



HAL
open science

La gestion du campagnol des champs : du paysage à la parcelle agricole

Pauline Bigot

► **To cite this version:**

Pauline Bigot. La gestion du campagnol des champs : du paysage à la parcelle agricole. Ecosystèmes. 2024. dumas-04930947

HAL Id: dumas-04930947

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04930947v1>

Submitted on 5 Feb 2025

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

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

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur
agronome

La gestion du campagnol des
champs :
du paysage à la parcelle agricole

Pauline BIGOT

AEST

Agriculture, Environnement, Santé et Territoire

Septembre 2024



BIGOT Pauline

OPTION : Agriculture, Environnement, Santé et Territoire

La gestion du campagnol des champs : du paysage à la parcelle agricole

Méthodes de lutte alternatives contre les campagnols des champs
dans la région Grand Est : Objectif 0 rodenticide

– Projet MACC 0 –

ENCADRANTS :

- ◆ Maître de stage : AUDREN Louis (FREDON Grand Est)
- ◆ Tuteur pédagogique : PINOT Adrien (VetAgro Sup)

Année 2024



L'étudiante conserve la qualité d'auteur ou d'inventrice au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Elle ne saurait, en cas, seule ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de mon stage et à la rédaction de ce mémoire.

Tout d'abord je souhaite exprimer ma gratitude à mon maître de stage, **Louis AUDREN**, chargé d'études à la FREDON Grand Est. Merci pour ta pédagogie, ta bonne humeur et ton soutien pendant ces six mois de campagnols !

J'aimerais aussi remercier **Geoffroy COUVAL**, ingénieur d'études à la FREDON Bourgogne Franche-Comté, pour son expertise et son aide précieuse sur ce sujet complexe.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon professeur référent, **Adrien PINOT**, enseignant-chercheur à VetAgro Sup. Merci de m'avoir encadrée et conseillée pendant ce stage, et merci également pour vos cours tout au long de cette dernière année.

Je voudrais remercier **Elise VANNETZEL**, directrice générale de la FREDON Grand Est, de m'avoir fait confiance. Un grand merci également à toute l'équipe : **Alexandre, Jean-Baptiste, Renaud**, merci pour votre aide sur le projet. **Aurélie, Charlotte, Stella, Christine, Pierre-Yves, Justine, Sabine, Barbara** et **Christine**, merci pour votre bienveillance et pour cette atmosphère de travail chaleureuse !

Je finirais par remercier mes ami-es et ma famille pour leur relecture et particulièrement Awen pour nos longs débats sur les statistiques... mais surtout pour ces trois années inoubliables !



© Alexandre Keltz

Table des matières

Remerciements.....	i
Table des figures.....	v
Table des cartes	vi
Table des tableaux	vi
Liste des abréviations.....	vii
I. INTRODUCTION & ÉTAT DE L'ART	1
1. Les paysages favorables à l'apparition et au développement de <i>Microtus arvalis</i>.....	2
1.1. Le remembrement agricole a créé des conditions favorables au campagnol des champs.....	2
1.1.1. Openfields et colonisation des cultures par les campagnols des champs.....	2
1.1.2. Préférences du campagnol des champs pour certains habitats.....	3
1.2. L'intensification des pratiques agricoles bénéficie à <i>M. arvalis</i>.....	4
1.2.1. Propriétés des sols et présence du campagnol des champs.....	4
1.2.2. Développement de l'irrigation et amélioration de la productivité.....	4
1.3. Le campagnol des champs dans la région Grand Est	5
2. Une « nouvelle » agriculture et ses enjeux environnementaux face au risque de pullulation de campagnols des champs.....	6
3. Quelques expérimentations sur l'effet des méthodes alternatives sur les densités de campagnols des champs	7
4. Le projet MACC 0 dans la région Grand Est	8
II. MATÉRIEL & MÉTHODE.....	10
1. Le diagnostic paysager comme outil d'analyse de risque face aux pullulations de campagnols des champs	10
1.1. Description des sites expérimentaux	10
1.2. Cartographie du paysage	11
1.2.1. Description des données	11
1.2.2. La structure paysagère	11
1.2.3. La composition paysagère.....	12
1.3. Création d'un outil d'analyse du risque de pullulation de campagnols des champs.....	12

2. Description des dispositifs expérimentaux et des méthodes alternatives appliquées.....	13
2.1. Cartographie des dispositifs expérimentaux.....	13
2.1.1. Travail dans les parcelles de la Marne et de la Haute-Marne.....	13
2.1.2. Le verger expérimental d'Alsace	13
2.2. Des méthodes adaptées aux graminées porte-graine de la Marne	14
2.3. La Haute-Marne en grandes cultures.....	14
2.3.1. Travail du sol superficiel.....	14
2.3.2. Gestion des bordures.....	15
2.3.3. L'effet perchoir pour les rapaces.....	15
2.4. Le verger expérimental d'Alsace	16
3. Analyse statistique de l'effet des méthodes alternatives testées	17
3.1. Nature et choix des données étudiées.....	17
3.2. Modélisation des interactions entre les variables	17
3.2.1. <i>Un modèle linéaire généralisé à effet mixte pour la Marne</i>	<i>18</i>
3.2.2. <i>Trois modèles linéaires généralisés pour la Haute-Marne</i>	<i>19</i>
• Travail superficiel du sol.....	19
• Travail sur les bordures de champs.....	19
• Effet des perchoirs	20
3.2.3. <i>Un modèle additif généralisé pour le VEREXAL</i>	<i>20</i>
III. RÉSULTATS & ANALYSE	21
1. Le diagnostic paysager des sites expérimentaux.....	21
1.1. Analyse cartographique des zones d'étude	21
1.2. Une grille d'analyse de risque pour évaluer la sensibilité des parcelles face aux pullulations de campagnols des champs.....	22
2. Les effets des méthodes alternatives sur le taux d'infestation de campagnols des champs	23
2.1. Le meilleur modèle pour la Marne et les résultats des modalités testées	23
2.2. Les meilleurs modèles pour la Haute-Marne et les résultats des modalités testées.....	25
• Travail superficiel du sol.....	25

• Travail sur les bordures de champs.....	26
• Effet des perchoirs.....	27
2.3. Le meilleur modèle pour le VEREXAL et les résultats des modalités testées	28
IV. DISCUSSION	30
1. La grille d'analyse de risque : un outil d'aide à la décision.....	30
2. Les tests expérimentaux <i>in situ</i>	30
2.1. Effet de la herse dans les graminées porte-graine de la Marne	31
2.2. Effet du déchaumeur en Haute-Marne	32
2.3. Effet des pièges bassines et du mélange farine et plâtre sur les bordures de champs en Haute-Marne	33
2.4. Effet des perchoirs en Haute-Marne	33
2.5. Effet des méthodes alternatives testées dans le verger du VEREXAL.....	34
3. Les effets des méthodes alternatives au regard de la grille d'analyse de risque	35
4. Quels sont les avantages et inconvénients des méthodes alternatives par rapport au rodenticide ?.....	36
V. CONCLUSION.....	38
Bibliographie.....	39
Table des annexes	43
Résumé..	57
Abstract.	57

Table des figures

Figure 1 : Différentes cinétiques de population des campagnols des champs (Delattre et al., 1992)	1
Figure 2 : Comparaison du parcellaire agricole avant (a) et après (b) remembrements, dans le département de la Marne, près de Châlons-en-Champagne.....	2
Figure 3 : Étapes de la création des cartes de structure paysagère	11
Figure 4 : Étapes de la création des cartes de composition paysagère	12
Figure 5 : Méthode de la diagonale indiciaire.....	13
Figure 6 : Etapes de la création des cartes des dispositifs expérimentaux	13
Figure 7 : Dispositif expérimental du verger du VEREXAL	16
Figure 8 : Grille d'analyse de risque : outil d'aide à la décision pour la gestion des cultures face au risque de pullulation de campagnols des champs dans une parcelle.	22
Figure 9 : Résumé du glmm_1	23
Figure 10 : Comparaisons des modalités en fonction des jours (à gauche) ; puis des jours en fonction des modalités (à droite) (package 'emmeans'), pour le site de la Marne	23
Figure 11 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs au cours du temps (J0, J21, J42), dans une modalité témoin, une modalité de travail superficiel du sol (herse) et une modalité traitée par rodenticide.....	24
Figure 12 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs au cours du temps (J0, J21, J42, J79, J170) dans une modalité témoin, une modalité de travail superficiel du sol (déchaumeur) et une modalité traitée par rodenticide.....	25
Figure 13 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs dans la modalité témoin, en J0 et J21, en fonction de la distance à la bordure de champs.	26
Figure 14 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs dans les modalités témoin et perchoirs de J0 (2021) à J476 (2022).	27
Figure 15 : Cinétique globale des populations de campagnols des champs dans l'ensemble des modalités du verger du VEREXAL entre 2021 et 2024.....	28
Figure 16 : Taux d'infestation moyens de campagnols des champs, de 2021 à 2024, dans le verger, en fonction de la saison et de la modalité appliquée.	29
Figure 17 : Evolution des taux d'infestation moyens entre 2021 et 2024, en fonction de la saison, pour chaque modalité, dans le verger du VEREXAL.....	30

Table des cartes

Carte 1 : Situation géographique des départements de la région Grand Est.....	10
Carte 2 : Exemple d'un dispositif expérimental dans la Marne, 2022.....	14
Carte 3 : Dispositif expérimental de la Haute-Marne pour la gestion des bordures, 2021.....	15
Carte 4 : Dispositif expérimental de la Haute-Marne pour la prédation, 2021 – 2022	15
Carte 5 : Structure paysagère du site expérimental de la Marne.....	21
Carte 6 : Composition paysagère du site expérimental de la Marne	21

Table des tableaux

Tableau 1 : Surfaces des sites expérimentaux	10
Tableau 2 : Données utilisées pour la cartographie du paysage.....	11
Tableau 3 : Cinq types de cinétiques des populations de campagnols des champs selon le ratio STH/SAU (d'après Delattre et al., 1992).....	12
Tableau 4 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Marne	18
Tableau 5 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Haute-Marne sur le travail du sol.....	19
Tableau 6 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Haute-Marne sur les bordures	19
Tableau 7 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Haute-Marne pour la prédation.....	20
Tableau 8 : Variables et données retenues pour le VEREXAL	20
Tableau 9 : Comparaison des AIC des GLMM proposés pour le site expérimental de la Marne.....	23
Tableau 10 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur le travail superficiel du sol.....	25
Tableau 11 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur le travail dans les bordures de champs.....	26
Tableau 12 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur la prédation par les rapaces	27
Tableau 13 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur la prédation par les rapaces	28

Liste des abréviations

ACS : Agriculture de Conservation des Sols

GAM : Modèle Additif Généralisé

GLM : Modèle Linéaire Généralisé

GLMM : Modèle Linéaire Généralisé à effet Mixte

IFT : Indice de Fréquence de Traitements

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière

MACC 0 : Méthodes de lutte Alternatives contre le Campagnol des Champs – objectif 0 rodenticide

RPG : Registre Parcellaire Graphique

SAU : Surface Agricole Utile

SD-SCV : Semis Direct Sous Couvert Végétal

STH : Surface Toujours en Herbe

VEREXAL : VERger EXpérimental d'ALSace

ZERRAC : Zone Expérimentale de Régulation des Rongeurs en Agriculture de Conservation

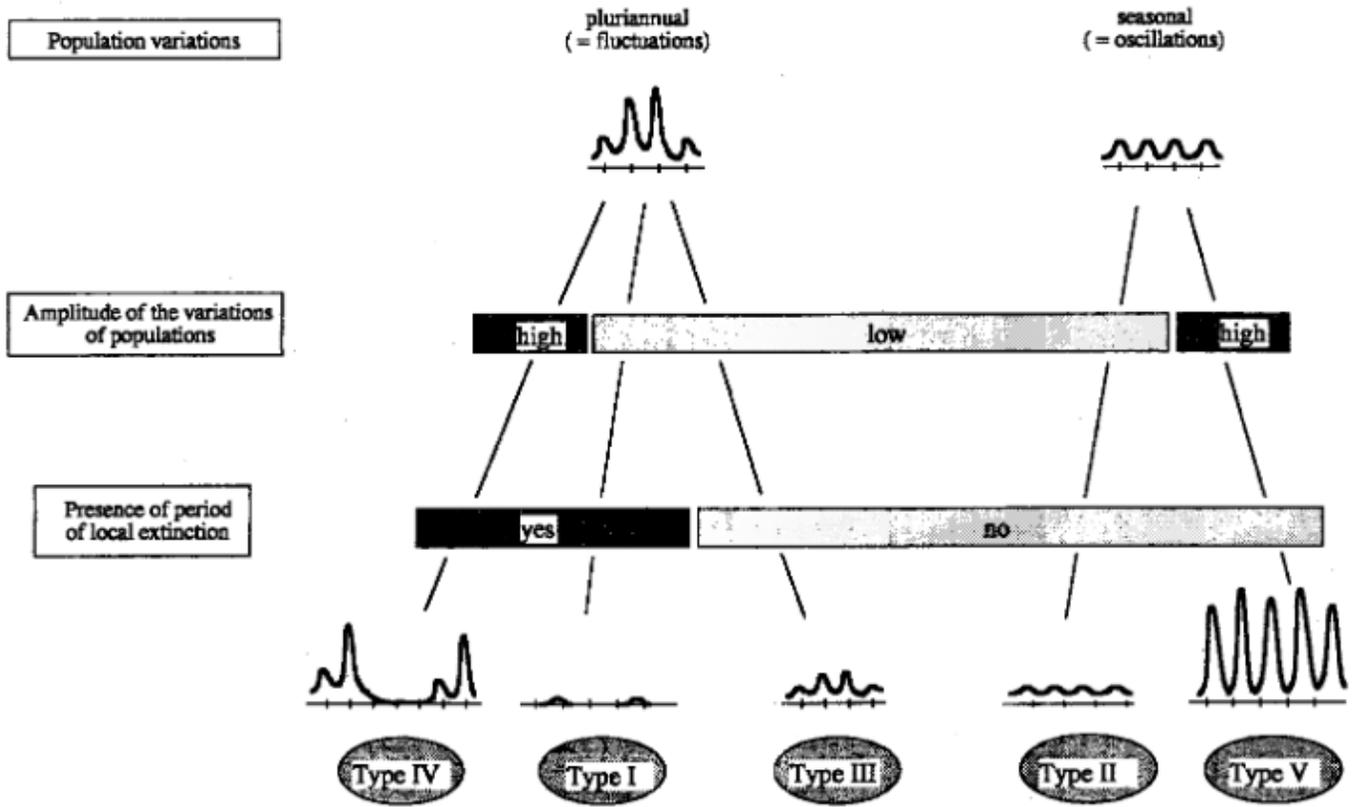


Figure 1.: Différentes cinétiques de population des campagnols des champs (Delattre et al., 1992)

I. INTRODUCTION & ÉTAT DE L'ART

« Le campagnol des champs, *Microtus arvalis*, est probablement l'un des rongeurs les plus abondants en Europe » (Pinot, 2012). C'est une espèce ubiquiste mais particulièrement présente dans les systèmes agricoles, où il se nourrit de jeunes pousses de plantes herbacées, de graines et de racines. L'espèce est très prolifique et précoce : les femelles peuvent porter jusqu'à huit petits cinq fois par an et ont une maturité sexuelle atteinte dès l'âge de deux semaines. « Les temps de gestations sont de l'ordre de la vingtaine de jours, [...] tout ceci conduisant à des successions rapides de génération et à des variations numériques très brutales » (pullulations) (Butet et Spitz, 2001). Les fluctuations d'abondance de l'espèce ont d'ailleurs été caractérisées par Delattre et al. (1992) et réparties selon cinq cinétiques (cf. Figure 1).

Les populations de campagnols des champs suivent une dynamique cyclique caractérisée par des variations saisonnières (printemps/automne) et pluriannuelles (pullulation tous les 3 à 5 ans) (Jacob et al. 2014) (cf. Figure 1). « Les raisons de ces pics d'abondance peuvent être multiples mais sont en général liées à la variabilité naturelle du climat » (Pinot, 2012). De plus, Lambin, Bretagnolle, et Yoccoz (2006) ont montré que les populations de campagnol des champs étaient cycliques à plusieurs centaines de kilomètres de distance. Cependant, il est aussi montré que les populations peuvent avoir des dynamiques stables dans certaines localités. « Tkadlec et Stenseth (2001) ont trouvé qu'il existe un gradient de cyclicité entre les populations stables au Nord et cycliques au Sud » (Pinot, 2012).

Les bioagresseurs ont toujours impacté l'agriculture, mais *M. arvalis* est devenu un enjeu de production agricole et de santé environnementale dans plusieurs pays et notamment dans la région Grand Est, en France. Lors d'une pullulation, la densité peut atteindre 2000 individus par hectare (Leukers et al. 2014). Avec une consommation de deux fois son poids par jour et les réserves qu'il fait dans ses galeries, ses dégâts peuvent atteindre jusqu'à 80% de pertes sur les récoltes (Pinot, 2012). Il est ainsi classé comme organisme nuisible pour les végétaux¹. L'intensité de ces dégâts est multifactorielle : « la densité de population, la durée de la phase d'abondance » mais aussi le biotope doivent être considérés (Benoît et al., 2007). Les facteurs qui influencent les populations de campagnols des champs ont été étudiés, et il en ressort plusieurs niveaux d'analyse. La structure paysagère explique en partie les variations d'abondance des populations selon Delattre et al. (1996). A l'échelle de la parcelle, les effets des pratiques agricoles et des stratégies de lutte restent peu étudiées (Benoît et al., 2007).

« L'augmentation des problèmes posés par les rongeurs pour l'agriculture (dégâts aux cultures) et la santé publique (transmission de maladies à l'homme) résulte dans la plupart des cas d'un changement dans le schéma démographique de ces espèces. Le passage d'un modèle stable à un modèle instable (systèmes de pullulation) se produit régulièrement à la suite de changements environnementaux à l'échelle sectorielle ou même régionale. C'est donc à l'échelle sectorielle ou paysagère qu'il faut rechercher les mécanismes explicatifs de ces changements de patrons de populations de rongeurs dans l'espace et le temps » (Quéré et al., 2000).

¹ D'après l'arrêté du 16 avril 2020, article L.251-3 du code rural et de la pêche maritime

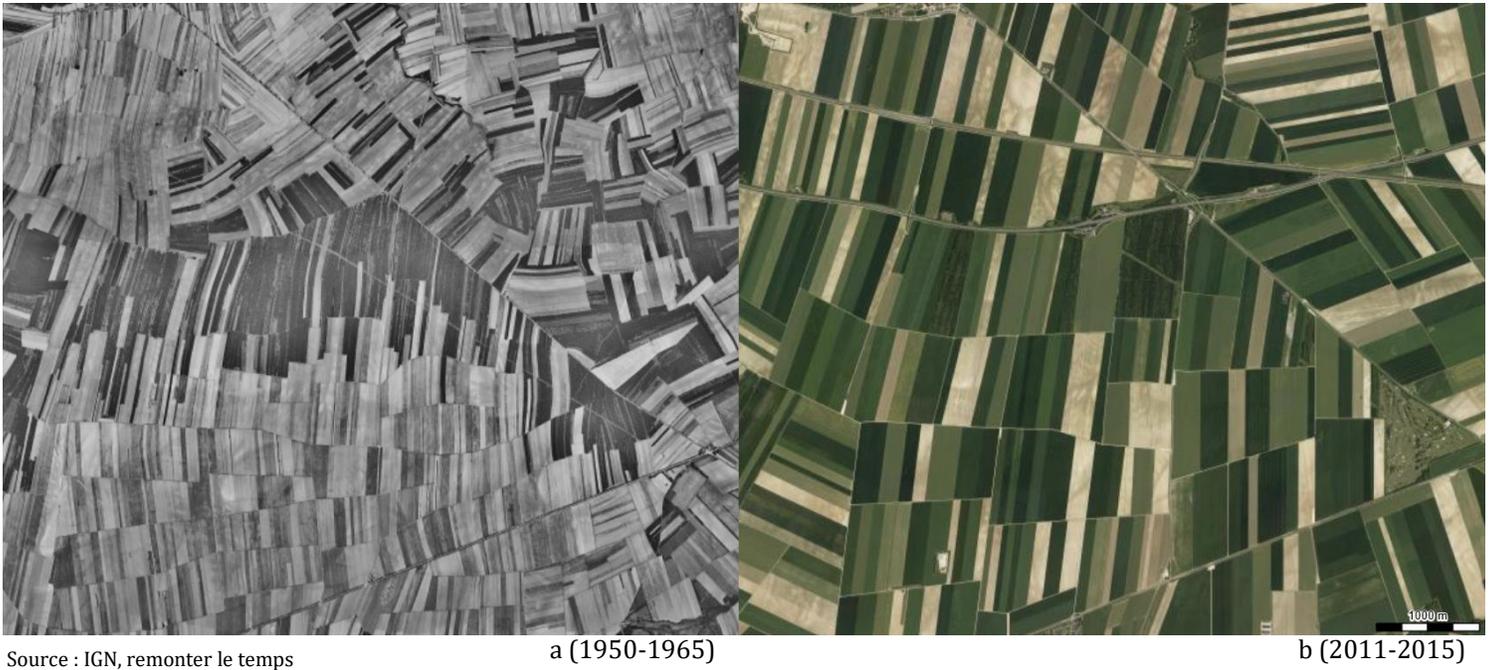


Figure 2 : Comparaison du parcellaire agricole avant (a) et après (b) remembrements, dans le département de la Marne, près de Châlons-en-Champagne

Par ailleurs, « depuis les années 1950, on assiste à des évolutions importantes de l'usage des terres, des techniques et des pratiques agricoles suite aux différentes politiques mises en place pour la promotion d'une agriculture plus compétitive et plus productive » (Butet et al., 2007). La priorité est aux grands espaces, plus facilement mécanisables, et en particulier aux céréales dans la région Grand Est. Tous ces changements sont en lien avec l'apparition et le développement des populations de campagnols des champs dans cette région. En effet, « particulièrement adaptés pour passer le filtre écologique de l'agriculture intensive » (Pinot, 2012), il est aujourd'hui très compliqué de contrôler la densité des populations de campagnols au sein des parcelles.

1. Les paysages favorables à l'apparition et au développement de *Microtus arvalis*

« L'intensification de l'agriculture a conduit à une baisse générale de la diversité des paysages agricoles » (Butet et al., 2007). La destruction de certains milieux au profit d'autres, entraîne des changements dans les écosystèmes. On peut supposer que les pullulations de campagnols des champs observées dans les cultures céréalières et dans les vergers de la région Grand Est sont une conséquence du changement paysager engendré par la révolution agricole.

1.1. Le remembrement agricole a créé des conditions favorables au campagnol des champs

1.1.1. Openfields et colonisation des cultures par les campagnols des champs

« Les paysages agricoles actuels résultent de la suppression, de la fragmentation et de la réduction des habitats naturels d'origine, ce qui conduit à des mosaïques hétérogènes composées de grandes étendues de monoculture et de zones non cultivées éparpillées de tailles et de formes diverses (c'est-à-dire des habitats semi-naturels) » (Rodríguez-Pastor et al., 2016). « Il en résulte le fameux openfield-mosaïque, avec ses très vastes parcelles de 40 et même 50 ha » (Flatrès et Flatrès, 1997) (cf. Figure 2). A l'échelle du paysage, il s'agit d'une composition hétérogène, puisque les cultures et les zones non cultivées forment des patchs non connectés. Mais à une échelle inférieure (celle de la parcelle), les monocultures forment des habitats homogènes.

L'ouverture de ces paysages et la disparition des barrières physiques sont des facteurs favorables au développement des populations de campagnols des champs. En effet, ils sont plus abondants dans les habitats homogènes (Jareño et al., 2015), et leur densité de population augmente drastiquement dans les openfields (Delattre et al., 1996). C'est par exemple le cas en Espagne, où les pullulations atteignent leur maximum de densité dans les paysages homogènes et herbacés des steppes agricoles (Luque-Larena et al., 2013). L'aire de ces surfaces ouvertes semble d'ailleurs jouer un rôle dans l'amplitude des cycles des campagnols des champs. D'après Delattre et al. (1999), pour un openfield de 15 km², comme pour des plus petits, ces rongeurs fonctionnent sur une base pluriannuelle, mais lorsque la surface est de quatre à dix fois inférieure (entre 1,5 et 3,75 km²), les variations de densités sont amorties et sont de deux à quatre fois plus faibles.

Enfin, au sein des openfields, la colonisation, pendant la période de reproduction est rapide dans les espaces vides, tandis qu'elle est lente dans les réseaux de haies. Effectivement, des paysages très connectés et dominés par les prairies faciliteraient la dispersion des campagnols des champs, alors qu'un paysage plus hétérogène la ralentirait (Delattre et al., 1996). C'est notamment le cas « dans les zones forestières, où la succession végétale affecte la dynamique des petits mammifères comme celle des campagnols *Microtus*, qui disparaissent en grande partie lorsque les

zones de coupes rases herbeuses deviennent des habitats boisés inadaptés » (Andreassen et al., 2021).

Des préférences semblent donc se dessiner pour le campagnol des champs.

1.1.2. Préférences du campagnol des champs pour certains habitats

L'accroissement des surfaces parcellaire au profit des monocultures est couplé à la diminution de la part des surfaces toujours en herbe (STH) dans la surface agricole utile (SAU). En effet, dans ces régions d'agriculture intensive, la STH représentait en 2007 à peine 10% de la SAU (Lepart, Marty, et Kleszczewski, 2007). Ainsi, « les habitats semi-naturels sont souvent réduits à des éléments linéaires, tels que les haies, les bordures de champs ou les bandes herbeuses le long des cours d'eau, des bois ou des routes et à des habitats non linéaires, tels que les jachères, les chaumes ou les friches » (Rodríguez-Pastor et al., 2016).

Or, les habitats optimaux des campagnols des champs sont les prairies, les jachères, les bandes fleuries, les bandes enherbées et les champs de luzernes et de trèfles. De façon générale, ils préfèrent les habitats herbeux, la végétation courte et non perturbée (Jacob et al., 2014). Cependant, lors d'un pic de pullulation, ils peuvent être nombreux dans « les zones cultivées comme les céréales, le colza, les pois, les haricots et les carottes et parfois les betteraves sucrières et les pommes de terre », qui constituent leurs habitats sous-optimaux (Jacob et al. 2014). La survie des campagnols des champs est cependant plus importante dans les habitats optimaux où les refuges sont plus abondants (Jacob et al., 2014). Il paraît donc fondamental qu'ils aient accès à ces milieux stables où ils peuvent maintenir leur population et se multiplier, avant de « se déplacer vers les cultures céréalières une fois que les populations atteignent des densités maximales » (Roos et al., 2019). En général, lorsque cette densité maximale est atteinte, les campagnols des champs s'étendent de la bordure au champ adjacent (Rodríguez-Pastor et al., 2016).

Rodríguez-Pastor et al. (2016) ont aussi montré un fort effet de la bordure de champs, puisqu'ils ont constaté que « l'abondance des campagnols diminuait exponentiellement avec une distance croissante de la bordure vers l'intérieur des champs ». Ils ont mis en avant une abondance 2,3 fois plus grande dans les bordures qu'à l'intérieur des champs. Ceci souligne « le rôle important joué par les cultures pérennes en tant qu'habitat refuge lorsque les cultures annuelles deviennent inadaptées » (Pinot, 2012). « L'utilisation de ces bordures varie en fonction du type de culture, de la saison et de l'abondance des campagnols, ainsi que des caractéristiques de la végétation des marges » (Rodríguez-Pastor et al., 2016).

De cette façon, le faible niveau de fragmentation du paysage, l'homogénéité et le type de cultures sont des éléments qui expliqueraient l'installation et le développement des populations de campagnols des champs dans les zones refuges puis dans les cultures. Les caractéristiques de la végétation et des sols semblent être aussi des composantes importantes.

I. INTRODUCTION & ÉTAT DE L'ART

1.2. L'intensification des pratiques agricoles bénéficie à *M. arvalis*

« Le changement des modes d'occupation des sols peut influencer la dynamique des populations de petits rongeurs » (Andreassen et al., 2021).

1.2.1. Propriétés des sols et présence du campagnol des champs

La révolution agricole a entraîné la spécialisation des agriculteur·rices dans la monoculture au détriment du mode de polyculture-élevage (Dussol et al., 2004). Or, en Espagne, Jareño et al. (2015) expliquent que la probabilité de colonisation des paysages agraires tend à diminuer lorsque l'abondance des troupeaux augmente. Ce phénomène peut être lié au tassement du sol causé par le piétinement et la destruction des galeries par les bêtes. En effet, « l'abondance des campagnols des champs est négativement corrélée à la compaction du sol », et ainsi, « l'utilisation des habitats souterrains semble être régulée par le coût de creusement, qui dépend de la dureté du sol » (Blank et al., 2011).

De la même manière, le taux d'humidité du sol joue un rôle important dans l'exploitation des galeries sous-terraines. « La teneur en eau du sol est inversement corrélée avec les populations de petits mammifères ce qui confirme l'influence négative des conditions humides sur les petits mammifères vivant sous la surface » (Blank et al., 2011). Les campagnols des champs préfèrent les prairies sèches aux prairies humides et ne sont pas présents dans les zones où la nappe phréatique est proche de la surface (entre 0 et 20 mètres) (Blank et al., 2011).

Par ailleurs, les propriétés du sol influencent la fréquence générale des pullulations de campagnols des champs (Blank et al., 2011). Cela peut s'expliquer en partie car « le type de sol est étroitement associé à la production végétale, qui affecte la disponibilité et la qualité de la nourriture et des abris » (Blank et al., 2011). L'accès à la nourriture semble donc être un point essentiel qui module la présence des campagnols des champs. D'ailleurs, en Espagne, « les surfaces dédiées aux « cultures vertes » (luzerne, céréales irriguées et autres cultures herbacées irriguées) ont augmenté au détriment des cultures herbacées non irriguées et des jachères » (Jareño et al., 2015). Ces cultures seraient particulièrement importantes pour le campagnol des champs pendant les périodes de sécheresse en leur procurant de la nourriture au moment où celle-ci se fait rare (Jareño et al., 2015). De plus, une augmentation parallèle entre la couverture des prairies et l'intensité des pullulations de campagnols des champs a été constatée à plusieurs reprises dans le Jura (Delattre et al., 1992).

1.2.2. Développement de l'irrigation et amélioration de la productivité

Pour assurer et améliorer les rendements, leur productivité et pour être moins dépendant.es du climat, des agriculteur·rices français·es se sont tourné·es vers l'irrigation (Martin, 1972). Pourtant, « dans le nord-ouest de l'Espagne, le campagnol des champs, jusqu'alors absent, a envahi environ 5 millions d'hectares de paysages agricoles tandis que la surface des cultures herbacées irriguées, y compris la luzerne, augmente fortement » (Rodríguez-Pastor et al., 2016). En effet, d'après une étude de Luque-Larena et al. (2013), l'apparition de populations de campagnols des champs dans certaines régions espagnoles s'est faite depuis les montagnes (humides) vers les plaines agricoles (sèches). Cette observation est en contradiction avec ce qu'attendaient les auteurs. Ainsi, ils supposent que « les campagnols ont répondu aux changements d'utilisation des

I. INTRODUCTION & ÉTAT DE L'ART

terres, c'est-à-dire à une augmentation des cultures herbacées humides (irriguées) » plutôt qu'à l'augmentation des températures dans les plaines. L'expansion de l'aire de répartition a été associée en particulier à une augmentation des cultures de luzerne irriguées (Roos et al., 2019). Cet apport d'eau a aussi « augmenté la superficie des cultures de graminées, ce qui a entraîné des invasions et une dynamique éruptive des campagnols des champs en Espagne » (Andreassen et al., 2021). Lorsqu'il y a des anomalies positives de productivité des plantes, des événements de pullulation inattendus peuvent être observés (Lambin, Bretagnolle, et Yoccoz, 2006).

Finalement, l'intensification agricole a conduit à une spécialisation dans les monocultures et une augmentation de la productivité. Ces changements ont modifié les propriétés des sols et amélioré la qualité nutritive des cultures, ce qui fut particulièrement favorable pour le campagnol des champs qui trouve à la fois nourriture et refuge.

1.3. Le campagnol des champs dans la région Grand Est

La région Grand Est, située au nord-est de la France illustre très bien les impacts de la révolution agricole sur les cultures. Très peu d'études ont été réalisées sur le sujet en Grand Est. On peut toutefois constater des changements de paysages similaires à ceux exprimés dans le reste de la France ou dans d'autres pays européens proches. En effet, dans la grande plaine céréalière de l'Île de France, c'est-à-dire la partie ouest de la région Grand Est, « les transformations se poursuivent pendant des siècles et il en résulte l'openfield-mosaïque » (Flatrès et Flatrès, 1997) caractéristique de la région aujourd'hui. En Lorraine, soit à l'est de la région, 670 000 ha sont remembrés et 55 400 ha étaient en cours de remembrement en 1997, soit 62% de la SAU (Flatrès et Flatrès, 1997).

Par ailleurs, le Grand Est est la première région céréalière de l'Union Européenne (de La Haye Saint Hilaire et Guillemin, 2023). Dans les années 1970, le département de la Marne était « parmi les premiers producteurs de blé, d'orge, de betteraves sucrières, de luzerne déshydratée » (Colin, 1971). Les rotations se faisaient entre céréales, plantes sarclées (pommes de terre et betterave à sucre) et prairies artificielles (surtout de luzerne) (Colin, 1971). Entre 1980 et 1995, « en Alsace, les herbages sont passés de 40% de la SAU à un peu moins de 30%, et on a assisté à une véritable explosion du maïs (grain essentiellement) passant de 20% à 50% » (Ramon et Benoît, 1998). « En Lorraine, les pâturages ont diminué de 60% à 50% de la SAU au profit du colza et du maïs » (Ramon et Benoît, 1998). A partir des années 2000, le recul des prairies ralentit dans la région et quelques gains mineurs dans les départements les plus céréalières sont observés (de La Haye Saint Hilaire et Guillemin, 2023).

L'irrigation est aussi apparue en France et « la superficie irriguée a été multipliée par quatre en 40 ans, de 1955 à 1995 » (Janin, 1996). « Cette irrigation intéresse surtout la culture du maïs et des plantes sarclées » (Martin, 1972), présente dans la Marne et en Alsace-Lorraine.

L'agriculture dans la région Grand Est paraît avoir évolué comme d'autres pays européens voisins, l'Espagne ou l'Allemagne, où le lien entre la transformation des cultures et du paysage et l'apparition des populations de *M. arvalis* a été prouvé. Aujourd'hui les pics de pullulations sont suivis en Grand Est, mais aucune conclusion n'est faite sur le lien entre le paysage et les pullulations dans cette région précisément. Au regard des résultats dans les pays voisins, ainsi que de l'évolution similaire du paysage, on pourrait supposer que les caractéristiques paysagères présentées précédemment sont en partie responsables de l'apparition et du développement des

I. INTRODUCTION & ÉTAT DE L'ART

populations cycliques de campagnols des champs dans la région Grand Est. On pourrait également supposer un gradient de pullulation entre la Champagne et l'Alsace, des cycles les plus courts aux plus longs.

« En 2013, une enquête nationale a couvert toute la production par expertise des dégâts observés par les techniciens de production en parcelles d'agriculteurs. Cette année-là, sur les 20 800 ha enquêtés, plus de 10 % des surfaces ont été classées gravement touchées, voire détruites pour certaines. Les deux principales régions de production (Ouest, Nord-est) sont plus affectées : plus de 5 % des surfaces détruites sur luzerne en Vendée et près de 15 % en graminées en Champagne » (Deneufbourg et Pateau 2017).

L'agriculture des dernières décennies a donc été favorable à l'apparition et au développement des populations cycliques des campagnols des champs. Face aux diminutions de rendements causées par ces rongeurs, plusieurs solutions ont été utilisées. Du traitement chimique au labour, ces solutions sont aujourd'hui remises en question face à une volonté de réduire l'utilisation de produits phytosanitaires et de préserver les sols.

2. Une « nouvelle » agriculture et ses enjeux environnementaux face au risque de pullulation de campagnols des champs

« En Europe, les antivitamine K (AVK) utilisés comme produits phytopharmaceutiques sont régis par le règlement (CE) n°1107/2009. Ils permettent de lutter contre des espèces telles que le campagnol terrestre, le campagnol des champs ou bien le campagnol provençal. La chlorophacinone puis la bromadiolone sont les seules molécules à avoir été autorisées en France pour cet usage. En France, les traitements sont réalisés uniquement par les professionnels ; il s'agit d'une collaboration entre des organismes à vocation sanitaire, comme les FREDON, et les agriculteurs. Ces organismes fournissent en exclusivité les produits AVK aux agriculteurs, et tracent les quantités délivrées et appliquées. Les luttes chimiques sont déclenchées uniquement suite à la détection vérifiée d'une prolifération des nuisibles, par le suivi d'indices de présences » (Duflon, 2023).

Les rodenticides ont été une solution de lutte chimique utile dans les parcelles, mais ces traitements anticoagulants étaient autrefois responsables d'intoxications primaires et secondaires de la faune non-cible (Berny et al., 1997). Ces intoxications ont engendré de très fortes mortalités dans les populations de prédateurs, conduisant à l'interdiction de ces matières en agriculture. Le principal produit utilisé (à base de bromadiolone) est progressivement retiré du marché en 2020. Depuis 2017, l'utilisation de produits homologués à base de phosphore de zinc est autorisée. Cette substance active présente un risque d'intoxication secondaire plus faible que la bromadiolone, mais sa toxicité primaire est bien supérieure.

Les pratiques agricoles comme le travail profond du sol ou laisser les sols nus sont aussi des techniques qui induisent une mortalité directe ou indirecte des campagnols des champs. Cependant, l'agriculture doit aujourd'hui répondre à d'autres objectifs comme réduire les émissions de carbone, limiter l'érosion des sols et contrôler l'utilisation de l'eau. C'est le cas de l'agriculture de conservation des sols (ACS) et des techniques culturales simplifiée (TCS). En France, depuis 2009 la surface en ACS a augmenté de 50%, représentant alors 4% de la surface totale arable (Montaz et al., 2022).

L'ACS repose sur trois principes agronomiques :

- « Une réduction quasi-totale du travail du sol ;
- Une couverture organique des sols, vivante ou morte, temporaire ou permanente ;
- Et une rotation diversifiée » (Derrouch et al., 2020).

De même, les TCS, comme le semis direct sous couvert végétal (SDCV), correspondent au non-travail du sol. Or un labour profond « élimine plus de 80% des campagnols présents sur des parcelles de petites tailles » et les « 20% restant tentent de se disperser dans les cultures environnantes ou les bordures et s'exposent aux coûts de la dispersion » (Pinot, 2012). Selon Roos et al. (2019), ces méthodes « pourraient [donc] créer des habitats refuges favorables aux campagnols ».

Par ailleurs, l'ACS est un mode de culture qui consomme une quantité importante de produits phytosanitaires afin de brûler le couvert intermédiaire puisqu'il ne peut être retiré mécaniquement (Montaz et al., 2022). Or, lorsque le campagnol des champs est présent sur la culture, il peut créer des trouées dans le couvert végétal, ce qui laisse la place pour les adventices et donc davantage de traitements seront nécessaires.

Les nouvelles problématiques agricoles doivent prendre en compte les enjeux de production et de préservation des écosystèmes. Cependant, il faut constater que certaines pratiques vont plutôt favoriser des populations de campagnols des champs. La diminution du labour au profit de la conservation des sols favorise leur installation et leur développement au sein des parcelles. La régulation des traitements chimiques et l'aspect chronophage de leur application est aussi un frein à l'utilisation des rodenticides. C'est pourquoi de nouvelles techniques sont étudiées. Entre travail superficiel du sol, gestion des bordures, favorisation de la prédation, toutes ces méthodes se veulent plus respectueuses de l'environnement et leur efficacité est en cours d'expérimentation.

3. Quelques expérimentations sur l'effet des méthodes alternatives sur les densités de campagnols des champs

La stratégie de lutte s'appuie sur le principe de la lutte raisonnée, combinant méthodes alternatives et méthode chimique. Si cette stratégie est validée contre le campagnol terrestre en prairies (Delattre et Giraudoux, 2009) et mise en application dans plusieurs régions (Couval et al., 2014; Berthier et al., 2014), il n'en est rien pour le campagnol des champs dans d'autres systèmes d'exploitation. Sa « grande plasticité démographique, [...] sa dynamique et les facteurs de son contrôle sont multifactoriels et dépendent de la nature des écosystèmes » (Giraudoux et al., 2019). Il convient aussi de préciser que les méthodes alternatives développées dans un contexte prairial ne sont pas adaptées à d'autres systèmes de cultures.

En 2016, la zone expérimentale de régulation des rongeurs en agriculture de conservation (ZERRAC) de Bourgogne-Franche-Comté a testé l'effet d'un outil de travail superficiel du sol (1 à 5 cm), la herse Magnum, sur les populations de campagnols des champs à court terme (deux à douze semaines) et à moyen terme (quatre ans) (Montaz et al., 2022). Les résultats montrent que « le passage de la herse Magnum avant semis permet de limiter les populations de campagnols des champs à court terme » (Montaz et al., 2022). L'étude montre aussi que « le passage de la herse Magnum semble efficace pour limiter les populations de campagnols des champs à moyen terme ».

En 2015, en Haute-Marne, une expérimentation utilise un déchaumeur afin de mettre en avant l'impact d'un gradient de travail du sol (un et deux passages de déchaumeur) sur les densités relatives de campagnols des champs. Les conclusions montrent une réduction très significative des populations après un passage d'outil à court terme (neuf jours).

La poursuite de ces expérimentations est nécessaire, sur plusieurs années et dans des contextes paysagers variés, afin d'obtenir des résultats robustes.

4. Le projet MACC 0 dans la région Grand Est

L'objectif est donc de trouver de nouvelles solutions qui permettent de lutter contre les campagnols des champs, sans utiliser de produits phytosanitaires et en respectant les pratiques culturelles de l'exploitation.

C'est ainsi que depuis 2019 la FREDON Grand Est s'intéresse à l'efficacité de méthodes de lutte alternatives (travail superficiel du sol, piégeage, prédation) contre le campagnol des champs en grande culture et en arboriculture en Grand Est. Le projet MACC 0 s'inscrit dans une démarche d'affranchissement de l'utilisation de la lutte chimique actuelle et vise les objectifs suivants :

- ◆ Quantifier l'impact des méthodes alternatives retenues sur les populations de campagnols des champs et sur le système de production ;
- ◆ Proposer un référentiel technique sur les stratégies de lutte, en tenant compte du système de cultures et de l'environnement de l'exploitation ;
- ◆ Acquérir des références sur les dynamiques spatiales et temporelles des populations de campagnols des champs ;
- ◆ Tester la faisabilité d'un système avec un IFT_{rodenticide} de 0.

Pour répondre à ces objectifs, le projet s'articule autour de trois axes de travail :

- ◆ Axe 1, échelle du paysage : réaliser un diagnostic paysager pour chaque site d'études, afin de caractériser l'environnement dans lequel évoluent les campagnols des champs et leurs prédateurs ;
- ◆ Axe 2, échelle du paysage : réaliser deux suivis sur le long terme (2019-2024) pour chaque site d'études ;
 - Suivi des densités de campagnols des champs deux fois par an (printemps et automne) pour mieux appréhender l'évolution spatio-temporelle des populations dans différents habitats ;
 - Suivi des prédateurs nocturnes et diurnes ;
- ◆ Axe 3, échelle parcellaire : selon les sites ;
 - Un dispositif expérimental pour mesurer l'efficacité sur le long terme de méthode(s) alternative(s) aux rodenticides ;

- Un observatoire piloté avec une adaptation annuelle des méthodes alternatives, d'après les informations obtenues sur les populations de campagnols des champs et selon la culture en place.

Dans le cadre du stage de fin d'études, je suis chargée d'améliorer et terminer le diagnostic paysager et mettre à jour son évolution entre 2019 et 2024 (axe 1) et faire la synthèse statistique des résultats des méthodes alternatives dans les différents sites expérimentaux (axe 3). Le mémoire devra donc répondre à la question suivante :

Quelles techniques mettre en place pour maîtriser le risque de pullulation du campagnol des champs ?

Plusieurs hypothèses de recherche peuvent être posées :

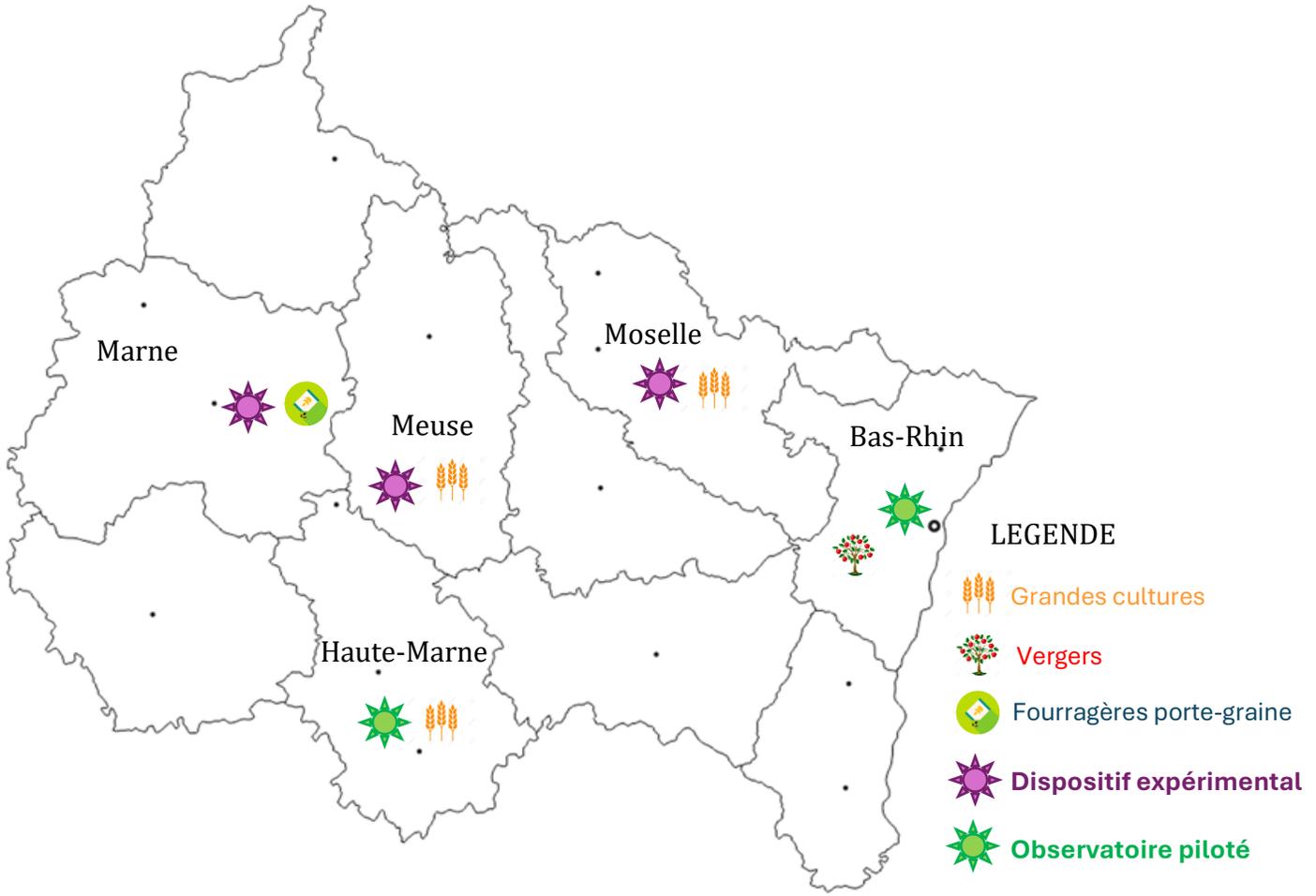
H1 : L'analyse du contexte paysager permet d'évaluer le risque de pullulation de campagnols des champs dans la parcelle étudiée et mieux adapter la gestion qui suit.

H2 : Les méthodes alternatives testées permettent de réduire le taux d'infestation au cours du temps.

H3 : La multiplication des méthodes est plus efficace que l'utilisation d'une seule méthode.

Pour répondre à cette question, le mémoire se déroulera comme suit :

- ◆ Le matériel et la méthode mis en place seront présentés ;
- ◆ Les résultats seront analysés ;
- ◆ Une discussion permettra de remettre les résultats dans leur contexte et de répondre à la question au regard de la bibliographie ;
- ◆ Enfin, une analyse critique mettra en avant les points forts et les limites de ce projet et des méthodes alternatives.



Carte 1 : Situation géographique des départements de la région Grand Est

Source : FREDON Grand Est

Tableau 1 : Surfaces des sites expérimentaux

ZONES D'ETUDES	SURFACES (ha)
Bas-Rhin	20 328
Haute-Marne 1	23 940
Haute-Marne 2	21 066
Marne 1	38 089
Marne 2	21 211
Meuse	27 566
Moselle	20 597

II. MATÉRIEL & MÉTHODE

L'objectif de cette étude est donc de déterminer des techniques de gestion face au risque de pullulation de campagnols des champs dans les cultures. L'étude se déroulera à deux échelles. D'abord, une analyse à l'échelle du paysage permettra de caractériser l'environnement des parcelles expérimentales. Ces éléments, mis en perspective avec la bibliographie sur les préférences des campagnols, contextualiseront le risque de pullulation dans ces zones. Ces informations serviront aussi de contrôle méthodologique pour l'analyse des résultats ultérieurs. Puis, à l'échelle de la parcelle, l'effet des méthodes mises en place sera étudié. L'évolution du taux d'infestation dans les différentes modalités permettra de conclure sur l'impact des méthodes sur le risque de pullulation.

1. Le diagnostic paysager comme outil d'analyse de risque face aux pullulations de campagnols des champs

1.1. Description des sites expérimentaux

Le projet MACC 0 s'intéresse à cinq sites expérimentaux situés dans la région Grand Est (cf. Carte 1). Ces départements sont représentatifs de différents types de cultures et donc de différents types d'habitats pour les campagnols :

- Site 1 : La Marne, étudiée pour ses graminées porte-graines² (luzerne, dactyle, fétuque, koeleria) correspond aux habitats optimaux des campagnols des champs (Jacob et al., 2014) ;
- Site 2, 3 et 4 : La Haute-Marne, la Meuse et la Moselle, en grandes cultures (céréales, colza...), représentent les habitats sous-optimaux des campagnols des champs (Jacob et al., 2014) ;
- Site 5 : Le Bas-Rhin, étudié pour ses vergers, fait également partie des habitats sous-optimaux (Jacob et al., 2014).

Le choix de ces départements permet de couvrir la région d'ouest en est.

Dans chacun des départements, plusieurs parcelles ont été choisies selon les critères suivants :

- Le type de culture ;
- La présence de campagnols des champs ;
- La volonté et la capacité des agriculteurs et agricultrices à mettre en place le dispositif expérimental sur plusieurs années.

Le renard roux (*Vulpes vulpes*) est un prédateur généraliste du campagnol des champs. Il couvre le plus grand territoire parmi les prédateurs terrestres du campagnol des champs. L'étude du paysage s'est alors focalisée sur une surface d'un rayon de 8 km autour des parcelles expérimentales, soit une surface d'environ 200 km² (20 000 ha) (cf. Tableau 1). Ce rayon représente la distance que peut parcourir le renard roux, en une journée dans un système agricole (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2006). Les surfaces obtenues représentent les cinq sites expérimentaux.

² Ici, les graminées porte-graines (ou fourragères porte-graines) correspondent aux cultures herbacées de la famille des graminées, dont l'intérêt est la production de semences.

Tableau 2 : Données utilisées pour la cartographie du paysage

NATURE DES DONNÉES	ORIGINE DES DONNÉES	UTILISATION DES DONNÉES
Photographies aériennes des parcelles expérimentales	Agriculteur-rices	Création de la zone tampon
Occupation des sols (bâtiments, végétation, hydrographie...) BD TOPO	GéoService	Structure paysagère
Registres parcellaires graphiques (RPG)		Structure & composition paysagère

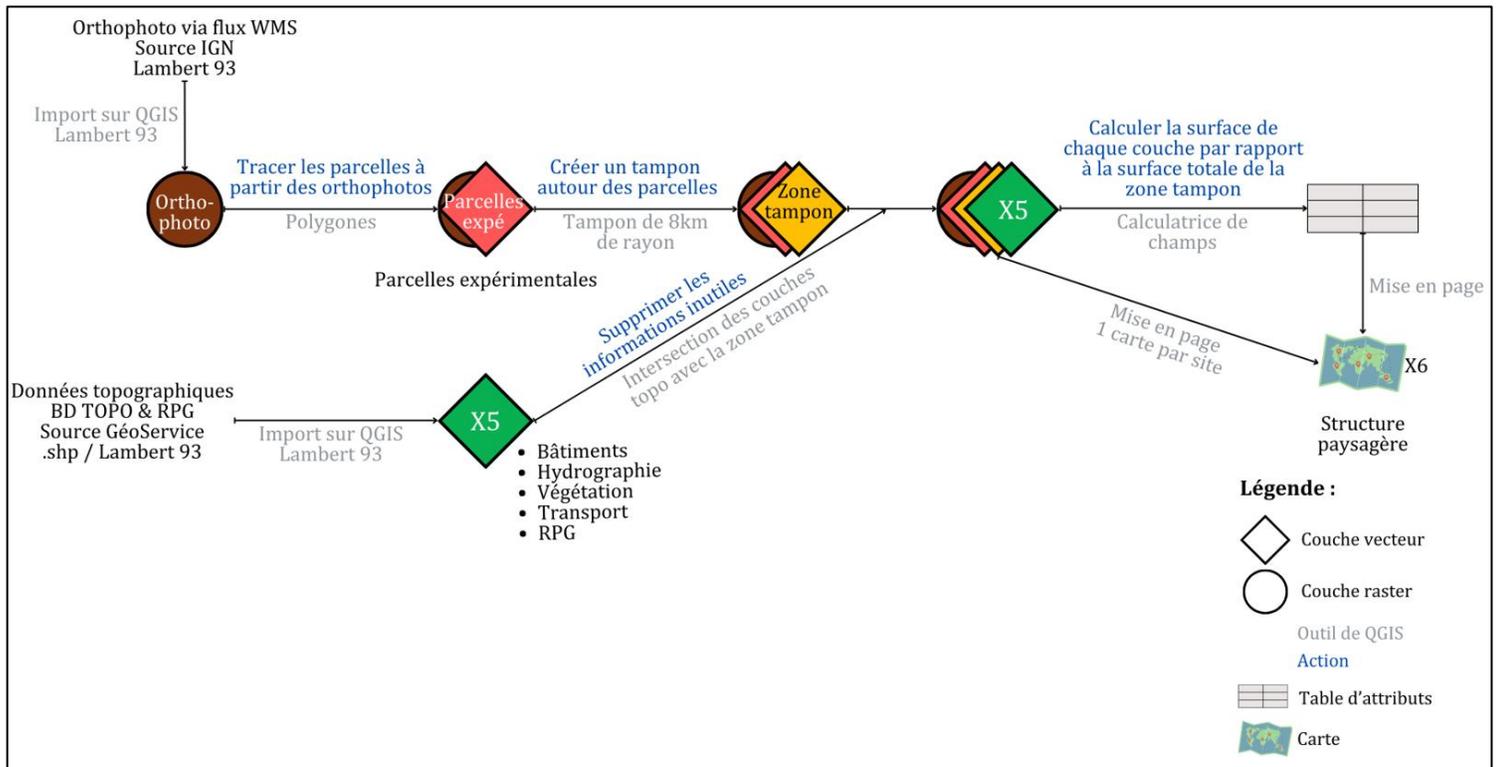


Figure 3 : Étapes de la création des cartes de structure paysagère

1.2. Cartographie du paysage

« La définition même de paysage est sujette à discussion. Cette définition pourra varier en effet selon les études » (Henckel, 2015). Mais, les paysages peuvent être caractérisés selon deux composantes : la structure paysagère et la composition paysagère. La composition caractérise « la nature, la taille ou la proportion relative des éléments qui composent le paysage », alors que la structure correspond à la forme et l'agencement spatial de ces éléments (Henckel, 2015).

Selon Delattre et al. (1996), « la structure du paysage devrait affecter la propagation et la dynamique des populations. La propagation devrait être facilitée dans les paysages fortement connectés, dominés par les prairies, tandis qu'elle devrait être ralentie dans les paysages hétérogènes ». Selon Jacob et al. (2014), les types de cultures sont infestés différemment selon les préférences des campagnols.

Ainsi, afin de mettre en avant le contexte paysager des sites expérimentaux, des cartes ont été construites grâce au logiciel QGIS³.

1.2.1. Description des données

Les données utilisées pour la création des cartes sont publiques, issues du site de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et datent de 2022. Elles sont téléchargées au format shapefile (.shp). D'autres données sont fournies par les agriculteur·rices pour la localisation des parcelles (cf. Tableau 2).

A partir de ces données une carte de structure et une carte de composition paysagère ont été produites pour chacun des sites.

1.2.2. La structure paysagère

La Figure 3 présente les étapes qui ont permis de construire les cartes des structures paysagères de chacun des sites. Pour des raisons de distance entre les parcelles, la Haute-Marne a été divisée en deux zones. Il en ressort donc six cartes.

Les surfaces de chacun des éléments de paysage par rapport à la surface de la zone ont été synthétisées dans un graphique camembert.

³ Version 3.34.5 de QGIS

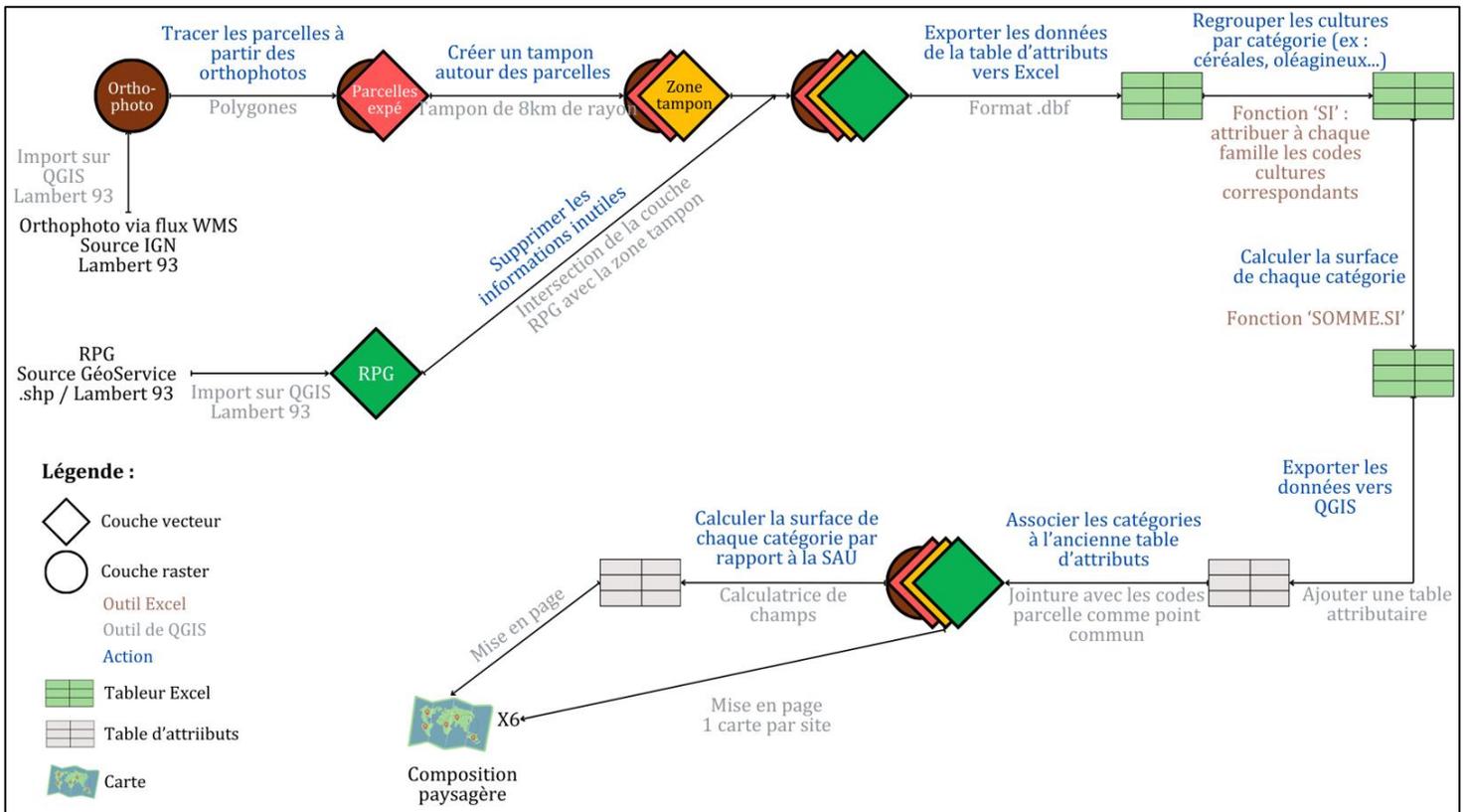


Figure 4 : Étapes de la création des cartes de composition paysagère

Tableau 3 : Cinq types de cinétiques des populations de campagnols des champs selon le ratio STH/SAU (d'après Delattre et al., 1992)

RATIO STH/SAU	TYPES DE CINETIQUES	NIVEAU D'ABONDANCE DES POPULATIONS
0 à 5 %	Type 1 : faible amplitude d'abondance, extinctions locales pendant plusieurs années SYSTEME STABLE	Faible niveau d'abondance : 0 à 20 individus / ha
	Type 2 : pas d'extinction, abondance variable de façon saisonnière SYSTEME A FLUCTUATION	
5 à 15 %	Type 3 : pas d'extinction, fluctuations pluriannuelles d'amplitudes variables SYSTEME A PULLULATION EPISODIQUE	0 à plusieurs centaines d'individus / ha
15 à 50 %	Type 4 : pas d'extinction, fluctuations pluriannuelles marquées SYSTEME A PULLULATION PERIODIQUE	
50 % et plus	Type 5 : pas d'extinction, grande variation saisonnière de l'abondance SYSTEME A PULLULATION CHRONIQUE	

1.2.3. La composition paysagère

La Figure 4 présente les étapes qui ont permis de construire les cartes des compositions paysagères de chacun des sites. Pour des raisons de distance entre les parcelles, la Haute-Marne a été divisée en deux zones. Il en ressort donc six cartes.

Les surfaces de chacune des catégories de culture par rapport à la SAU ont été réparties selon le type d'habitat auquel elles appartiennent d'après (Jacob et al., 2014). Ces informations ont été synthétisées et ajoutées au graphique camembert précédent.

1.3. Création d'un outil d'analyse du risque de pullulation de campagnols des champs

Plusieurs éléments clés sont à identifier dans l'analyse du paysage. En 1992, Delattre et al. ont établi cinq types de cinétiques des populations de campagnols des champs en fonction du ratio STH/SAU (cf. Tableau 3). Dans la suite du document, la STH correspond aux cultures herbacées, aux luzernes, aux fourrages et aux légumineuses qui peuvent rester en place plusieurs années. Un franchissement du seuil de 50% du ratio STH/SAU induit des densités dépassant les 800 individus par hectare, provoquant d'importants dégâts agricoles (Delattre et al., 1992). De plus, une proportion importante de luzernes peut abaisser ces seuils. Puis, en 1996, Delattre et al. ont mis en avant les différences d'infestation selon le niveau d'hétérogénéité du paysage (la structure du paysage).

Par ailleurs, d'après Jacob et al. (2014), les cultures peuvent être classées selon leur attractivité pour le rongeur. Les habitats optimaux favorisent la survie des populations pendant l'hiver, alors que pendant l'été, les campagnols des champs se propagent dans les habitats sous-optimaux lors des fortes densités (cf. ¶ I.1.1.2).

Enfin, le travail du sol est un élément essentiel modulant la présence de campagnols des champs dans la parcelle. Le labour, les TCS, le strip-till⁴ et le semis direct sous couvert végétal (SD-SCV) perturbent le sol (Morris et al., 2010), de 40 cm de profondeur pour le labour jusqu'à moins de 5 cm pour le SD-SCV. Le labour permet la destruction de l'habitat et diminue de 80% le taux d'infestation dans la parcelle (Pinot, 2012). C'est une technique qui semble efficace pour lutter contre le campagnol, mais elle est à l'origine de la dégradation des sols. Des techniques plus légères peuvent répondre à d'autres objectifs comme réduire les émissions de carbone, limiter l'érosion des sols et contrôler l'utilisation de l'eau. Cependant, elles pourraient aussi créer des habitats refuges favorables aux campagnols des champs (cf. ¶ I.2) (Roos et al., 2019).

Ainsi, en prenant en compte ces cinq paramètres, une grille d'analyse de risque de pullulation dans la parcelle a été construite. Grâce à un tableau Excel à double entrée, et un jeu de couleurs, le risque de pullulation est classé selon son niveau. La concordance d'une couleur pour plusieurs situations différentes est à dire d'experts (G. Couval et L. Audren)⁵.

On suppose ainsi qu'avec ces premiers outils il sera possible d'attribuer un niveau de risque aux parcelles expérimentales et de nuancer l'effet des méthodes appliquées.

⁴ Le strip-till est une technique de travail du sol localisé où seul le futur rang de semis est travaillé

⁵ Geoffroy COUVAL, FREDON Bourgogne-Franche-Comté ; Louis AUDREN, FREDON Grand Est

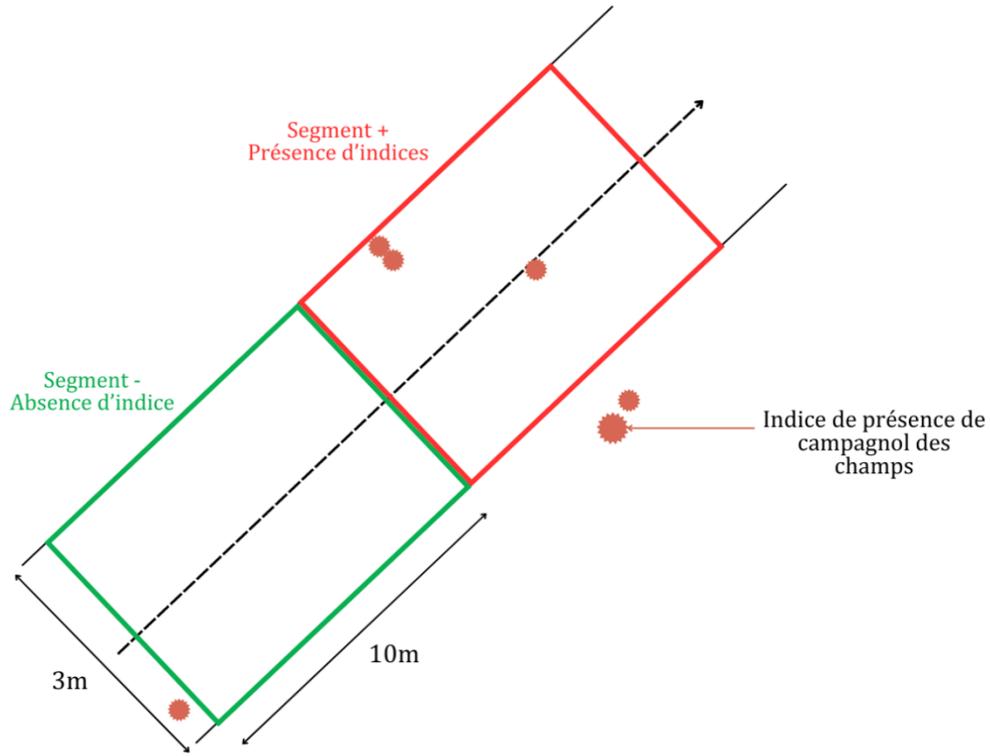


Figure 5 : Méthode de la diagonale indiciaire

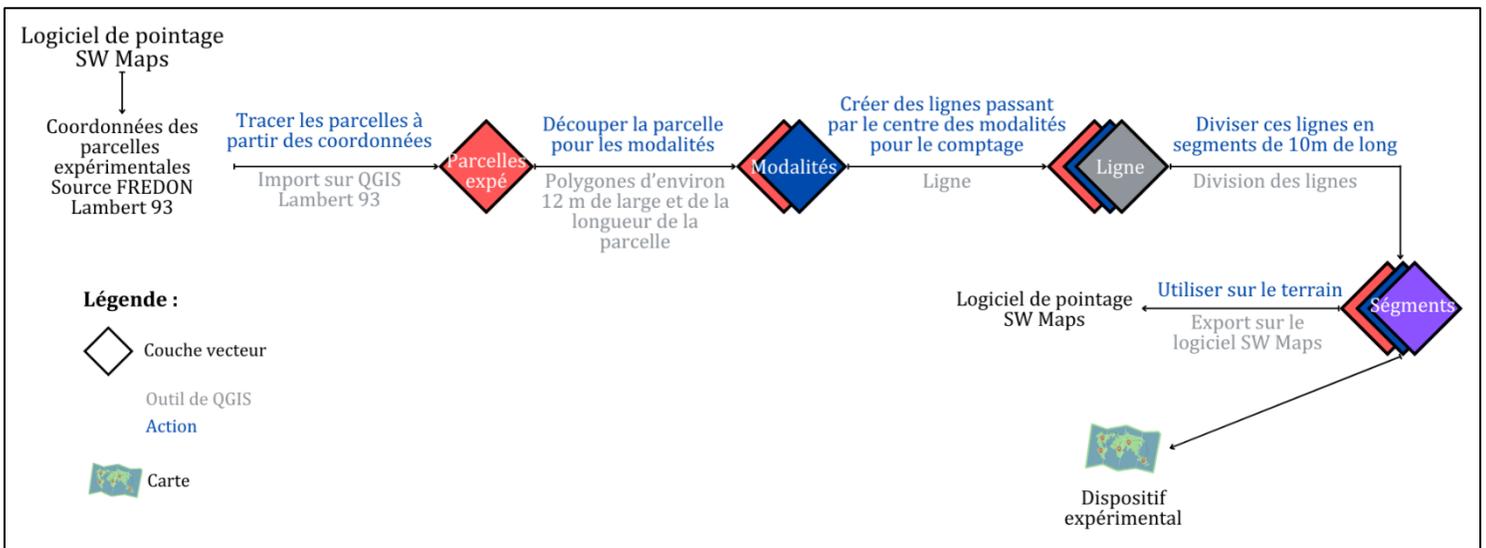


Figure 6 : Etapes de la création des cartes des dispositifs expérimentaux

2. Description des dispositifs expérimentaux et des méthodes alternatives appliquées

Dans la suite du document, les sites de la Meuse et de la Moselle ne seront pas étudiés, car les essais n'ont pas été conduits.

Le dispositif expérimental mis en place pour tester les méthodes alternatives consiste à compter le nombre d'indices de présence de campagnols des champs dans différentes modalités et à plusieurs intervalles de temps. Les observations reposent sur la méthode de la diagonale indiciaire (Quéré et al., 2000; Delattre et al., 1990; Jareño et al., 2014). Cette méthode permet de parcourir un transect et de compter les indices de présence des campagnols dans des surfaces de 10 x 3 m. Les indices de présence sont les entrées de terriers et les coulées de passage. La présence d'aliments ou de fèces permettent de s'assurer qu'il s'agit d'un terrier récent (Jareño et al., 2014; Delattre et al., 1990).

Dans le projet, un segment correspond alors à un rectangle de 10 x 3 m. Ainsi, la personne effectuant les observations traverse à pied des intervalles réguliers de 10m, le long d'un parcours fixe et note la présence (notée 1) ou l'absence (notée 0) d'indices frais de campagnol des champs sur une largeur de 3 m (1,5 m de part et d'autre) (cf. Figure 5).

Ces dimensions sont cohérentes avec le format des habitats semi-naturels préférés par les campagnols des champs : les bandes herbeuses ou bordures de champs (cf. ¶ I.1.1.2) (Rodríguez-Pastor et al., 2016).

Les taux d'infestation dans plusieurs modalités ont pu être comparés à un témoin et au cours du temps. Dans la suite du document, le terme de « modalité » caractérise les différentes méthodes appliquées (méthodes alternatives, chimique, témoin).

2.1. Cartographie des dispositifs expérimentaux

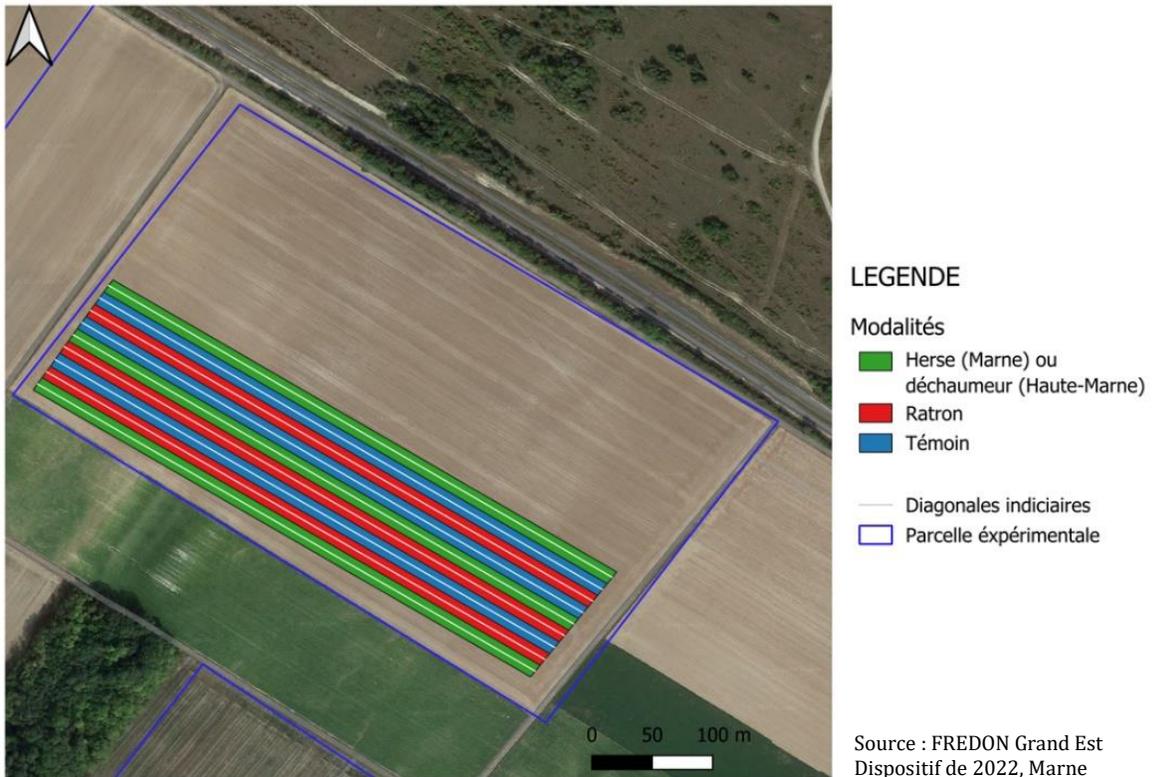
Afin d'appliquer les modalités et réaliser les observations dans les parcelles, FREDON Grand Est a créé des cartes. Cette cartographie permet de se géolocaliser et d'identifier le segment et la modalité dans lesquels on se trouve lors des observations.

2.1.1. Travail dans les parcelles de la Marne et de la Haute-Marne

La Figure 6 présente les étapes qui ont permis de construire les cartes. Le géoréférencement des parcelles s'est fait via un pointage sur le terrain avec le logiciel SW Maps pour être le plus précis possible. Les parcelles ont été divisées en bandes d'une largeur d'environ 12 m, correspondant à la largeur de l'outil pour les modalités de travail du sol. Au sein de ces bandes est appliquée la méthode de comptage.

2.1.2. Le verger expérimental d'Alsace

Le verger expérimental d'Alsace (VEREXAL) est divisé différemment. Les arbres étant plantés en rangs, une modalité correspond à un rectangle de dix rangs par 100 m de long (10 segments). La méthode de comptage est appliquée sur trois inter-rangs parmi les dix. Six modalités sont testées, et le verger est donc divisé en six rectangles de même dimension. Les étapes de la cartographie sont les mêmes (cf. Figure 6), mais le logiciel utilisé est QField.



Carte 2 : Exemple d'un dispositif expérimental dans la Marne, 2022

2.2. Des méthodes adaptées aux graminées porte-graine de la Marne

Dans la Marne, les modalités étudiées sont :

- Un travail du sol superficiel (environ 2 à 4 cm de profondeur) par le passage d'une herse ;
- Un appât de blé à base de phosphore de zinc dosé à 25 g/kg (appelé dans la suite « rodenticide »), appliqué dans les entrées des galeries (réservé aux professionnels) ;
- Et un témoin permet de suivre l'évolution naturelle des populations (cf. Carte 2).

Un premier relevé des indices de présence est effectué avant toute mise en place de méthode afin de connaître les populations initiales présentes dans chaque modalité. Ce jour est appelé « J0 ». Idéalement, la méthode choisie est appliquée juste après les observations de J0. L'intervalle de temps choisi entre chaque observation est de 21 jours, ce qui correspond à la durée de gestation de l'espèce et donc au temps nécessaire pour le renouvellement d'une génération (Butet et Spitz, 2001). Des observations sont réalisées 21 jours et 42 jours après l'application de la méthode, respectivement appelés « J21 » et « J42 ». L'étude sur environ 42 jours permet donc de voir l'effet des modalités sur deux générations. Les modalités sont répétées trois à quatre fois dans une parcelle. L'ensemble ne couvre pas la totalité de la surface de la parcelle, pour sécuriser la production de l'agriculteur face au risque de pullulation (notamment dans les témoins). Ces mesures ont été reproduites sur plusieurs parcelles pendant six ans.

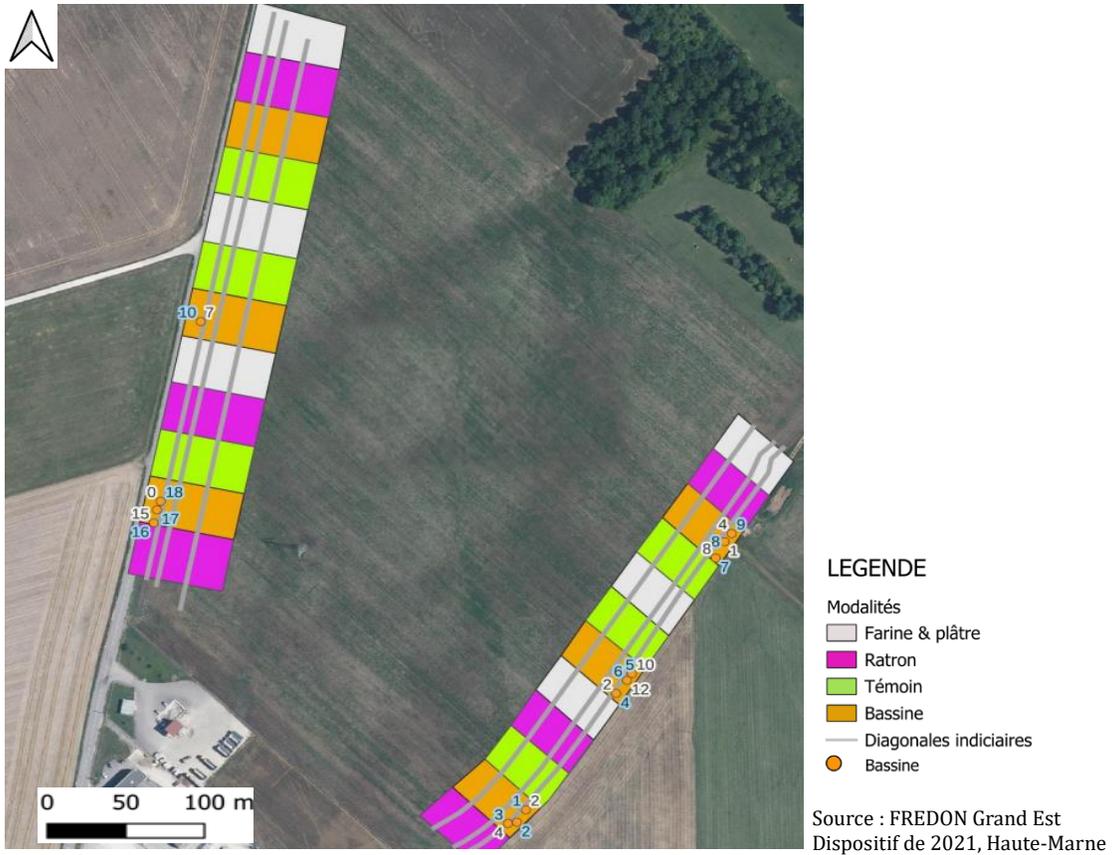
On suppose alors qu'en J21 les taux d'infestation sont inférieurs dans les modalités herse et rodenticide par rapport au témoin. En effet, ces deux méthodes devraient causer la mort directe ou indirecte ou la dispersion des individus présents en J0. Elles détruisent aussi les habitats et ainsi, le temps consacré à la reconstruction au détriment de la reproduction ralentirait le temps de renouvellement. En J42 on suppose que les taux d'infestation augmentent par rapport à J21, puisque les individus encore présents en J21 auraient le temps de se reproduire.

2.3. La Haute-Marne en grandes cultures

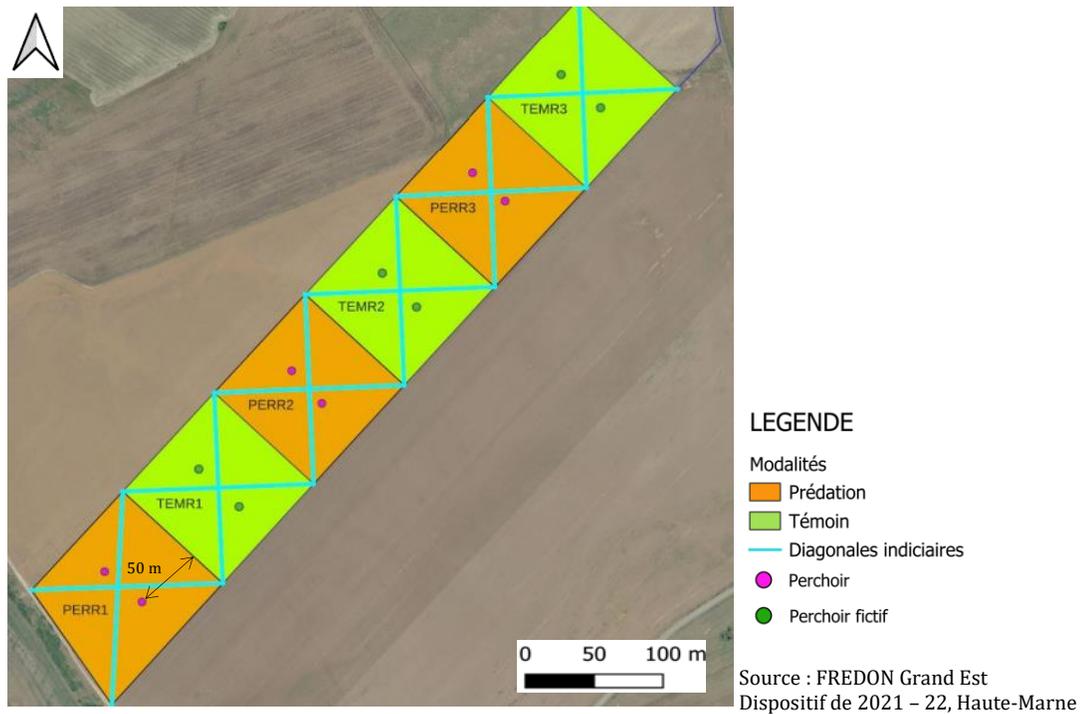
2.3.1. Travail du sol superficiel

Comme pour la Marne, une partie du site de la Haute-Marne se focalise sur l'impact du travail superficiel du sol. Les trois mêmes modalités sont appliquées (cf. Carte 2), mais l'outil utilisé est un déchaumeur. Pour sécuriser sa récolte face au risque de pullulation, l'agriculteur a passé le déchaumeur sur toute la surface de la parcelle. Le sol a donc été travaillé sur 5 cm de profondeur sur toutes les modalités et un nouveau passage à 8 cm de profondeur sur la modalité de travail du sol. Chaque modalité est répétée trois fois. Les observations sont faites en J0, J21, J42 mais aussi J79 et J170 pour un suivi long terme. Ces mesures ont été produites sur une seule parcelle d'orge d'hiver, entre septembre 2019 et mars 2020.

Pour les mêmes raisons que dans la Marne, on suppose un effet négatif du déchaumeur et du rodenticide sur la présence de campagnols des champs en J21. On suppose ensuite que le taux d'infestation retrouve sa valeur initiale sur le long terme.



Carte 3 : Dispositif expérimental de la Haute-Marne pour la gestion des bordures, 2021



Carte 4 : Dispositif expérimental de la Haute-Marne pour la prédation, 2021 - 2022

2.3.2. Gestion des bordures

Sur une autre parcelle de la Haute-Marne, des mesures sur les bordures de champs sont évaluées. En effet, puisque les campagnols se propagent de la bordure vers l'intérieur des parcelles (Rodríguez-Pastor et al., 2016), il serait intéressant de voir les effets des méthodes mises en places sur les bordures. Les modalités testées sont le rodenticide, le piégeage dans des bassines (trois par répétition) (cf. Annexe 1) et l'application d'un mélange de farine et de plâtre dans l'entrée des galeries (cf. Carte 3). En effet, d'après des pratiques populaires, l'association de farine et de plâtre permet de tuer les rats. Le piégeage est en continu de septembre 2020 à novembre 2023, alors que le rodenticide et la farine et le plâtre sont appliqués après la mesure de J0. Le fonctionnement des bassines a été testé au préalable. Les modalités sont répétées six fois dans la parcelle.

Les observations ont été effectuées en J0 et J21 seulement, mais aussi à des distances croissantes par rapport à la bordure : 0 m, 3 m, 10 m et 30 m pour apprécier l'effet de la modalité sur la colonisation de la parcelle. Les modalités ont été appliquées à la distance de 0 m. Ces mesures ont été produites sur une seule parcelle de féveroles en avril et mai 2021.

On suppose ici que d'une part les modalités testées ont un effet négatif sur la présence de campagnols des champs en J21. D'autre part, plus l'éloignement à la bordure augmente, plus le taux d'infestation diminue. Cela permettrait de savoir si les méthodes testées dans les bordures permettent de réduire le taux d'infestation vers l'intérieur des parcelles.

2.3.3. L'effet perchoir pour les rapaces

Enfin, une troisième parcelle a permis d'étudier l'effet de la perchoirs dédiés aux rapaces. Bien que présenté jusqu'ici comme nuisible, le campagnol des champs est la cible de nombreux prédateurs, ce qui fait de lui « une espèce clé pour le réseau trophique » (Pinot, 2012). « Un consensus actuel s'établit pour admettre que la prédation est le facteur explicatif majeur des évolutions de densité de populations de la plupart des espèces de campagnols (Benoît et al. 2007b; Giraudoux et al. 2020; Delattre et al. 1996). Mais, certains chercheurs restent prudents et rappellent que « la question de l'impact des prédateurs sur les populations de proies reste très difficile à traiter, car, dans le monde réel, de multiples prédateurs, dont les effectifs (mouvements, reproduction) et les préférences alimentaires varient non linéairement et se combinent, peuvent consommer de multiples proies dont les effectifs varient aussi non linéairement » (Giraudoux, 2019). Dans cette expérimentation, on suppose alors que les perchoirs vont faciliter la prédation par les rapaces.

Afin d'étudier la prédation par les faucons crécerelles (*Falco tinnunculus*), très présents dans la région, et par d'autres rapaces, des poteaux perchoirs ont été installés pour faciliter la chasse à l'affût (cf. Annexe2). La parcelle a donc été divisée en carrés de 100 m de côté et deux poteaux ont été disposés à l'intérieur de la modalité. On estime que la distance de 50 m entre les poteaux et la modalité témoin permet d'éviter la prédation à l'affût dans le témoin. Les modalités sont répétées trois fois dans la parcelle (cf. Carte 4).

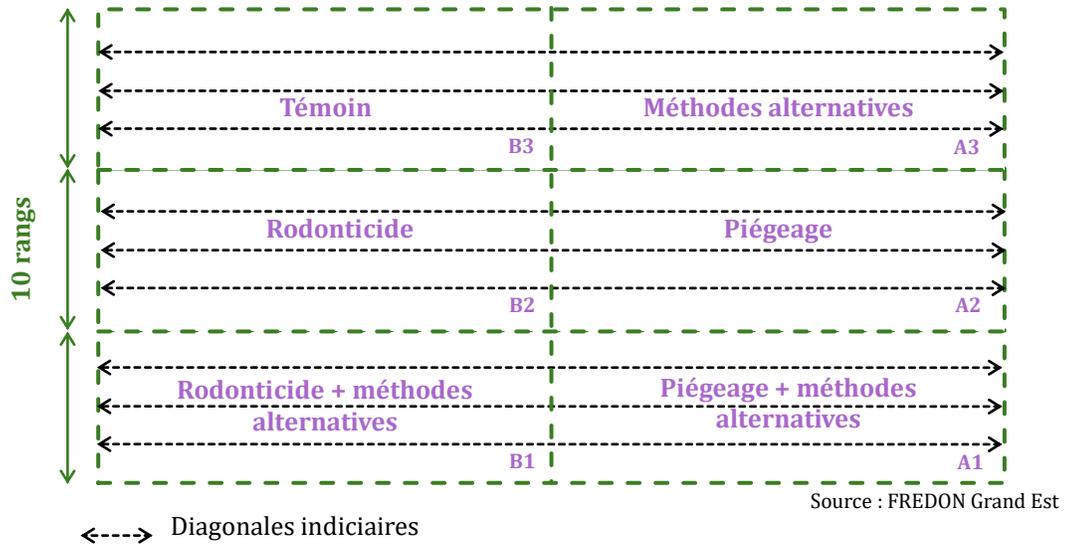


Figure 7 : Dispositif expérimental du verger du VEREXAL

La présence de campagnols a été mesurée en J0, J21, puis pendant plus d'un an (J78, J132, J193, J412, J432, J453, J476). En même temps, le nombre de pelotes rejetées par les rapaces a été compté au pied des poteaux. Puis, ces pelotes ont été analysées afin de vérifier que les proies sont bien des campagnols des champs. Enfin, les rapaces qui utilisent ces perchoirs ont été observés pour savoir de quel rapace il s'agit. Ces mesures préliminaires réalisées par FREDON Grand Est permettent de s'assurer de la présence des rapaces sur chacun des perchoirs et de leur absence dans les modalités témoin. Elles permettent aussi de savoir si la prédation se fait sur le campagnol des champs ou sur un autre micromammifère (prédateur spécialiste ou généraliste).

Cette expérimentation n'a été conduite que sur une seule parcelle entre juin 2021 et septembre 2022. Des féveroles et un couvert de trèfle étaient cultivés jusque septembre 2021, puis du blé jusqu'en juillet 2022 et de nouveau du trèfle jusqu'à la fin de l'expérimentation.

On suppose que la prédation par les rapaces fait diminuer les populations de campagnols des champs (Jareño et al., 2011).

2.4. Le verger expérimental d'Alsace

Les six modalités testées dans le verger sont les suivantes :

- Témoin
- Méthodes alternatives (aérateur de prairie ou engrais à base de ricin pour son effet répulsif)
- Rodenticide
- Piégeage guillotine en acier inoxydable (cf. Annexe 3)
- Rodenticide & méthodes alternatives
- Piégeage & méthodes alternatives

Les deux dernières correspondent à des modalités combinées où deux méthodes sont appliquées (cf. Figure 7).

Les mesures ont été faites une fois par mois pendant quatre ans (à partir de 2021), peu importe la date d'application des modalités (cf. Annexe 4). C'est le cas des rodenticides qui ne peuvent pas être appliqués au printemps et en été, car le verger se trouve en zone de protection du Grand Hamster (*Cricetus cricetus*). Chacun des intervalles est calculé selon la distance en temps par rapport au premier jour, J0. Cette variable sera appelée « JourJulien ».

Dans cette expérimentation, on suppose que l'effet cumulé des modalités testées permet de réduire le taux d'infestation par rapport au témoin. On suppose aussi que les modalités combinées sont plus efficaces que les modalités seules.

3. Analyse statistique de l'effet des méthodes alternatives testées

L'étude des effets des modalités sur le taux d'infestation passe par l'analyse statistique des données de présence relevées dans les dispositifs présentés précédemment. Cette étude sera conduite grâce au logiciel RStudio⁶. Chacun des sites expérimentaux sont étudiés séparément, car les modalités testées et les types de cultures sont différents.

3.1. Nature et choix des données étudiées

Les données ont été rassemblées dans un tableur Excel. Il regroupe des informations propres à la parcelle (qualitatives ou quantitatives) et le jour de la mesure (J0, J21, etc.). Chacune de ces informations sont des variables explicatives utilisées pour la modélisation des résultats. La présence (1) ou l'absence (0) de campagnols des champs dans un segment est la variable réponse, appelée « présence ». Les individus statistiques sont les segments. Lors de la création des bases de données, un nouvel identifiant unique a été attribué à chacun des individus statistiques, pour qu'un même segment mesuré plusieurs fois (à J0, J21 par exemple) puisse être identifié.

Enfin, un tri des individus a été effectué pour s'affranchir des mesures qui pourraient biaiser les résultats. C'est le cas de certains comptages qui ont été réalisés avec une mauvaise visibilité sur les parcelles, ou à un protocole qui n'a pas pu être respecté.

3.2. Modélisation des interactions entre les variables

Afin de comprendre les interactions entre les variables explicatives et la variable réponse, des modèles ont été créés sur la base des hypothèses liées aux résultats d'études précédentes et à la biologie du campagnol des champs. Le but est de trouver le modèle qui répond le mieux à ces hypothèses et de fournir les résultats associés. Ces modèles permettront de prédire les taux d'infestation dans différentes conditions.

Les modèles pourront être différents en fonction du site expérimental concerné.

Dans la suite, les saisons sont définies d'après le calendrier :

- Printemps (avril, mai, juin) ;
- Été (juillet, août, septembre) ;
- Automne (octobre, novembre, décembre) ;
- Hiver (janvier, février, mars).

⁶ Version 4.4.0 de R. Les bibliothèques utilisées sont 'lme4' et 'emmeans'

Tableau 4 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Marne

NOM DE LA VARIABLE	DESCRIPTION	NOTATION	NOMBRE DE CATÉGORIES
id_segment	Identifiant unique de l'individu	1,2, ..., 18758	
parcelle	Nom de la parcelle	A, B, ..., H	8 parcelles
mod	Modalité appliquée à l'individu	M1 (herse), M2 (témoin) ou M3 (rodenticide)	3 modalités
culture	Nom de la culture dans laquelle se trouve l'individu	luzerne, dactyle, fétuque ou koeleria	4 cultures
age_culture	Age de la culture dans laquelle se trouve l'individu	1,2 ou 3	3 âges
annee	Année de la mesure	2019, 2020, ..., 2024	6 années
saison	Saison de la mesure	p (printemps) ou a (automne)	2 saisons
jour	Jour de la mesure	J0, J21 ou J42	3 jours
presence	Présence / absence de campagnol dans l'individu	0 (absence) ou 1 (présence)	

3.2.1. Un modèle linéaire généralisé à effet mixte pour la Marne

Dans la base de données du site de la Marne, les variables utilisées pour la modélisation statistique sont dans le Tableau 4.

Pour le site de la Marne, c'est un modèle linéaire généralisé à effet mixte (GLMM) qui a été choisi. Les raisons qui permettent de justifier ce choix sont les suivantes :

- La variable réponse « présence » est une variable binaire {0 ; 1} qui suit donc une loi binomiale. Le choix d'une régression logistique avec un lien logit et une distribution d'erreur binomiale permet de modéliser ces données ;
- Des individus sont regroupés selon la variable « parcelle », puisque l'environnement autour de la parcelle et sa localisation n'impacteraient pas de la même façon l'évolution des populations (cf. diagnostic paysager). Les données ne sont donc pas indépendantes. Un effet aléatoire sur la variable parcelle permet de prendre en compte cette hypothèse ;
- Enfin, d'après la cyclicité du campagnol des champs, des années sont sujettes aux pullulations. De ce fait, un effet aléatoire est aussi appliqué à la variable « année ».

Le but étant d'étudier l'impact des modalités selon les jours sur la variable « présence », une interaction est appliquée entre ces deux variables.

D'après ces informations, le GLMM est donc de la forme :

```
glmm_1 <- glmer(presence ~ mod : jour + culture + age_culture + saison + (1 | parcelle) + (1 | annee),
               family = binomial(link = "logit"), data = marne_bis)
```

Puis, ce modèle a été testé afin de savoir s'il représente bien les données. Les variances des effets aléatoires ont été calculées afin de vérifier l'intérêt de ces variables en tant qu'effet aléatoire. La qualité du modèle a été comparée à celle d'autres modèles dont les variables à effet fixe ont été retirées une à une. Les AIC⁷ de chacun des modèles sont comparés. Le modèle dont l'AIC est le plus faible est conservé. Enfin, la qualité de l'ajustement du modèle est évaluée pour s'assurer qu'il n'y a pas de sur-dispersion des données.

Lorsque le meilleur modèle est identifié, l'étude des coefficients permet de décrire les effets des variables explicatives sur la présence de campagnols des champs et leur niveau de significativité. Le package « emmeans » a été utilisé pour comparer les moyennes marginales du modèle et les erreurs standard associées pour les différentes combinaisons « mod : jour » (test post hoc). Puis, les prédicteurs du modèle sont calculés sous la forme « response » qui permet d'annuler la fonction logit du GLMM. Ces prédicteurs sont des valeurs moyennes prédites par le modèle pour des observations données. Les erreurs standards associées permettent d'expliquer à quel point l'ensemble des données utilisées représente la réalité. Plus l'erreur standard de la moyenne (du prédicteur) est petite, plus la valeur est proche de la réalité. Ces prédicteurs représentent alors le taux d'infestation dans des conditions fixées. Ainsi, les variables explicatives sont fixées et seulement une variable d'intérêt est modifiée. Pour choisir à quel niveau fixer les variables, le taux d'infestation de chacune a été prédit dans la modalité témoin et en fonction des autres variables.

⁷L'AIC permet de comparer différents modèles pour déterminer lequel est le plus approprié tout en pénalisant les modèles plus complexes.

Tableau 5 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Haute-Marne sur le travail du sol

NOM DE LA VARIABLE	DESCRIPTION	NOTATION	NOMBRE DE CATÉGORIES
id_segment	Identifiant unique de l'individu	1,2, ..., 2477	
mod	Modalité appliquée à l'individu	M1 (déchaumeur), M2 (témoin) ou M3 (rodenticide)	3 modalités
jour	Jour de la mesure	J0, J21, J42, J79 ou J170	5 jours
presence	Présence / absence de campagnol dans l'individu	0 (absence) ou 1 (présence)	

Tableau 6 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Haute-Marne sur les bordures

NOM DE LA VARIABLE	DESCRIPTION	NOTATION	NOMBRE DE CATÉGORIES
id_segment	Identifiant unique de l'individu	1,2, ..., 641	
mod	Modalité appliquée à l'individu	M4 (farine & plâtre), M2 (témoin), M3 (rodenticide) ou M5 (piégeage bassine)	4 modalités
jour	Jour de la mesure	J0 ou J21	2 jours
distance	Distance à la bordure	0, 3, 10 ou 30 (m)	4 distances
presence	Présence / absence de campagnol dans l'individu	0 (absence) ou 1 (présence)	

A partir de ces résultats, il est donc possible de voir l'impact des modalités au cours du temps sur le taux d'infestation dans les parcelles.

3.2.2. Trois modèles linéaires généralisés pour la Haute-Marne

- [Travail superficiel du sol](#)

Sur le site de la Haute-Marne, trois expérimentations différentes sont menées sur trois parcelles. Comme pour la Marne, le travail superficiel du sol est testé sur une des parcelles. Les variables utilisées pour la modélisation statistique sont dans le Tableau 5.

Pour cette expérimentation, c'est un modèle linéaire généralisé (GLM) qui a été choisi. Les raisons qui permettent de justifier ce choix sont les mêmes que pour la Marne. Cependant, comme les données retenues ne concernent qu'une année et une seule parcelle, les effets aléatoires présents pour la Marne ne sont pas utilisés ici.

Le but étant d'étudier l'impact des modalités selon les jours sur la variable « présence », une interaction est appliquée entre ces deux variables. Les AIC de ce modèle et d'un modèle sans interaction sont comparés.

D'après ces informations, le GLM est donc de la forme :

```
glm_1 <- glm(presence ~ mod : jour,
             family = binomial(link = "logit"), data = haute_marne)
```

L'étude des coefficients permet de décrire les effets des variables explicatives sur la présence de campagnols des champs. Le package 'emmeans' permet d'étudier la significativité des différences des moyennes marginales du modèle (test post hoc). Puis, les prédicteurs du modèle sont calculés sous la forme « response » qui permet d'annuler la fonction logit du GLM.

A partir de ces résultats, il est donc possible de voir l'impact des modalités au cours du temps sur le taux d'infestation dans les parcelles.

- [Travail sur les bordures de champs](#)

Puis, sur une deuxième parcelle, des modalités sont testées sur les bordures. Les variables utilisées pour la modélisation statistique sont dans le Tableau 6.

Pour cette expérimentation, c'est un modèle linéaire généralisé (GLM) qui a été choisi. Les raisons qui permettent de justifier ce choix sont les mêmes que pour le GLM précédent.

Le but étant d'étudier l'impact des modalités selon les jours et la distance sur la variable « présence », une interaction est appliquée entre ces trois variables.

D'après ces informations, le GLM est donc de la forme :

```
glm_3 <- glm(presence ~ mod : jour : distance,
             family = binomial(link = "logit"), data = bordure)
```

L'étude des coefficients et des prédicteurs se déroule comme précédemment.

A partir de ces résultats, il est donc possible de voir l'impact des modalités au cours du temps et selon la distance à la bordure sur le taux d'infestation dans les parcelles.

Tableau 7 : Variables et données retenues pour le site expérimental de la Haute-Marne pour la prédation

NOM DE LA VARIABLE	DESCRIPTION	NOTATION	NOMBRE DE CATÉGORIES
id_segment	Identifiant unique de l'individu	1,2, ..., 2647	
mod	Modalité appliquée à l'individu	M6 (perchoir) ou M2 (témoin)	2 modalités
jour	Jour de la mesure	J0, J21, J78, J132, J193, J412, J432, J453 ou J476	9 jours
presence	Présence / absence de campagnol dans l'individu	0 (absence) ou 1 (présence)	

Tableau 8 : Variables et données retenues pour le VEREXAL

NOM DE LA VARIABLE	DESCRIPTION	NOTATION	NOMBRE DE CATÉGORIES
id_segment	Identifiant unique de l'individu	1,2, ..., 5760	
mod	Modalité appliquée à l'individu	B1(rodenticide & méthode alternative), B2 (rodenticide), B3 (témoin), A1 (piégeage & méthode alternative), A2 (piégeage) ou A3 (méthode alternative)	6 modalités
saison	Saison de la mesure	printemps, ete, automne ou hiver	4 saisons
JourJulien	Le nombre de jour depuis la première mesure	0, 10, ..., 1202 (cf. Annexe 4)	32 jours
presence	Présence / absence de campagnol dans l'individu	0 (absence) ou 1 (présence)	

- [Effet des perchoirs](#)

Enfin, sur la troisième parcelle, la prédation par les rapaces, favorisée par l'installation de perchoirs, est testée. Les variables utilisées pour la modélisation statistique sont dans le Tableau 7.

Pour cette expérimentation, c'est un modèle linéaire généralisé (GLM) qui a été choisi. Les raisons qui permettent de justifier ce choix sont les mêmes que pour le GLM précédent.

Le but étant d'étudier l'impact des modalités selon les jours sur la variable « présence », une interaction est appliquée entre ces deux variables. Le modèle est ensuite comparé avec un modèle sans interaction pour voir si celle-ci est nécessaire.

D'après ces informations, le GLM est donc de la forme :

```
glm_7 <- glm(presence ~ mod : jour,
            family = binomial(link = "logit"), data = perchoirs)
```

L'étude des coefficients et des prédicteurs se déroule comme précédemment.

A partir de ces résultats, il est donc possible de voir l'impact des modalités au cours du temps et selon la distance à la bordure sur le taux d'infestation dans les parcelles.

3.2.3. Un modèle additif généralisé pour le VEREXAL

Dans le verger, six modalités ont été testées. A la différence des autres sites, le but est de voir l'effet cumulé des méthodes alternatives depuis 2021. Les variables utilisées pour la modélisation statistique sont dans le Tableau 8.

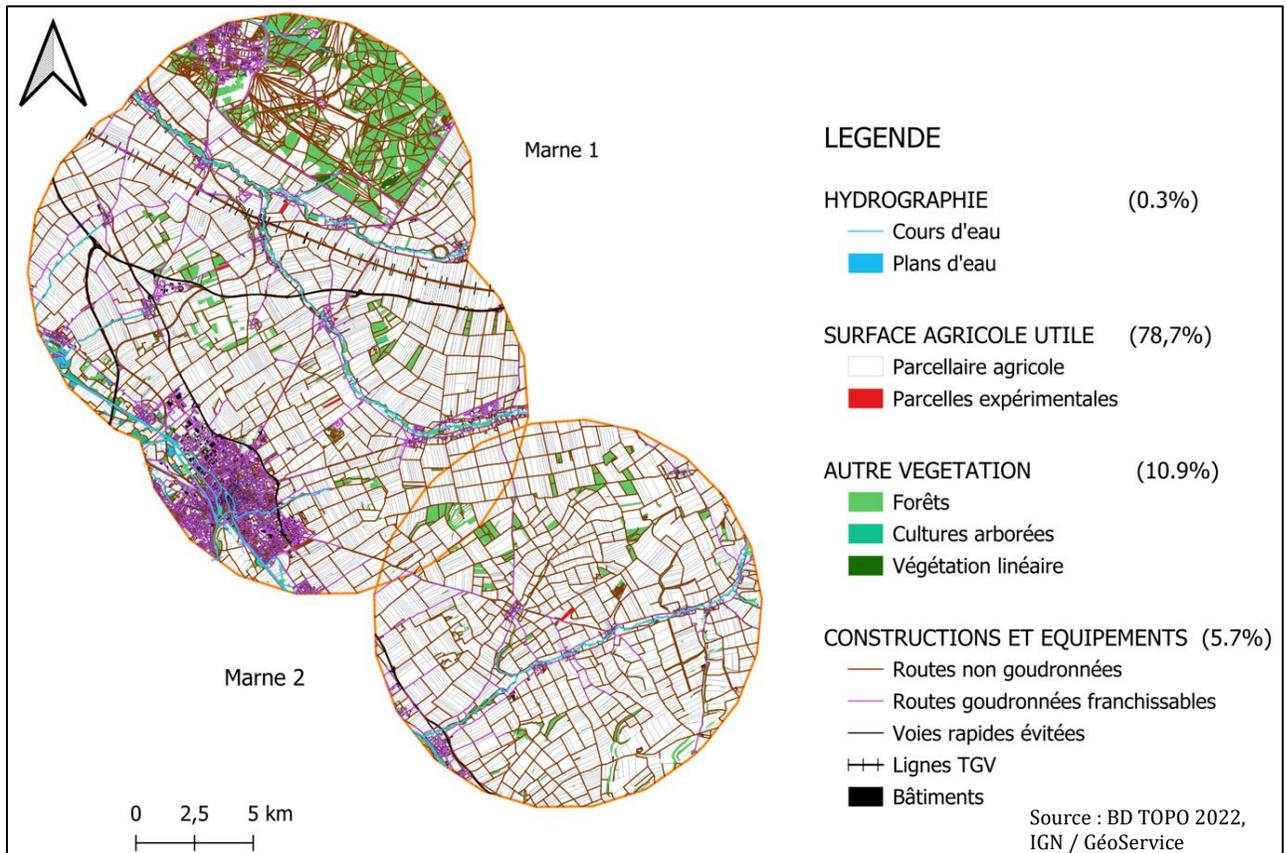
Pour cette expérimentation, c'est un modèle additif généralisé (GAM) qui a été choisi. Les raisons qui permettent de justifier ce choix sont similaires à celles des modèles précédents concernant la nature des données. Cependant, le GAM offre une méthode flexible pour décrire une relation non-linéaire entre la variable réponse et les variables explicatives. C'est le cas pour la variable « JourJulien » qui permet de suivre la cinétique des populations de campagnols. Les jours n'impactent donc pas la variable « présence » linéairement (variations annuelles et pluriannuelles). La variable JourJulien est donc lissée (par une fonction spline) pour prendre en compte cette non-linéarité.

D'après ces informations, le GAM est donc de la forme :

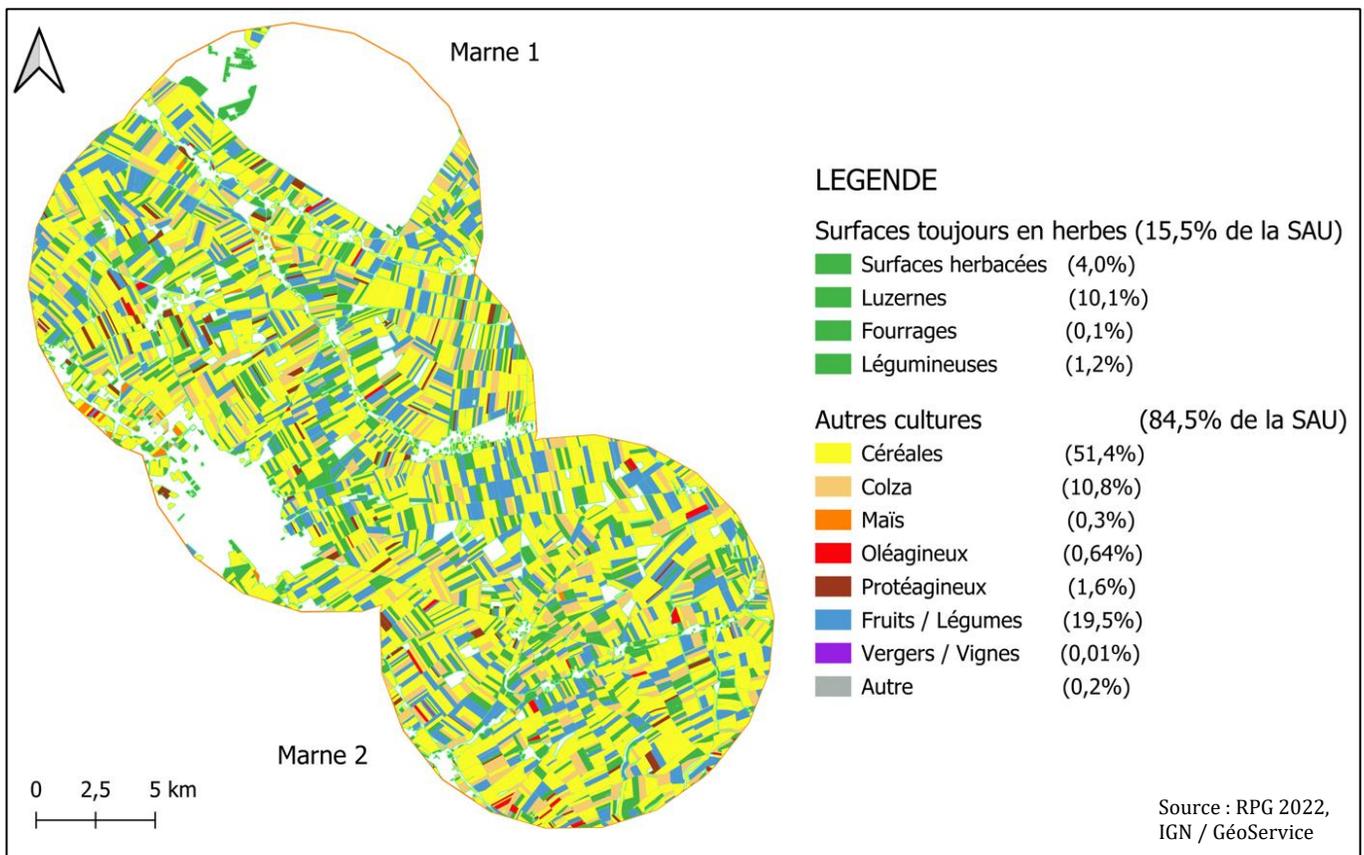
```
gam_1 <- gam(presence ~ s(JourJulien), family = binomial, data = alsace_bis)
```

Le but étant d'étudier l'impact des modalités sur cette cinétique, la variable « mod » est ajoutée. En comparant les AIC, il sera possible de voir si en moyenne les taux d'infestation sont différents en fonction de la modalité.

Enfin, d'après les études préliminaires réalisées sur le verger (cf. Annexe 5) et la bibliographie, on sait que les différences de taux d'infestation dans les modalités sont surtout portées par les saisons. Selon cette hypothèse, une interaction entre la variable « mod » et « saison » est appliquée.



Carte 5 : Structure paysagère du site expérimental de la Marne



Carte 6 : Composition paysagère du site expérimental de la Marne

L'étude des coefficients permet de décrire les effets des modalités sur la présence de campagnols des champs et leur niveau de significativité. Le package « emmeans » a été utilisé pour comparer les moyennes et les erreurs standard associées pour les différentes combinaisons « mod : saison ».

III. RÉSULTATS & ANALYSE

1. Le diagnostic paysager des sites expérimentaux

1.1. Analyse cartographique des zones d'étude

Les cartes d'un seul site expérimental seront présentées et analysées ici puisque le raisonnement est le même pour les autres sites. Les autres cartes sont rapportées en Annexes 6 et 7.

La carte de structure paysagère du site de la Marne met en avant l'agencement des éléments de structure (cf. Carte 5). On constate que plus des trois quarts de la surface de la zone sont occupés par les cultures agricoles (SAU) et que les autres types de végétation, tels que les forêts, les cultures arborées ou les linéaires de haies ne représentent que 10,9 % de cette zone. Enfin, les constructions et les réseaux routiers et ferroviaires couvrent 5,7 % de la zone et les plans et cours d'eau, 0,3 %. La végétation (hors parcelles agricoles) est assez rare et les quelques zones boisées ne sont pas interconnectées. La majeure partie du paysage est consacrée à l'agriculture (78,7 %). Ce paysage est très ouvert et homogène dans sa structure.

La carte de composition paysagère permet de détailler plus précisément la SAU (cf. Carte 6). Dans ce site expérimental, les surfaces herbacées, de luzernes, de fourrages et de légumineuses représentent plus de 15,5 % de la SAU. Comme défini précédemment, ces cultures sont considérées comme des STH, le ratio STH/SAU est donc de 15,5 %. Les 84,5 % restant sont majoritairement des céréales (51,4 %), puis des cultures de fruits et légumes (19,5 %), des colzas (10,8 %). Enfin, les maïs, les oléagineux, les protéagineux, les vignes et vergers et les autres cultures varient entre 1,6 et 0,01 % de la SAU. Les parcelles sont régulières, rectangulaires et majoritairement consacrées à la culture des céréales.

Du fait de sa configuration, ce site pourrait être qualifié d'openfield. Les parcelles sont ensuite étudiées au regard de la grille d'analyse de risque qui suit.

1.2. Une grille d'analyse de risque pour évaluer la sensibilité des parcelles face aux pullulations de campagnols des champs

Cette grille d'analyse de risque permet une classification du niveau de risque de pullulation de campagnols des champs depuis un niveau très faible vers un niveau très élevé. Elle prend en compte les cinq éléments influant le développement des populations, présentés dans la partie II.1.3. (cf. Figure 8).

En l'état, la grille présente une situation juste après le « travail du sol » (cf. Figure 8). A noter que cet effet « travail du sol » diminue avec le temps puisque les campagnols peuvent réinfester les parcelles. A cette grille, il faut ajouter la dynamique pluriannuelle : plus on s'approche d'une pullulation, plus le risque augmente. Cette grille est un outil d'aide à la décision à destination des agriculteur·rices et des technicien·nes pour aider à la gestion de leur culture.

En utilisant les Cartes 5 et 6 (et les Annexe 6 et 7) des sites expérimentaux et les caractéristiques des parcelles étudiées, la sensibilité des parcelles face aux pullulation de campagnols des champs a pu être estimée. Dans la grille, chaque symbole représente une parcelle peu de temps après le travail du sol. Ces niveaux de risque sont ensuite adaptés en fonction du temps pendant lequel le sol n'est pas travaillé et en fonction de la phase du cycle du campagnol des champs. La forme du symbole correspond à un site expérimental.

Ainsi, d'après cette grille, peu de temps après le travail du sol, les parcelles de la Marne ont un niveau de risque très faible pour les parcelles labourées et élevé pour les parcelles en TCS. Cependant, les cultures étudiées restent en place entre 1 an et 3 ans, donc au cours du temps, ce risque va augmenter. Enfin, d'après les suivis de population de campagnols des champs effectués par FREDON Grand Est, il semble que l'automne 2020 corresponde au dernier pic de pullulation. Si l'on considère que les pics de pullulation apparaissent tous les 4 à 5 ans, alors les populations sont dans une phase de croissance et le risque augmente. C'est pourquoi les parcelles étudiées dans la Marne ont un risque de pullulation entre élevé et très élevé.

Après semi, les parcelles de la Haute-Marne 1, ont un risque faible pour l'expérimentation sur les bordures et modéré pour l'expérimentation sur les perchoirs. Le sol n'a pas été travaillé pendant toute l'expérimentation sur les perchoirs (SD-SCV entre les cultures) ou superficiellement pour l'expérimentation sur les bordures (TCS). Comme pour la Marne, il semble que les populations soient en phase de croissance. Finalement, le risque au moment de la récolte serait modéré et élevé. Pour le site Haute-Marne 2, sur le travail du sol, la parcelle est initialement à un risque modéré et finalement à un risque élevé.

Enfin, au sein du verger, le travail du sol est limité, et pourrait correspondre à un SD-SCV et les arbres restent en place plusieurs années. Ainsi, au regard du cycle du campagnol, le risque de pullulation au sein du verger oscille entre élevé et très élevé.

Tableau 9 : Comparaison des AIC des GLMM proposés pour le site expérimental de la Marne

MODELES	AIC
glmm_1	18368.78
glmm_2	18374.65
glmm_3	18378.57
glmm_4	18380.88

```

Random effects:
  Groups   Name      Variance Std.Dev.
parcelle (Intercept) 1.70932  1.3074
annee    (Intercept) 0.01253  0.1119
Number of obs: 18847, groups:  parcelle, 8; annee, 6

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)    0.64238    0.72744   0.883 0.377197
culturefetuque -3.13508    1.15675  -2.710 0.006723 **
culturekoehleria -3.27788    1.57432  -2.082 0.037333 *
cultureluzerne  0.57671    1.27526   0.452 0.651107
age_culture    -0.28471    0.09841  -2.893 0.003815 **
saisona        0.56221    0.16554   3.396 0.000683 ***
modM2:jourJ0   0.10493    0.07859   1.335 0.181842
modM1:jourJ0   0.09340    0.07930   1.178 0.238896
modM3:jourJ0   0.10768    0.08098   1.330 0.183643
modM2:jourJ21  0.20190    0.07833   2.578 0.009946 **
modM1:jourJ21 -0.59299    0.08279  -7.163 7.92e-13 ***
modM3:jourJ21 -0.30374    0.08354  -3.636 0.000277 ***
modM2:jourJ42  0.47319    0.07920   5.975 2.30e-09 ***
modM1:jourJ42 -0.14841    0.08162  -1.818 0.069032 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
    
```

Figure 9 : Résumé du glmm_1

jour = J0:							mod = M2:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	1.012	0.0743	Inf	1	0.157	0.9865	J0 / J21	0.908	0.0657	Inf	1	-1.340	0.3732
M2 / M3	0.997	0.0757	Inf	1	-0.036	0.9993	J0 / J42	0.692	0.0510	Inf	1	-4.999	<.0001
M1 / M3	0.986	0.0757	Inf	1	-0.186	0.9811	J21 / J42	0.762	0.0559	Inf	1	-3.697	0.0006
jour = J21:							mod = M1:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	2.214	0.1695	Inf	1	10.383	<.0001	J0 / J21	1.987	0.1538	Inf	1	8.866	<.0001
M2 / M3	1.658	0.1300	Inf	1	6.449	<.0001	J0 / J42	1.274	0.0976	Inf	1	3.155	0.0046
M1 / M3	0.749	0.0620	Inf	1	-3.493	0.0014	J21 / J42	0.641	0.0510	Inf	1	-5.590	<.0001
jour = J42:							mod = M3:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	1.862	0.1430	Inf	1	8.095	<.0001	J0 / J21	1.509	0.1224	Inf	1	5.073	<.0001
M2 / M3	1.605	0.1271	Inf	1	5.975	<.0001	J0 / J42	1.114	0.0902	Inf	1	1.330	0.3787
M1 / M3	0.862	0.0704	Inf	1	-1.818	0.1636	J21 / J42	0.738	0.0617	Inf	1	-3.636	0.0008

Figure 10 : Comparaisons des modalités en fonction des jours (à gauche) ; puis des jours en fonction des modalités (à droite) (package 'emmeans'), pour le site de la Marne

2. Les effets des méthodes alternatives sur le taux d'infestation de campagnols des champs

2.1. Le meilleur modèle pour la Marne et les résultats des modalités testées

Le résultat de la comparaison entre les AIC des modèles testés ci-dessous est présenté dans le Tableau 9.

```
glmm_1 <- glmer(presence ~ mod : jour + culture + age_culture + saison + (1 | parcelle) + (1 | annee),
               family = binomial(link = "logit"), data = marne_bis)
glmm_2 <- glmer(presence ~ mod : jour + culture + age_culture + (1 | parcelle) + (1 | annee),
               family = binomial(link = "logit"), data = marne_bis)
glmm_3 <- glmer(presence ~ mod : jour + culture + (1 | parcelle) + (1 | annee),
               family = binomial(link = "logit"), data = marne_bis)
glmm_4 <- glmer(presence ~ mod : jour + (1 | parcelle) + (1 | annee),
               family = binomial(link = "logit"), data = marne_bis)
```

Les variables explicatives ont été enlevées une à une pour tester leur intérêt dans le modèle. Le `glmm_1`, dont l'AIC est le plus faible, est gardé. Ce GLMM comprend toutes les variables explicatives et est celui qui permet d'expliquer le mieux la variabilité des données.

La qualité de l'ajustement du modèle est validée en vérifiant qu'il n'y a pas de sur-dispersion des données (cf. Annexe 8). Cela suggère que le modèle explique une proportion importante de la variabilité dans les données par rapport à la variabilité inexpliquée.

Enfin, l'intérêt et le bon ajustement des effets aléatoires sont confirmés.

Le résumé du `glmm_1` décrit les effets des variables indépendantes sur la variable « presence ». Les valeurs de référence sont la modalité témoin (M2), dans un dactyle, au printemps et en J0. D'après la Figure 9, les cultures de féтуque et koeleria ont significativement moins de campagnols des champs dans les conditions de référence par rapport aux cultures de dactyle dans les conditions de référence. La présence de campagnols des champs dans une luzerne n'est pas significativement différente de celle dans un dactyle dans les conditions de référence. L'âge de la culture a un effet significatif sur la présence de campagnols : plus l'âge de la culture augmente, plus la présence de campagnols diminue. Les interactions ne semblent pas comparables avec l'intercept. En effet, la première interaction « M2 : J0 » est sensée correspondre aux valeurs de référence (témoin M2 et J0) mais le coefficient est différent. Cependant il ne paraît pas possible d'imposer une interaction dans l'intercept. C'est pourquoi le package 'emmeans' est utilisé ensuite.

Les résultats des comparaisons par paires des interactions « modalité : jour » via un test post hoc sont dans la Figure 10. En J0, les modalités ne sont pas significativement différentes entre elles. En J21, il y a significativement moins de campagnols dans les modalités « herse » (M1) et « rodenticide » (M3) que dans la modalité témoin (M2). De plus, il y a significativement moins de campagnols dans la modalité « herse » que dans la modalité « rodenticide ». En J42, il y a significativement moins de campagnols dans les modalités « herse » (M1) et « rodenticide » (M3) que dans la modalité témoin (M2). De plus, la présence de campagnols dans les modalités « herse » et la présence dans la modalité « rodenticide » ne sont pas significativement différentes (cf. Figure 10).

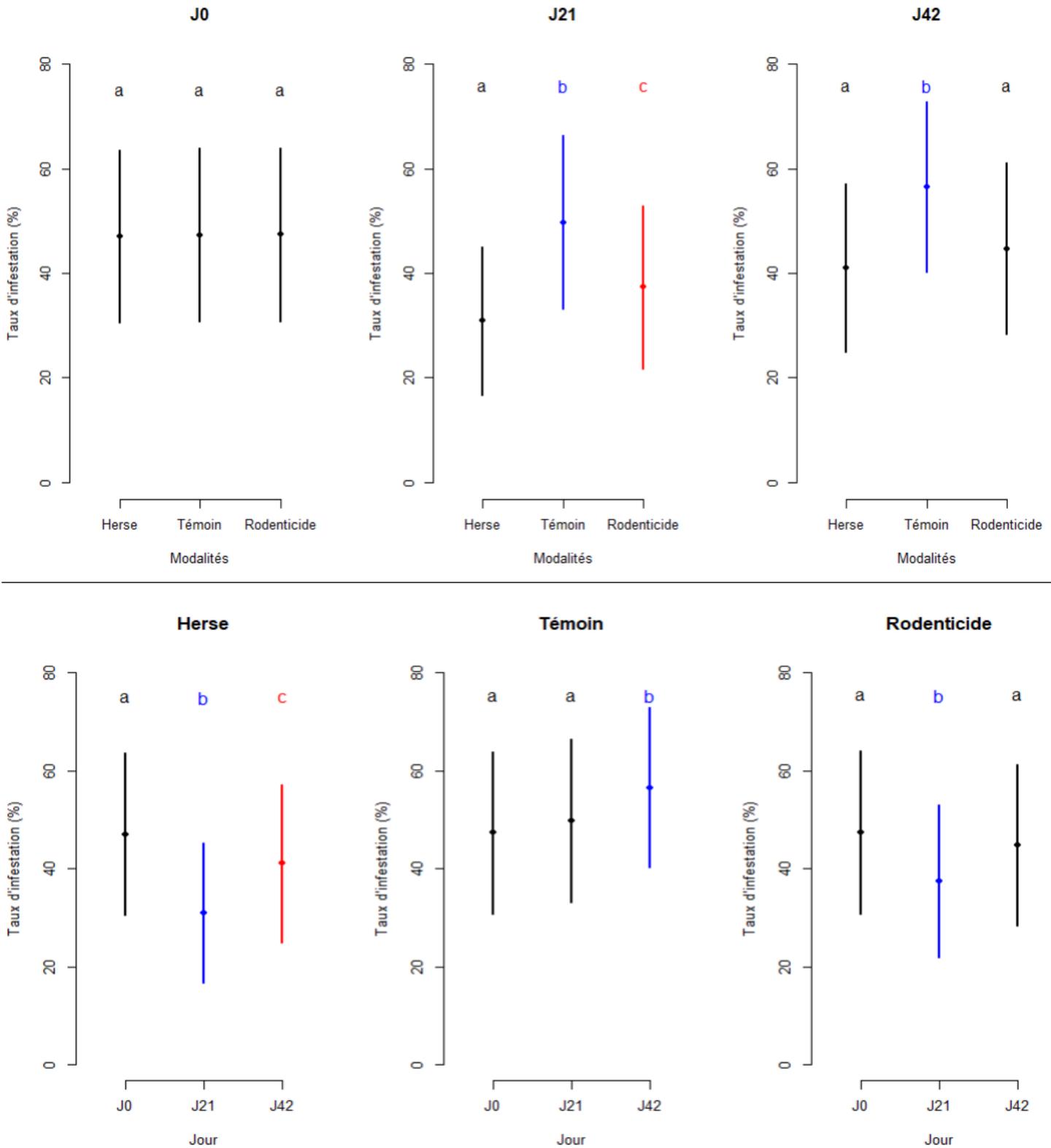


Figure 11 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs au cours du temps (J0, J21, J42), dans une modalité témoin, une modalité de travail superficiel du sol (herse) et une modalité traitée par rodenticide.

Ces taux sont les prédictions issues du *glimm_1*, dans un dactyle de trois ans au printemps, dans le site expérimental de la Marne. Les comparaisons sont en fonction des modalités (en haut), ou des jours (en bas). Les barres représentent les erreurs standards prédites. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre les moyennes marginales du modèle.

Par ailleurs, la comparaison en fonction des modalités permet de comparer les jours entre eux. Dans la modalité témoin, la présence en J0 n'est pas significativement différente de la présence en J21. En J42, la présence de campagnols augmente significativement par rapport à J21. Enfin, entre J0 et J42, il y a une augmentation significative. Dans la modalité « herse », la présence de campagnols diminue significativement entre J0 et J21, puis réaugmente significativement entre J21 et J42. Cependant, la présence en J42 reste significativement inférieure à la présence en J0. Pour finir, dans la modalité « Rodenticide », la présence de campagnols diminue significativement entre J0 et J21, puis réaugmente significativement entre J21 et J42. La présence en J42 n'est pas significativement différente de la présence en J0.

Pour représenter l'évolution de ces taux d'infestation, les prédicteurs du modèle et les erreurs standards associées sont présentés dans la Figure 11. Les taux d'infestation sont prédits en fixant les variables explicatives (cf. Annexe 9, 10 et 11). Les niveaux choisis pour ces variables explicatives sont :

- Le dactyle pour la variable culture ;
- Le printemps pour la variable saison ;
- Et une culture de 3 ans pour la variable age_saison.

En J0, ce sont les taux les plus proches des taux réels.

Pour ce graphique, les points représentent le taux d'infestation prédits par le modèle pour chacun des niveaux « mod » ou « jour ». Les barres représentent les erreurs standards issues du `glmm_1`. Elles permettent d'expliquer à quel point l'ensemble des données utilisées représente la réalité : c'est l'incertitude de la moyenne échantillonnale. Les lettres (couleurs) au-dessus de chaque point reprennent la significativité des différences présentées avant. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre les taux d'infestation d'une même modalité ou d'un même jour.

D'après la Figure 11, dans les conditions choisies, le taux d'infestation en J0 est d'environ 47 %. Puis en J21, le taux d'infestation diminue d'environ 17 points de pourcentage pour la modalité « herse » et de 10 points pour la modalité « rodenticide ». Le témoin au contraire augmente de 2 points. Enfin, en J42, les taux d'infestation sont de 41 % pour la modalité « herse », 45 % pour la modalité « Rodenticide » et 56 % pour le témoin. On observe donc une diminution de la présence à court terme (au moins 21 jours) dans les modalités « herse » et « rodenticide ». Cette diminution est plus grande dans la modalité « herse » et n'existe pas dans le témoin. A plus long terme (au moins 42 jours), les taux d'infestation augmentent dans toutes les modalités par rapport à J21. Les taux d'infestation des modalités « herse » et « rodenticide » restent inférieurs à celui du témoin.

Tableau 10 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur le travail superficiel du sol

MODELES	AIC
glm_1	1447.341
glm_2	1466.250

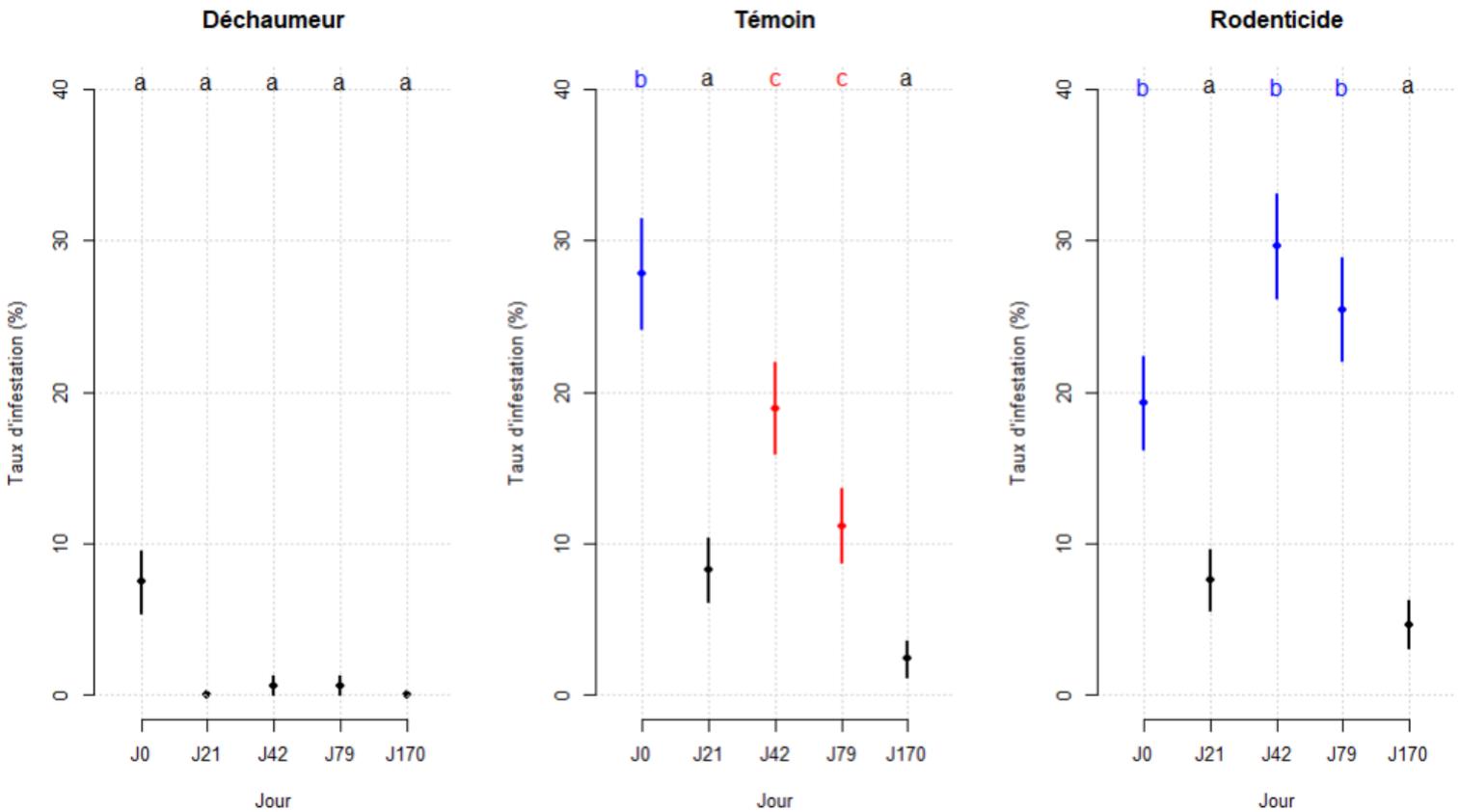


Figure 12 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs au cours du temps (J0, J21, J42, J79, J170) dans une modalité témoin, une modalité de travail superficiel du sol (déchaumeur) et une modalité traitée par rodenticide.

Ces taux sont les prédictions issues du glm_1, dans de l'orge d'hiver entre septembre 2019 et mars 2020, dans le site expérimental de la Haute-Marne. Les barres représentent les erreurs standards issues du glm_1. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre les moyennes marginales du modèle. Ces lettres peuvent être comparées au sein d'une même modalité, mais aussi entre les modalités pour un même jour.

2.2. Les meilleurs modèles pour la Haute-Marne et les résultats des modalités testées

- [Travail superficiel du sol](#)

Le résultat de la comparaison entre les AIC des modèles testés ci-dessous est présenté dans le Tableau 10.

```
glm_1 <- glm(presence ~ mod : jour,
             family = binomial(link = "logit"), data = haute_marne)
glm_2 <- glm(presence ~ mod + jour,
             family = binomial(link = "logit"), data = haute_marne)
```

Le glm_1, dont l'AIC est le plus faible, est gardé. Ce GLM comprend l'interaction entre les variables explicatives. Il permet d'expliquer le mieux la variabilité des données.

Le résumé du glm_1 décrit les effets des variables indépendantes sur la variable « presence » (cf. Annexe 12). Les valeurs de référence sont la modalité témoin (M2) en J0. Pour les mêmes raisons que précédemment, le package 'emmeans' est utilisé. Les résultats des comparaisons par paires des interactions « modalité : jour » via un test post hoc sont dans l'Annexe 13. Pour rappel, il y a eu un passage de déchaumeur sur toute la parcelle après les mesures de J0.

Dans ce graphique, les points représentent le taux d'infestation prédits par le modèle pour chacun des niveaux « mod » ou « jour ». Les barres représentent les erreurs standards. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre les taux d'infestation. Ces lettres peuvent être comparées au sein d'une même modalité, mais aussi entre les différentes modalités mais pour un même jour.

D'après la Figure 12, en J0, le taux d'infestation est d'environ 28 %, puis diminue d'environ 20 points de pourcentage en J21, pour la modalité « témoin ». Cette différence est significative. En J42, le taux d'infestation augmente et atteint environ 19 %, puis 11 % en J79. La différence entre les taux d'infestation entre J42 et J79 n'est pas significative. Les taux en J42 et J79 sont significativement différents des taux en J0 et J21. Enfin, le taux d'infestation en J170 est d'environ 2 % et est significativement différent des taux en J0, J42 et J79.

Dans la modalité « déchaumeur », en J0, le taux d'infestation est d'environ 7 %, puis devient nul pour les jours suivants. Les différences ne sont pas significatives.

Enfin, dans la modalité « Rodenticide », en J0, le taux d'infestation est d'environ 19 %, puis diminue d'environ 12 points en J21. Cette différence est significative. En J42, le taux d'infestation augmente et atteint environ 30 %, puis 25 % en J79. La différence entre les taux d'infestation entre J0, J42 et J79 n'est pas significative. Les taux en J42 et J79 sont significativement différents des taux en J21 et J170. Enfin, le taux d'infestation en J170 est d'environ 5 %.

En comparant les modalités entre elles, on peut aussi observer qu'en J0 il y a significativement moins de campagnols dans la modalité « déchaumeur » par rapport aux deux autres. En J21, il n'y a pas de différence significative entre les taux des trois modalités. En J42, le taux d'infestation est significativement plus grand dans la modalité « rodenticide » que celui de la modalité « témoin », qui lui-même est significativement plus grand que celui de la modalité « déchaumeur ». Il en est de

Tableau 11 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur le travail dans les bordures de champs

MODELES	AIC
glm_3	552.0405
glm_4	549.0097
glm_5	553.5691
glm_6	550.5040

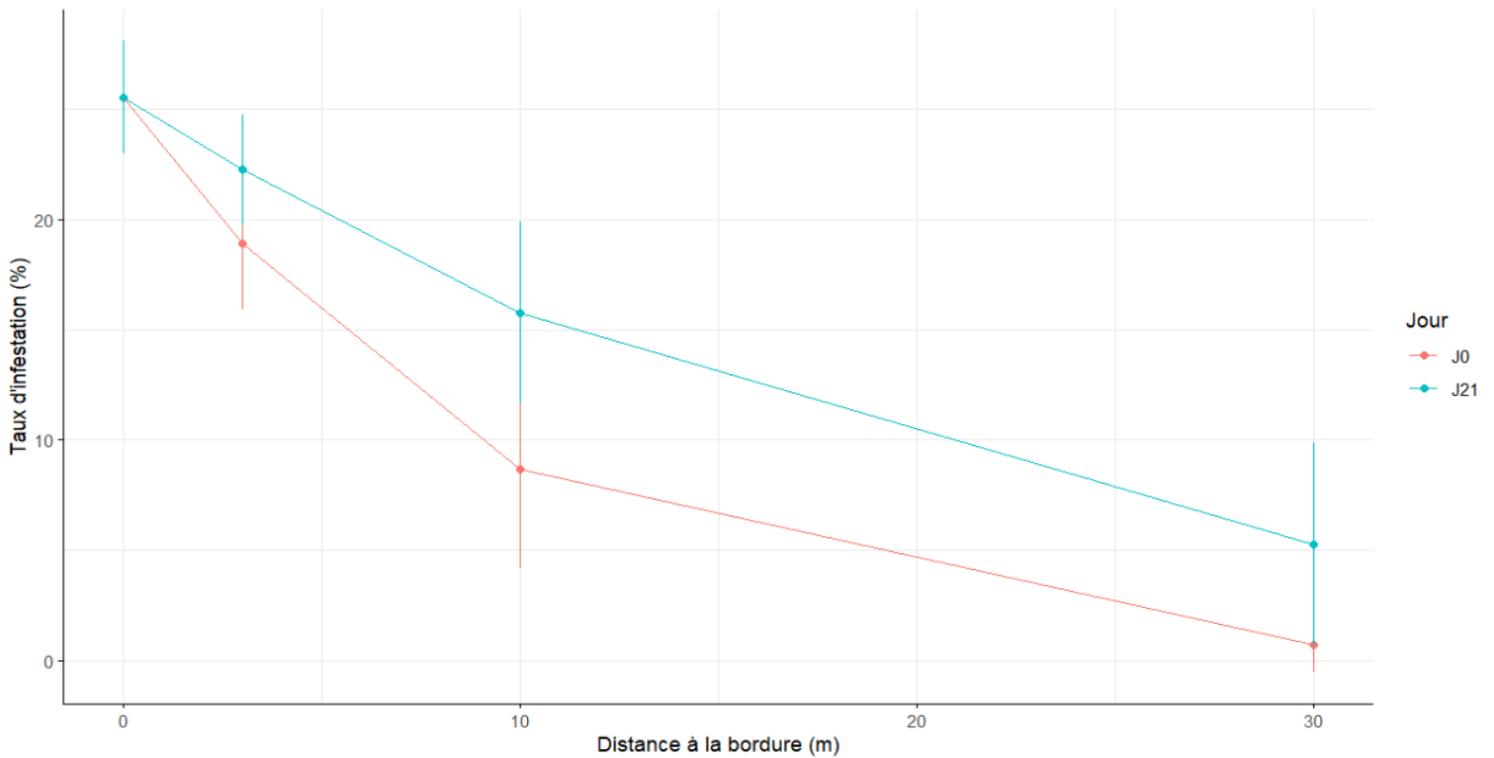


Figure 13 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs dans la modalité témoin, en J0 et J21, en fonction de la distance à la bordure de champs.

Ces taux sont les prédictions issues du glm_3, dans une parcelle de féveroles, au printemps 2021, dans le site expérimental de la Haute-Marne. Les barres représentent les erreurs standards issues du glm_3. La différence de taux d'infestation entre J0 et J21 n'est pas significative. La différence entre les distances est significative.

même pour J79. Enfin, en J170, il n'y a pas de différence significative entre les taux d'infestation des trois modalités.

Ainsi, dans la modalité « déchaumeur », le taux d'infestation reste faible sur le long terme, tandis que les taux d'infestation des modalités « témoin » et « rodenticide » oscillent entre J0 et J170. L'amplitude de l'oscillation de la modalité « rodenticide » est plus grande que celle du témoin.

- [Travail sur les bordures de champs](#)

Le résultat de la comparaison entre les AIC des modèles testés ci-dessous est présenté dans le Tableau 11.

```
glm_3 <- glm(presence ~ mod : jour : distance,
             family = binomial(link = "logit"), data = bordure)

glm_4 <- glm(presence ~ mod + jour + distance,
             family = binomial(link = "logit"), data = bordure)

glm_5 <- glm(presence ~ mod : jour + distance,
             family = binomial(link = "logit"), data = bordure)

glm_6 <- glm(presence ~ mod + jour : distance,
             family = binomial(link = "logit"), data = bordure)
```

Le glm_4 a l'AIC le plus faible. Ce GLM ne comprend pas les interactions entre les variables explicatives. Par conséquent, le fait d'ajouter des interactions ne contribue pas de manière significative à l'amélioration de l'ajustement du modèle. Le résumé du glm_4 (cf. Annexe 14) indique que seule la distance à la bordure a un effet significatif sur la présence. Plus la distance à la bordure augmente, plus la présence de campagnols diminue. Cependant, l'intérêt de cette expérimentation est de voir l'effet des modalités en fonction des jours et en fonction de la distance. Le glm_3 semble plus adapté. De plus, la différence d'AIC entre ces deux modèles est faible. Le glm_3 est donc conservé.

A partir de ce modèle, les prédicteurs dans le témoin en J0 puis en J21 en fonction de la distance permettent de mettre en avant l'effet bordure au cours du temps (cf. Figure 13). A 0 m, il n'y a pas d'évolution du taux d'infestation entre J0 et J21. Les taux d'infestation diminuent de la bordure vers le centre de la parcelle, en passant de 25 % à 0 m, à respectivement 1 % (J0) et 5 % (J21) à une distance de 30 m. Aux distances de 3 m, 10 m et 30 m, les taux d'infestation augmentent entre J0 et J21 mais de façon non significative dans le témoin.

Par ailleurs, à partir du résumé du glm_3 (cf. Annexe 15), il est aussi possible de parler de la tendance des évolutions des taux d'infestation dans les autres modalités. Pour les modalités « rodenticide » (M3) et « farine & plâtre » (M4), les taux d'infestation ont tendance à augmenter entre J0 et J21, pour les distances de 3 m, 10 m et 30m, bien que ces différences ne soient pas significatives (la significativité étant due à la distance). Au contraire, le taux d'infestation entre J0 et J21 dans la modalité de piégeage tend à diminuer mais de façon non significative. Dans chacun des cas, il n'y a presque pas de différence entre les taux en J0 et en J21.

Tableau 12 : Comparaison des AIC des GLM proposés pour le site expérimental de la Haute-Marne sur la prédation par les rapaces

MODELES	AIC
glm_7	2123.275
glm_8	2115.791

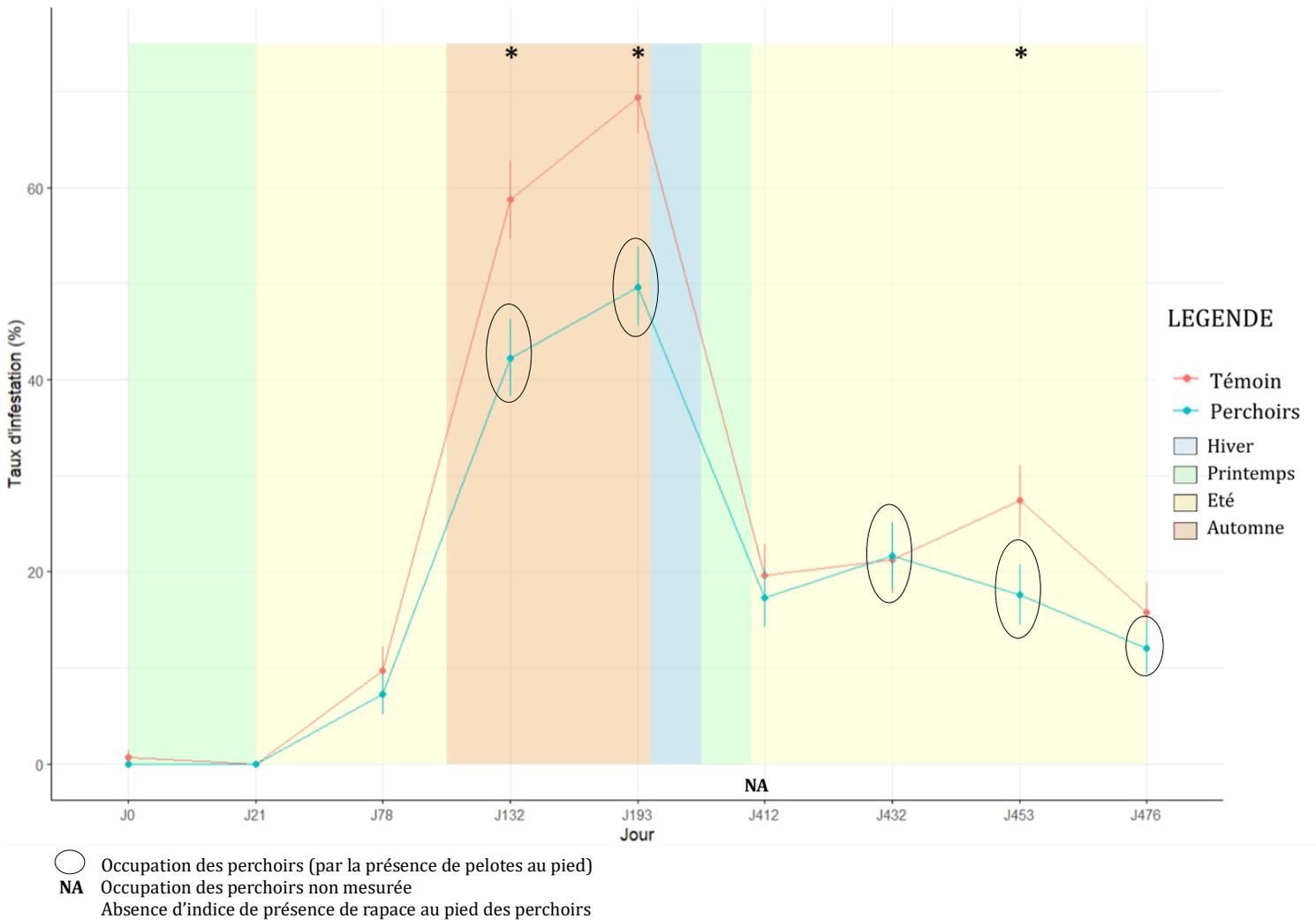


Figure 14 : Evolution du taux d'infestation de campagnols des champs dans les modalités témoin et perchoirs de J0 (2021) à J476 (2022).

Ces taux sont les prédictions issues du glm_7, dans une parcelle de féveroles, trèfles, puis blé, dans le site expérimental de la Haute-Marne. Les barres représentent les erreurs standards issues du glm_7. Les étoiles témoignent de différences significatives entre les deux modalités.

Finalement, dans cette expérimentation, seule la distance entre la bordure et l'intérieur de la parcelle a un effet significatif sur la présence de campagnols des champs. Les modalités n'ont pas eu d'effet significatif et seul le piégeage a une tendance à faire diminuer le taux d'infestation entre J0 et J21 d'après les prédictions du modèle dans ces conditions.

- [Effet des perchoirs](#)

Le résultat de la comparaison entre les AIC des modèles testés ci-dessous est présenté dans le Tableau 12.

```
glm_7 <- glm(presence ~ mod : jour,
             family = binomial(link = "logit"), data = perchoirs)

glm_8 <- glm(presence ~ mod + jour,
             family = binomial(link = "logit"), data = perchoirs)
```

Le glm_8 a l'AIC le plus faible. Ce GLM ne comprend pas l'interaction entre les variables explicatives. Donc le fait d'ajouter une interaction ne contribue pas de manière significative à l'amélioration de l'ajustement du modèle. Cependant, l'intérêt de cette expérimentation est de voir l'effet des modalités en fonction des jours. Le glm_7 semble plus adapté. De plus la différence d'AIC entre ces deux modèles est faible. Le glm_7 est donc conservé. Le résumé du glm_7 et le résultat des comparaisons par paires sont en Annexes 16 et 17. La valeur de référence est la modalité témoin (M2) en J0.

Les prédicteurs de ce modèle permettent d'obtenir la Figure 14. Les étoiles représentent une différence significative entre les modalités pour un jour donné. Au début de l'expérimentation, (J0 et J21), il n'y avait ni campagnols des champs ni indice de présence des rapaces. L'occupation des perchoirs par la présence des pelotes à leur pied n'est avérée qu'à partir de J132 (cf. Annexe 18). Dans les deux modalités, on observe une oscillation saisonnière, avec un maximum de taux d'infestation à 69 % dans le témoin en J193. De J0 à J476, le taux d'infestation dans la modalité avec les perchoirs est inférieur au taux d'infestation dans le témoin. Cette différence est significative en J132, J193 et J453.

C'est lors de forts taux d'infestation que la différence entre les taux d'infestation des deux modalités est la plus grande : 19 points de pourcentage. Ces différences sont significatives quand le taux d'infestation du témoin dépasse environ 27 %.

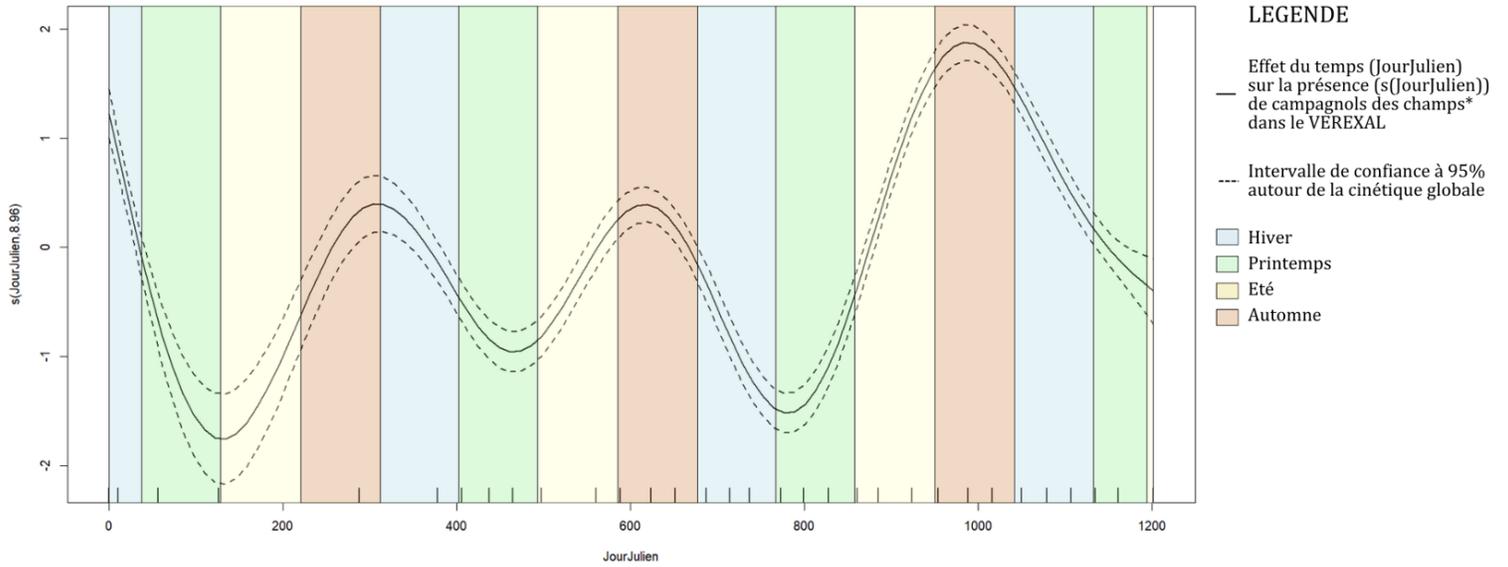


Figure 15 : Cinétique globale des populations de campagnols des champs dans l'ensemble des modalités du verger du VEREXAL entre 2021 et 2024.

** : La fonction lissée $s(\text{JourJulien})$ est sous la forme $\text{logit. } 8.96$ représente la souplesse du modèle.*

Tableau 13 : Comparaison des AIC des GAM proposés pour le VEREXAL

MODELES	AIC
gam_1	6255.845
gam_2	5959.552
gam_3	5802.884

2.3. Le meilleur modèle pour le VEREXAL et les résultats des modalités testées

Les variations de la variable « présence » sont tracées en fonction du temps à partir du modèle `gam_1` (cf. Figure 15). Ces oscillations mettent en avant les variations annuelles de densité de campagnols des champs et semblent en accord avec la bibliographie. Les maximums d'infestation sont atteints en automne. On constate un déclin hivernal durant lequel les densités de populations sont au minimum en fin d'hiver / début de printemps avant de ré-augmenter pendant l'été.

Le résultat de la comparaison entre les AIC des modèles testés ci-dessous est présenté dans le Tableau 13.

```
gam_1 <- gam(presence ~ s(JourJulien), family = binomial, data = alsace_bis)
gam_2 <- gam(presence ~ s(JourJulien) + mod, family = binomial, data = alsace_bis)
gam_3 <- gam(presence ~ s(JourJulien) + mod : saison, family = binomial, data = alsace_bis)
```

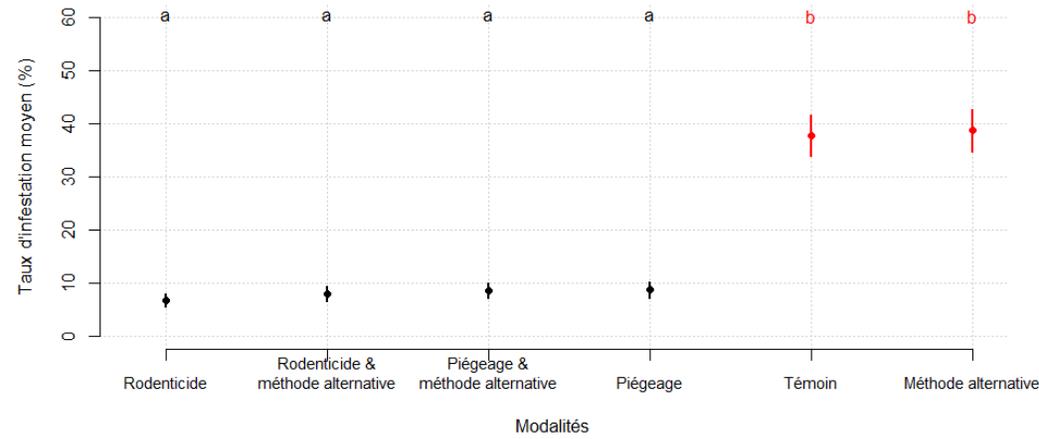
Le `gam_2` a un AIC inférieur au `gam_1`, ce qui signifie qu'en moyenne, les taux d'infestation sont différents en fonction des modalités. De plus, le `gam_3` a l'AIC le plus faible, donc l'ajout de l'interaction avec la variable saison permet d'améliorer l'ajustement du modèle. Le `gam_3` est donc conservé. Comme précédemment, le résumé du GAM et le résultat des comparaisons par paires sont en Annexes 19 et 20. La valeur de référence est la modalité témoin (B3) en hiver. Dans cette expérimentation, le terme de « méthode alternative » fait référence au travail du sol par un aérateur de prairie ou engrais à base de ricin.

Pour ce modèle, ce sont les moyennes marginales (c'est-à-dire les moyennes ajustées en fonction des autres variables) fournies par le package 'emmeans' qui ont permis de tracer la Figure 16. Les points correspondent donc aux taux d'infestation moyen pour l'interaction « modalité : saison » et les barres aux erreurs standards de ces moyennes. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre les taux d'infestation moyens des modalités. S'il y a deux lettres au-dessus d'un point, elles sont prises séparément.

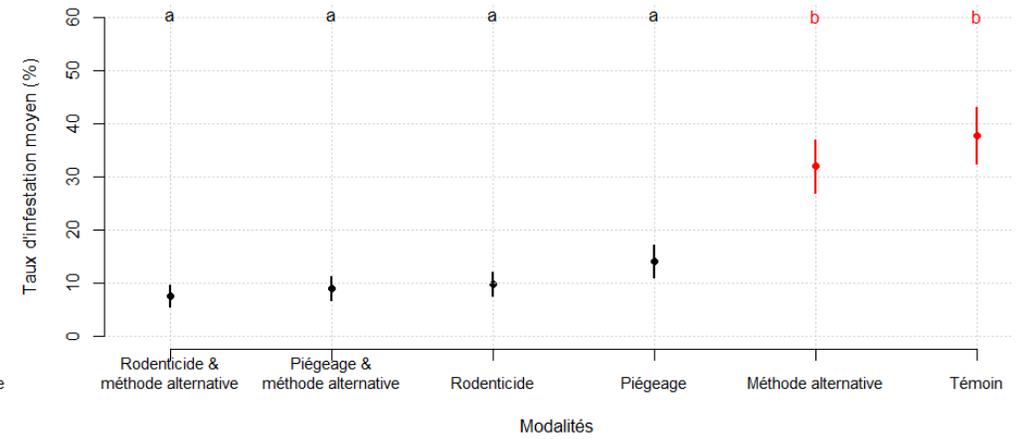
D'après la Figure 16, en hiver, les modalités « témoin » et « méthode alternative » ont un taux d'infestation moyen d'environ 38 %. Ce taux est significativement différent des autres modalités dont le taux d'infestation moyen est d'environ 8 %. Ainsi, en hiver, il semble que les méthodes : « rodenticide », « rodenticide & méthode alternative », « piégeage & méthode alternative » et « piégeage » permettent de diminuer de 30 points le taux d'infestation moyen par rapport au témoin. La modalité « méthode alternative » n'est pas significativement différente du témoin, alors que les combinaisons « piégeage & méthode alternative » et « rodenticide & méthode alternative » le sont. Ceci laisse à penser que dans ces combinaisons, seul le rodenticide et le piégeage ont eu un effet sur le taux d'infestation moyen en hiver.

Au printemps, les modalités « témoin » et « méthode alternative » ont des taux d'infestation moyen d'environ 37 % pour le témoin et 32 % pour la modalité « méthode alternative ». Ces taux moyens sont significativement différents des autres modalités dont les taux d'infestation sont d'environ 14 % pour la modalité « piégeage » et 8 % pour les autres. Ainsi, au printemps, il semble que les méthodes : « rodenticide », « rodenticide & méthode alternative », « piégeage & méthode alternative » et « piégeage » permettent de diminuer d'une vingtaine de points de pourcentage le taux d'infestation moyen du témoin. Comme pour l'hiver, il semble que dans les combinaisons de méthodes, seul le rodenticide et le piégeage ont eu un effet sur le taux d'infestation moyen au printemps.

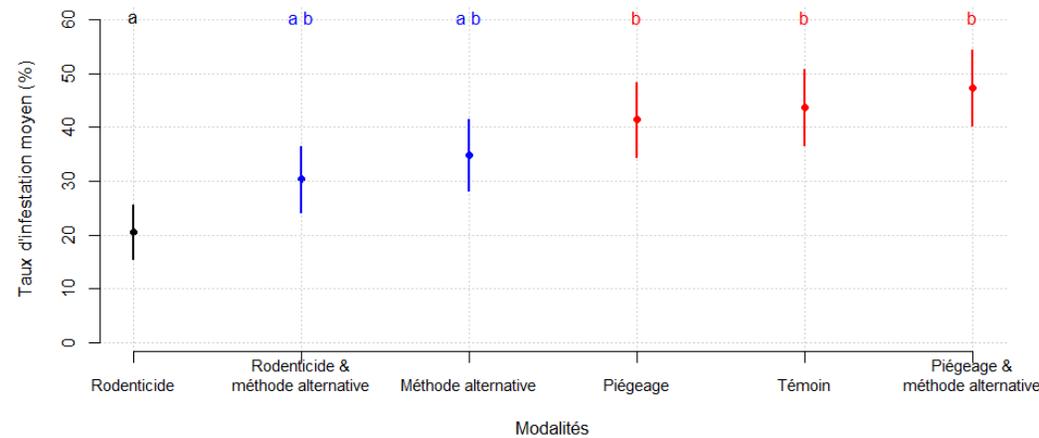
Hiver



Printemps



Été



Automne

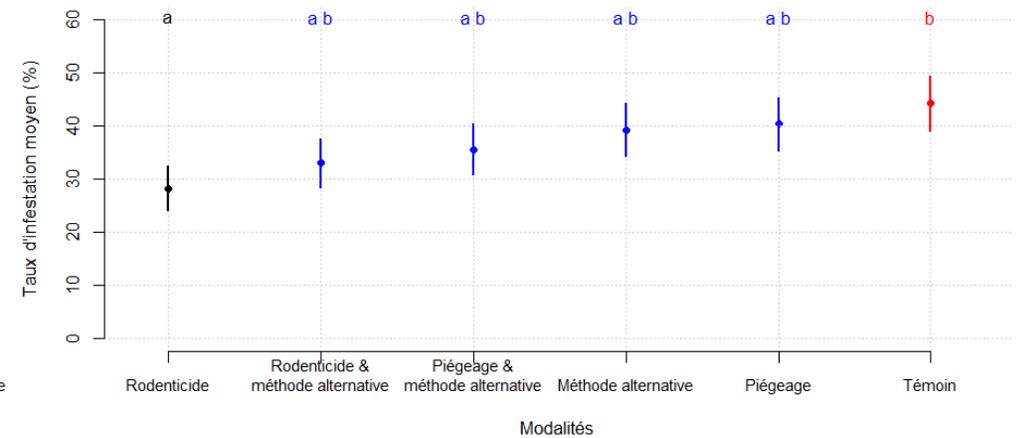


Figure 16 : Taux d'infestation moyens de campagnols des champs, de 2021 à 2024, dans le verger, en fonction de la saison et de la modalité appliquée.

Les taux sont issus des moyennes marginalisées du gam_3. Les barres représentent les erreurs standards. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre les taux d'infestation moyens des modalités. S'il y a deux lettres, elles sont prises séparément.

En été, le taux d'infestation moyen de la modalité « rodenticide » est significativement différent des taux d'infestation moyens des modalités « piégeage », « témoin » et « piégeage & méthode alternative » mais pas des modalités « rodenticide & méthode alternative » ni « méthode alternative ». Du témoin à la modalité « rodenticide » il y a une diminution de 23 points de pourcentage. En été, il semble donc que seul le rodenticide ait un effet significatif sur le taux d'infestation moyen par rapport au témoin.

Enfin, en automne comme en été, seul le taux d'infestation dans la modalité « rodenticide » est significativement différent des taux des autres modalités. Les taux d'infestation sont d'environ 44 % dans le témoin et 28 % dans la modalité « rodenticide ». Ainsi, en automne, il semble que seul le rodenticide ait un effet sur le taux d'infestation moyen par rapport au témoin.

En superposant les résultats de la Figure 16, pour voir l'évolution des populations au cours des saisons, on obtient la Figure 17. Les barres d'erreurs ne sont pas représentées pour plus de lisibilité, mais la significativité des différences est analysée à partir des résultats des comparaisons par paires de l'Annexe 21. Au cours des saisons, les taux d'infestation moyens des modalités « témoin » et « méthode alternative » ne varient pas de façon significative. La tendance suit tout de même une oscillation saisonnière avec des densités plus faibles en hiver et au printemps et plus forte en automne. Pour toutes les autres modalités, le schéma est le même : les taux d'infestation sont significativement différents entre l'automne et l'hiver, et entre le printemps et l'été, mais les différences ne sont pas significatives entre l'hiver et le printemps, ni entre l'été et l'automne. Cette représentation permet de mettre en avant les périodes où sont appliquées les méthodes et permet de faciliter la discussion des résultats qui suit.

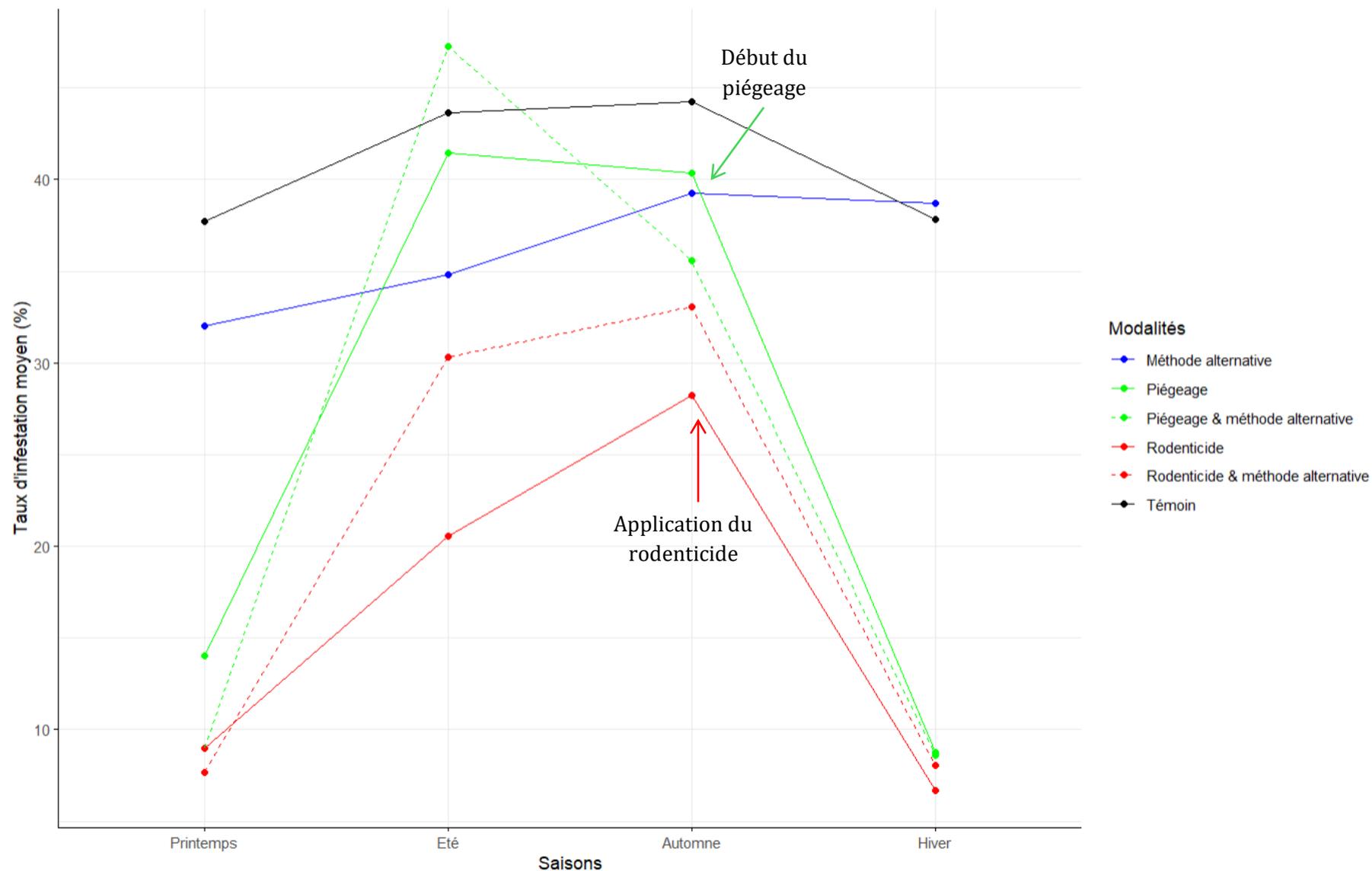


Figure 17 : Evolution des taux d'infestation moyens entre 2021 et 2024, en fonction de la saison, pour chaque modalité, dans le verger du VEREXAL.

Les erreurs standard ne sont pas représentées pour plus de lisibilité. Les taux d'infestation moyens du témoin et de la méthode alternative ne varient pas significativement entre les saisons. Pour les autres modalités, les taux sont significativement différents entre l'automne et l'hiver et entre le printemps et l'été.

IV. DISCUSSION

Les résultats précédents permettent d'évaluer les méthodes alternatives appliquées dans des contextes précis. Afin de leur apporter une analyse critique, ces résultats vont être discutés au regard de la bibliographie, des précédentes expérimentations et de la nature des données étudiées.

1. La grille d'analyse de risque : un outil d'aide à la décision

Le diagnostic paysager caractérise l'environnement autour des parcelles. La grille d'analyse de risque utilise les résultats de ce diagnostic et des facteurs favorables ou défavorables au campagnol des champs pour estimer le risque de pullulation dans la parcelle. Elle peut être utilisée par les agriculteur·rices ou les technicien·nes comme un outil d'aide à la décision dans la gestion des cultures. En fonction du niveau de risque à un instant T, elle permettra d'adapter le choix de la culture ou des pratiques agricoles.

Cet outil pourrait être encore amélioré. 1 / L'utilisation de couleurs permet une compréhension visuelle des effets des facteurs sur le niveau de risque, mais une même couleur peut être utilisée pour plusieurs situations. Inversement, un niveau est caractérisé par plusieurs couleurs. Des valeurs chiffrées pourraient permettre plus de précisions. 2 / Le choix des facteurs n'est pas exhaustif. Par exemple, la productivité de la parcelle, l'humidité et la compaction du sol, les linéaires de haies sont des facteurs d'influence mentionnés dans l'état de l'art. 3 / La proportion de luzerne « forte » ou « faible » est assez relative : aucune valeur chiffrée n'est disponible dans la bibliographie. 4 / La grille représente le niveau de risque dans une parcelle à un instant T, après le « travail du sol ». Il faut en plus prendre en compte le temps et la cyclicité du campagnol pour comprendre comment va évoluer ce risque pour la culture. 5 / Il serait aussi pertinent de tenir compte de la sensibilité de la parcelle face au risque de pullulation au cours des années précédentes.

Dans le cadre du stage, la grille d'analyse de risque a aussi servi de contrôle, en remettant les résultats des expérimentations dans leur contexte paysager et leur niveau de risque.

Grâce à cette grille, l'hypothèse 1 selon laquelle l'étude du contexte paysager permet d'évaluer le risque de pullulation du campagnol des champs est validée.

2. Les tests expérimentaux *in situ*

Les résultats obtenus résultent de modélisations statistiques. Le choix d'utiliser des modèles permet de prendre en compte plusieurs variables simultanément. Les modèles sont souvent plus flexibles que les tests statistiques ce qui est important quand on s'intéresse à des interactions complexes, souvent non linéaires et multiples comme en écologie. Ils permettent d'utiliser à la fois des variables continues et catégorielles. Les modèles ont des capacités prédictives qui ont permis d'obtenir les résultats présentés précédemment. Mais ils admettent quelques limites, comme la dépendance des résultats aux hypothèses simplificatrices et aux données extrêmes. La généralisation des résultats est assez complexe dans notre cas, puisque des conditions précises sont fixées lors des prédictions.

2.1. Effet de la herse dans les graminées porte-graine de la Marne

Dans le site expérimental de la Marne, l'effet de la herse sur le taux d'infestation de campagnols des champs est testé. En J21, les taux d'infestation dans les modalités « herse » et « rodenticide » sont significativement inférieurs aux taux en J0. Le témoin, lui, reste constant. La comparaison entre l'évolution du témoin et celle des deux autres modalités permet de conclure que **le passage de la herse et l'application du rodenticide réduisent de manière significative le taux d'infestation jusqu'à 21 jours après application.**

La herse réduit davantage le taux d'infestation par rapport au rodenticide entre J0 et J21. **La herse serait plus efficace que le rodenticide sur les 21 premiers jours.**

En J42, les taux d'infestation dans les modalités « herse » et « rodenticide » mais aussi dans le témoin sont significativement supérieurs aux taux en J21. Le témoin montre une croissance naturelle des populations. L'évolution similaire des taux d'infestation dans les trois modalités indique que **la herse et le rodenticide ne font plus diminuer le taux d'infestation après 21 jours.** Cependant, **ces modalités permettent de maintenir le taux d'infestation inférieur à celui du témoin 42 jours après leur mise en place.**

Ces résultats sont en accord avec ceux du projet ZERRAC (Montaz et al., 2022).

Pour aller plus loin, il serait intéressant de voir comment évoluent les populations de campagnols des champs après 42 jours : à quel moment le taux d'infestation dans la méthode alternative redevient-il équivalent à celui du témoin ?

De plus, le fonctionnement de la herse sur la diminution du taux d'infestation de campagnols des champs n'est pas complètement connu. En plus d'une action létale et de destruction des galeries superficielles et des coulées, la herse pourrait engendrer un phénomène de dispersion. Cette dispersion rendrait les individus plus vulnérables à la prédation (Laundre, Hernandez, et Ripple, 2010). La recherche d'un nouvel habitat et la reconstruction du réseau de galerie pourrait être au détriment de la reproduction.

Cette dispersion pourrait d'ailleurs être facilitée par la largeur étroite des bandes dans l'expérimentation. Un travail sur la totalité de la parcelle pourrait montrer d'autres résultats.

Par ailleurs, d'après Audren et Fleisch (2022), il semble qu'au-delà de 60 % les effets de la herse ne soient plus avérés. Cette hypothèse n'a pas été testée dans cette étude, puisque les taux initiaux des données disponibles ne dépassent pas ces 60 %.

Lors des prédictions du GLMM, des variables explicatives ont été fixées. La culture est un dactyle, l'âge de la culture est de 3 ans et la saison est le printemps. Selon le niveau choisi pour fixer ces variables, les valeurs des taux d'infestation peuvent changer. En revanche, la dynamique de l'évolution est inchangée. D'après le résumé de ce modèle (cf. Figure 9) et grâce à l'étude graphique des variables explicatives (cf. Annexes 9, 10 et 11), on constate que les variables « cultures » et « saison » ont des magnitudes d'effet plus importantes (valeurs absolues des « Estimate » des résumés des modèles). Une variable avec une forte magnitude d'effet, peut masquer l'effet des jours et des modalités sur la variable « présence ».

En automne, le taux d'infestation est plus élevé qu'au printemps (Jacob et al., 2014). Fixer la variable saison à « automne » fera donc augmenter les taux d'infestation.

Les niveaux de la variable « culture » ont aussi une magnitude d'effet importante. Les cultures sont des graminées porte-graine qui regroupent des dactyles, des luzernes, des fétuques et des koelerias. On supposait donc que les populations de campagnols des champs évoluent de la même façon dans ces quatre cultures. Cependant, les dactyles et les luzernes ont des taux d'infestation beaucoup plus importants que les fétuques et les koeleria. Une préférence du campagnol des champs pour la luzerne est cohérent avec les publications de Jacob et al. (2014) et Delattre et al. (1992). Les différences avec la koeleria et la fétuque peuvent être expliquées par plusieurs hypothèses : 1/ L'expérimentation dans la koeleria n'ont pas été répétées et le taux d'infestation dans cette parcelle était faible. Cette faible infestation est probablement liée à la variété koeleria qui n'est pas implantée de façon pérenne. Cette graminée est récoltée dès la première année puis est détruite. Ainsi, les taux d'infestation n'ont pas le temps d'augmenter. 2 / L'expérimentation dans les fétuques a été répétée dans deux parcelles voisines avec peu de campagnols des champs. Il semble que la proximité de ces parcelles avec un village puisse expliquer ce taux inférieur (Delattre et al., 1996).

Les variables ont été fixées de façon à obtenir des taux d'infestation cohérents avec la réalité mesurée sur le terrain.

Cette variabilité entre les niveaux des variables pourrait aussi expliquer la taille des barres d'erreur de la Figure 11.

Enfin, l'étude de la variable « age_culture » a montré une contradiction avec les résultats attendus. D'après Jacob et al. (2014), lorsque la culture reste en place plusieurs années, que le sol n'est pas perturbé, les campagnols des champs sont dans des conditions favorables pour se multiplier. On suppose alors que plus la variable « age_culture » augmente, plus le taux d'infestation augmente. Les résultats du GLMM décrivent l'inverse. On peut supposer que les parcelles contractualisées et gérées pour un industriel doivent répondre à des critères de production et assurer des rendements. Les cultures qui dès la première année sont fortement infestées et dont le rendement est potentiellement faible, sont détruites et replantées. Cela peut expliquer que les cultures de 3 ans sont des cultures avec un taux d'infestation plus faible, car le risque est maîtrisé pour sécuriser la production.

2.2. Effet du déchaumeur en Haute-Marne

L'expérimentation n'a pas été répétée. Les résultats sont donc très spécifiques aux conditions de l'expérimentation. Pour rappel, après les observations de J0, un passage de déchaumeur a été effectué sur toute la parcelle sur 5 cm de profondeur, puis un deuxième sur 8 cm de profondeur dans la modalité « déchaumeur ». Ce passage dans toute la parcelle est un biais majeur sur toute la conduite de l'expérimentation.

De plus, en J0, le taux d'infestation de la modalité « déchaumeur » est déjà significativement inférieur au témoin. Cette différence n'était pas attendue, car il n'y a pas de modalité plus en contact avec une bordure qu'une autre. Ce second constat entraîne un autre biais.

Dans les trois modalités (« rodenticide », « déchaumeur » et « témoin »), les taux d'infestation diminuent entre J0 et J21.

Premièrement, il est impossible de conclure sur l'efficacité du déchaumeur dans la modalité à cause de la non-significativité de la diminution entre J0 et J21.

Secondairement, la diminution est significative dans le témoin et dans la modalité « rodenticide » entre J0 et J21. Compte tenu du premier passage de déchaumeur sur l'ensemble de la parcelle (biais 1), ces résultats lui sont majoritairement imputables bien que le déclin naturel ou l'efficacité du rodenticide puissent aussi avoir eu un effet supplémentaire.

Il est à noter qu'une étude menée par Blanchet et al. en 2017 montrait qu'un déchaumeur à travail vertical avait permis de réduire significativement les populations de campagnols des champs dans de bonnes conditions expérimentales.

Cette expérimentation mériterait d'être refaite en la répétant et en s'assurant que le témoin ne soit pas biaisé pour permettre la bonne comparaison des modalités entre elles. Il est aussi important de s'assurer qu'en J0, les taux d'infestation des modalités ne soient pas significativement différents entre eux.

2.3. Effet des pièges bassines et du mélange farine et plâtre sur les bordures de champs en Haute-Marne

Dans cette expérimentation, l'effet bordure est cohérent avec ce qu'avaient montré Rodríguez-Pastor et al. (2016). **Plus on s'éloigne de la bordure de champs, plus le taux d'infestation diminue.** Entre J0 et J21 dans le témoin, les tendances montrent une augmentation du taux d'infestation à 3 m, à 10 m et à 30 m mais pas à 0 m. On suppose un transfert des individus de la bordure vers l'intérieur de la parcelle (Rodríguez-Pastor et al., 2016).

Dans cette expérimentation, **aucune modalité n'a d'effet significatif sur le taux d'infestation.** Les tendances montrent une augmentation des taux dans les modalités « témoin », « farine & plâtre » et « rodenticide » mais une diminution pour la modalité « piégeage ». Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces tendances. 1/ L'expérimentation s'est déroulée dans une parcelle de féveroles qui est une légumineuse très appréciée par le campagnol. Ce dernier, par préférence alimentaire, n'aurait pas consommé le rodenticide. 2/ Le rodenticide aurait pu être lessivé. 3/ Le mélange de farine et de plâtre est une méthode adaptée aux rats et le campagnol des champs ne le consomme peut-être pas (dans une parcelle de féveroles). 4/ Les pièges bassines étaient fonctionnels avant l'application des autres modalités et en continu.

Il serait intéressant de refaire cette expérimentation avec plusieurs répétitions. Il faudrait aussi tester l'effet du rodenticide dans différentes cultures, pour déterminer les préférences du campagnol des champs entre les cultures et le rodenticide.

2.4. Effet des perchoirs en Haute-Marne

On suppose que l'installation de perchoirs au sein d'une parcelle permet de favoriser la prédation par les rapaces (Jareño et al., 2011).

Pendant cette expérimentation, les indices de présence des campagnols ont été relevés ainsi que des indices de présence de rapaces. Cette dernière est appréciée par des pelotes de réjection qu'ils peuvent laisser au pied des perchoirs. Pour s'assurer que la prédation concernait bien le campagnol des champs et pas un autre micromammifère, deux mesures ont été faites. 1 / Certaines pelotes ont été analysées et la majorité contenait des restes de campagnols des champs. 2 / L'analyse des pelotes a montré que le rapace le plus présent sur le site est le faucon crécerelle, prédateur spécialiste du campagnol des champs.

Au début de cette expérimentation, il n'y avait pas d'indice de présence de campagnols des champs, ni d'indices de présence de rapaces.

Après 21 jours, le taux d'infestation de campagnol des champs augmente fortement et atteint un maximum d'infestation à l'automne. Les premiers indices de présence de rapaces apparaissent en J132.

La modalité témoin suit une oscillation saisonnière, avec une croissance des populations pendant l'été, un maximum de présence en automne et le déclin hivernal (Jacob et al., 2014). Cette oscillation est aussi observée dans la modalité « perchoirs », mais à des taux d'infestation plus faibles. Ces différences sont significatives quand le taux d'infestation dans le témoin dépasse environ 27 %. **La prédation, favorisée par l'installation de perchoirs, permet de diminuer l'amplitude de l'oscillation saisonnière.**

Au cours du deuxième été, le taux d'infestation dans le témoin augmente, alors que celui dans la modalité « perchoirs » diminue (entre J432 et J453). **A faible densité, on pourrait alors penser que la prédation permet de maintenir un faible taux d'infestation et d'empêcher la croissance des populations.**

La diminution des taux d'infestation entre J453 et J476 dans les deux modalités pourrait être le résultat d'un déclin naturel, mais d'après la dynamique du campagnol des champs (Jacob et al., 2014), on s'attend plutôt à une augmentation du taux d'infestation en été. Ainsi, ce déclin pourrait être un effet de la prédation sur le témoin. Pour des densités faibles de campagnols, on peut supposer que 1 / les rapaces ont étendu leur territoire de chasse 2 / plus de rapaces étaient présents à cette période.

2.5. Effet des méthodes alternatives testées dans le verger du VEREXAL

Dans le verger, le but est de voir l'effet des modalités testées au bout de plusieurs années. En comparant les taux d'infestation moyens des modalités avec le taux d'infestation moyen du témoin saison par saison, on en conclurait que : 1 / Le rodenticide permet de diminuer le taux d'infestation à toutes les saisons ; 2 / Le piégeage réduit le taux d'infestation au printemps et en hiver ; 3 / **L'aérateur de prairie ou l'engrais à base de ricin (« méthode alternative ») ne permet pas la diminution du taux d'infestation ; 4 / Les méthodes combinées sont surtout efficaces au printemps et en hiver grâce au rodenticide ou au piégeage et non à l'aérateur de prairie ou l'engrais à base de ricin associés.**

Les modalités efficaces le sont surtout en hiver et au printemps, lorsque les populations de campagnols des champs sont à plus basse densité (Jacob et al., 2014). Cependant, lorsque la densité de populations augmente (été) et est maximale (automne), alors seul le rodenticide donne un taux d'infestation significativement inférieur à celui du témoin.

Dans toutes les modalités, le taux d'infestation augmente en été et en automne et rediminue en hiver et au printemps. **Les modalités testées n'empêcheraient pas l'oscillation saisonnière mais permettraient de réduire son amplitude sur toute l'année pour le rodenticide ; et en hiver et au printemps pour les autres modalités.**

Cependant, les modalités ne sont pas appliquées en même temps ni le même nombre de fois. L'évolution des taux d'infestation est donc discutée en fonction des dates d'application des méthodes et par rapport à l'évolution naturelle des populations.

Dans le témoin, on observe une tendance cohérente avec la littérature (Jacob et al., 2014), mais ces variations ne sont pas significatives dans notre expérimentation (cf. Figure 17). Plusieurs hypothèses expliquent cette non-significativité de l'oscillation : 1 / La capacité de charge du milieu est atteinte. 2 / Le déclin hivernal n'est pas observé à cause d'un transfert des populations des autres modalités vers celle-ci (comme zone refuge). 3 / La moyenne sur plusieurs années gomme les oscillations du témoin.

Le rodenticide est appliqué en fin d'automne et en hiver. La diminution du taux d'infestation entre l'automne et l'hiver peut être attribuée au déclin hivernal naturel (Jacob et al., 2014), mais la diminution est plus importante dans la modalité « rodenticide » que dans le témoin, lié à l'efficacité de la matière active. Au printemps et en été, le rodenticide n'est pas appliqué car le verger se trouve dans une zone de protection du Grand Hamster. Bien qu'on observe peu d'augmentation naturelle dans le témoin, on peut supposer que l'augmentation du taux d'infestation dans la modalité « rodenticide » soit liée à la croissance naturelle des populations en cette saison (Jacob et al., 2014). Ce taux d'infestation reste inférieur à celui du témoin. Ainsi, **on peut conclure que l'application du rodenticide pendant le déclin hivernal, accentue la diminution du taux d'infestation pendant l'hiver et permet d'atténuer l'amplitude de l'oscillation de l'année qui suit.**

Comme pour le rodenticide, les sessions de piégeages se déroulent pendant l'automne et l'hiver. Les variations sont les mêmes, mais en été et en automne, les taux d'infestation augmentent plus fortement et ne sont plus significativement différents du témoin. Ainsi, **on peut conclure que la méthode de piégeage pendant le déclin hivernal, accentue la diminution du taux d'infestation pendant l'hiver et le printemps, mais ne permet pas de réduire l'amplitude de l'oscillation de l'année qui suit.**

Les méthodes « rodenticide » et « piégeage » ont montré leur efficacité à faire diminuer le taux d'infestation après leur application. Le rodenticide semble permettre le maintien des populations à plus faible densité pour l'année suivante. Ce n'est pas le cas pour le piégeage. Il serait intéressant de voir si pour de plus fortes densités (en été ou en automne), ces méthodes permettent aussi de diminuer les taux d'infestation.

Grâce aux résultats précédents, l'hypothèse 2 selon laquelle les méthodes alternatives permettent de diminuer le taux d'infestation de campagnols des champs au cours du temps est partiellement validée.

L'hypothèse 3 est réfutée : la multiplication des méthodes n'est pas plus efficace que l'utilisation d'une seule méthode dans ce dispositif expérimental.

3. Les effets des méthodes alternatives au regard de la grille d'analyse de risque

L'interprétation des résultats précédent n'a jusque-là pas tenu compte du contexte paysager dans lequel se trouve les parcelles expérimentales. Grâce aux niveaux de risque estimés, il est possible d'apprécier la robustesse des conclusions.

A court terme, la herse permet de réduire le taux d'infestation dans une zone à très fort risque de pullulation (site de la Marne). Cela rend l'interprétation robuste et laisse à penser que la méthode pourrait être efficace dans des zones à risque plus faible.

Les expérimentations sur les bordures n'ont pas montré d'effet dans une zone à risque modéré. Expérimenter dans une zone à risque plus faible ou d'autres cultures permettrait peut-être d'avoir des résultats significatifs.

La prédation permet de réduire le taux d'infestation par rapport au témoin dans une zone à risque modéré. Il serait intéressant d'étudier son efficacité dans une zone où le risque de pullulation de campagnols des champs est plus grand.

Enfin, le verger est dans une zone à risque modéré voire élevé. Les résultats sont donc assez robustes et l'expérimentation pourrait fonctionner dans des zones à plus faible risque.

Grâce à cette méthodologie, les résultats obtenus à l'échelle de la parcelle ont pu être interprétés de manière plus globale, en tenant compte des effets du paysage.

4. Quels sont les avantages et inconvénients des méthodes alternatives par rapport au rodenticide ?

Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes intéressé·es aux effets de certaines méthodes alternatives aux rodenticides sur les populations de campagnols des champs. Les principales raisons de cette volonté de trouver d'autres solutions sont : 1 / Les effets négatifs sur la biodiversité de ces produits phytopharmaceutiques. 2 / L'application chronophage et répétitive pour les agriculteur·rices. 3 / La réglementation qui limite la dose maximale à 2kg/ha/an (E-Phy, 2024).

Le projet MACC 0 s'inscrit dans une démarche d'affranchissement de l'utilisation de la lutte chimique. Il vise, entre autres, à quantifier l'impact des méthodes alternatives retenues sur les populations de campagnols des champs, mais aussi sur le système de production. Il veut proposer un référentiel technique sur les stratégies de lutte, en tenant compte du système de cultures et de l'environnement de l'exploitation. Cependant, le seul prisme de l'efficacité sur les populations de campagnols peut sembler réducteur et il est intéressant de réfléchir aux bénéfices et désavantages des méthodes testées.

La herse, en plus de réduire le taux d'infestation de campagnols des champs sur le court terme a d'autres co-bénéfices. 1 / La fragmentation superficielle du sol permet l'aération du sol et une meilleure pénétration de l'eau et de l'air, ce qui favorise le développement des racines et la croissance des cultures (Montaz et al., 2022). 2 / L'infiltration de l'eau minimise le ruissellement et donc le risque d'érosion des sols (Montaz et al., 2022). 3 / Le hersage réduit aussi la compaction du sol et préserve sa structure sur le long terme (Montaz et al., 2022). 4 / L'utilisation de la herse, plutôt que des méthodes plus agressives comme le labour profond, perturbe moins les écosystèmes souterrains et aide à maintenir une biodiversité saine dans le sol (Montaz et al., 2022).

Cependant, l'usage de la herse pourrait poser question 1 / dans une société où le contexte socio-économique est de plus en plus difficile (augmentation des charges, baisse de revenus agricoles) et où le prix des carburants augmente. D'autant plus lorsque les résultats laissent à penser que des passages réguliers seraient nécessaires pour des résultats à moyen et long terme. 2 / La production de CO₂ lors des passages de ces tracteurs, peut être en contradiction avec les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de transition vers des pratiques agricoles plus durables. 3 / Le passage de la herse peut faciliter la levée des adventices. En agriculture biologique, cela oblige à modifier son itinéraire technique pour prendre ce paramètre en compte. En agriculture conventionnelle ou en ACS, cela sous-entend une augmentation de l'utilisation des herbicides pour limiter ce phénomène.

Les pièges guillotines permettent une gestion écologique des populations de campagnols des champs. Cependant, le dispositif comprend une centaine de pièges disponibles dans le verger du VEREXAL, pour un nombre d'activation des pièges qui varie entre 1000 et 2000 par session de piégeage. Les pièges doivent être réactivés manuellement lorsqu'ils sont déclenchés. Cette méthode chronophage ne semble donc pas adaptée à de grandes surfaces et demande des moyens humains importants (Couval, 2024 - communication personnelle).

La prédation semble être la solution la plus écologique, la plus économique et la moins chronophage. Elle permet de réduire l'amplitude des oscillations saisonnières des campagnols. L'installation des perchoirs et des nichoirs doit être faite pour favoriser la prédation mais ne doit pas gêner l'agriculteur·rice pour les passages d'outils.

D'autres aménagements paysagers peuvent être proposés pour favoriser la prédation par les rapaces mais aussi par d'autres espèces. En effet, ce mémoire s'intéresse aux solutions au sein de la parcelle, mais un travail à l'échelle du paysage peut être intéressant. Des infrastructures agroécologiques comme les haies ou des corridors écologiques permettraient de faciliter le déplacement des petits mustélidés, des renards ou d'autres prédateurs terrestres ou aériens du campagnol des champs et leur créerait des zones refuges (URCA-CERFE, 2020). Ces aménagements favorables aux prédateurs sont d'ailleurs souvent directement défavorables aux campagnols des champs puisqu'ils hétérogénéisent la structure et la composition paysagère.

De plus, une gestion globale du paysage passe aussi par une gestion collective. En effet, la synchronisation des actions de lutte dans le temps permet de diminuer globalement le risque (Couval et Truchetet, 2014). Ainsi, des parcelles voisines gérées communément ne devraient pas être sujettes à un transfert de populations.

Les méthodes testées ont donc montré des avantages et des inconvénients par rapport à l'utilisation du rodenticide. L'association de plusieurs méthodes pourrait permettre d'accumuler les bénéfices et limiter les effets négatifs. Le travail du sol ou le piégeage (dans les conditions décrites dans cette étude) feraient diminuer le taux d'infestation, tandis que favoriser la prédation permettrait de maintenir ces taux plus faibles. Le passage à une gestion intégrée des campagnols, combinant outils mécaniques, biologiques et paysagers, paraît être une solution.

V. CONCLUSION

La gestion durable du campagnol des champs représente un enjeu majeur pour l'agriculture. Il peut causer jusqu'à 80 % de pertes sur les récoltes. Très présent dans le Nord-est de la France, le campagnol n'épargne pas la région Grand Est. Sécuriser ce bassin de production face aux dégâts de ce ravageur est une nécessité. Face aux conséquences de l'usage des rodenticides, de nouvelles solutions doivent être trouvées.

Le projet MACC 0, dans le cadre du plan Ecophyto, expérimente des méthodes alternatives aux rodenticides. L'objectif est de s'affranchir de ces produits phytopharmaceutiques et de proposer des solutions plus durables aux agriculteurs et agricultrices.

Deux niveaux d'analyse complémentaires ont permis d'apporter des éléments de réponse : à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du paysage.

À l'échelle de la parcelle, des pratiques comme le travail superficiel du sol, le piégeage et la favorisation de la prédation se sont révélées efficaces pour réduire directement le taux d'infestation. Ces méthodes, testées dans des conditions expérimentales précises, permettent aux agriculteur·rices d'intervenir de manière réactive et ciblée sur le court terme. Elles offrent une solution concrète et immédiate.

À l'échelle du paysage, un diagnostic paysager a été réalisé sur chacun des sites expérimentaux. A partir de cela, des aménagements agroécologiques défavorables au campagnol des champs et favorables à ses prédateurs ont été proposés. Un outil d'aide à la décision a également été créé, alliant le diagnostic du paysage à la biologie du campagnol des champs. Grâce à cet outil, il est possible d'estimer le niveau de risque de pullulation dans les parcelles, et donc d'anticiper et adapter les cultures et les pratiques en conséquence. Il souligne également l'importance d'adapter les interventions selon le contexte local.

Enfin, les méthodes alternatives sont moins référencées scientifiquement pour le campagnol des champs que pour le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*). Bien que ces méthodes alternatives contribuent à réduire l'usage des rodenticides sur les campagnols des champs, la poursuite de recherches et d'expérimentations est essentielle pour consolider et pérenniser ces approches dans le cadre d'une agriculture durable.

Le passage à une gestion intégrée des campagnols des champs, combinant outils mécaniques, biologiques et paysagers, apparaît comme une solution viable pour répondre aux enjeux de durabilité dans l'agriculture.

Bibliographie

- Andreassen H., Sundell J., Ecke F., Halle S., Haapakoski M., Henttonen H., Huitu O. et al. 2021. « Population cycles and outbreaks of small rodents: ten essential questions we still need to solve ». *Oecologia* 195 (mars):1-22.
- Audren L. et Fleisch A. 2022. « Méthodes de lutte alternatives contre le campagnol des champs ». *Phytoma*, n° 754, 18-22.
- Benoît M., Quere J-P, Delattre P., Crespin L. et Mehay V. 2007a. « Evaluation du risque d'abondance du campagnol des champs (*Microtus arvalis*) en fonction du type de prairie ». *Fourrages*.
- Berny P., Buronfosse T., Buronfosse F., Lamarque F. et Lorgue G. 1997. « Field evidence of secondary poisoning of foxes (*Vulpes vulpes*) and Buzzards (*Buteo buteo*) by bromadiolone, a 4-year survey ». *Chemosphere* 35 (novembre):1817-29.
- Berthier K., Piry S., Cosson J-F, Giraudoux P., Foltête J-C., Defaut R., Truchetet D. et Lambin X. 2014. « Dispersal, Landscape and Travelling Waves in Cyclic Vole Populations ». *Ecology Letters* 17 (1): 53-64.
- Blanchet R., Coeurdassier M., Couval G. et Vannetzel E. 2017. « Le travail du sol superficiel testé sur le campagnol des champs ». *Phytoma*, n° 704, 20-23.
- Blank B., Jacob J., Petri A. et Esther A. 2011. « Topography and Soil Properties Contribute to Regional Outbreak Risk Variability of Common Voles (*Microtus Arvalis*) ». *Wildlife Research* 38 (7): 541-50.
- Butet A., Michel N., Rantier Y., Nabucet J., Hubert-Moy L. et Delettre Y. 2007. « Conséquence des changements d'usage des terres en zone agricole sur l'architecture d'un réseau trophique prédateurs- proies (rapaces/petits mammifères) ». *Colloque de restitution ANR-ECCO*, décembre.
- Butet A. et Spitz F. 2001. « Campagnols cycliques : Un demi-siècle de recherches ». *Revue d'Écologie* 56 (4): 353-72.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. 2006. « Paramètres d'exposition chez les mammifères – Renard roux. Fiche descriptive ».
- Colin G. 1971. « Un grand département agricole : la Marne ». *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims* 7 (1): 3-15;
- Couval G., Michelin Y., Giraudoux P., Truchetet D. et Maire F. 2014. « Changements agricoles de 1956 à 2010 et évolution des pullulations d'*Arvicola terrestris* : comparaison entre la Bourgogne, la Franche-Comté et les Alpes ». *Fourrages* 220 (janvier):303-10.
- Couval G. et Truchetet D. 2014. « Le concept de lutte raisonnée : combiner des méthodes collectives contre le campagnol terrestre afin de conserver une autonomie fourragère ». *Fourrages*.
- Delattre P. et Giraudoux P. 2009. *Le campagnol terrestre: Prévention et contrôle des populations*. Editions Quae.

- Delattre P., Giraudoux P., Baudry J., Musard P., Toussaint M., Truchetet D., Stahl P. et al. 1992. « Land Use Patterns and Types of Common Vole (*Microtus Arvalis*) Population Kinetics ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 39 (3-4): 153-68.
- Delattre P., Giraudoux P., Baudry J., Quéré J-P. et Fichet E. 1996. « Effect of Landscape Structure on Common Vole (*Microtus Arvalis*) Distribution and Abundance at Several Space Scales ». *Landscape Ecology* 11 (5): 279-88.
- Delattre P., Giraudoux P., Damange J-P. et Quéré J-P. 1990. « Recherche d'un indicateur de la cinétique démographique des populations du Campagnol des champs (*Microtus arvalis*) ». *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)* 45 (4): 375-84.
- Delattre P., Sousa B., Fichet-Calvet E., Quéré J-P. et Giraudoux P. 1999. « Vole outbreaks in a landscape context: Evidence from a six year study of *Microtus arvalis* ». *Landscape Ecology* 14 (août):401-12.
- Deneufbourg F. et Pateau Y. 2017. « Les fourragères porte-graines face au campagnol des champs ». *Phytoma*, n° 704, 17-19.
- Derrouch D., Dessaint F., Felten E. et Chauvel B. 2020. « L'adoption du semis direct sous couvert végétal : transition douce ou rupture ? » *Cahiers Agricultures* 29:5.
- Duflon A. 2023. « Etude de l'exposition du lynx boreal aux rodenticides antivitamin K (AVK) en France à partir des données du réseau national de surveillance sanitaire de la faune sauvage SAGIR ». Thèse, Université Claude Bernard Lyon 1: Campus vétérinaire de Lyon - VetAgro Sup.
- Dussol A-M., Hilal M., Kroll J-C. et Inra-Enesad U. 2004. « Permanences et mutations des bassins de production agricole en France de 1988 à 2000 ».
- E-Phy. 2024. « Ratron GW ». 2024. <https://ephy.anses.fr/ppp/ratron-gw>.
- Flatrès H. et Flatrès P. 1997. « Mutations agricoles et transformations des paysages en Europe ». *Norois* 173 (1): 173-93.
- Giraudoux P. 2019. « Modèle d'impact des prédateurs et du piégeage sur une population de campagnols terrestres - ZAAJ ».
- Giraudoux P., Levret A., Afonso E., Coeurdassier M. et Couval G. 2020. « Numerical Response of Predators to Large Variations of Grassland Vole Abundance and Long-term Community Changes ». *Ecology and Evolution* 10 (24): 14221-46.
- Giraudoux P., Villette P., Quéré J-P., Damange J-P. et Delattre P. 2019. « Weather Influences *M. Arvalis* Reproduction but Not Population Dynamics in a 17-Year Time Series ». *Scientific Reports* 9 (1): 13942.
- Henckel L. 2015. « Effet de l'hétérogénéité des paysages agricoles (composition et configuration) et de l'intensification des pratiques culturales sur la structure des communautés écologiques (oiseaux et adventices) en systèmes intensifs tempérés ». Montpellier: Montpellier II.
- Jacob J., Manson P., Barfknecht R. et Fredricks T. 2014. « Common Vole (*Microtus Arvalis*) Ecology and Management: Implications for Risk Assessment of Plant Protection Products ». *Pest Management Science* 70 (6): 869-78.

- Janin J-L. 1996. « L'irrigation en France depuis 1988 ». *La Houille Blanche* 82 (8): 27-34.
- Jareño D., Paz Luna A., Arroyo L., Viñuela J., Arroyo B., Mougeot F., Luque-Larena J. et Fargallo J. 2011. « Avian predators as a biological control system of common vole (*Microtus arvalis*) populations in NW Spain: experimental set-up and preliminary results ».
- Jareño D., Viñuela J., Luque-Larena JJ., Arroyo L., Arroyo B. et Mougeot F. 2014. « A comparison of methods for estimating common vole (*Microtus arvalis*) abundance in agricultural habitats ». *Ecological Indicators* 36 (janvier):111-19.
- . 2015. « Factors Associated with the Colonization of Agricultural Areas by Common Voles *Microtus Arvalis* in NW Spain ». *Biological Invasions* 17 (8): 2315-27.
- La Haye Saint Hilaire L. et Guillemain P. 2023. « Un demi-siècle d'agriculture en Grand-Est. Approche diachronique des recensements agricoles 1970-2020 à l'échelle départementale ».
- Lambin X., Bretagnolle V. et G Yoccoz N. 2006. « Vole Population Cycles in Northern and Southern Europe: Is There a Need for Different Explanations for Single Pattern? » *Journal of Animal Ecology* 75 (2): 340-49.
- Laundre JW., Hernandez L. et J Ripple W. 2010. « The Landscape of Fear: Ecological Implications of Being Afraid ». *The Open Ecology Journal* 3 (3): 1-7.
- Lepart J., Marty P. et Kleszczewski M. 2007. « Faut-il prendre au sérieux les effets des changements du paysage sur la biodiversité ? » In *Paysages : de la connaissance à l'action*, par Berlandarqué M., Luginbühl Y. et Terrasson D. 29. Editions Quæ.
- Leukers A., Plekat A., Wolff C. et Jacob J. 2014. « Umweltverträgliche Nagetier-Bekämpfung in der Landwirtschaft: Vergleichende Umweltbewertung für Rodentizide, Bewertung nicht-chemischer Alternativen ».
- Luque-Larena JJ., Mougeot F., Viñuela J., Arroyo B., Jareño D., Arroyo L. et Lambin X. 2013. « Recent large-scale range expansion and outbreaks of the common vole (*Microtus Arvalis*) in NW Spain ». *Basic and Applied Ecology* in press (juillet).
- Martin J. 1972. « L'évolution de l'irrigation en France ». *Revue de Géographie Alpine* 60 (3): 419-43.
- Montaz J., Blaszczyk N., Nowak J., Levret A., Coeurdassier M. et Giraudoux P. 2022. « La herse, le campagnol des champs et le semis direct ». *Phytoma*, n° 754, 24-29.
- Morris N-L., Miller P. C. H., Orson J.H. et Froud-Williams R. J. 2010. « The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review ». *Soil and Tillage Research* 108 (1): 1-15.
- Pinot A. 2012. « Les cycles de campagnols des champs dans l'Ouest de la France : une vieille question revisitée à l'aide d'outils modernes. » Thèse, Paris VI: Université Pierre et Marie Curie.
- Quéré J-P., Raoul F., Giraudoux P. et Delattre P. 2000. « An index method of estimating relative population densities of the Common Vole (*Microtus arvalis*) at landscape scale ». *Revue d'Écologie* 55 (1): 25-32.

- Ramon S. et Benoît M. 1998. « L'évolution de la nature des cultures en Lorraine et en Alsace : une menace pour les nappes ». *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 33 (33): 98-100.
- Rodríguez-Pastor R., Luque-Larena JJ., Lambin X. et Mougeot F. 2016. « "Living on the edge": The role of field margins for common vole (*Microtus arvalis*) populations in recently colonised Mediterranean farmland ». *Agriculture Ecosystems & Environment* 231 (août).
- Roos D., Caminero C., Arroyo B., Mougeot F., Luque-Larena JJ. et Lambin X. 2019. « Unintentional effects of environmentally-friendly farming practices: Arising conflicts between zero-tillage and a crop pest, the common vole (*Microtus arvalis*) ». *Agriculture Ecosystems & Environment* 272 (février):105-13.
- URCA-CERFE. 2020. « Identification des corridors forestiers et des passages à faune actifs pour les mammifères terrestre en Champagne-Ardenne ». Université Reims Champagne-Ardenne.

Table des annexes

Annexe 1 : Bassine de piégeage (à gauche) et trappe de la bassine (à droite)	44
Annexe 2 : Perchoir à rapace.....	44
Annexe 3 : Piège guillotine en acier inoxydable	44
Annexe 4 : Calendrier de comptages et application des modalités dans le verger du VEREXAL.....	45
Annexe 5: Courbes préliminaires du taux d'infestation dans le verger du VEREXAL entre septembre 2022 et février 2024 en fonction de la modalité appliquée.....	46
Annexe 6 : Diagnostique paysager des sites expérimentaux de la Haute-Marne (structure paysagère au-dessus, et composition paysagère en-dessous)	47
Annexe 7: Diagnostique paysager du site expérimental du Bas-Rhin (structure paysagère au-dessus, et composition paysagère en-dessous)	49
Annexe 8 : Vérification de la non sur-dispersion des données dans le glmm_1.....	50
Annexe 9 : Evolution des taux d'infestation prédis par le glmm_1, dans la modalité témoin, au printemps, dans des cultures de 3 ans, en fonction de la culture	50
Annexe 10 : Evolution des taux d'infestation prédis par le glmm_1, dans la modalité témoin, dans un dactyle de 3 ans, en fonction de la saison	51
Annexe 11 : Evolution des taux d'infestation prédis par le glmm_1, dans la modalité témoin, dans un dactyle, au printemps en fonction de l'âge de la culture	52
Annexe 12 : Résumé du glm_1 (travail superficiel du sol en Haute-Marne).....	53
Annexe 13 : Comparaisons des modalités en fonction des jours (à gauche) ; puis des jours en fonction des modalités (à droite) (package 'emmeans'), pour le site de la Haute-Marne sur l'étude du travail superficiel du sol	53
Annexe 14 : Résumé du modèle glm_4 (travail sur les bordures de champs en Haute-Marne).....	54
Annexe 15 : Résumé du modèle glm_3 (travail sur les bordures de champs en Haute-Marne).....	54
Annexe 16 : Résumé du modèle glm_7 (prédation par les rapaces en Haute-Marne)	54
Annexe 17 : Comparaisons des modalités en fonction des jours (package 'emmeans'), pour le site de la Haute-Marne sur la prédation par les rapaces.....	55
Annexe 18 : Nombre de pelotes aux pieds des perchoirs dans les modalités de prédation sur le site de la Haute-Marne.....	56
Annexe 19 : Résumé du gam_3 (VEREXAL)	56
Annexe 20 : Comparaisons des modalités en fonction des saisons (package 'emmeans'), pour le site du Bas-Rhin.....	57
Annexe 21 : Comparaisons des saisons en fonction modalité (package 'emmeans'), pour le site du Bas-Rhin.....	57

Annexe 1 : Bassine de piégeage (à gauche) et trappe de la bassine (à droite)



Source : FREDON Grand Est

Annexe 2 : Perchoir à rapace



Source : FREDON Grand Est

Annexe 3 : Piège guillotine en acier inoxydable

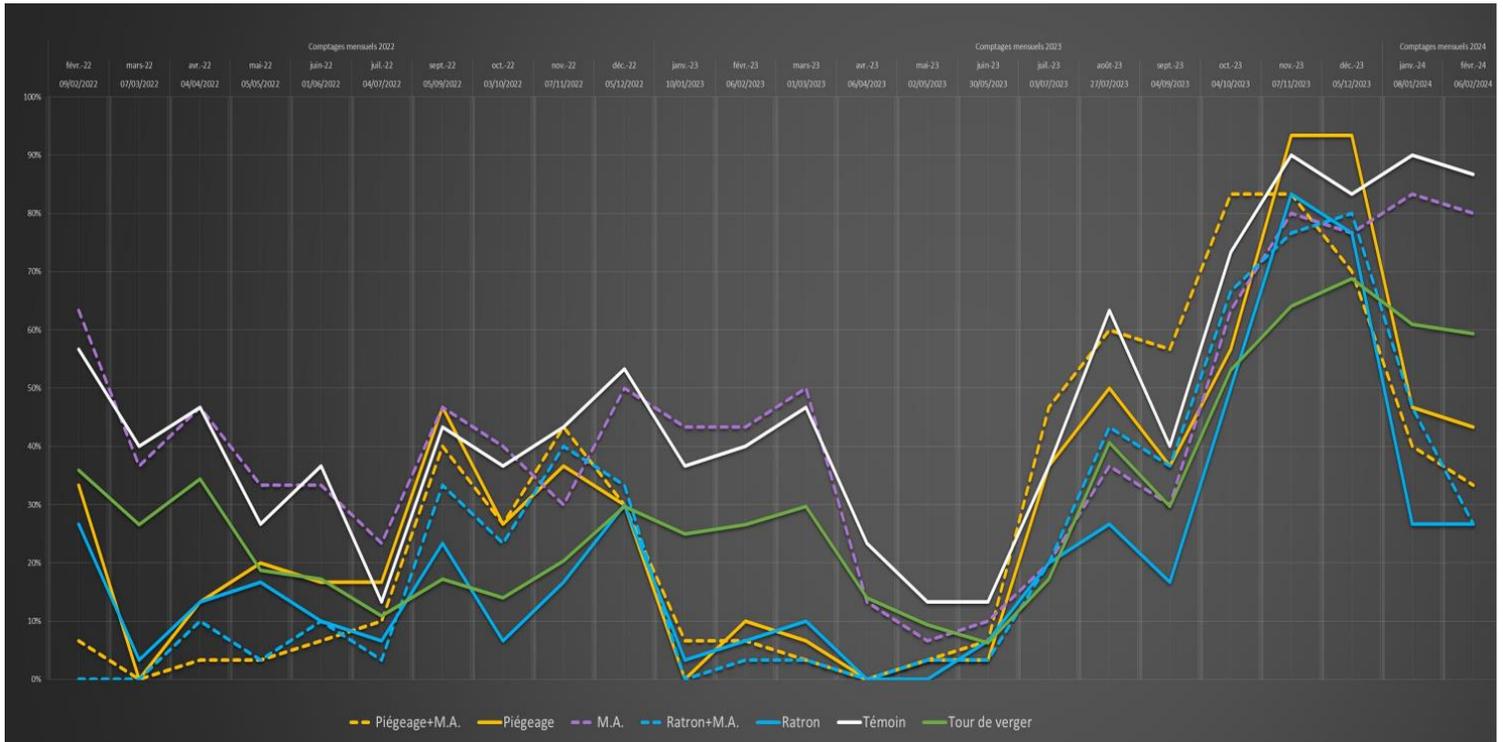


Source : Andermatt

Annexe 4 : Calendrier de comptages et application des modalités dans le verger du VEREXAL

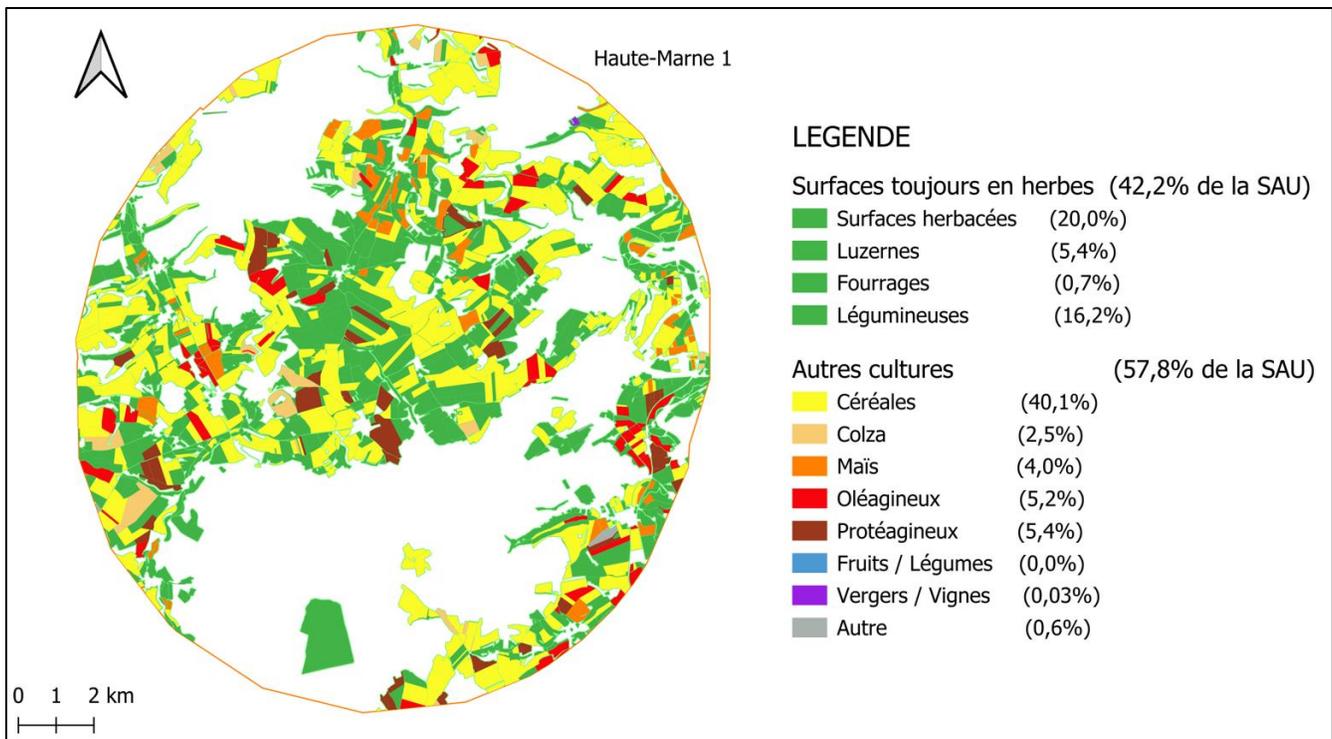
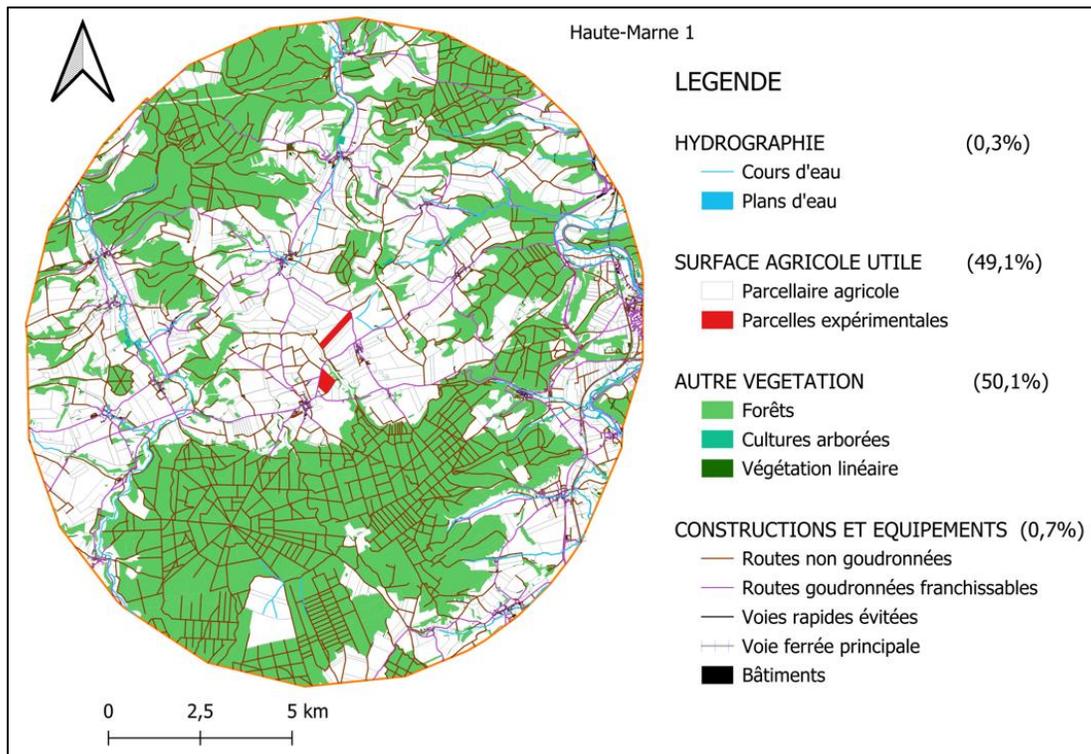
Année	Comptages	Piégeage (surface 0,84 ha)	Traitement ratron (surface 0,84 ha)	Méthodes alternatives	
				Aérateur de prairie (surface 1,26 ha)	Engrais à base de Ricin (surface 1,26 ha)
2021	22/02/2021				
		22/02 au 10/03/2021	22/02/2021		
	04/03/2021				
	19/04/2021				
	28/06/2021				
	07/12/2021			30/06/2021	
		09/12 au 22/12/2021			
			31/12/2021		
2022				17/02/2022	
		21/02 au 02/03/2022			
	07/03/2022				
	04/04/2022				
				11/04/2022	
	05/05/2022				
	01/06/2022				
				30/06/2022	
	04/07/2022				
	05/09/2022				
	03/10/2022				
	07/11/2022				
		22/11 au 07/12/2022		22/11/2022	
05/12/2022					
				08/12/2022	
		12/12/2022			
2023		04/01 au 06/01/2023			
	10/01/2023				
	06/02/2023				
	01/03/2023	28/02 au 02/03/2023			
			02/03/2023		
	06/04/2023				
				11/04/2023	
					17/04/2023
	02/05/2023				
				05/05/2023	
	31/05/2023				
	03/07/2023				
	27/07/2023				
				29/07/2023	
					03/08/2023
04/09/2023					
04/10/2023					
07/11/2023					
05/12/2023					
	11/12 au 21/12/2023		21/12/2023		
				21/12/2023 au 12/01/2024	
2024	08/01/2024				
	06/02/2024	31/01 au 19/02/2024			
			19/02/2024		
					01/03/2024
	05/03/2024				
	02/04/2024				
				12/04/2024	
30/04/2024					
10/06/2024					

Annexe 5: Courbes préliminaires du taux d'infestation dans le verger du VEREXAL entre septembre 2022 et février 2024 en fonction de la modalité appliquée

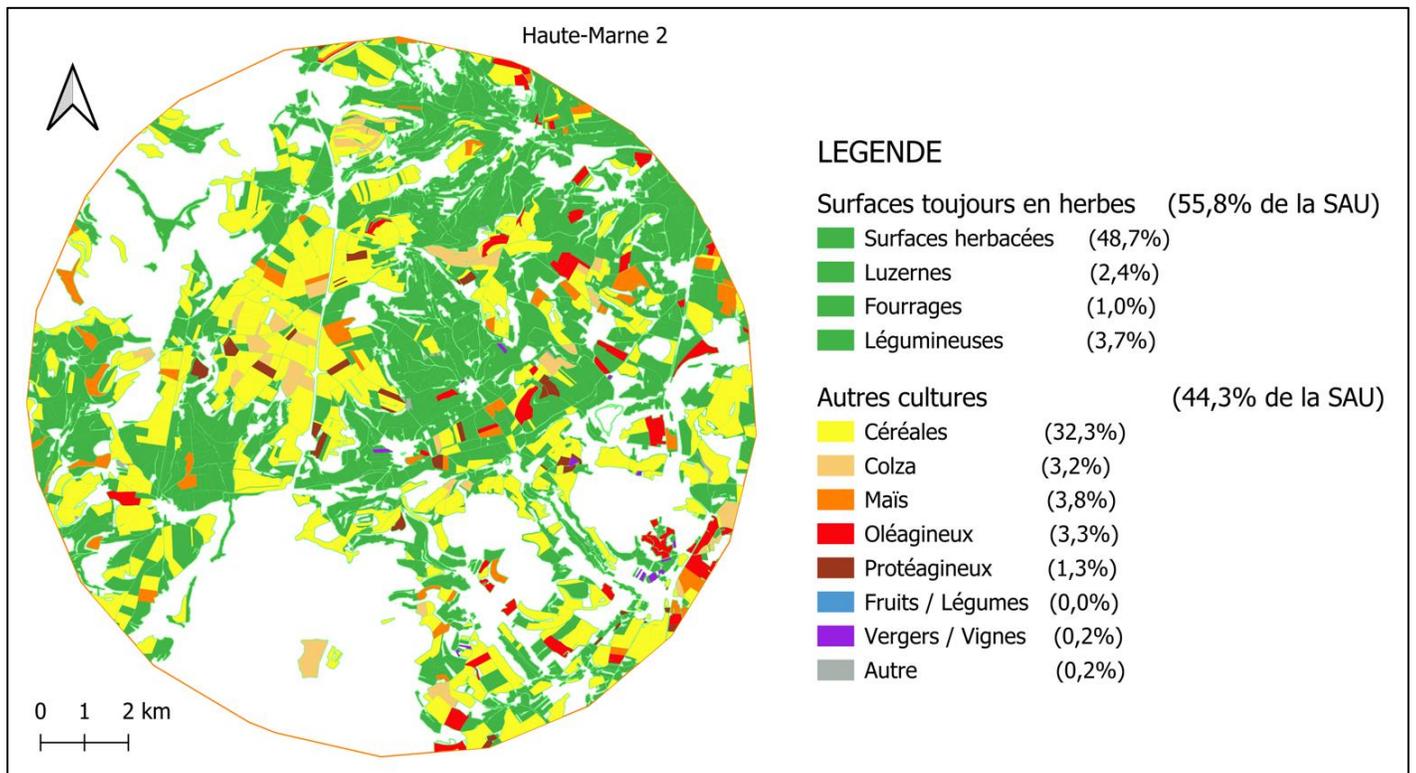
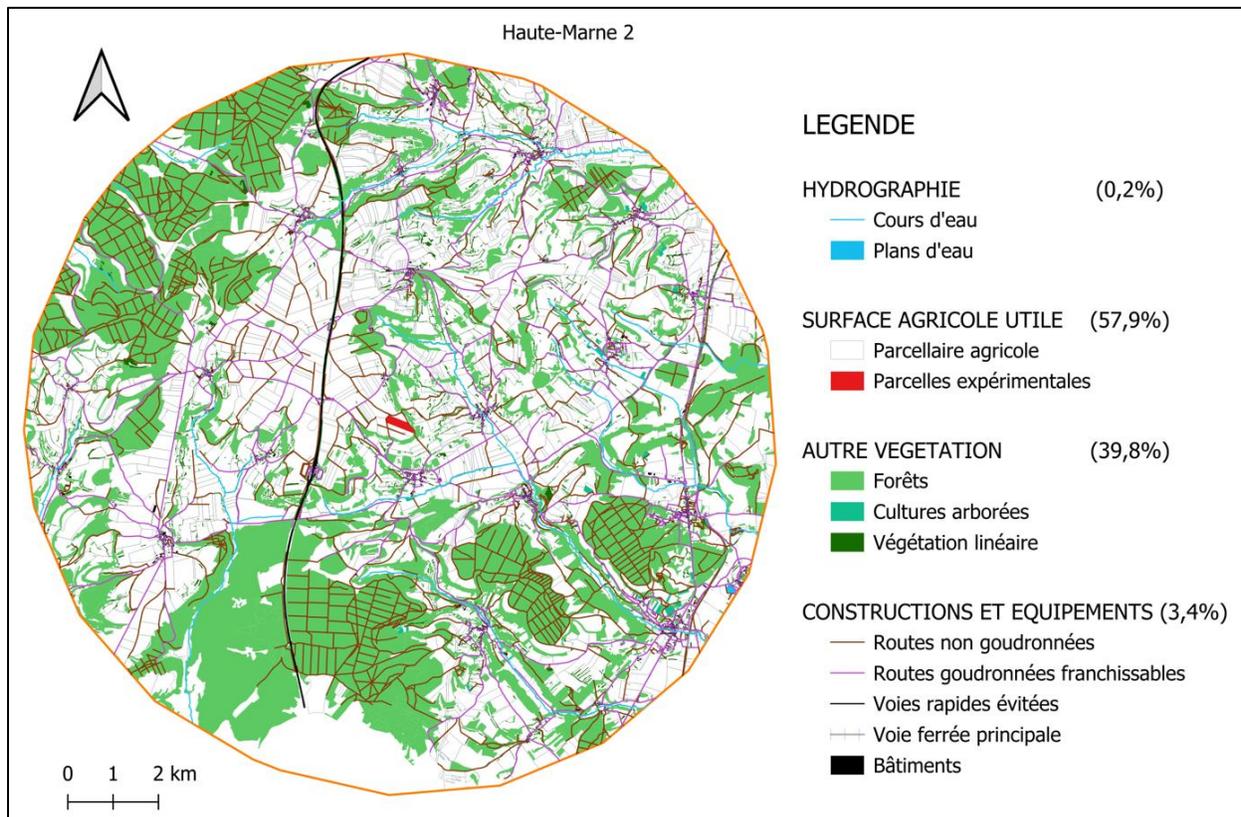


Source : FREDON Grand Est

Annexe 6 : Diagnostic paysager des sites expérimentaux de la Haute-Marne (structure paysagère au-dessus, et composition paysagère en-dessous)

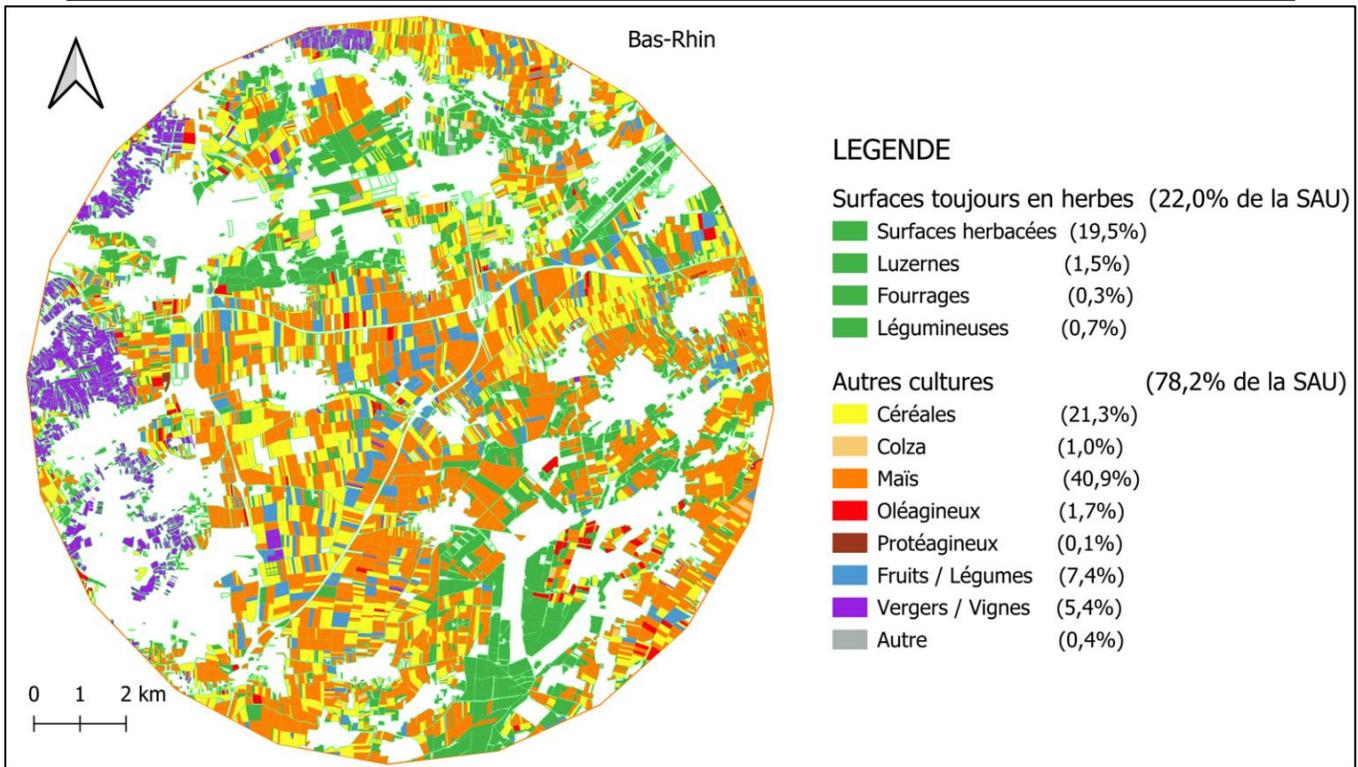
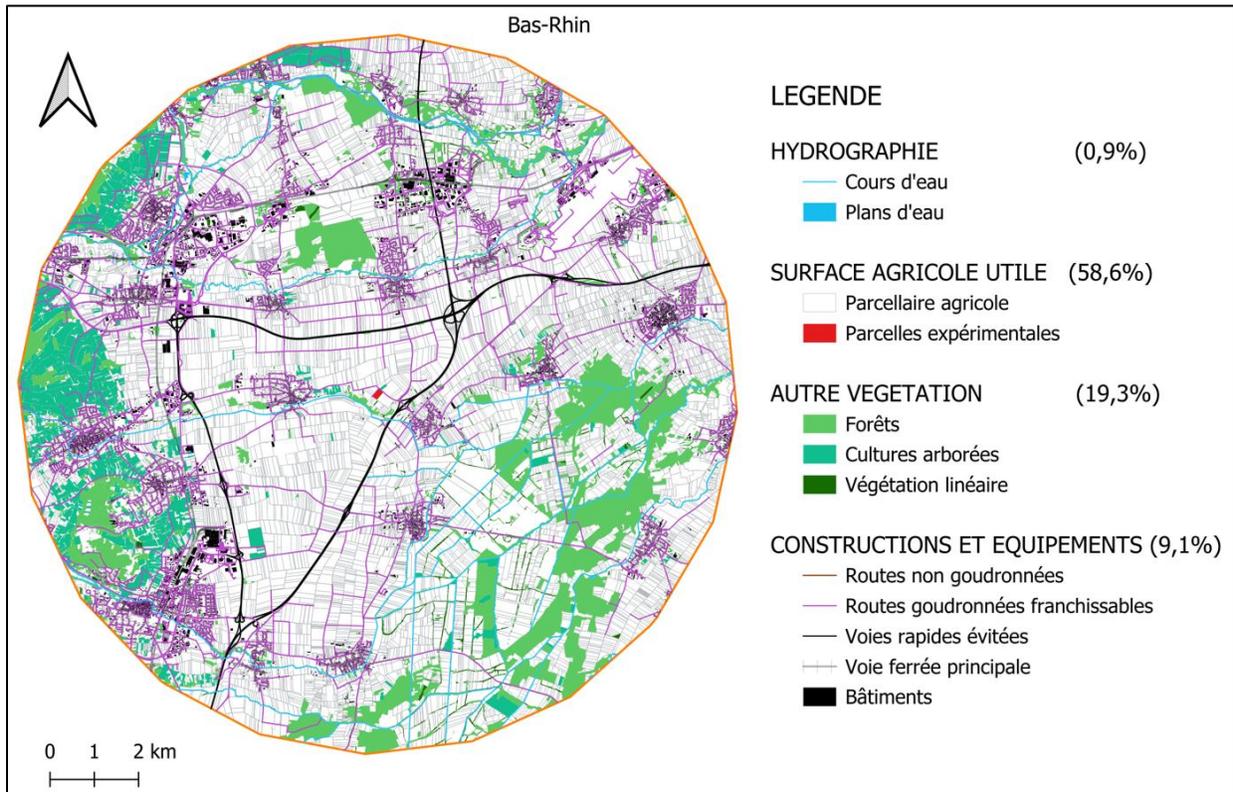


Ce paysage est hétérogène avec plus de 50 % de la surface occupée par des forêts et des îlots boisés. Les parcelles ne sont pas régulières et les cultures céréalières sont morcelées. Il semble que ce site puisse être qualifié de bocager.



Ce paysage est hétérogène avec environ 40 % de la surface occupée par des forêts et des îlots boisés. Les parcelles ne sont pas régulières et les cultures céréalières sont morcelées. Il semble que ce site puisse être qualifié de bocager.

Annexe 7: Diagnostic paysager du site expérimental du Bas-Rhin (structure paysagère au-dessus, et composition paysagère en-dessous)



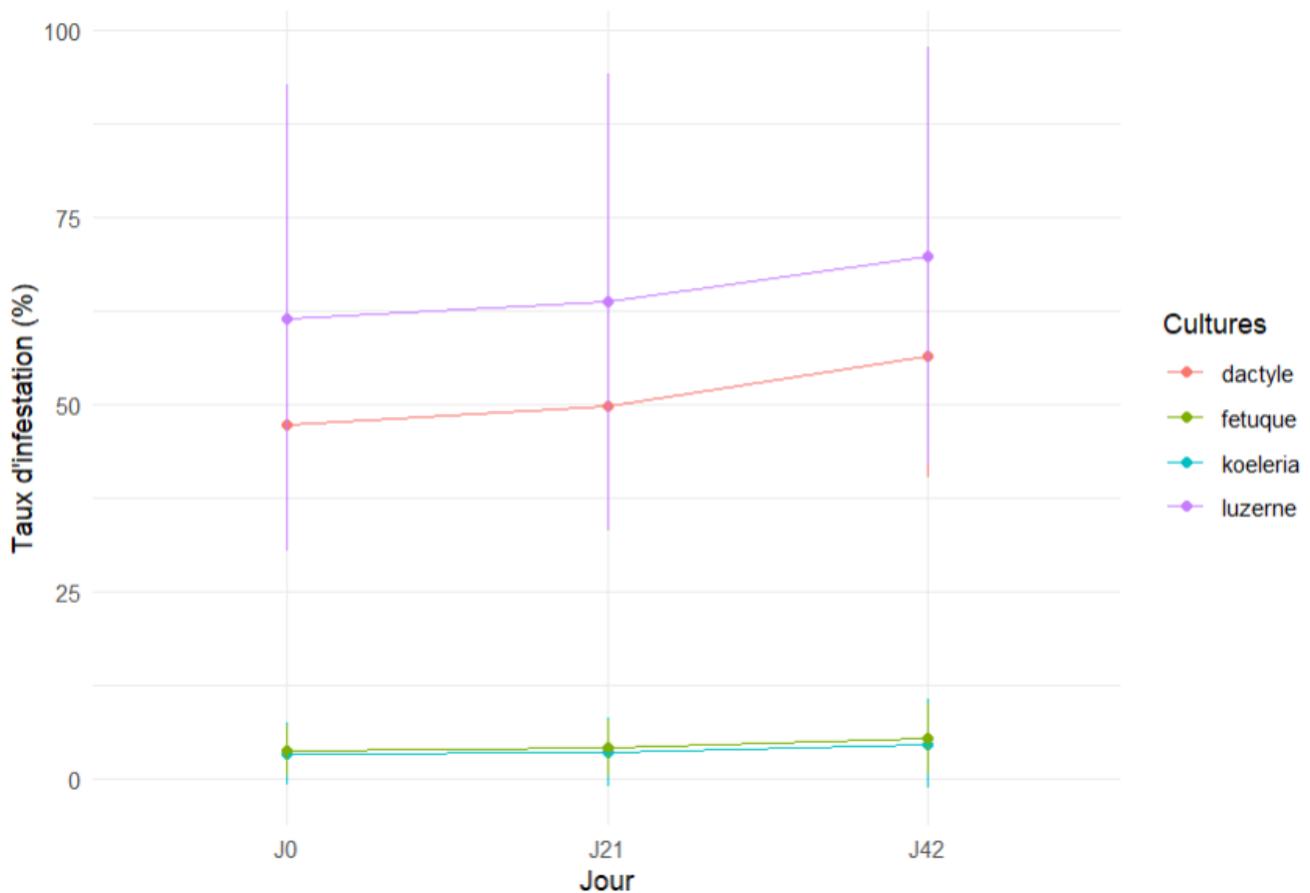
Ce paysage est assez homogène, avec seulement 19,3 % de la surface occupée par des forêts et des îlots boisés. Les parcelles sont régulières. Il semble que ce site puisse être qualifié d'openfield.

Annexe 8 : Vérification de la non sur-dispersion des données dans le glmm_1

```
> deviance(glmm_1)/df.residual(glmm_1)  
[1] 0.9703615
```

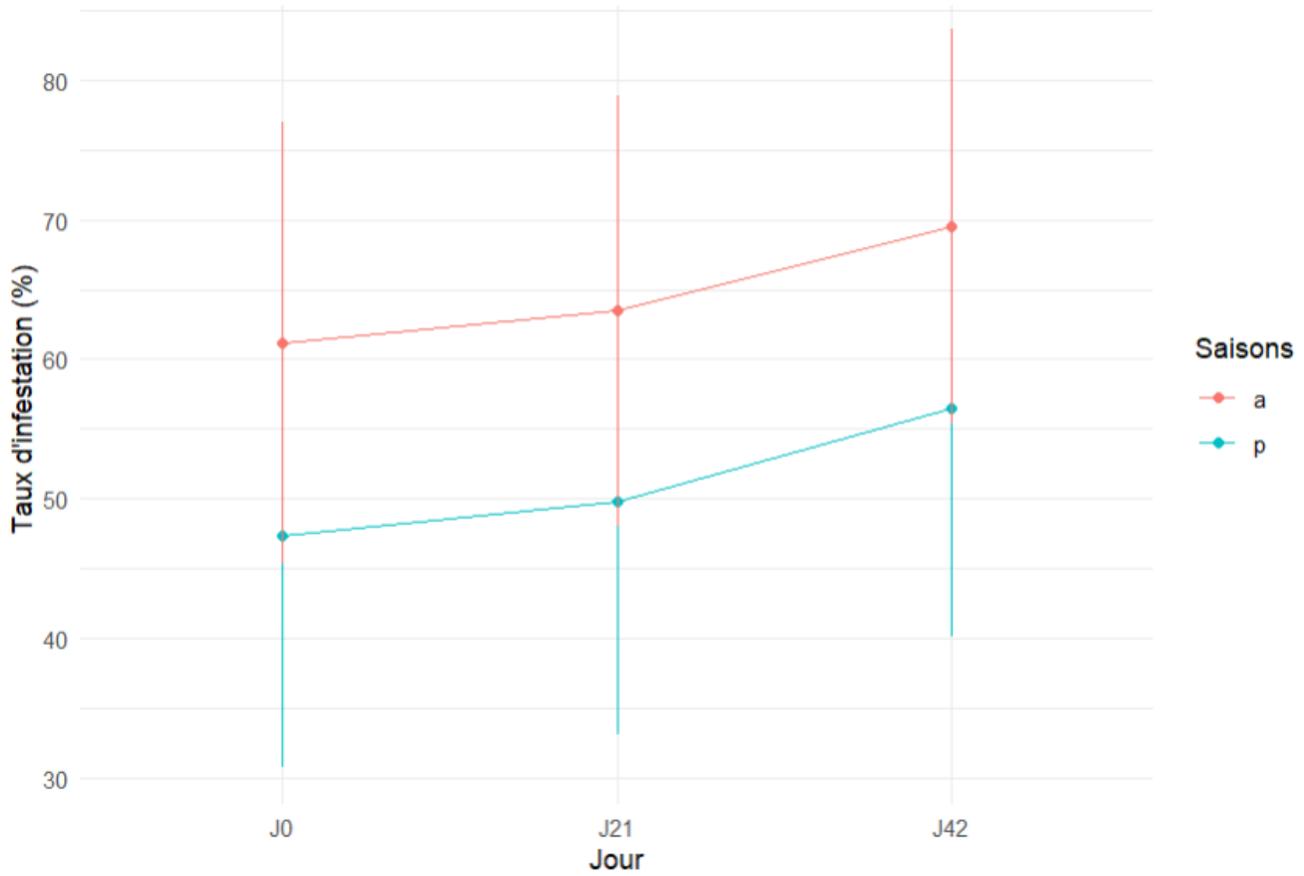
Un ratio proche de 1 indique que le modèle est bien ajusté et que la variance des données est correctement modélisée par le modèle. En général, un ratio proche de 1 suggère qu'il n'y a pas de sur-dispersion.

Annexe 9 : Evolution des taux d'infestation prédits par le glmm_1, dans la modalité témoin, au printemps, dans des cultures de 3 ans, en fonction de la culture



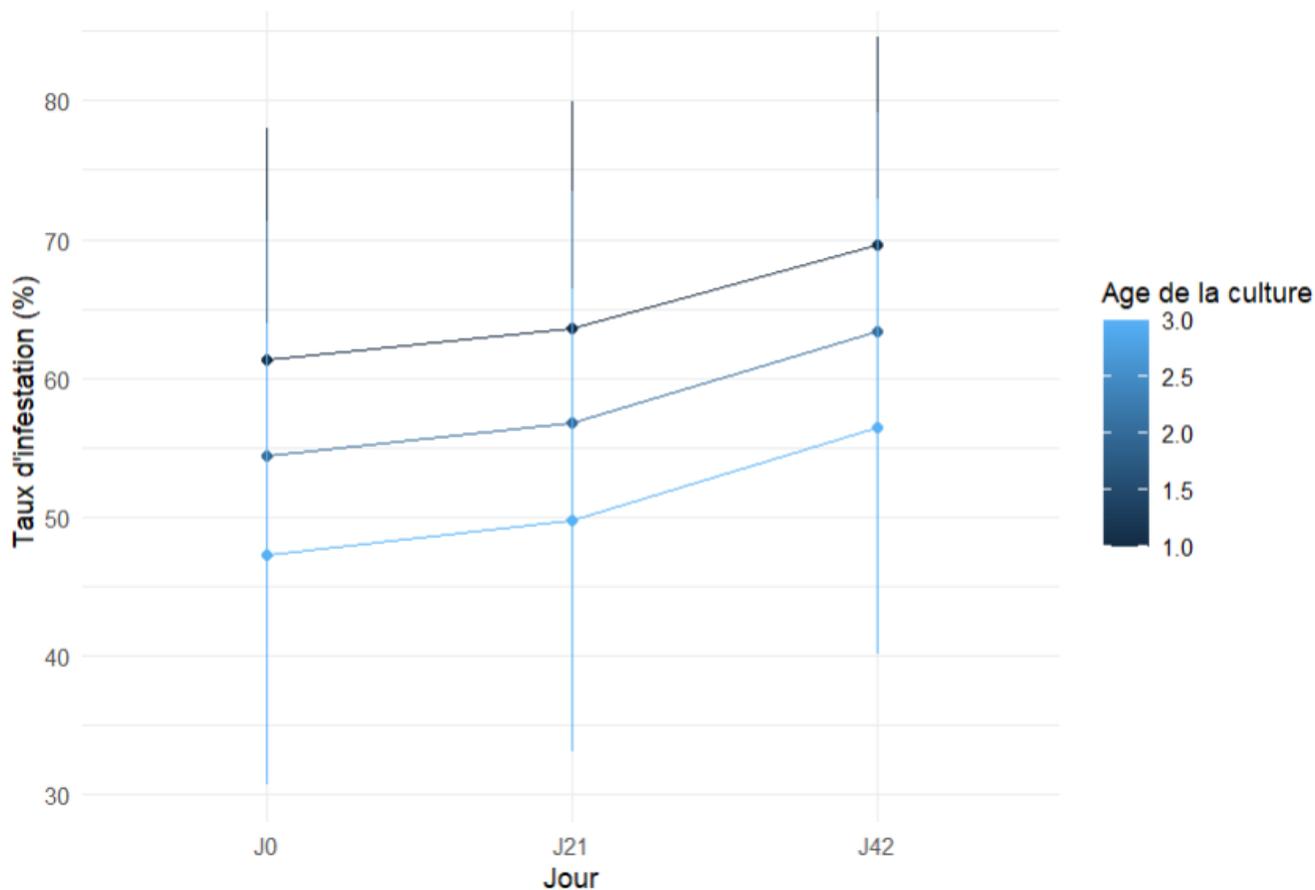
Les taux d'infestation sont prédits par le modèle glmm_1. Le taux d'infestation dans le dactyle est intermédiaire par rapport aux autres cultures. De plus, un taux en J0 d'environ 50 % correspond environ aux taux réels. Ainsi c'est le dactyle qui sera fixé pour la variable culture.

Annexe 10 : Evolution des taux d'infestation prédis par le glmm_1, dans la modalité témoin, dans un dactyle de 3 ans, en fonction de la saison



Les taux d'infestation sont prédits par le modèle glmm_1. En J0, le taux d'infestation au printemps est d'environ 50 %, ce qui correspond environ aux taux réels. Ainsi c'est le printemps qui sera fixé pour la variable saison.

Annexe 11 : Evolution des taux d'infestation prédis par le glmm_1, dans la modalité témoin, dans un dactyle, au printemps en fonction de l'âge de la culture



Les taux d'infestation sont prédits par le modèle glmm_1. En J0, le taux d'infestation dans la culture de 3 ans est d'environ 50 %, ce qui correspond environ aux taux réels. Ainsi c'est le l'âge de 3 ans qui sera fixé pour la variable age_culture.

Annexe 12 : Résumé du glm_1 (travail superficiel du sol en Haute-Marne)

```

Coefficients: (1 not defined because of singularities)
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  -1.0739    0.1809  -5.937 2.91e-09 ***
modM2:jourJ0   0.1202    0.2563   0.469 0.639012
modM1:jourJ0  -1.4451    0.3504  -4.124 3.72e-05 ***
modM3:jourJ0  -0.3582    0.2673  -1.340 0.180203
modM2:jourJ170 -2.6457    0.5374  -4.923 8.51e-07 ***
modM1:jourJ170 -17.4921   515.6599  -0.034 0.972939
modM3:jourJ170 -1.9465    0.4047  -4.809 1.52e-06 ***
modM2:jourJ21  -1.3369    0.3325  -4.021 5.81e-05 ***
modM1:jourJ21 -17.4921   514.0560  -0.034 0.972855
modM3:jourJ21  -1.4300    0.3405  -4.200 2.67e-05 ***
modM2:jourJ42  -0.3803    0.2670  -1.425 0.154273
modM1:jourJ42  -4.0075    1.0193  -3.932 8.44e-05 ***
modM3:jourJ42   0.2100    0.2462   0.853 0.393708
modM2:jourJ79  -0.9989    0.3033  -3.294 0.000989 ***
modM1:jourJ79  -4.0013    1.0193  -3.925 8.66e-05 ***
modM3:jourJ79      NA         NA      NA      NA
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
    
```

Annexe 13 : Comparaisons des modalités en fonction des jours (à gauche) ; puis des jours en fonction des modalités (à droite) (package 'emmeans'), pour le site de la Haute-Marne sur l'étude du travail superficiel du sol

	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
jour = J0:	J0 / J170	16	9.00e+00	Inf	1	5.145	<.0001
	J0 / J21	4	1.00e+00	Inf	1	4.377	0.0001
	J0 / J42	2	0.00e+00	Inf	1	1.872	0.3327
	J0 / J79	3	1.00e+00	Inf	1	3.685	0.0021
	J170 / J21	0	0.00e+00	Inf	1	-2.265	0.1563
	J170 / J42	0	0.00e+00	Inf	1	-4.174	0.0003
	J170 / J79	0	0.00e+00	Inf	1	-2.933	0.0278
	J21 / J42	0	0.00e+00	Inf	1	-2.804	0.0404
	J21 / J79	1	0.00e+00	Inf	1	-0.913	0.8921
	J42 / J79	2	1.00e+00	Inf	1	1.978	0.2767
mod = M1:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
	J0 / J170	9313997	4.80e+09	Inf	1	0.031	1.0000
	J0 / J21	9313997	4.79e+09	Inf	1	0.031	1.0000
	J0 / J42	13	1.40e+01	Inf	1	2.447	0.1030
	J0 / J79	13	1.30e+01	Inf	1	2.441	0.1045
	J170 / J21	1	7.28e+02	Inf	1	0.000	1.0000
	J170 / J42	0	0.00e+00	Inf	1	-0.026	1.0000
	J170 / J79	0	0.00e+00	Inf	1	-0.026	1.0000
	J21 / J42	0	0.00e+00	Inf	1	-0.026	1.0000
	J21 / J79	0	0.00e+00	Inf	1	-0.026	1.0000
J42 / J79	1	1.00e+00	Inf	1	-0.004	1.0000	
mod = M3:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
	J0 / J170	5	2.00e+00	Inf	1	3.854	0.0011
	J0 / J21	3	1.00e+00	Inf	1	3.070	0.0183
	J0 / J42	1	0.00e+00	Inf	1	-2.202	0.1789
	J0 / J79	1	0.00e+00	Inf	1	-1.340	0.6660
	J170 / J21	1	0.00e+00	Inf	1	-1.116	0.7984
	J170 / J42	0	0.00e+00	Inf	1	-5.409	<.0001
	J170 / J79	0	0.00e+00	Inf	1	-4.809	<.0001
	J21 / J42	0	0.00e+00	Inf	1	-4.921	<.0001
	J21 / J79	0	0.00e+00	Inf	1	-4.200	0.0003
J42 / J79	1	0.00e+00	Inf	1	0.853	0.9138	

jour = J0:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	5	2.00e+00	Inf	1	4.463	<.0001	
M2 / M3	2	0.00e+00	Inf	1	1.787	0.1740	
M1 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-3.029	0.0069	

jour = J170:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	2803607	1.45e+09	Inf	1	0.029	0.9995	
M2 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-1.124	0.4994	
M1 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-0.030	0.9995	

jour = J21:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	10378738	5.34e+09	Inf	1	0.031	0.9995	
M2 / M3	1	0.00e+00	Inf	1	0.232	0.9707	
M1 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-0.031	0.9995	

jour = J42:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	38	3.80e+01	Inf	1	3.549	0.0011	
M2 / M3	1	0.00e+00	Inf	1	-2.290	0.0571	
M1 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-4.147	0.0001	

jour = J79:	contrast	odds.ratio	SE	df	null	z.ratio	p.value
M2 / M1	20	2.10e+01	Inf	1	2.909	0.0102	
M2 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-3.294	0.0028	
M1 / M3	0	0.00e+00	Inf	1	-3.925	0.0003	

Annexe 14 : Résumé du modèle glm_4 (travail sur les bordures de champs en Haute-Marne)

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-1.05564	0.25943	-4.069	4.72e-05	***
modM3	0.12131	0.31646	0.383	0.7015	
modM4	0.20097	0.31514	0.638	0.5237	
modM5	0.21870	0.31524	0.694	0.4878	
jourJ21	-0.39287	0.22104	-1.777	0.0755	.
distance	-0.06720	0.01363	-4.930	8.21e-07	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 15 : Résumé du modèle glm_3 (travail sur les bordures de champs en Haute-Marne)

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-1.07034	0.13340	-8.024	1.03e-15	***
modM2:jourJ0:distance	-0.12850	0.05772	-2.226	0.0260	*
modM3:jourJ0:distance	-0.06683	0.03119	-2.143	0.0321	*
modM4:jourJ0:distance	-0.07277	0.03464	-2.101	0.0357	*
modM5:jourJ0:distance	-0.09831	0.04440	-2.214	0.0268	*
modM2:jourJ21:distance	-0.06046	0.03134	-1.929	0.0537	.
modM3:jourJ21:distance	-0.03202	0.02225	-1.439	0.1502	
modM4:jourJ21:distance	-0.04706	0.02642	-1.781	0.0748	.
modM5:jourJ21:distance	-0.12398	0.05633	-2.201	0.0277	*

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 16 : Résumé du modèle glm_7 (prédation par les rapaces en Haute-Marne)

Coefficients: (1 not defined because of singularities)

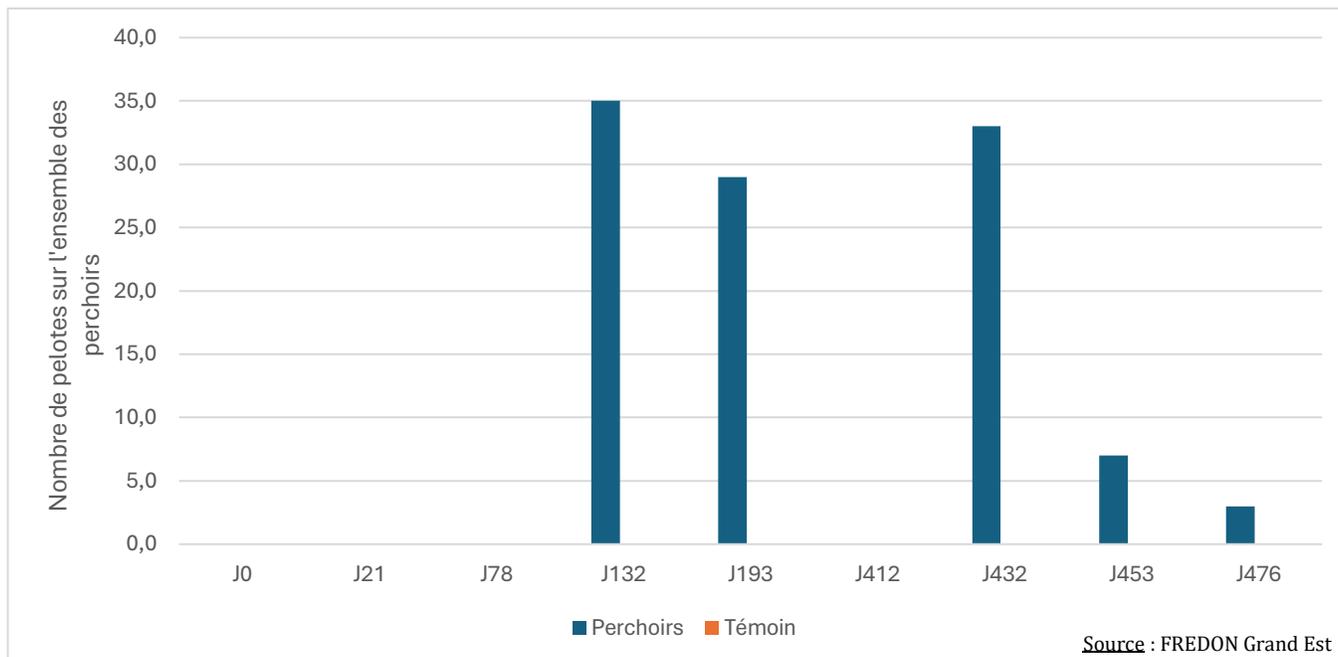
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-2.5437	0.3131	-8.124	4.53e-16	***
modM2:jourJ0	-2.4399	1.0511	-2.321	0.020279	*
modM6:jourJ0	-16.0223	527.3242	-0.030	0.975761	
modM2:jourJ132	2.8970	0.3562	8.132	4.21e-16	***
modM6:jourJ132	2.2325	0.3543	6.301	2.96e-10	***
modM2:jourJ193	3.3647	0.3616	9.304	< 2e-16	***
modM6:jourJ193	2.5301	0.3539	7.149	8.76e-13	***
modM2:jourJ21	-16.0223	537.9783	-0.030	0.976241	
modM6:jourJ21	-16.0223	534.3555	-0.030	0.976080	
modM2:jourJ412	1.1310	0.3774	2.997	0.002731	**
modM6:jourJ412	0.9816	0.3802	2.581	0.009838	**
modM2:jourJ432	1.2328	0.3728	3.307	0.000944	***
modM6:jourJ432	1.2592	0.3731	3.375	0.000739	***
modM2:jourJ453	1.5692	0.3640	4.311	1.62e-05	***
modM6:jourJ453	0.9978	0.3804	2.623	0.008715	**
modM2:jourJ476	0.8671	0.3869	2.241	0.025009	*
modM6:jourJ476	0.5513	0.4015	1.373	0.169683	
modM2:jourJ78	0.3076	0.4208	0.731	0.464828	
modM6:jourJ78	NA	NA	NA	NA	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 17 : Comparaisons des modalités en fonction des jours (package 'emmeans'), pour le site de la Haute-Marne sur la prédation par les rapaces

```
jour = J0:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6      792115.0 4.18e+08 Inf    1   0.026  0.9795  
  
jour = J132:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.9 0.00e+00 Inf    1   2.799  0.0051  
  
jour = J193:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         2.3 1.00e+00 Inf    1   3.409  0.0007  
  
jour = J21:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.0 7.58e+02 Inf    1   0.000  1.0000  
  
jour = J412:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.2 0.00e+00 Inf    1   0.496  0.6202  
  
jour = J432:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.0 0.00e+00 Inf    1  -0.092  0.9265  
  
jour = J453:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.8 1.00e+00 Inf    1   2.006  0.0448  
  
jour = J476:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.4 0.00e+00 Inf    1   0.932  0.3513  
  
jour = J78:  
contrast odds.ratio      SE  df null z.ratio p.value  
M2 / M6         1.4 1.00e+00 Inf    1   0.731  0.4648
```

Annexe 18 : Nombre de pelotes aux pieds des perchoirs dans les modalités de prédation sur le site de la Haute-Marne



De J0 à J78, il n’y pas de pelotes aux pieds des perchoirs. On suppose donc qu’il n’y a pas de prédation par les rapaces jusqu’en J78. En J412 les relevés n’ont pas été effectués.

Annexe 19 : Résumé du gam_3 (VEREXAL)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-2.18250	0.23452	-9.306	< 2e-16	***
modB3:saisonhiver	1.99295	0.28484	6.997	2.62e-12	***
modA1:saisonhiver	0.12568	0.29523	0.426	0.6703	
modA2:saisonhiver	0.14870	0.29484	0.504	0.6140	
modA3:saisonhiver	2.03138	0.28501	7.127	1.02e-12	***
modB1:saisonhiver	0.05538	0.29648	0.187	0.8518	
modB2:saisonhiver	-0.14267	0.30048	-0.475	0.6349	
modB3:saisonautomne	2.25999	0.33887	6.669	2.57e-11	***
modA1:saisonautomne	1.89723	0.33721	5.626	1.84e-08	***
modA2:saisonautomne	2.10024	0.33797	6.214	5.16e-10	***
modA3:saisonautomne	2.05497	0.33776	6.084	1.17e-09	***
modB1:saisonautomne	1.78474	0.33696	5.297	1.18e-07	***
modB2:saisonautomne	1.55841	0.33685	4.626	3.72e-06	***
modB3:saisonete	2.23539	0.32635	6.850	7.41e-12	***
modA1:saisonete	2.38173	0.32473	7.334	2.23e-13	***
modA2:saisonete	2.14554	0.32756	6.550	5.75e-11	***
modA3:saisonete	1.86260	0.33242	5.603	2.11e-08	***
modB1:saisonete	1.65801	0.33704	4.919	8.69e-07	***
modB2:saisonete	1.13780	0.35374	3.216	0.0013	**
modB3:saisonprintemps	1.98872	0.24932	7.976	1.51e-15	***
modA1:saisonprintemps	0.17396	0.29544	0.589	0.5560	
modA2:saisonprintemps	0.67856	0.27385	2.478	0.0132	*
modA3:saisonprintemps	1.73696	0.25159	6.904	5.06e-12	***
modB1:saisonprintemps	0.00000	0.00000	NaN	NaN	
modB2:saisonprintemps	0.17396	0.29544	0.589	0.5560	

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 20 : Comparaisons des modalités en fonction des saisons (package 'emmeans'), pour le site du Bas-Rhin

saison = hiver:							saison = ete:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
B3 / A1	6.471	1.3527	5727	1	8.932	<.0001	B3 / A1	0.864	0.2091	5727	1	-0.605	0.9907
B3 / A2	6.323	1.3187	5727	1	8.844	<.0001	B3 / A2	1.094	0.2678	5727	1	0.367	0.9991
B3 / A3	0.962	0.1887	5727	1	-0.196	1.0000	B3 / A3	1.452	0.3630	5727	1	1.491	0.6703
B3 / B1	6.942	1.4628	5727	1	9.195	<.0001	B3 / B1	1.781	0.4549	5727	1	2.261	0.2104
B3 / B2	8.462	1.8282	5727	1	9.885	<.0001	B3 / B2	2.997	0.8253	5727	1	3.986	0.0010
A1 / A2	0.977	0.2097	5727	1	-0.107	1.0000	A1 / A2	1.266	0.3081	5727	1	0.971	0.9272
A1 / A3	0.149	0.0312	5727	1	-9.098	<.0001	A1 / A3	1.681	0.4178	5727	1	2.088	0.2936
A1 / B1	1.073	0.2323	5727	1	0.325	0.9995	A1 / B1	2.062	0.5237	5727	1	2.850	0.0501
A1 / B2	1.308	0.2895	5727	1	1.212	0.8311	A1 / B2	3.469	0.9509	5727	1	4.538	0.0001
A2 / A3	0.152	0.0318	5727	1	-9.011	<.0001	A2 / A3	1.327	0.3334	5727	1	1.126	0.8706
A2 / B1	1.098	0.2372	5727	1	0.432	0.9981	A2 / B1	1.628	0.4177	5727	1	1.901	0.4017
A2 / B2	1.338	0.2956	5727	1	1.319	0.7746	A2 / B2	2.739	0.7572	5727	1	3.646	0.0037
A3 / B1	7.214	1.5230	5727	1	9.360	<.0001	A3 / B1	1.227	0.3208	5727	1	0.783	0.9705
A3 / B2	8.794	1.9034	5727	1	10.044	<.0001	A3 / B2	2.064	0.5799	5727	1	2.580	0.1023
B1 / B2	1.219	0.2716	5727	1	0.889	0.9493	B1 / B2	1.682	0.4804	5727	1	1.822	0.4516

saison = automne:							saison = printemps:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
B3 / A1	1.437	0.3068	5727	1	1.700	0.5319	B3 / A1	6.140	1.4556	5727	1	7.655	<.0001
B3 / A2	1.173	0.2508	5727	1	0.747	0.9759	B3 / A2	3.707	0.7754	5727	1	6.263	<.0001
B3 / A3	1.228	0.2622	5727	1	0.960	0.9305	B3 / A3	1.286	0.2285	5727	1	1.417	0.7168
B3 / B1	1.608	0.3435	5727	1	2.225	0.2261	B3 / B1	7.306	1.8216	5727	1	7.976	<.0001
B3 / B2	2.017	0.4326	5727	1	3.271	0.0137	B3 / B2	6.140	1.4556	5727	1	7.655	<.0001
A1 / A2	0.816	0.1735	5727	1	-0.955	0.9318	A1 / A2	0.604	0.1587	5727	1	-1.920	0.3898
A1 / A3	0.854	0.1814	5727	1	-0.743	0.9766	A1 / A3	0.210	0.0502	5727	1	-6.527	<.0001
A1 / B1	1.119	0.2374	5727	1	0.530	0.9950	A1 / B1	1.190	0.3516	5727	1	0.589	0.9918
A1 / B2	1.403	0.2988	5727	1	1.591	0.6045	A1 / B2	1.000	0.2853	5727	1	0.000	1.0000
A2 / A3	1.046	0.2226	5727	1	0.213	0.9999	A2 / A3	0.347	0.0736	5727	1	-4.993	<.0001
A2 / B1	1.371	0.2915	5727	1	1.484	0.6748	A2 / B1	1.971	0.5398	5727	1	2.478	0.1308
A2 / B2	1.719	0.3671	5727	1	2.538	0.1135	A2 / B2	1.656	0.4353	5727	1	1.920	0.3898
A3 / B1	1.310	0.2784	5727	1	1.272	0.8005	A3 / B1	5.680	1.4290	5727	1	6.904	<.0001
A3 / B2	1.643	0.3505	5727	1	2.328	0.1830	A3 / B2	4.773	1.1430	5727	1	6.527	<.0001
B1 / B2	1.254	0.2670	5727	1	1.063	0.8961	B1 / B2	0.840	0.2483	5727	1	-0.589	0.9918

Annexe 21 : Comparaisons des saisons en fonction modalité (package 'emmeans'), pour le site du Bas-Rhin

mod = B3:							mod = A3:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
hiver / automne	0.766	0.1994	5727	1	-1.025	0.7346	hiver / automne	0.977	0.2532	5727	1	-0.091	0.9997
hiver / ete	0.785	0.2348	5727	1	-0.810	0.8496	hiver / ete	1.184	0.3612	5727	1	0.553	0.9457
hiver / printemps	1.004	0.2271	5727	1	0.019	1.0000	hiver / printemps	1.342	0.3068	5727	1	1.288	0.5705
automne / ete	1.025	0.2788	5727	1	0.090	0.9997	automne / ete	1.212	0.3343	5727	1	0.697	0.8981
automne / printemps	1.312	0.3795	5727	1	0.938	0.7846	automne / printemps	1.374	0.3987	5727	1	1.096	0.6919
ete / printemps	1.280	0.3450	5727	1	0.915	0.7968	ete / printemps	1.134	0.3173	5727	1	0.449	0.9699

mod = A1:							mod = B1:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
hiver / automne	0.170	0.0456	5727	1	-6.609	<.0001	hiver / automne	0.177	0.0477	5727	1	-6.429	<.0001
hiver / ete	0.105	0.0320	5727	1	-7.387	<.0001	hiver / ete	0.201	0.0640	5727	1	-5.042	<.0001
hiver / printemps	0.953	0.2718	5727	1	-0.169	0.9983	hiver / printemps	1.057	0.3134	5727	1	0.187	0.9977
automne / ete	0.616	0.1663	5727	1	-1.795	0.2759	automne / ete	1.135	0.3175	5727	1	0.453	0.9690
automne / printemps	5.603	1.8396	5727	1	5.249	<.0001	automne / printemps	5.958	2.0076	5727	1	5.297	<.0001
ete / printemps	9.095	2.8677	5727	1	7.002	<.0001	ete / printemps	5.249	1.7691	5727	1	4.919	<.0001

mod = A2:							mod = B2:						
contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value	contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
hiver / automne	0.142	0.0382	5727	1	-7.263	<.0001	hiver / automne	0.182	0.0498	5727	1	-6.233	<.0001
hiver / ete	0.136	0.0417	5727	1	-6.494	<.0001	hiver / ete	0.278	0.0939	5727	1	-3.790	0.0009
hiver / printemps	0.589	0.1548	5727	1	-2.014	0.1827	hiver / printemps	0.729	0.2118	5727	1	-1.089	0.6961
automne / ete	0.956	0.2600	5727	1	-0.167	0.9984	automne / ete	1.523	0.4523	5727	1	1.416	0.4892
automne / printemps	4.144	1.2843	5727	1	4.587	<.0001	automne / printemps	3.993	1.3094	5727	1	4.221	0.0001
ete / printemps	4.336	1.2897	5727	1	4.932	<.0001	ete / printemps	2.622	0.9047	5727	1	2.793	0.0269

**La gestion du campagnol des champs :
du paysage à la parcelle agricole**

58 pages

Mémoire de fin d'études
Soutenu à VetAgro Sup – campus agronomique

STRUCTURE D'ACCUEIL : FREDON Grand Est

ENCADRANTS :

- ◆ Maître de stage : AUDREN Louis (FREDON Grand Est)
- ◆ Tuteur pédagogique : PINOT Adrien (VetAgro Sup)

OPTION : Agriculture, Environnement, Santé et Territoire

Résumé

Les changements environnementaux causés par la révolution agricole sont en partie responsables de l'instabilité des populations de campagnols des champs (*Microtus arvalis*).

La gestion de ce campagnol est un enjeu dans la région Grand Est. C'est pourquoi, le projet MACC 0, vise à acquérir des données sur la dynamique des populations et quantifier l'impact de méthodes alternatives pour réduire l'utilisation de rodenticide en grande culture et en arboriculture.

L'analyse paysagère des sites expérimentaux a permis de caractériser le niveau de risque de pullulation en fonction de la structure et de la composition paysagère, tandis que l'analyse statistique des dispositifs expérimentaux a permis d'évaluer l'effet des méthodes alternatives sur les taux d'infestation des campagnols dans les parcelles.

Les résultats montrent un effet significatif à court terme du travail superficiel du sol ainsi que du piégeage, et un effet de la prédation pour maintenir un taux d'infestation inférieur à celui du témoin.

Cette étude met en avant l'intérêt d'une gestion globale pour répondre aux enjeux d'une agriculture durable.

Mots-clés : *Microtus arvalis, méthodes alternatives, rodenticide, analyse paysagère, gestion globale*

Abstract

The environmental changes caused by the agricultural revolution are partly responsible for the instability of common vole (*Microtus arvalis*) populations.

The management of this vole is a significant challenge in the Grand Est region. This is why the MACC 0 project aims to gather data on population dynamics and quantify the impact of alternative methods to reduce the use of rodenticides in large-scale farming and arboriculture.

The landscape analysis of the experimental sites helped to assess the risk level of outbreaks based on landscape structure and composition, while the statistical analysis of the experimental setups evaluated the effect of alternative methods on vole infestation rates in the fields.

The results show a significant short-term effect of shallow soil tillage and trapping, as well as an effect of predation in maintaining lower infestation rates compared to the control plots.

This study highlights the importance of an integrated management approach to address the challenges of sustainable agriculture.

Keywords: *Microtus arvalis, alternative methods, rodenticide, landscape analysis, integrated management*