'habitat + ILT ».

➤ Analyses comportementales

Pour conforter nos résultats et en apprendre davantage sur les comportements qu'adoptent les individus face aux ILT, nous avons examiné les portions de trajet qui ont eu lieu à moins de 50 m d'une des rives. Cet évènement est alors dénommé une « occasion de franchissement ». Autrement dit, le nombre d'occasions de franchissement pour une martre équivaut au nombre de fois où celle-ci pénètre dans une zone située à moins de 50 m d'une rive de l'ILT sachant que 1) si l'animal ressort de la zone et y rentre à nouveau, l'évènement est considéré comme une nouvelle occasion, 2) seuls les déplacements de plus de 50 m situés dans la zone sont pris en compte.

Chaque occasion de franchissement a ainsi été répertoriée et associée à un comportement dans l'une des quatre catégories suivantes : soit l'animal « longe » l'ILT, soit il fait « demi-tour », il elle la « traverse » (quel que soit le passage emprunté), soit le déplacement est inclassable et est alors noté « indéterminé » (**Figure 23**).



Au total, 155 occasions de franchissement ont été répertoriées, dont 96 concernent les canaux et 59 les autoroutes (**Tableau 8**). Aucune des deux martres suivies près de la LGV ne s'est rapprochée à moins de 50 m de la voie ferrée, la distance la plus proche ayant été enregistrée à 95 mètres.

Aux abords du canal, il s'avère que le nombre d'occasions de franchissement est généralement bien supérieur au nombre de traversées effectives (**Tableau 8**). Ainsi, même si les martres utilisent les bords du canal en période d'activité, et qu'elles y passent beaucoup de temps, elles ne le franchissent pas fréquemment. MF3 par exemple, compte 18 occasions de franchissement (presque 22 heures d'activité au bord du canal) sur seulement 8 trajets, et aucune traversée directement observée (**Tableau 8, Figure 24**). Globalement, toutes martres confondues, seules 26% des occasions aboutissent à la traversée d'un canal, contre 40% pour une autoroute. À noter le trajet particulier de MM9 au cours duquel ont eu lieu ses 2 seules occasions de franchissement : une au bord de l'A26 qu'il a longé sur 1141 m, l'autre sur une rive du canal où il a finalement fait demi-tour (**Figure 24**).

Tableau 8. Récapitulatif des données relatives aux occasions de franchissement, au temps passé près des ILT, aux distances qui y sont effectuées et au nombre de traversées finalement observées.

Indiv.	Nom	ILT	Nb. de trajets avec occasion	Nb. d'occasions	Tps cumulé à - de 50m	Dist. cumulées à - de 50 m (m)	Nb. de franchissements
MM1	Matt	C08	10	21	11:34	11099	12
MM2	Michka	C08	8	15	10:00	4980	5
MF2	Maline	C08	1	3	2:25	828	0
MF3	Miracle	C08	6	18	21:55	8321	0
MF4	Mouette	C08	2	5	2:20	584	0
MF5	Manon	C08	1	1	0:55	749	0
MM3	Maden	C08	1	2	0:45	1460	0
MF8	Mamie	C08	3	5	6:07	2305	4
MM5	Max	C51	1	1	0:15	835	1
MM8	Marc	C51	8	24	23:05	12069	4
MM9	Milou	C51	1	1	0:25	599	0
MM4	Maurice	A4	3	6	1:50	1156	2
MF10	Méva	A4	9	40	4:50	11101	25
MM9	Milou	A26	1	5	1:40	1141	0
MF13	Marie	A4	1	5	1:30	668	2
MF15	Marino	A4	3	3	1:00	389	2

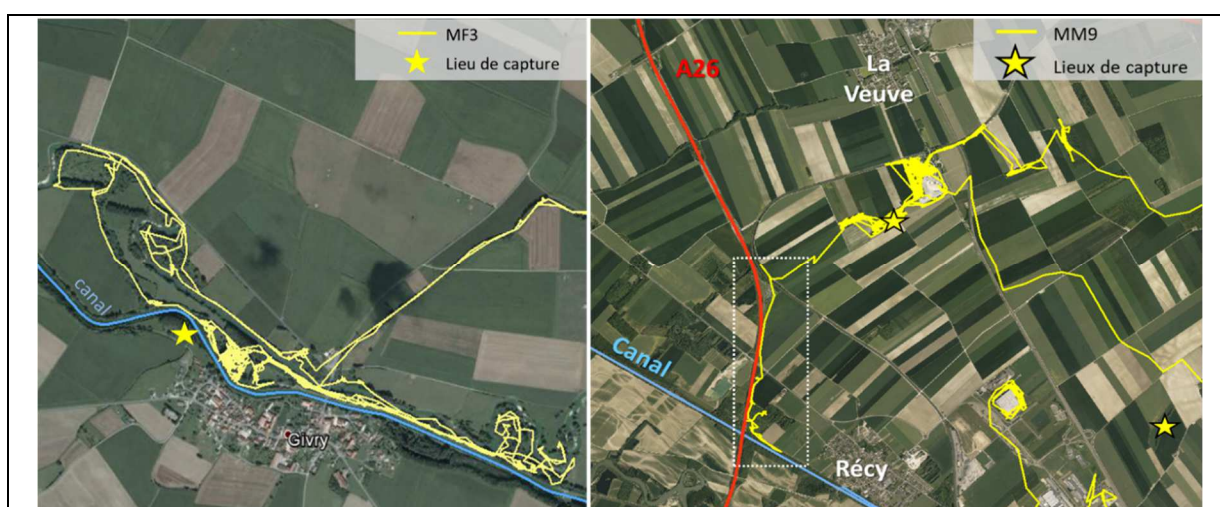
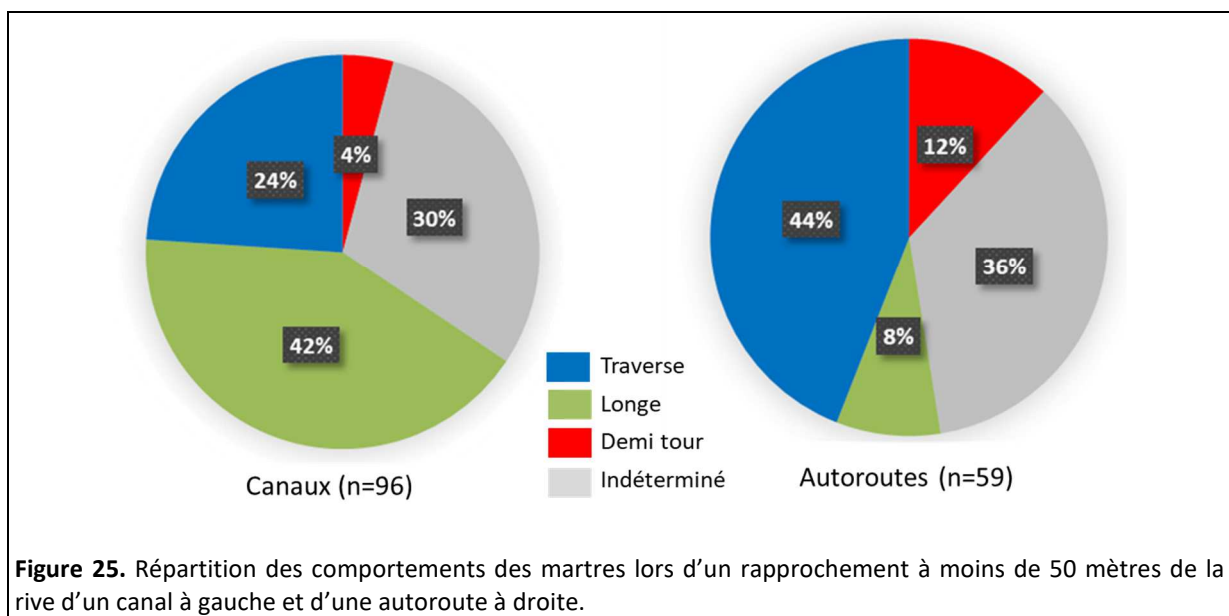


Figure 24. A gauche, trajets de la martre MF3 à proximité directe du canal des Ardennes. Malgré tout le temps passé à moins de 50 m de la Berge, aucune traversée n'a été enregistrée lors des trajets (elle l'a cependant franchi au moins une fois entre sa capture et le 1er enregistrement). A droite, trajets de MM9 révélant deux occasions de franchissement (une concernant l'A26, l'autre le canal de la Marne).

Lorsqu'on s'intéresse aux « décisions » prises par les individus lorsqu'ils sont à moins de 50 m du bord d'une ILT, on s'aperçoit que les martres n'ont pas le même comportement près des canaux qu'à proximité des autoroutes ($\chi^2= 21.921$, $p\text{-value}<0.01$). En effet elles longent plus fréquemment les canaux que les autoroutes et les franchissent moins fréquemment (**Figure 25**). Ces résultats sont cohérents avec l'analyse précédente suggérant que les autoroutes n'ont que peu d'effet barrière sur les déplacements des martres contrairement aux canaux qui sont moins facilement franchis. Ces derniers ont en revanche tendance à diriger les déplacements puisque dans 42% des cas, lorsqu'une martre s'approche à moins de 50 m d'un canal, elle longe la berge. Néanmoins, une nouvelle fois, la ripisylve qui borde généralement les canaux peut avoir un effet confondu à l'effet barrière. Nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse qu'une martre reste sur une rive uniquement parce que le milieu lui convient et non pas parce que le canal l'empêche d'aller ailleurs. Autrement dit, à l'instar des haies, les ripisylves bordant les canaux pourraient agir comme des « guides » aux déplacements, minimisant finalement les « envies de traverser ».



Les données disponibles aux abords de la LGV ne nous permettent pas d'aller plus loin que le constat de traversées. En revanche, cinq individus ont été confrontés à des voies ferrées de tailles modestes. Les observations directes montrent qu'elles sont régulièrement traversées et que l'ensemble voie ferrée et végétation haute associée semble agir, tout comme les haies et ripisylves, comme des guides au déplacements en milieu ouvert (**Figure 26**). Par ailleurs, au moins trois gîtes y sont localisés.



e. Identification et caractérisation des transpositeurs utilisés pour franchir les ILT

Afin d'identifier et caractériser les endroits qu'utilisent les animaux pour traverser les ILT, nous avons logiquement sélectionné uniquement les trajets comportant au moins un franchissement, soit 28 trajets. Pour rappel, 57 franchissements au total ont été observés au cours de ces trajets, dont 26 de canaux (chez cinq individus) et 31 d'autoroutes chez 4 individus différents (**Tableau 9**).

Tableau 9. Récapitulatif des données relatives aux franchissements

Indiv.	Nom	ILT	nb trajets avec franchissement	nb franchissements	nb d'aller-retour	nb zones de traversée	mode de traversée majoritaire
MM1	Matt	C08	6	12	6	3	nage
MM2	Michka	C08	5	5	0	2	nage
MF8	Mamie	C08	3	4	1	4	écluse
MM5	Max	C51	1	1	0	1	pont agricole
MM8	Marc	C51	2	4	2	3	pont agricole
MM4	Maurice	A4	1	2	1	1	pont agricole
MF10	Méva	A4	7	25	10	3	pont routier inférieur
MF13	Marie	A4	1	2	1	2	pont routier supérieur
MF15	Marino	A4	2	2	0	2	buse
		Total	28	57	21	21	

Dans 69% des cas, les franchissements des canaux sont des aller-retours effectués au cours du même trajet (donc en 24h). Autrement dit, dans 31% des cas, le trajet ne finit pas sur la même rive qu'au départ. 80 % des franchissements d'autoroute sont quant à eux attribués à une seule et même martre nommée Méva (MF10). Chez cet individu, ce sont en très grande majorité des aller-retours qui sont observés (10 allers-retours, donc 20 franchissements sur les 25 observés). Deux autres martres ont réalisé un aller-retour chacun et Marino a franchi deux fois l'A4 lors de deux allers simples.

Qu'il s'agisse des canaux ou des autoroutes, certaines martres utilisent préférentiellement des endroits précis pour traverser les ILT, puisque le nombre de zones de traversée est parfois inférieur au nombre de franchissements effectués (**Tableau 9**)

➤ Canaux

65 % des traversées de canaux sont attribuées à deux individus aux domaines vitaux contigus, MM1 (Matt) et MM2 (Michka), qui évoluent à proximité du canal des Ardennes. Leurs trajets et les franchissements observés chez ces deux individus ont donc fait l'objet d'analyses particulières donnant lieu à deux rapports de stage, de M1 pour le premier (Reitz 2017) et de M2 pour le deuxième (Gautrelet 2017). Les résultats de ces travaux sont donc en partie résumés ci-dessous.

MM1 a traversé le canal des Ardennes à 12 reprises (à la nage) mais seulement dans 3 zones différentes, contre 16 traversées de la rivière dans 11 sites différents (**Figure 27**). Cette rivière située près du canal, d'une largeur et d'un débit supérieurs à celui-ci, compte donc davantage de traversées et de zones de franchissement, ce qui laisse à penser qu'elle est nettement plus perméable au passage des martres que le canal. De même, MM2 a traversé 5 fois le canal à seulement 2 endroits différents, alors qu'il a traversé la rivière 13 fois à 11 endroits différents (**Figure 27**).

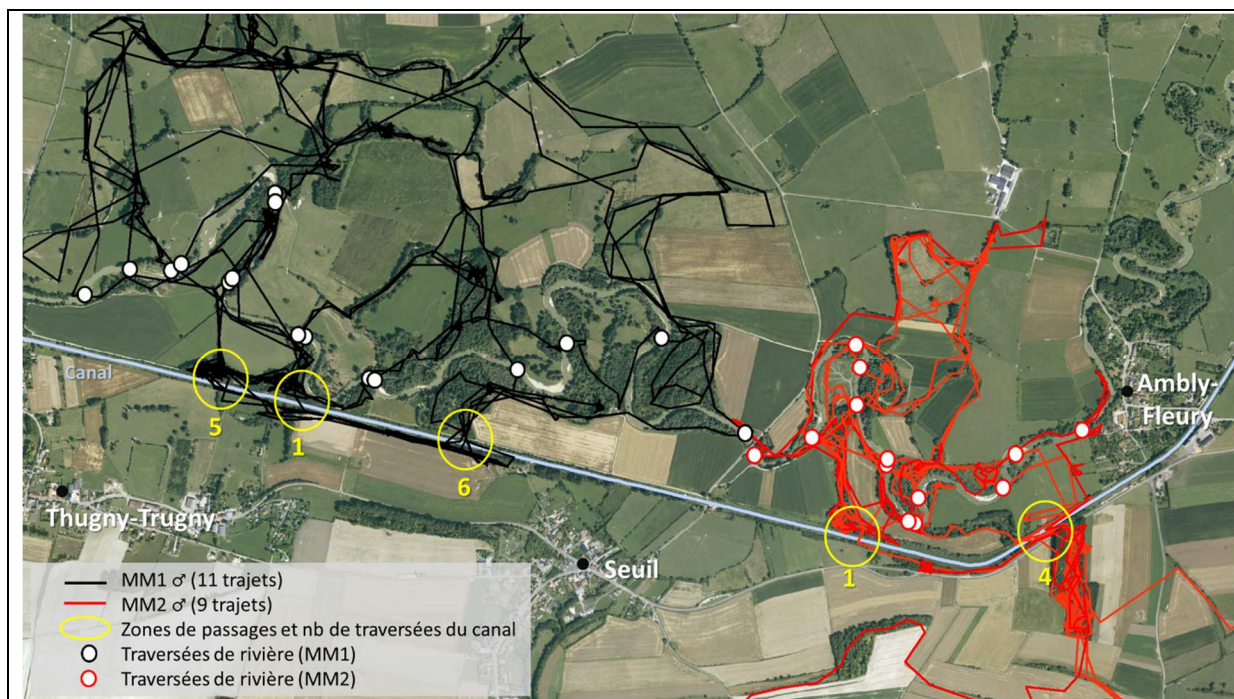


Figure 27. Représentation des trajets des deux mâles révélant l'existence de zones préférentielles pour la traversée du canal des Ardennes.

MM1 et MM2 ont semble-t-il effectué toutes leurs traversées à la nage, en plein hiver, sans que le canal ne soit gelé. Ce mode de traversée est peut-être lié au fait qu'il n'y a que peu de ponts disponibles au sein de leur domaine vital. Par ailleurs, le seul pont présent entre les deux domaines vitaux est très peu végétalisé. Les deux martres utilisent indifféremment des berges de palplanches et des berges en terre pour remonter, qu'elles soient verticales ou pas. Les berges utilisées présentent néanmoins une végétation haute (supérieure à 1,50 mètre) et retombant vers l'eau, ce qui peut fournir des prises idéales pour des martres qui sont, par définition, habituées à l'escalade (**Figure 28**). Le facteur principal qui semble conditionner les franchissements de MM1 et MM2 est la présence d'éléments boisés de part et d'autre du canal.



Figure 28. Photographies des berges des zones préférentielles utilisées par MM1 et MM2 pour franchir le canal des Ardennes (Gautrelet 2017).

Les trois autres martres qui ont franchi un canal ne montrent pas de zones préférentielles de façon aussi flagrante, mais peu de franchissements ont finalement été observés chez ces individus (**Tableau 9**). Par exemple, la femelle MF8 a franchi 4 fois le canal à 4 endroits différents (**Figure 29**), ce qui indiquerait au premier abord une absence de zones de passages préférentielles. Cependant, 2 franchissements ont probablement eu lieu sur 2 écluses différentes, ce qui suggère que les passerelles métalliques des écluses peuvent être utilisées préférentiellement lorsqu'elles existent.

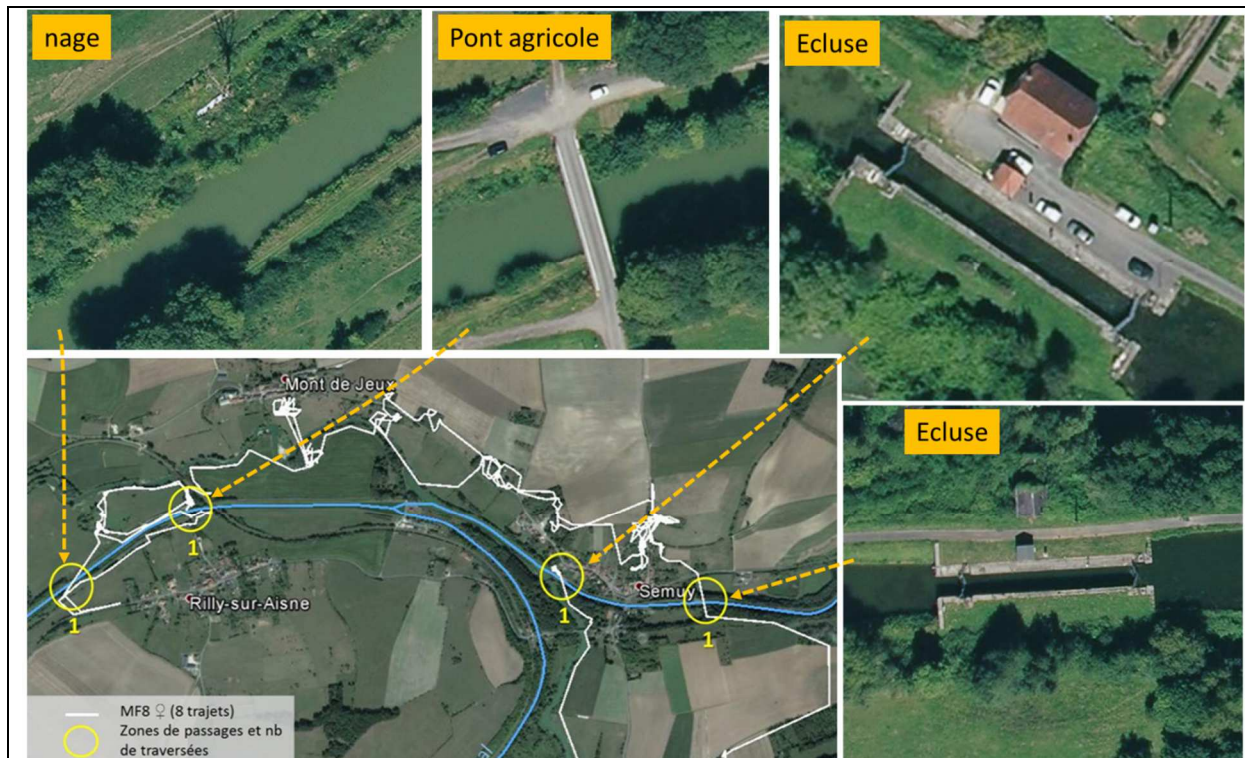


Figure 29. Représentation des trajets de MF8 montrant des traversées du canal à 4 reprises à 4 endroits différents. Les deux traversées à Semuy ont probablement eu lieu sur des passerelles métalliques au niveau d'écluses.

Quatre franchissements, réalisés en deux allers-retours lors de deux trajets différents, ont également été observés chez MM8, un mâle au domaine vital assez stable accolé au canal de la Marne (**Figure 30**). Une traversée aller a eu lieu à la nage et le retour sur un pont agricole et le second aller-retour via un même pont de voie ferrée (**Figure 30**). Une autre martre équipée (MM5), certainement en pleine dispersion, a également utilisé le même pont agricole que MM8 lors de l'enregistrement de son premier trajet.

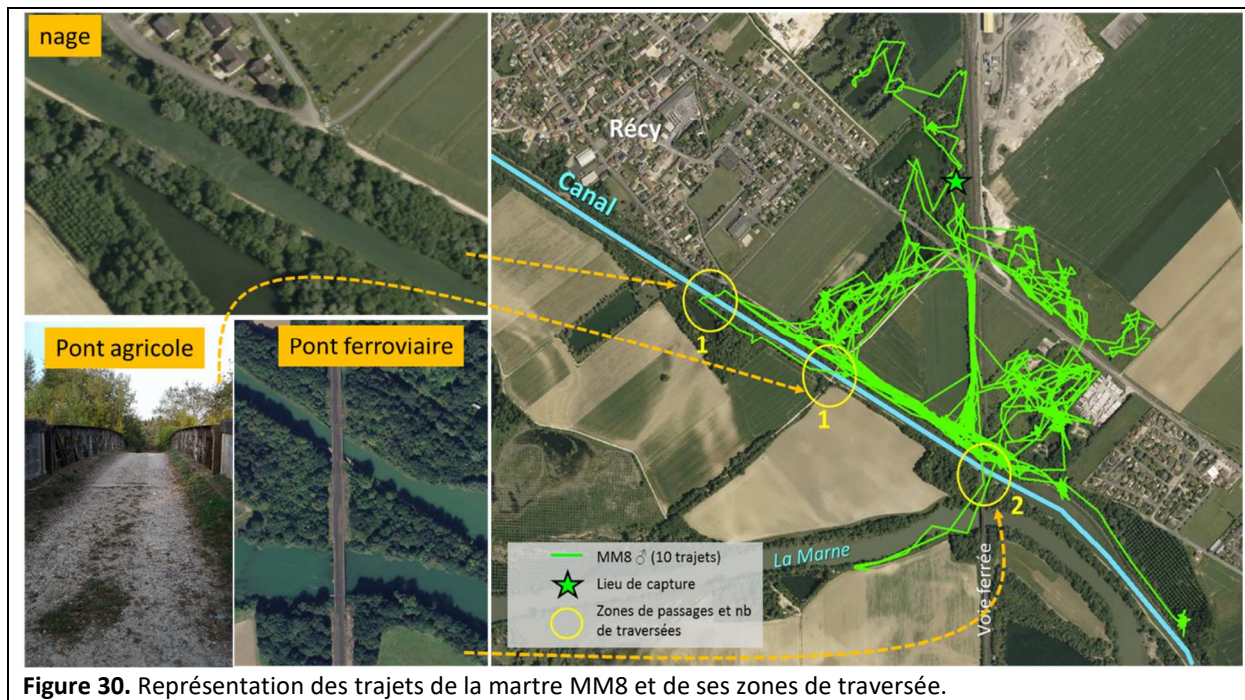


Figure 30. Représentation des trajets de la martre MM8 et de ses zones de traversée.

Finalement, même si les canaux agissent comme un frein au déplacement des martres et même s'ils sont moins perméables qu'une rivière imposante, ils n'empêchent pas les individus de traverser, la condition première étant la présence de zones boisées de part et d'autre du canal. Si des écluses, ou des ponts agricoles et ferroviaires sont disponibles, les martres peuvent les utiliser, mais ils ne sont pas obligatoires. En effet, les quatre martres pour lesquelles nous avons au moins quatre trajets ont réalisé au minimum une traversée à la nage. Elles semblent donc tout à fait capables de remonter des berges verticales de palplanches, à condition qu'une végétation retombante leur permette de trouver des prises.

➤ Autoroutes

Les franchissements d'autoroute ont surtout été observés chez Méva (MF10, 25 franchissements sur 31 au total, en 7 trajets), qui a élu domicile au niveau de l'aire de péage de la Veuve dans la Marne (autoroute A4). C'est la première fois que nous observons un tel milieu de vie chez une martre qui semble particulièrement habituée au trafic routier. Ces franchissements ont eu lieu à 3 endroits distincts : 21 sous un pont autoroutier surplombant l'autoroute, 1 certainement dans une buse de drainage et 3 probablement en traversant directement l'autoroute (Figure 31).

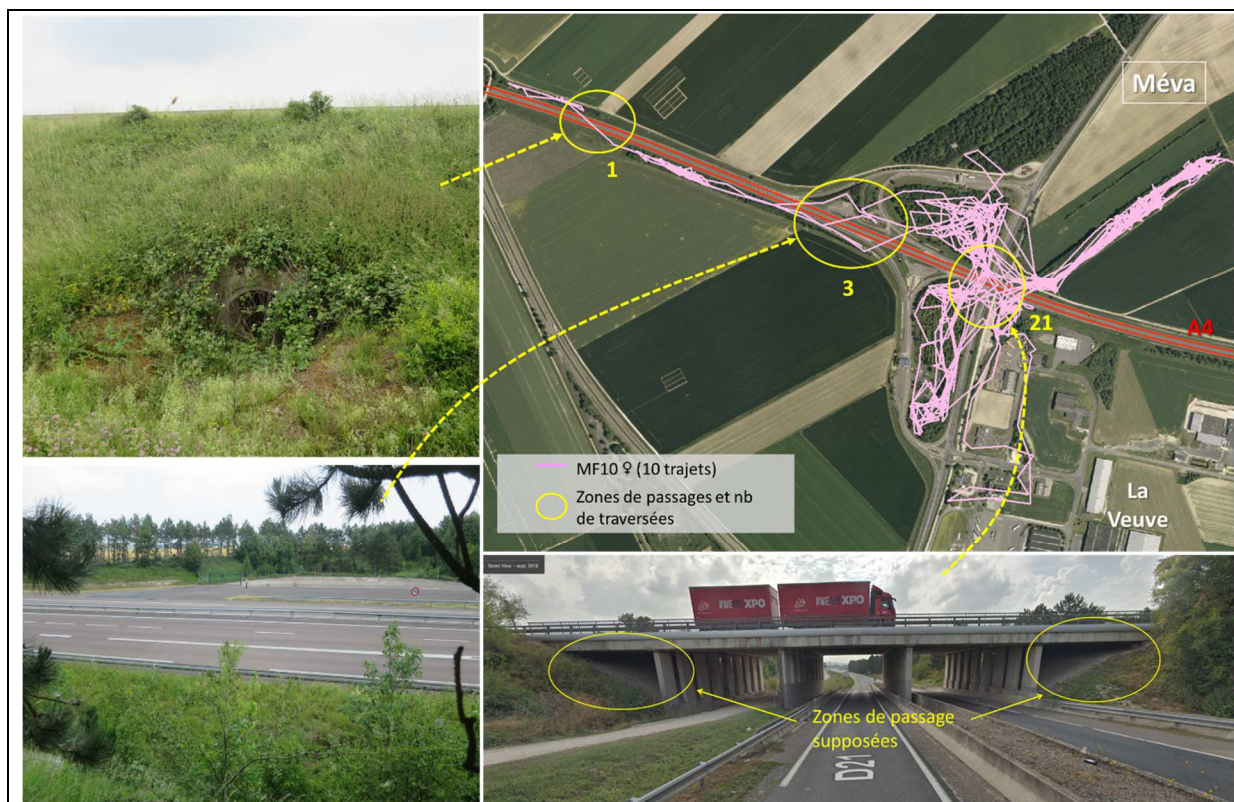


Figure 31. Représentation de 9 trajets de MF10 centrés sur le pont qu'elle utilise fréquemment pour traverser l'autoroute.

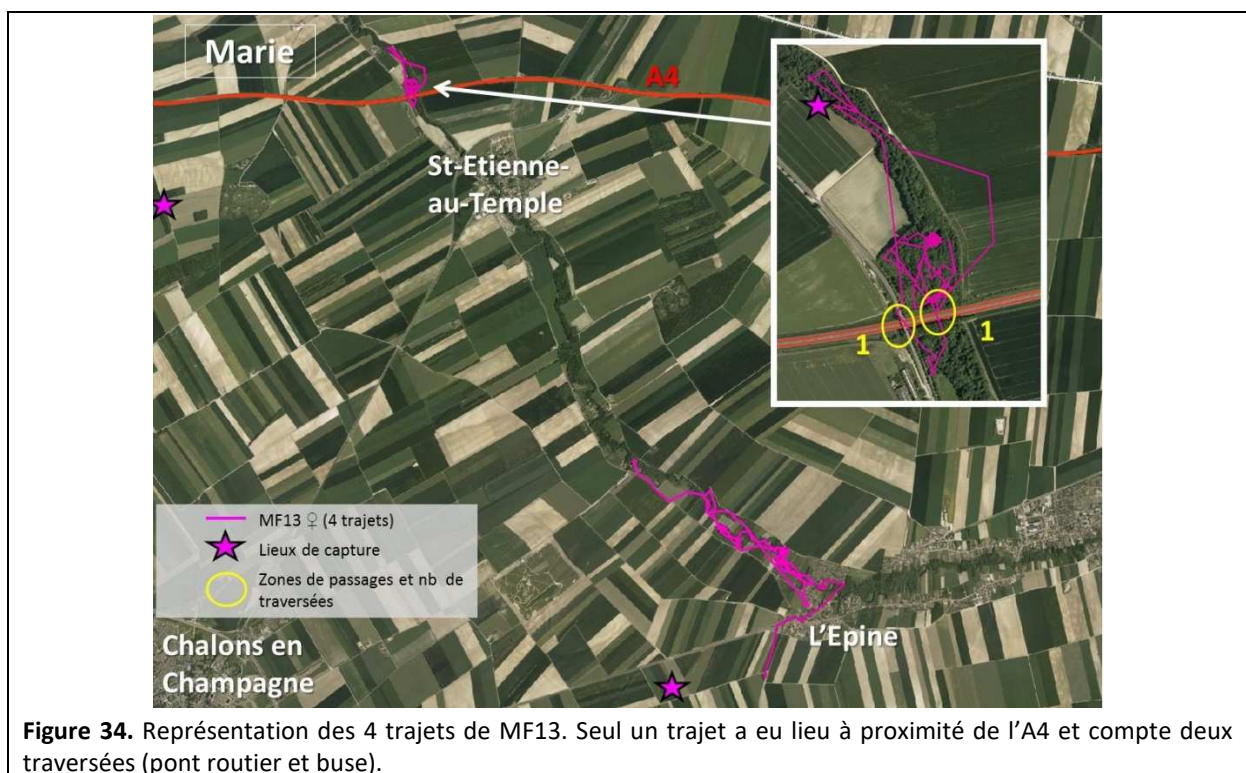
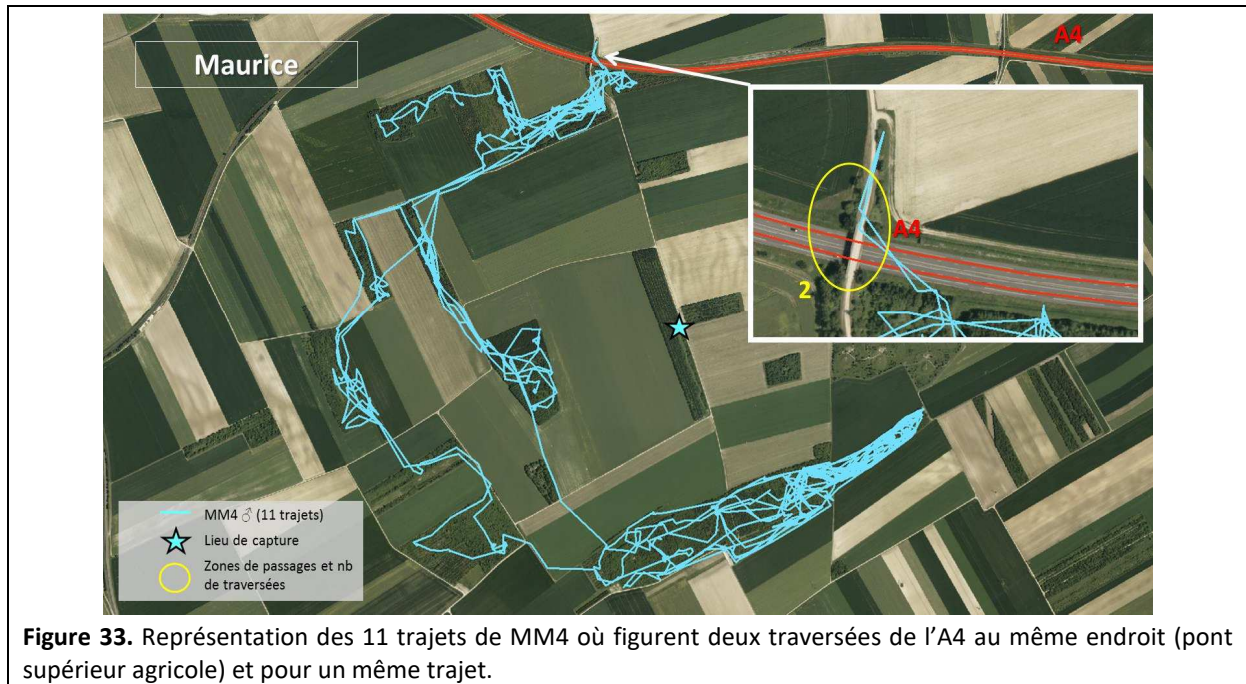
Les deux côtés du pont sont vraisemblablement utilisés pour passer de part et d'autre de l'autoroute. Des pièges photographiques y ont été posés et révèlent effectivement des traversées de martres (ou fouines) à 7 reprises en 2 mois (**Figure 32**), mais aucun collier n'a été observé au cou des animaux photographiés. Cette martre traverse également régulièrement la D21, route fréquentée d'une largeur de 18 m avec terre-plein central.



Figure 32. Images prises au piège photographique installé dans le but d'observer les passages de MF10. L'image de gauche permet de se rendre compte de la nature du sol, sans aucune végétation, et du passage d'un mustélide, fouine ou martre en arrière-plan. L'image de droite confirme que des martres se déplacent sous ce pont.

Outre cette martre très particulière, des franchissements d'autoroute, bien moins fréquents, ont été observés chez MM4, MF13, MF15.

Malgré la proximité de l'A4 avec une des extrémités du domaine vital de MM4, cet individu ne s'est trouvé à moins de 50 m de l'autoroute qu'à 6 occasions, menant à 2 franchissements. Ces franchissements ont eu lieu lors d'un même trajet (un aller-retour en 20 min) (**Figure 33**). De même, MF13 a traversé l'autoroute à deux reprises en effectuant un aller-retour lors d'un même trajet : l'aller en utilisant un passage supérieur (pont routier) et le retour en empruntant probablement une buse (passage inférieur) (**Figure 34**).



MF15 a quant à elle traversé l'autoroute deux fois en période d'enregistrement et au moins 3 autres fois en dehors de l'enregistrement des points (trajets consécutifs de part et d'autre de l'autoroute) (**Figure 35**). À noter qu'un des deux passages a probablement eu lieu au même endroit qu'une des deux traversées de MF13, c'est-à-dire dans une buse (**Figure 36**).

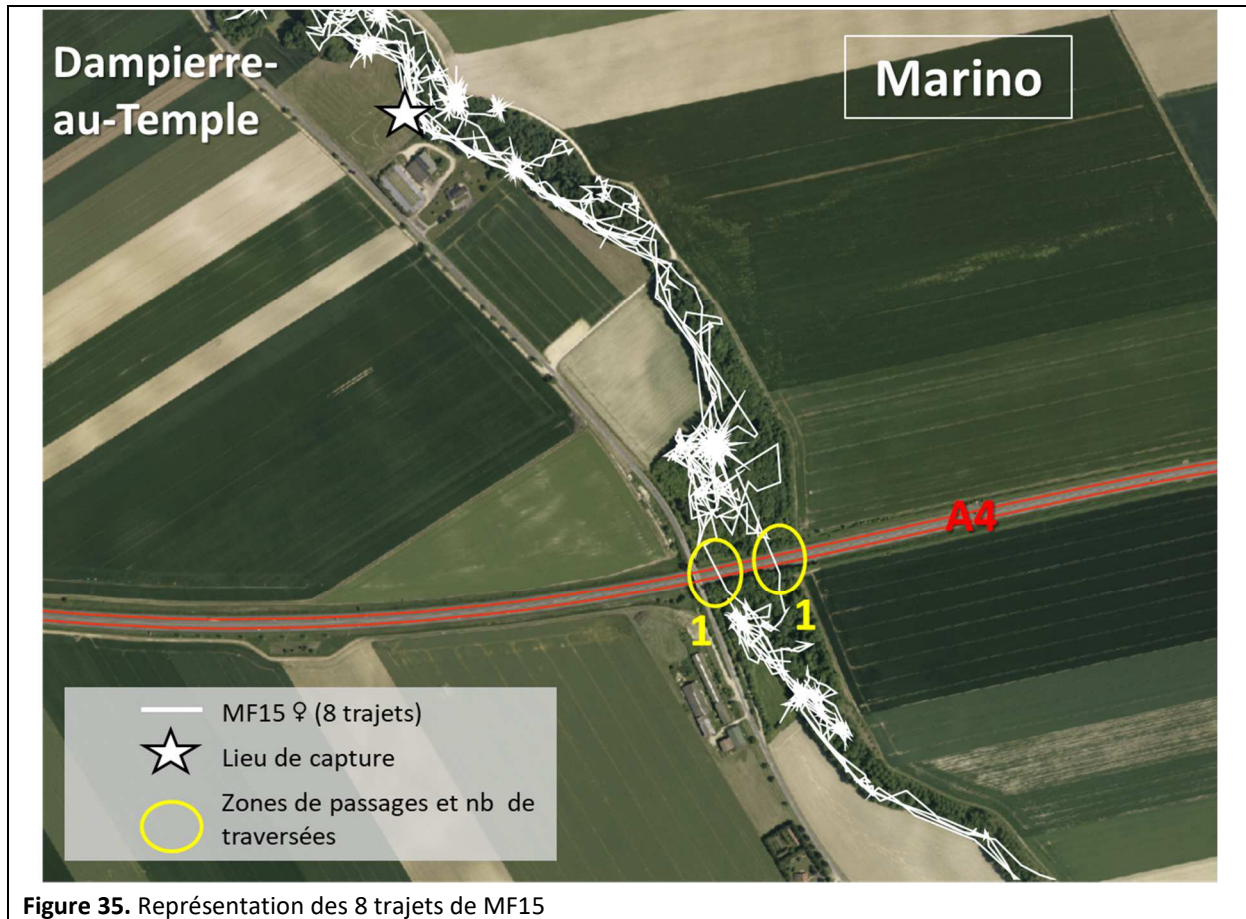


Figure 35. Représentation des 8 trajets de MF15



Figure 36. Buse probablement empruntée au moins une fois par deux martres différentes (MF13 et MF15) pour franchir l'A4.

f. Plaine céréalière

Afin de mener à bien les analyses des déplacements des martres en plaine céréalière, il a été nécessaire de cartographier le paysage à fine échelle aux endroits précis et à plus ou moins longue distance des localisations obtenues, l'idée étant d'identifier les éléments exploités par les individus par rapport à leur disponibilité. Remarquons que ces analyses sont possibles car les localisations des animaux sont précises. Les catégories d'éléments paysagers retenues pour la suite sont les plus représentées et celles qui, par expérience, sont les plus pertinentes pour notre modèle d'étude à savoir :

- « Cultures » : champs cultivés, quel qu'en soit l'état (labour, hauteur de végétation, espèce produite...).
- « Herbe » : pâtures, prairies de fauches, pelouses, bandes enherbées de lisière.
- « Chemins » : chemins en terre, pierrés ou herbeux, non goudronnés, permettant le passage d'un véhicule à 4 roues.
- « Routes » : routes goudronnées à une voie, routes départementales et nationales.
- « Arbre isolé » : arbre seul dont le houppier est nettement séparé de celui de l'arbre le plus proche.
- « Haie » : élément linéaire du paysage composé d'espèces ligneuses, variable en termes de superficies, de 3 arbres accolés alignés jusqu'à 3 rangées d'arbres dont la longueur dépasse grandement la largeur.
- « Bois » : tout élément arboré non linéaire avec une emprise au sol supérieure à celle d'un bouquet de 3 arbres. Ne sont pas inclus dans cette catégorie les haies et arbres isolés.
- « Arboré » : tout élément comportant des espèces ligneuses et donc comprenant les catégories « arbre isolé », « haie » et « bois »

➤ Trajets de plaine, disponibilité des éléments paysagers et répartition des localisations

Au total huit individus ont réalisé des « trajets de plaine céréalière » (**Tableau 10**). Sont classés comme tel les trajets (1) qui ont lieu en zone d'agriculture intensive comportant des éléments boisés très fragmentés, (2) qui sont éloignés de plus de 20 m d'une lisière de bois, et (3) pour lesquels sont enregistrés des déplacements en milieu ouvert (hors « arboré ») pour passer d'un bois à l'autre (**Figure 37**). Chez ces huit individus, seuls 43% des trajets enregistrés comprennent des passages d'un bois à l'autre. Autrement dit, la majorité de leurs parcours, même s'ils sont confrontés aux cultures, sont effectués confinés à l'intérieur des bois, voire de villages.



Figure 37. Exemple de trajet dit de plaine céréalière. Il s'agit d'un parcours de 24h de MF1 de 16 km au total.

La disponibilité des éléments « bois » a été mesurée dans une zone tampon de 200 mètres autour de chaque trajet de martre réalisé en plaine céréalière. Leur superficie atteint 37 ha, avec une moyenne de 2,9 ha dans le secteur des martres suivies en « plaine céréalière des Ardennes » et 40 ha avec une moyenne de 7,13 ha en « plaine céréalière de la Marne ». Globalement ils représentent 10 % du paysage, dans lesquels sont finalement enregistrés 70% des localisations (**Tableau 10**). Ce pourcentage s'élève à 84% si l'on considère tous les éléments arborés ensemble.

Tableau 10. Nombre d'individus suivis en plaine céréalière dans les Ardennes et dans la Marne, nombre réel de « trajets de plaine céréalière », et répartition des localisations dans les différents éléments paysagers. La catégorie « bois » comprend tous éléments arborés sauf les haies et arbres isolés, la catégorie « arboré » comprend tous les éléments arborés y compris haies et arbres isolés. NB : Ne sont retenues pour les analyses que les localisations enregistrées lorsque l'animal était en déplacement.

N° Individu	Nom	site d'étude	Nb trajets plaine (% du nb trajet total)	% loc "bois"	% loc "arboré"	% loc "cultures"	nb tot loc
MM2	Michka	Site 1	3 (33%)	73,4	80,2	10,6	207
MF1	Macha	Site 1	8 (62%)	65,8	83,5	12,2	1282
MF2	Maline	Site 1	1 (50%)	64,2	87,5	8,3	120
MM3	Maden	Site 1	8 (44%)	31,3	66,7	7,8	1168
MM4	Maurice	Site 2	5 (45%)	92,7	93,9	2,9	1142
MF10	Méva	Site 2	1 (9%)	98,6	99,3	0,0	141
MM9	Milou	Site 2	9 (38%)	76,8	88,0	3,4	1602
MM11	Manu	Site 2	7 (78%)	85,5	87,5	4,0	840
TOTAL			42 (43%)	70,5	84,2	6,1	6502

Une martre, MM3, se détache des autres puisqu'elle ne compte « que » 33% de ses localisations dans des bois et 66% en incluant en plus les arbres isolés et les haies contre 79% et 88% en moyenne chez ses congénères. Cela peut s'expliquer par les habitudes particulières de cet individu qui évolue principalement en villages (entourés de plaines céréalières). Certains trajets qu'il effectue sont considérés comme des trajets de plaine céréalière selon nos critères mais seulement sur de petites portions. Le reste des localisations est principalement enregistré dans la catégorie « herbe », à savoir dans les pelouses de jardins, petites pâtures ou prairies de fauche.

Nos premières constatations confirment le fort attachement de notre modèle d'étude aux éléments arborés du paysage. Ce constat a été réalisé dans des études précédentes, notamment en bocage, mais c'est la première fois que des données télémétriques aussi précises ont été obtenues en plaines d'agriculture intensive. Même si dans ce milieu la fragmentation du paysage est extrême, nos données montrent, d'une part, que des martres y subsistent, et d'autre part, qu'elles restent très dépendantes du moindre élément boisé, qu'il s'agisse de bois, haies ou même d'arbres isolés (**Figure 38**).

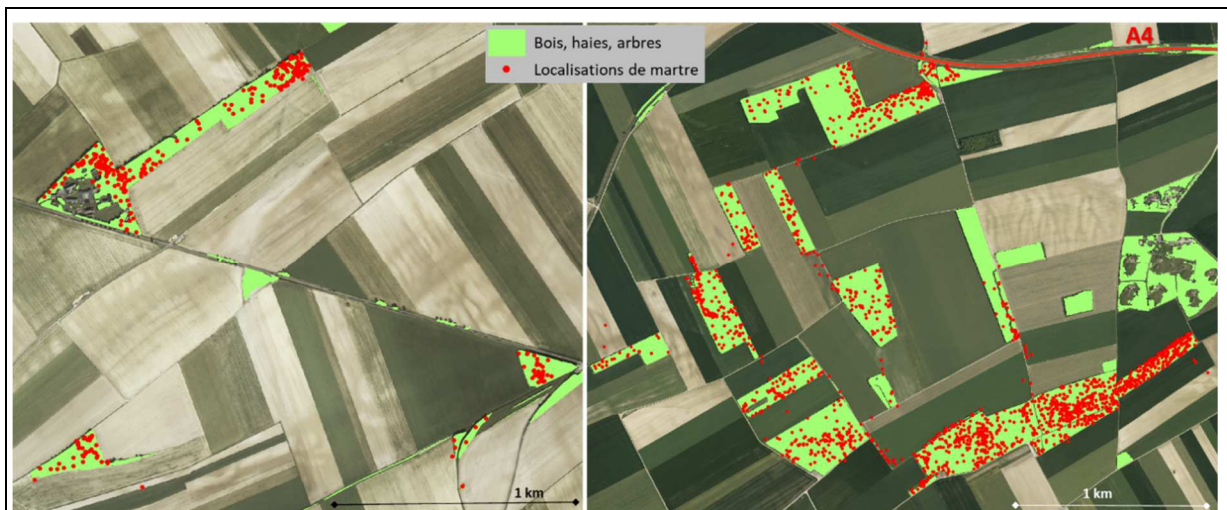


Figure 38. Illustration de l’attachement important des martres aux éléments arborés présents en plaine céréalière. A gauche, localisations de MF1 (Macha) au sud du département des Ardennes (secteur de Mazagran, les « Sylvains »). A droite, localisations de 3 martres (MM4 Maurice, MM9 Milou, MM11 Manu) dans le même secteur au sud-est de la Veuve dans la Marne.

Des déplacements d’un bois à l’autre ont tout de même été enregistrés (**Figure 39**) et c’est précisément l’examen de ces déplacements qui a permis de déterminer les modalités de passage d’un bois à l’autre et d’identifier les corridors empruntés et/ou les éléments du paysage utilisés.

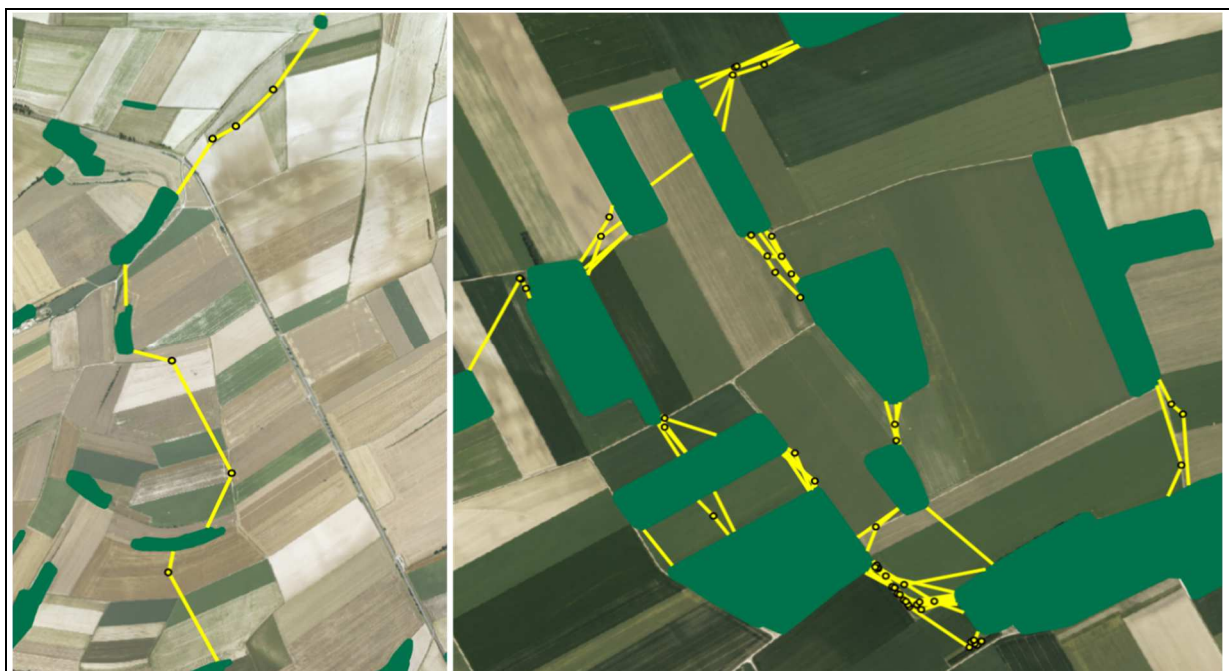


Figure 39. Exemples de déplacements (ou passages) entre bois, à gauche, chez une martre en plaine céréalière ardennaise et à droite chez trois individus évoluant dans un même secteur dans la Marne.

➤ Distances parcourues en dehors des bois

Un total de 116 passages d’un bois à l’autre a ainsi été observé (**Tableau 11**). Les distances parcourues lors de ces passages varient de 57 m à 5 km avec une médiane de 310m. La grande majorité des déplacements réalisés sont inférieurs à 500 mètres (**Figure 40**). Ces distances sont des