

MEMOIRE de fin d'études
pour l'obtention du titre
d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

Etude du lien entre les pissenlits (*Taraxacum officinal*) et le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*) : vers une prédiction du risque par télédétection

*Study of the relationship between dandelions and fossorial water vole (*Arvicola terrestris scherman*) : towards threat prediction by remote sensing*

Buronfosse Marion

Maitre de stage : PINOT Adrien (Enseignant- chercheur, VetAgro Sup)

Tuteur de stage : LEE Alexandre

Spécialisation : Gestion des Ressources et de l'Environnement

Étude réalisée à : VetAgro Sup – Campus agronomique
89 Avenue de l'Europe
63370 Lempdes



USC 1233 : Rongeurs Sauvages, Risques Sanitaires
et Gestion des Populations



Financements :

Sur la période 2020 – 2022, cette action de recherche est financée au travers du projet de recherche – contribution à la lutte contre les campagnols terrestres : « *Etude des préférences alimentaires et des interactions avec la flore prairiale du campagnol terrestre en vue de développer de nouveaux outils et leviers pour conduire à sa gestion agro-écologique en zones herbagées de moyenne montagne dans le Grand Massif* ».

*L'opération « Projet de recherche – Contribution à la lutte contre les campagnols terrestres » est cofinancée par le **Conseil Régional d'Auvergne***

*L'opération « Projet de recherche – Contribution à la lutte contre les campagnols terrestres » est cofinancée par l'**Union européenne** dans le cadre du **FEDER***

Remerciements

Avec la conclusion de ce rapport se tourne une page, non seulement sur 6 mois de stage riche et intense, mais aussi sur 3 ans d'école d'ingénieur. Il me paraît évident que tout ce travail aurait été inenvisageable sans la présence de personnes à qui je dois beaucoup et envers qui j'aimerais exprimer ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord remercier l'équipe de VetAgro Sup pour son accueil et les conditions de travail dans lesquelles j'ai pu évoluer.

Je voudrais particulièrement remercier mon maître de stage Adrien Pinot, qui m'a encadrée pendant toute la durée de ce stage. Je ne pourrais pas dresser la liste exhaustive de tous les rôles que tu as joué au cours de ces 6 mois, jamais je n'aurais réussi sans toi. Tu as été d'une patience sans limite face à mes difficultés à comprendre des modèles statistiques ou pour remodifier avec moi pour la 300^e fois consécutive un bout de code qui ne marchait pas. Tu as toujours pris le temps de m'aider et tu l'as fait avec bonne humeur, de la première journée de stage jusqu'à l'ultime relecture de ce rapport. Et si tes conseils m'aideront dans ma vie en tant que future ingénieure, sois certain que nos multiples conversations me suivront dans ma vie en tant que personne. Par bien des aspects, sache que pour moi, tu as été un maître de stage d'exception.

Je voudrais également remercier Hélène Lisse. Rien dans cette étude n'aurait été possible sans ta présence et ton travail. Tu as également toujours pris le soin d'écouter avec bienveillance mes idées et mes demandes, et pour ça merci beaucoup.

Je voudrais remercier l'équipe enseignante de la spécialité GREEN de Bordeaux Sciences Agro pour nous avoir assuré une année aussi chaleureuse malgré les conditions sanitaires compliquées. Je voudrais adresser une mention spéciale à Alexandre Lee, d'une part pour son encadrement lors de ce stage et son aide dans la mise en place de ce rapport, mais aussi pour tout le temps qu'il nous a consacré au cours de cette année et le soutien dont il a fait preuve. Je pense que je peux parler au nom de la promotion en disant que vous faites partie des professeurs qui marquent une scolarité. Evidemment, cette année n'aurait pas été la même sans mes camarades de GREEN, je n'aurais pu imaginer une promo plus soudée que la nôtre pour cette dernière année d'étudiant.

Enfin je voudrais remercier mes amis et ma famille qui m'ont soutenue et, osons le dire, supportée pendant toute la durée de ce stage. Je pense qu'ils en savent désormais autant que moi sur les campagnols à force de m'avoir entendu radoter. Merci d'avoir été là.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction.....	1
I- La lutte contre les campagnols : un problème caractéristique du système agronomique français	2
A- Un modèle agricole français sensible.....	2
B- Le Massif central : une région qui n'échappe pas aux ravageurs.....	3
C- La lutte contre les campagnols : un paradigme en évolution	5
1) Une tradition de lutte chimique curative.....	5
2) Vers une approche préventive grâce à la compréhension des mécanismes des populations	7
II- Une observation des interactions pissenlits-campagnols par drone via de la télédétection	11
A- Détermination des sites d'études	11
B- Démarche de collecte de données par télédétection	13
1) Acquisition des photographies aériennes	13
2) Repérage des colonies et des pissenlits	15
3) Validation de la procédure de télédétection	18
C- Etude statistique des relation campagnols-pissenlits	21
1) Effets de la présence de colonies hivernantes sur la densité de pissenlits.....	21
2) Influence de la densité de pissenlits sur la colonisation par les campagnols	23
III- Des interactions trophiques campagnols-pissenlits mises en évidence pendant ce stage.....	25
A- Une consommation des pissenlits par les colonies hivernantes.....	25
1) Diminution de la moyenne de pieds de pissenlits autour des colonies hivernantes.....	25
2) Mesure du taux de déplétion des pissenlits en fonction de la distance à la colonie.....	27
B- Une colonisation influencée par la densité de pissenlits	29
1) Effet de la densité de pissenlits sur le taux d'installation des campagnols	29
2) Sélection des zones denses en pissenlits au sein de la parcelle	30
IV- Perspectives et discussion : Les prémices d'un contrôle des populations ?	32
A- Limites et biais de l'étude.....	33
B- Comparaison à d'autres recherches sur les rongeurs	34
C- Des recherches au service du développement agricole.....	35
1) La télédétection : un outil supplémentaire pour la surveillance des populations de campagnols.....	35
2) Une première étape vers la prédiction et un contrôle des pullulations	37
D- Une étude à poursuivre avec une expérimentation de colonisation dirigée.....	38
Conclusion	39
Bibliographie.....	40

Liste des figures :

Figure 1 : A gauche : Photographie d'un campagnol terrestre (<i>Arvicola terrestris scherman</i>) (photographie : Adrien Pinot). A droite : Tumuli provoqués par le forage des galeries traduisant la présence de campagnols (photo drone : Hélène Lisse).....	5
Figure 2 : Schéma des cycles pluriannuels du campagnol terrestre (<i>Arvicola terrestris scherman</i>)	8
Figure 3 : Localisation des sites d'études dans le Puy-de-Dôme (63).....	12
Figure 4 : Représentation schématique d'un quadrat de l'étude.....	13
Figure 5 : Suivi d'une parcelle au cours des 3 prises de vues : a) Photographie de mars b) Photographie de mai c) Photographie de juin.....	14
Figure 6 : Application sur une colonie du package countcolors de R : a) colonie prise en photo par le drone RGB, b) Transformation de l'image en fausse couleur (EXGR, G, B), c) Sélection des pixels d'intérêt, d) Extraction de la colonie	16
Figure 7 : Application du package countcolors sur les pissenlits a) Photographie prise par drone, b) Sélection des pixels d'intérêt, c) Extraction des pissenlits	16
Figure 8 : Schéma de synthèse des deux approches mis en place dans cette expérimentation	21
Figure 9 : Schéma du dénombrement des pissenlits à l'aide de buffers consécutifs	23
Figure 10 : Evolution du nombre de pieds de pissenlits portant au moins une fleur par m ² d'herbe en fonction de la proportion de terre dans le pixel.	26
Figure 11 : Pourcentage de pissenlits par rapport à la moyenne en fonction de l'éloignement à la colonie.	28
Figure 12 : Taux de croissances des parcelles en fonction du nombre de pieds de pissenlits par m ² ...	29
Figure 13 : Evolution de la probabilité pour un pixel d'être colonisé en fonction de l'écart entre la densité de pissenlits de son environnement et celle de la parcelle	31
Figure 14 : Evolution de la probabilité pour un pixel d'être colonisé en fonction de l'écart entre la densité de pissenlits de son environnement et celle de la parcelle	32

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Extrait du tableau issu de l'analyse d'images après l'application d'une grille de 2x2m	17
Tableau 2 : Résultat de la comparaison entre l'analyse des images par le script et par un opérateur (VP : Vrai positif, VN : Vrai négatif, FN : Faux négatif, FP : Faux positif).....	19
Tableau 3 : Récapitulatif des résultats des AIC entre la densité de pied par pixel et les 4 variables explicatives étudiées.....	27
Tableau 4 : Récapitulatif des résultats des AIC entre la densité de pied par pixel, les pratiques agricoles et les 3 autres variables explicatives étudiées.	27
Tableau 5 : Valeur des AIC pour les 2 variables explicatives étudiées dans la colonisation des pixels par les campagnols	30
Tableau 6 : Valeur des AIC pour les 2 variables explicatives étudiées dans la survie des pixels colonisés par les campagnols	31

Introduction

L'évolution de l'agriculture a permis l'émergence de techniques de production toujours plus performantes. Cependant, malgré les grandes avancées scientifiques et technologiques du XXe siècle, l'agriculture française semble plus que jamais fragilisée. En effet, la simplification de la mosaïque paysagère et la concentration des productions similaires dans les mêmes régions agricoles ont renforcé la pression exercée par les ravageurs, engendrant non seulement des conséquences économiques mais pouvant aussi affecter la sécurité alimentaire (Tricault, 2010). Le Massif central, bien que souvent considéré comme un territoire naturel et préservé de la production intensive, n'échappe pas à la pression des ravageurs. L'orientation technico-économique principale de cette région étant l'élevage, les exploitations possèdent en général une grande surface prairiale afin d'assurer leurs ressources en fourrage et en pâturage. Cependant, ces étendues herbagères offrent également un véritable garde-manger pour les campagnols terrestres (*Arvicola terrestris scherman*), un des principaux ravageurs des prairies. Ce petit rongeur, vivant dans des galeries sous-terraines, pose des problèmes majeurs dans les régions de moyennes montagnes comme le Massif central ou la Franche-Comté depuis les années 1970. Alternant les périodes de hautes et de basses densités de population de manière cyclique, il atteint un pic environ tous les 6 ans avec des densités pouvant aller jusqu'à 600 individus adultes/ha à l'automne. Les campagnols peuvent consommer quotidiennement l'équivalent de leur poids en racines des espèces prairiales et remontent également de la terre en creusant leurs galeries (Delattre & Giraudoux, 2009). Leur présence affecte donc les rendements fourragers de manière conséquente lors des périodes de pullulations (Duriez, 2010). Avec l'interdiction de la bromadiolone en 2020, les agriculteurs ont perdu leur principal outil de lutte contre ce ravageur et si d'autres molécules restent encore disponibles, la lutte chimique actuelle semble de plus en plus apparaître comme une impasse environnementale et sociétale. C'est pour trouver des substituts chimiques aux conséquences moindres, voire une alternative agroécologique aux appâts chimiques que VetAgro Sup, institut d'enseignement agronomique et vétérinaire, a rejoint la recherche sur la ressource alimentaire du campagnol afin d'identifier des leviers agronomiques capables de contrôler l'intensité des pullulations. Lors d'une étude en 2018, la découverte du contenu des silos, chambres où les campagnols entreposent des racines pour survivre à l'hiver, a révélé que ces derniers étaient composés majoritairement de pissenlits (*Taraxacum officinale*) (Sobczyk-Moran, 2018). Cette plante semble donc avoir une place prépondérante dans l'alimentation du campagnol et sa présence pourrait faire l'objet d'un critère de sélection pour la colonisation. Dans quelle mesure la dynamique des populations de campagnols terrestres est-elle liée à la ressource en pissenlits ? Quelle importance joue la densité de pissenlits dans la sélection du territoire d'implantation pour les nouvelles colonies ?

Dans un premier temps, nous présenterons en quoi la lutte contre le campagnol est caractéristique de l'évolution de la mentalité agricole française au cours du temps. Puis nous chercherons à mettre en place un protocole de télédétection pour étudier les interactions entre les pissenlits et les campagnols. Les résultats seront ensuite présentés et interprétés. Enfin, dans une dernière partie nous discuterons de la pertinence de nos résultats et proposerons des expériences complémentaires pour continuer l'étude.

I- La lutte contre les campagnols : un problème caractéristique du système agronomique français

A- Un modèle agricole français sensible

Afin d'assurer l'alimentation de la population, l'agriculture a toujours dû faire face aux aléas naturels que ce soient les aléas climatiques comme la grêle et la sécheresse, ou les aléas liés aux êtres vivants. La réussite des cultures était une nécessité majeure pour la survie des populations et leur perte était considérée comme un châtement divin, comme le montre les 10 plaies d'Égypte du livre de l'exode, dont 3 sont en lien direct avec l'agriculture (la grêle, les criquets et la mort des troupeaux). Les ravageurs et les maladies des cultures, fléaux de l'agriculture, ont marqué l'histoire par les grandes famines qu'ils ont provoquées. On peut citer notamment la grande famine d'Irlande de 1845 à 1851 responsable de plus d'un million de morts et provoquée par le mildiou de la pomme de terre (Gillissen, 2015). Malgré l'évolution des pratiques agricoles et l'apparition de produits phytosanitaires, la présence de ravageurs reste un problème d'actualité. En effet, selon la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) il s'agirait d'environ 10% de la production mondiale de denrée alimentaire qui serait perdue par la présence de ravageurs que ce soit au moment de la culture ou du stockage. Le terme ravageur est un terme générique puisqu'on qualifie ainsi les animaux responsables de la destruction d'une partie des cultures, que ce soit par la consommation directe en plein champs (criquets pèlerins, chenilles de la pyrale du maïs, campagnol des champs ...), la destruction lors du stockage des denrées (vers de farine, calandre des greniers, souris domestique...) ou les espèces responsables de transmission de maladie (pucerons, la cicadelle *Scaphoideus tianus*, les cochenilles...). Les ravageurs sont donc multiples et diversifiés et se retrouvent dans la quasi-totalité des taxons du vivant. Un exemple emblématique des dommages potentiels causés par les ravageurs est le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) en Afrique de l'Est, où des essaims de plusieurs milliards de criquets peuvent consommer jusqu'à 80 000 tonnes de nourritures par jours, symbole de l'impuissance de la lutte contre de tel niveau de pullulation (Riba & Silvy, 1989).

En France, le XXe siècle marque un tournant particulier dans la problématique des ravageurs. D'une part, on observe une augmentation des déplacements intercontinentaux liés à la mondialisation provoquant l'apparition régulière de nouvelles espèces invasives sur le territoire (Sache, 2021). D'autre part, les pertes humaines, notamment d'hommes valides, causées par les guerres successives de la première moitié du XXe siècle poussent les politiques publiques à encourager la production à haut rendement : on parle de la révolution verte. L'augmentation des rendements s'appuie sur trois leviers principaux à savoir la génétique des semences, permettant l'émergence de variétés extrêmement productives, la mécanisation et la production de molécules chimiques en tant que phytosanitaires (Pingali, 2012). Au cours de cette période, les rendements ont fortement augmenté pour les céréales principales de la consommation humaine comme le blé avec une augmentation de 208% ou le maïs avec 157% (Thomine, 2019).

Ces avancées technologiques se sont aussi accompagnées d'un besoin de simplification de la mosaïque paysagère, planifiée à l'échelle nationale. Les anciennes parcelles aux formes géométriques variées n'étant pas propice au travail des tracteurs, les arbres isolés et les haies des bocages ont été retirées afin de faciliter le remembrement. On compte environ 50% de linéaires de haies en moins de 1950 à aujourd'hui, ainsi qu'une diminution des espaces semi-naturels comme les bois ou les prairies permanentes (Butet *et al.*, 2004). Le remembrement des parcelles agricoles a permis de créer de grandes surfaces plus efficaces à cultiver en monoculture. Cette tendance qui s'est ensuite poursuivie, indépendamment des plans nationaux, avec l'augmentation de la taille moyenne des exploitations après cette période (Agreste, 2010). De plus, les régions de la France se spécialisent dans une orientation technico-économique plus étroite (grande culture, élevage à l'herbe, élevage intensif, arboriculture, ...) et la mosaïque paysagère se simplifie à l'échelle locale et régionale.

Ces changements entraînent aussi des conséquences sur les ravageurs. L'amélioration de la fertilisation et des rendements a permis d'augmenter la quantité de ressource alimentaire disponible, ce qui a certes été positif pour le bétail et la sécurité alimentaire, mais a aussi offert plus de ressources aux ravageurs des cultures. Les champs et prairies possèdent aujourd'hui une capacité de charge supérieure à celle précédant les années 50, autrement dit l'environnement est désormais capable de supporter et de nourrir un plus grand nombre d'individus, qu'ils soient humains, bétails ou ravageurs. Les champs de plusieurs hectares de monocultures, permettent le développement des ravageurs avec des taux de croissance maximaux et une propagation extrêmement rapide, rendant l'espèce difficile à contenir. De plus, la disparition des haies, couloirs et habitats essentiels pour de nombreuses espèces, ainsi que le manque de rotation, a provoqué une baisse de la biodiversité. Cette perte de diversité des habitats affecte également les prédateurs naturels des ravageurs, nécessitant souvent des habitats plus complexes que leurs proies pour se développer et se reproduire. La simplification de la mosaïque diminue donc leur nombre et leur pouvoir de régulation (Tricault, 2010). Si les produits phytosanitaires ont permis de réagir en luttant chimiquement, ils n'ont réduit que temporairement les pressions subies par les cultures avec l'émergence de résistances obligeant les agriculteurs à traiter de plus en plus souvent et avec des quantités plus importantes. Les multiples atteintes économiques (comme le coût des traitements), sociales (avec l'exposition des individus à des substances pouvant être nocives) et environnementales (diminution de la biodiversité, contamination des eaux...) poussent désormais le système à se réinventer (Thomine, 2019).

B- Le Massif central : une région qui n'échappe pas aux ravageurs

La problématique des ravageurs est plutôt associée dans l'imaginaire collectif à des régions du territoire français spécialisées dans les grandes cultures. En effet, les principales cultures consommatrices de pesticides sont les grandes cultures et la viticulture, respectivement 67,4% et 14,4% de la consommation nationale de pesticides en 2006, bien loin devant la prairie et ses 3,9% (Butault *et al.*, 2011). Avec ses 10 parcs naturels et sa verdure, le Massif central jouit d'une réputation de milieu quasi-sauvage et très peu anthropisé. En réalité, l'homme a depuis très longtemps laissé son empreinte sur ce territoire : on peut citer par exemple, les ruines du temple romain de Mercure au sommet du Puy de Dôme ou encore l'Oppidum gaulois du plateau de Gergovie. Or, depuis cette époque, l'Homme n'a jamais quitté ces massifs, et le paysage, tel

que l'on peut l'observer maintenant, est modelé par l'activité humaine. C'est grâce au déboisement et au maintien de l'ouverture des prairies par l'agriculture que le Massif central possède son aspect actuel. Les terres restent à destination agronomique avec les hautes altitudes destinées aux estives et les terrains plus bas et plus plats pour la fenaison et la pâture. L'impression de naturel tient principalement du fait que, hormis pour la plaine de la Limagne, le système principal est herbagé, confondu à tort avec la végétation naturellement à l'équilibre de la région.

L'agriculture a une place prépondérante dans le Massif central, pourtant dans cette région aussi, la révolution agricole a entraîné une spécialisation des exploitations à l'échelle des petites régions agricoles. Les terrains fertiles de plaines comme la Limagne sont dédiés à la production de céréales et les zones de montagnes sont, quant à elles, utilisées pour l'élevage. Le Massif central possédant une grande partie de son territoire en altitude, les départements de l'Auvergne ont tous une orientation technico-économique principalement dirigée vers l'élevage avec entre 95% (Cantal) et 72% (Puy de Dôme) d'exploitations pratiquant l'élevage, principalement bovin (DRAAF, 2016). Cette orientation s'accompagne d'un besoin important en surface herbagère pour le pâturage et le fourrage. En 2016, le Puy de Dôme possédait 393 000 hectares de Surface Agricole Utile (SAU) dont 59% de surface toujours en herbe (STH) (DRAAF, 2018).

Comme les cultures céréalières ou fruitières, la prairie contient aussi son lot de ravageurs, responsables de la baisse de rendements ou de la dégradation de la qualité du foin. On peut citer par exemple la taupe ou les larves d'Hannetons. Cependant, le ravageur le plus connu des prairies de moyennes montagnes est le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*). Responsable de dégâts considérables et défrayant la chronique tous les ans quelque part dans le Massif central, le Jura, les Alpes ou les Pyrénées, ce petit mammifère, pesant entre 60 et 120g, apparaît de manière cyclique localement avec une année de pullulation environ tous les 6 ans (Saucy, 1988). Construisant des galeries sous-terraines à la manière des taupes, le campagnol possède un régime alimentaire composé de racines et parties aériennes des végétaux de la prairie. La consommation des plantes par le campagnol provoque une réduction considérable des rendements. Par ailleurs, la terre remontée à la surface sous forme de tumuli lors du forage des galeries entraîne un salissement de l'herbe réduisant l'appétence du bétail et endommageant la qualité du fourrage en nuisant à sa conservation. On estime les coûts économiques engendrés pour les exploitations entre 8 000€ et 25 000€ pour une année de pullulation en fonction de la surface de territoire atteinte (Duriez, 2010).



Figure 1 : A gauche : Photographie d'un campagnol terrestre (Arvicola terrestris scherman) (photographie : Adrien Pinot). A droite : Tumuli provoqués par le forage des galeries traduisant la présence de campagnols (photo drone : Hélène Lisse).

Présent de manière historique sur le territoire, le campagnol terrestre ne commence à faire parler de lui pour ses dommages agricoles qu'à partir des années 1970. C'est à partir de cette période que les agriculteurs semblent observer des populations de campagnols plus importantes avec des dégâts économiques conséquents. Dans le Massif central, les départements concernés par les pullulations de campagnols sont depuis plusieurs années : le Cantal, le Puy de Dôme, l'Allier, la Haute-Loire, la Creuse, la Corrèze et la Haute-Vienne et depuis plus récemment la Lozère et l'Aveyron. Désormais, l'ensemble des départements du Massif central sont placés sous surveillance pour leur sensibilité aux campagnols (Truchetet *et al.*, 2014). En raison de son impact agronomique et de sa capacité à véhiculer des maladies comme la leptospirose ou l'échinococcose alvéolaire, cette espèce est classée dans la catégorie nuisible par le code rural et de la pêche maritime depuis l'année 2000 (JORF n°201 du 31 août 2000) et peut être soumis à obligation de lutte.

C- La lutte contre les campagnols : un paradigme en évolution

1) Une tradition de lutte chimique curative

A l'instar de nombreux nuisibles, la lutte contre le campagnol, ne fut guère associée à une recherche de compréhension du fonctionnement des populations. L'animal ou la pullulation est alors vu comme un problème à résoudre le plus rapidement possible, par le biais d'une approche curative. En ce sens, la lutte contre les campagnols était organisée comme une réponse à un symptôme : l'agriculteur observait la présence de campagnol, ce qui nuisait à la qualité de son fourrage, il mettait donc en place des méthodes de destruction à l'aide de molécules chimiques ou de pièges, pour réduire au maximum les conséquences de la présence de l'animal.

Suites aux travaux réalisés dans les années 1990 révélant une cohérence territoriale des pullulations (c'est-à-dire une synchronisation des pullulations sur des surfaces de plusieurs dizaines de km²) en Franche-Comté et en Suisse (Giraudoux & Delattre, 1997 et Saucy, 1998) puis dans le Massif central (Note & Poix, 2006), des campagnes de suivis ont été mises en place. Un réseau d'acteurs du territoire (agriculteurs, fédérations de chasses, Parcs Naturels Régionaux, associations naturalistes, organismes à vocation sanitaire, structures d'aide au développement agricole) a été construit pour recueillir les informations sur les niveaux d'infestation à large échelle. Cette surveillance est supervisée par la FREDON (Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles). Cet organisme, reconnu par les services de l'état et en convention avec la DRAAF (Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt) a pour mission de déterminer à partir des données de terrain, et le plus rapidement possible, les foyers de départ de pullulation des campagnols afin d'inciter à la lutte tant que la densité de population est encore basse. La localisation des premiers foyers de pullulation doit donc être réalisée au plus tôt, la croissance des populations pouvant aller assez vite et les traitements n'étant envisageable qu'à basse densité étant donné la toxicité environnementale des molécules (lutte chimique) ou le temps nécessaire au piégeage (lutte mécanique). De plus la surveillance des niveaux d'infestations de campagnols permet d'organiser la lutte à l'échelle de la commune : la DRAAF peut, par le biais d'un arrêté préfectoral, rendre obligatoire le traitement (chimique ou par piégeage) sur l'ensemble des exploitations d'une commune.

La deuxième étape est la lutte en elle-même, avec l'utilisation de molécules chimiques ou de pièges. Apparue dans les années 1980, la bromadiolone était depuis cette époque et jusqu'à récemment, la molécule chimique la plus utilisée dans la gestion des rongeurs. Cette substance possède un principe actif anti-coagulant (aussi appelé anti-vitamine K) entraînant la mort de l'animal en quelques jours par hémorragies ou insuffisance cardiaque. La bromadiolone est très efficace sur les rongeurs, toutefois cette molécule est non spécifique et peut donc entraîner des symptômes similaires sur les mammifères et les oiseaux. Des traitements effectués de manière peu rigoureuse peuvent entraîner des intoxications massives d'espèces non-cibles. On distingue deux sortes d'intoxication de la faune sauvage avec d'une part l'exposition primaire, c'est-à-dire l'ingestion directe de l'appât, et d'autre part l'exposition secondaire avec une consommation des rongeurs déjà morts par intoxication. En Auvergne, c'est 225 cas d'intoxication avérée recensés entre 1998 et 2012, mais le nombre réel étant probablement supérieur, car il est compliqué de retrouver l'ensemble des cadavres dans la nature. On retrouve dans les espèces atteintes les rapaces (37% des cas) dont les Milans royaux et les Buses variables, ces deux espèces possédant un statut de protection national, ainsi que les renards (22% des cas). Au-delà de la mort de l'individu, la bromadiolone pourrait aussi avoir des effets sur la capacité de reproduction des animaux, ce qui est particulièrement problématique dans le cas d'espèces encadrées par des plans de conservation comme le Milan royal. (Coourdassier *et al.*, 2014).

Compte-tenu de son impact sur la biodiversité, l'ANSES a pris la décision de retirer les produits phytosanitaires à base de bromadiolone du marché depuis février 2020, et l'utilisation de ce produit est interdite aux agriculteurs depuis décembre 2020 (modification de la mise sur marché n°9800526). Bien que des produits phytosanitaires restent disponibles comme rodenticide, comme c'est le cas du Phosphore de zinc, le retrait de l'usage agricole de la

bromadiolone traduit une impasse dans l'application systématique de la lutte chimique. La surveillance et le traitement à basse densité restent encore des outils indispensables à la gestion des campagnols pour minimiser les pollutions environnementales, toutefois, les dernières décennies ont fait ressortir les préoccupations autour des conséquences environnementales de la gestion actuelles des problèmes (principalement l'utilisation de la chimie curative).

2) Vers une approche préventive grâce à la compréhension des mécanismes des populations

Une alternative à la lutte curative décrite précédemment est la mise en place d'une approche préventive, c'est-à-dire d'être capable d'anticiper la menace des ravageurs, pour pouvoir soit l'éviter, soit diminuer son intensité. Elle repose toutefois sur notre compréhension des mécanismes biologiques des ravageurs afin de déterminer les critères essentiels à leur développement et de prévoir au mieux les dynamiques des populations.

i. L'écologie du campagnol terrestre

C'est à partir des années 1970 avec Airoidi (Airoidi, 1975), que la science s'est penchée sur le comportement des campagnols terrestres. D'abord avec une démarche très naturaliste, l'étude de ces mammifères avait pour vocation de déterminer les critères phénotypiques et le fonctionnement des populations. Ces premières études ont permis de poser la base de nos connaissances sur l'écologie de cette espèce, la zone d'étude privilégiée étant initialement le Jura et la Suisse.

Le campagnol terrestre est un rongeur de couleur brun foncé ou gris clair, aux petites oreilles et avec une taille entre 12 et 22cm pour un poids compris entre 60 et 120g. Capable de vivre entre 6 mois et 1 an, il devient mature sexuellement dès 2 mois s'il naît au printemps, et fait en moyenne 3 portées par an de 4 à 5 petits (Delattre & Giraudoux, 2009). La capacité de croissance des populations est, dans de bonnes conditions, très forte ce qui implique de repérer très tôt les premiers campagnols d'un champ avant d'être submergé par le nombre d'individus. Les campagnols vivent dans des galeries souterraines formant un réseau d'environ 50m de long et enfoui à une profondeur entre 7 et 20cm. Leur structure s'organise autour de 1 ou 2 nids (Airoidi, 1975).

Les populations évoluent de manière cyclique alternant les périodes de basse densité avec quelques individus par hectare et les périodes dites de pullulation où le nombre peut atteindre les 500 à 600 individus adultes/ha à l'automne (Delattre & Giraudoux, 2009). Le cycle peut se décomposer en 4 étapes. On observe d'abord une phase de croissance caractérisée par une augmentation du nombre d'individus, jusqu'à une phase de pic, qui peut durer plusieurs années d'affilées, où la densité de population est la plus élevée de tout le cycle. La population diminue ensuite de manière drastique avant de se stabiliser à basse densité pendant quelques années. Une nouvelle croissance démographique marquera le début d'un nouveau cycle. La fréquence de répétitions de ce cycle varie entre 5 et 8 ans (Saucy, 1988). Au sein de ce cycle pluriannuel, on observe par ailleurs un cycle intra-annuel avec des fortes croissances au printemps et une diminution de la population causée par les conditions rudes de la période hivernale.

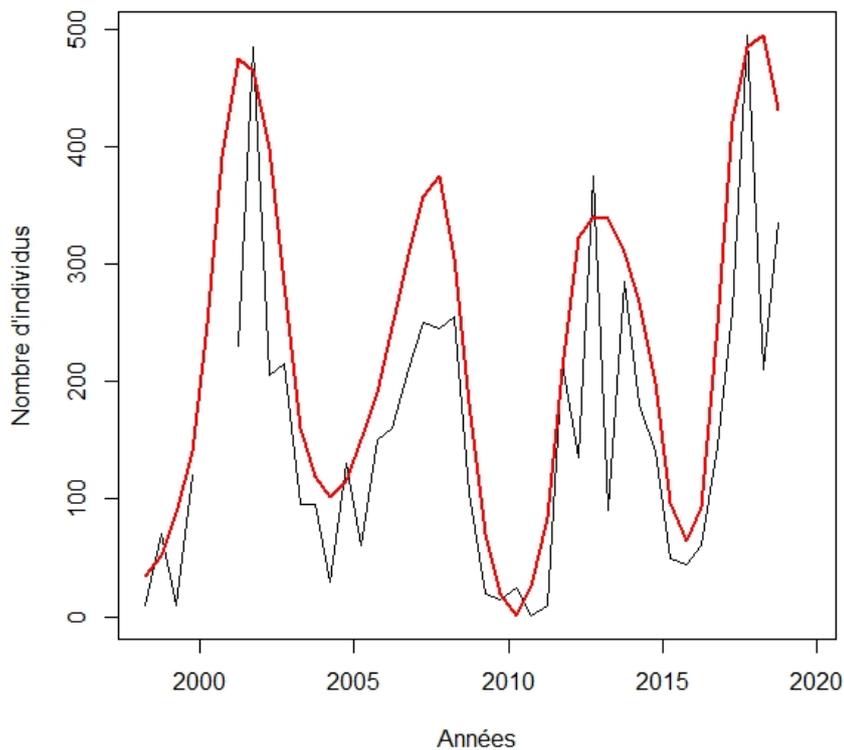


Figure 2 : Schéma des cycles pluriannuels du campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*). En noir : les relevés bruts du nombre d'individus capturés lors de 2 séances de piégeage par an, réalisé par Michel Horner (Office cantonal de Neuchâtel). En rouge : la courbe lissée des cycles.

ii. Les causes du déclin au centre des interrogations

Le déclin s'observe par une absence de recrutement, c'est-à-dire un manque d'installation de jeunes individus, au printemps sur les parcelles, à l'époque où le nombre d'individus devrait au contraire augmenter significativement. Les mécanismes provoquant le déclin des populations ne sont pas encore parfaitement connus et il existe plusieurs hypothèses.

La première impliquerait que le déclin soit provoqué par des pathogènes. La propagation d'agents infectieux étant plus facile au sein des populations à haute densité, l'apparition d'un pathogène faisant diminuer drastiquement la population est une possibilité envisagée. Néanmoins, la récente étude de Villette (2018) n'a pas réussi à mettre en évidence une corrélation claire entre le déclin et la charge en pathogène.

Bien que ce travail soulève des pistes à étudier sur cette hypothèse notamment sur la baisse de l'état corporel et donc probablement de la sensibilité à l'infection des campagnols terrestres au cours du déclin, les pathogènes ne semblent pas être la source de déclin. Les deux autres pistes envisagées au cours du temps sont donc la prédation et la ressource alimentaire. Ces hypothèses reposent sur deux principes phare de l'écologie. D'une part le contrôle dit top-down implique que les populations de campagnols diminuent lorsque la pression exercée par les prédateurs augmente. D'autre part le contrôle bottom-up, qui définit la quantité de ressource

alimentaire comme le facteur limitant la croissance de la population : une diminution de la nourriture provoquant un abaissement de la densité de population (Leroux & Loreau, 2015).

Les écosystèmes répondent à des mécanismes souvent complexes intégrant les deux types de contrôles. Cependant, bien qu'ayant probablement un impact dans la démographie du campagnol, la prédation a progressivement été écartée des probables sources du déclin. Selon l'hypothèse de la prédation, le nombre de campagnols augmenterait, assurant une plus grande ressource alimentaire pour les prédateurs qui se multiplieraient à leur tour. La trop grande densité de prédateurs provoquerait ensuite un trop grand prélèvement, causant l'effondrement de la population de campagnols. Les prédateurs, ne trouvant plus de nourriture, diminueraient en nombre permettant aux campagnols de se remultiplier et de recommencer le cycle. On parle dans ce cas-là de modèle Lodka-Volterra (Anisu, 2014). Toutefois cette dynamique des populations repose principalement sur l'existence d'une chaîne trophique simple avec soit des prédateurs spécialisés, soit une diversité de proies faibles pour que la population de prédateurs s'effondre après la disparition des campagnols. Cette hypothèse n'est donc pas adaptée aux conditions françaises où les prédateurs sont principalement généralistes et les proies potentielles nombreuses. Les prédateurs spécialistes des campagnols appartiennent à la famille des mustélidés comme la belette d'Europe (*Mustela nivalis*) mais son implication dans les déclin a déjà été rejeté dans le cas des campagnols agrestes car le nombre d'individus prélevés n'était pas suffisant pour produire un déclin des populations de campagnols (Graham & Lambin, 2002). La dernière hypothèse restante est donc celle d'un contrôle bottom-up liée à de la disponibilité en ressource alimentaire, ce qui est cohérent avec l'observation que les records de densité s'observent uniquement au sein des parcelles productives.

Les premières études alimentaires du campagnol terrestre ont été réalisées en 1988 par Kopp. C'est aussi avec son travail que l'étude des campagnols s'éloigne de l'approche purement naturaliste pour se rapprocher des enjeux agronomiques. Lors de son expérience, Kopp a proposé 12 types de plantes de prairie à des campagnols en terrarium, afin d'étudier l'appétence de ce dernier pour les fourrages. Il en ressort une nette préférence de l'animal pour la luzerne (*Medicago sativa*), le pissenlit (*Taraxacum officinal*) et le trèfle (*Trifolium pratense*) (Kopp, 1998). La diminution de la présence de ces espèces au sein des prairies lorsque de trop hautes densités de populations sont atteintes, pourrait être la raison du déclin.

iii. Une recherche sur des méthodes agroécologiques de lutte

L'objectif actuel de la recherche sur les campagnols terrestres est de déterminer des actions pouvant être mises en place par les agriculteurs ou les politiques publiques et permettant d'éviter au maximum les pullulations sur le territoire. Une étude (Giraudoux *et al.*, 1997) a déjà pu mettre en avant 2 facteurs :

- l'importance des haies ou des forêts comme barrières dans la dispersion des campagnols

- l'augmentation de la surface toujours en herbe comme facteur provoquant un accroissement de la probabilité pour une parcelle de subir une pullulation. Les grandes parcelles toujours en herbe et proches les unes des autres sont donc les plus sensibles à ces ravageurs.

De plus, les exploitations agricoles pratiquant les rotations semblent moins sensibles à la prolifération des campagnols et le travail du sol a des effets positifs sur le long terme en rendant les parcelles moins hospitalières (Morhilat, 2005).

Toutefois, la compréhension des mécanismes du déclin serait une avancée considérable pour identifier le pilier qui soutient l'augmentation démographique du campagnol terrestre et donc d'empêcher la croissance exponentielle de la population. Des actions rendant le terrain moins propice au développement des populations, tout en maintenant une activité agricole durable font partie intégrante du courant agroécologique vers lequel tend l'agriculture. L'agroécologie est définie comme « l'étude des interactions entre les plantes, les animaux, les humains et l'environnement dans un système agricole » (Dalgaard & Hutchings, 2003). La lutte agroécologique consiste donc à modifier ces interactions afin de déséquilibrer le système et diminuer la pression de ravageurs en rendant l'environnement moins propice à leur développement.

C'est dans cette intention que Vetagro-sup, institut d'enseignement supérieur en sciences agronomiques et vétérinaires, a proposé des actions de recherche sur la biologie du campagnol terrestre. Cet organisme, proche d'un territoire de pullulation de campagnol, possède la double compétence agronomique et vétérinaire, lui permettant d'aborder le sujet de la pullulation d'un point de vue écologique, anatomique et sanitaire tout en ayant conscience des enjeux agricoles que cette étude représente. Les expérimentations sont réalisées au sein d'une l'unité de recherche (USC 1233), composée de vétérinaires et de biologistes. Les financements sont issus de deux programmes FEDER (Fond Européen de Développement Régional) consécutifs. Le premier programme de 2017 à 2019 était basé sur l'exploration des liens entre les campagnols et des facteurs extrinsèques (comme les pathogènes ou la végétation) et intrinsèques de régulation (reproduction, état corporel, paramètres populationnels) pouvant faire l'objet d'un éventuel contrôle de la démographie. Le programme a ensuite été renouvelé de 2021 à 2023 sous l'appellation « Etude des préférences alimentaires et des interactions avec la flore prairiale du campagnol terrestre, en vue de développer des nouveaux outils et leviers pour conduire à sa gestion agro-écologique » après la découverte de lien entre les taux de croissance et certains paramètres de la végétation. Mon stage se déroule dans l'axe 2 de ce programme, sur l'identification de la flore prairiale déterminant le processus de colonisation naturelle.

iv. Les pissenlits : une source de pullulation ?

Bien que déjà brièvement mentionné par Airoidi (Airoidi, 1975), la découverte de silos de racines, lors du programme FEDER de l'unité de recherche de 2017 à 2019, a ramené au premier plan la question de la ressource alimentaire comme levier d'action. Un silo est une portion du terrier dont la galerie s'élargit afin d'entreposer les racines entre des couches de terre consécutives et les conserver pour la saison froide (Airoidi, 1975). Lors du précédent programme FEDER, il a été montré que les silos ont des tailles pouvant dépasser 1 kg de racines.

Leur contenu est majoritairement composé de pissenlits qui représentent 88% des racines stockées, et plus anecdotiquement des bulbes, des trèfles et des renoncules. Les pissenlits ne représentaient pourtant que 9,4% des espèces prairiales. Cette différence de proportion traduit une sélection de cette plante par les campagnols (Sobczyk-Moran, 2018).

Si le pissenlit est une source privilégiée de nourriture pour les campagnols, ils semblent aussi avoir un effet sur leur taux de croissance, à l'échelle du paysage. En effet, dans le même programme FEDER, l'unité de recherche démontre que le taux de croissance des populations de campagnols augmente dans les parcelles où la proportion de pissenlits est plus importante.

Cette augmentation démographique peut se justifier de plusieurs façons :

- Soit les colonies survivent mieux dans des environnements riches en pissenlits, ce qui augmente leur succès reproducteur et permet un développement plus rapide de la population
- Soit les campagnols sélectionnent le lieu d'implantation de leurs nouvelles colonies dans des endroits riches en pissenlits.

Cette étude a pour objectif de tester cette deuxième hypothèse, en étudiant à l'échelle intra-parcellaire, les emplacements des nouvelles colonies en fonction de la densité de pissenlits et de répondre à 2 questions :

- Dans quelle mesure la dynamique des populations de campagnols terrestres est-elle liée à la ressource en pissenlits ?

- Quelle importance joue la densité de pissenlits dans la sélection du territoire d'implantation pour les nouvelles colonies ?

Deux hypothèses sont testées au cours de ce travail :

- 1) Les anciennes colonies, présentes depuis la saison dernière, ont consommé les pissenlits à proximité de leur terrier et se retrouvent donc dans des zones plus faibles en pissenlits que la moyenne parcellaire.
- 2) Les jeunes, nés du printemps et devant s'installer à leur tour, vont sélectionner des zones plus denses en pissenlits par rapport à la moyenne parcellaire.

II- Une observation des interactions pissenlits-campagnols par drone via de la télédétection

Ainsi, les résultats précédents ont révélé l'existence de liens entre les campagnols et les pissenlits. Dans le but d'approfondir notre compréhension de leur nature, nous avons utilisé un drone pour collecter de la donnée à une échelle bien plus vaste que celle utilisée précédemment.

A- Détermination des sites d'études

La zone d'étude est entièrement située dans le Puy de Dôme (63) et plus précisément à l'Ouest de la chaîne des Puys. Elle a été sélectionnée pour sa réputation à être sujette aux pullulations de campagnols terrestres, elle est notamment proche du Cézallier, lieu réputé pour subir régulièrement des niveaux de populations très élevées de campagnols terrestres. Les sites ont donc été choisis en fonction d'un compromis entre la forte présence d'individus et la facilité d'accès depuis VetAgro Sup.

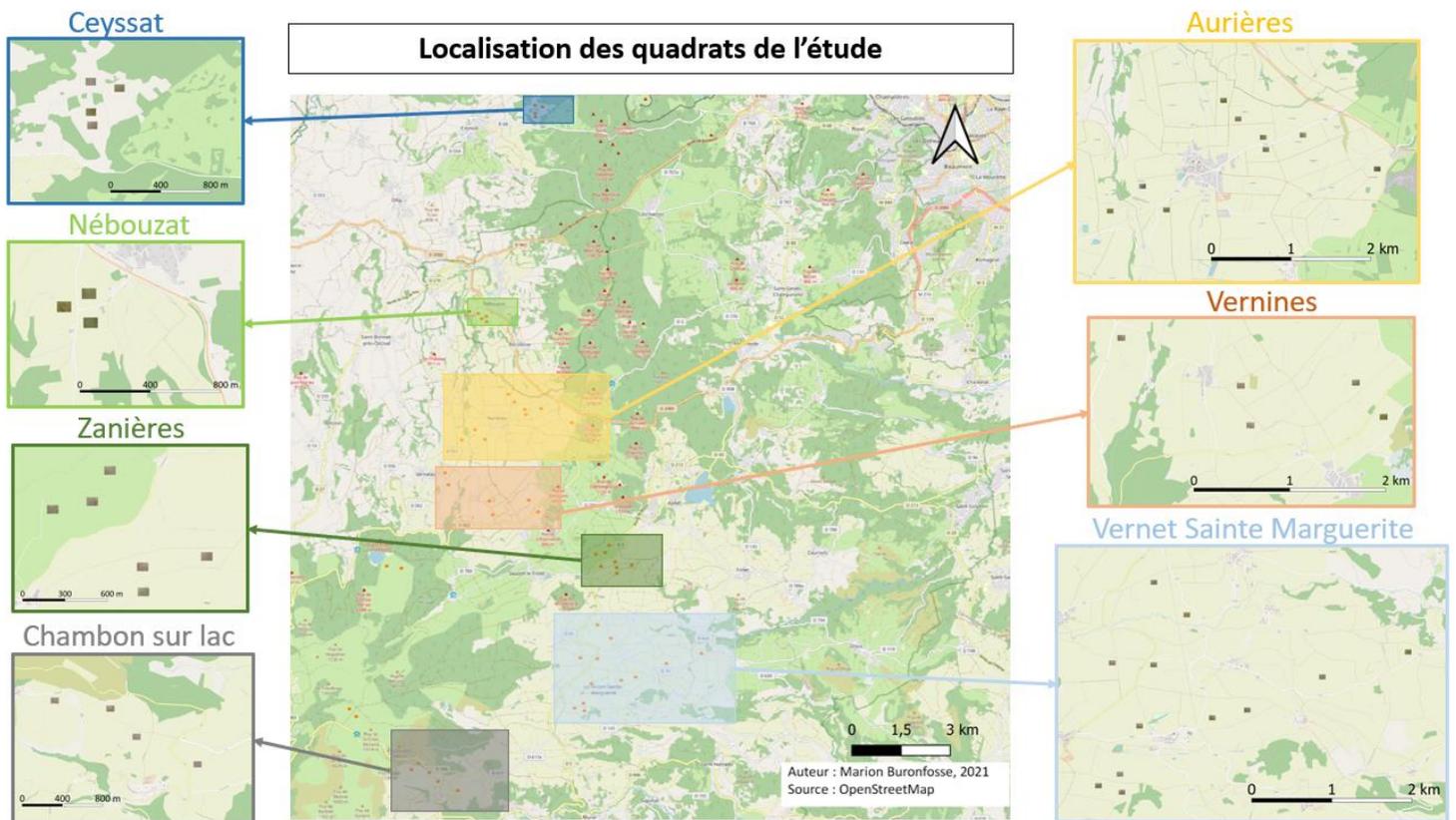


Figure 3 : Localisation des sites d'études dans le Puy-de-Dôme (63). Les barres d'échelles des miniatures à gauche représentent 800m et à droite 2 km. Les rectangles marrons représentent chaque quadrat de 5000m² qui a été suivi. Ils ont été tirés au sein de parcelle choisies avec la même orientation nord-sud.

Les quadrats étudiés ont été déterminés lors d'un repérage en automne, pour s'assurer d'une part de la présence de campagnols, d'autre part que la densité de population ne soit pas trop importante afin de laisser de la place aux nouvelles colonies pour s'installer. Les parcelles ont été choisies chez 20 agriculteurs différents, indépendamment de leurs pratiques agricoles. Les échanges avec les agriculteurs lors des entretiens en automne ont permis d'estimer que les populations de campagnols étaient dans la période du cycle correspondant à une croissance démographique, bien que seule l'installation de nouvelles colonies au printemps nous permette de l'affirmer avec certitude. Initialement au nombre de 52, le nombre de quadrats conservés pour l'étude est finalement de 40. Les causes de suppressions de quadrats peuvent être dû soit à un manque de temps, les fenêtres météorologiques étant particulièrement courtes en cette année 2021, soit à des conditions agronomiques pouvant altérer la visibilité des tumuli de

campagnols (présence de refus de pâturage en trop grande quantité pouvant masquer la terre sous l'herbe, pratiques agricoles endommageant trop la prairie ou enfin présence de bétail sur la parcelle). Les quadrats faisant environ $\frac{1}{2}$ hectare, c'est presque 20 ha de prairie qui sont étudiés sur le département. Pour une analyse de démographie de micromammifères, cette surface est conséquente, la plupart des études se focalisant sur quelques colonies. Cette surface nous permet cependant, d'avoir une certaine représentativité des lieux et des pratiques agricoles.

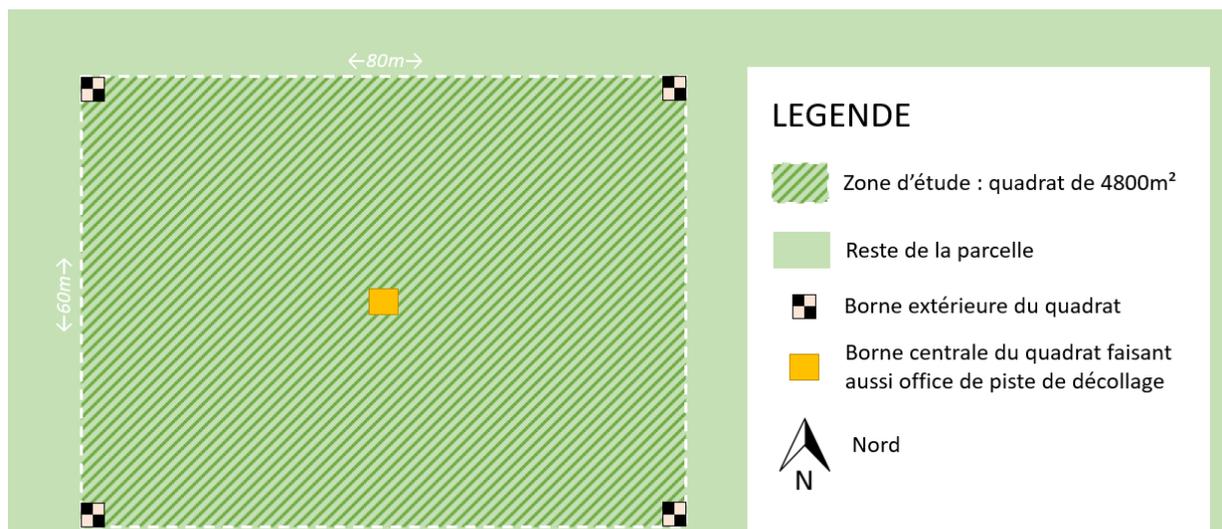
B- Démarche de collecte de données par télédétection

1) Acquisition des photographies aériennes

La surface de surveillance étant importante et la localisation des colonies devant être relevée avec précision, l'étude a nécessité l'acquisition d'un drone. L'instrument choisi est le Mavic air 2 de la marque DJI. Le critère de sélection le plus important pour le drone était sa précision puisqu'il devait être capable de détecter non seulement des tumuli, assimilable à des disques d'une dizaine de centimètres de diamètre, mais surtout, il devait pouvoir déceler des fleurs de pissenlits possédant un diamètre de quelques centimètres. Le Mavic air 2 était donc un bon compromis entre la qualité d'images et le prix (environ 800€). Les images obtenues ont été analysées par télédétection, l'étude repose donc sur la possibilité de pouvoir étudier les dynamiques des populations de campagnols terrestres depuis le ciel en observant l'apparition des tumuli des nouvelles colonies.

Les photographies sont prises à 80 mètres de haut à la verticale et au centre du quadrat. Elles sont au format jpeg et comportent donc pour chaque endroit de la photographie, une information en 3 bandes visibles (RGB), R : le taux de rouge, G : le taux de vert et B : le taux de bleu. La résolution souhaitée était de 1 cm² par pixel afin de s'assurer de pouvoir distinguer toutes les fleurs de pissenlits ouvertes. Le drone possédant 48MP, les quadrats font donc 80x60m de dimension. Tous les quadrats sont orientés selon l'axe nord-sud et éloignés des bordures de parcelles. Les quadrats ont été délimités par 5 bornes : une dans chacun des coins du rectangles et une au centre. Les bornes sont marquées par des feuilles de papiers aluminium enterrées peu profondément et dont le point GPS a été relevé. Elles sont retrouvées pour chacune des photos à l'aide des coordonnées GPS et d'un détecteur de métaux. Des balises noires et blanches sont ensuite posées dessus le temps de prendre la photo.

A chaque observation d'un quadrat, au moins 3 photos ont été prises ; deux à 80m de hauteur, ainsi qu'une à 10 mètres pour pouvoir déterminer le stade floral moyen de la parcelle.



Chaque quadrat est photographiés trois fois au cours du temps. La première prise de vue a été réalisée au cours des mois de mars et avril, après la disparition des dernières plaques de neige mais avant la repousse trop importante de l'herbe. Elle a pour intérêt de déterminer la localisation des colonies qu'on qualifiera par la suite d'hivernantes, c'est-à-dire des colonies créées par des individus nés en automne dernier, qui ont passé l'hiver dans leur terrier et qui serviront de reproducteurs pour la nouvelle génération au printemps. La deuxième prise de vue a été réalisée en mai, lorsque les pissenlits sont à leur pic de floraison, et que la quasi-totalité des pieds de pissenlits possèdent au moins une fleur ouverte. Enfin la dernière photographie est réalisée en juin et juillet après la fenaison (particulièrement tardive cette année), quand l'herbe est rase. Elle permet de déceler les traces d'activités des nouvelles colonies grâce à l'apparition de tumuli. La principale contrainte pour les photographies est liée à la météo : il faut un temps dégagé et avec peu ou pas de vents pour avoir l'autorisation de faire voler le drone. La température est également un facteur important à prendre en compte lors de la prise de vue de mai pour que les pissenlits soient ouverts et donc visibles (nous avons observé que les pissenlits ne s'ouvraient pas en-dessous de 12°C). Les photographies sont ensuite géoréférencées et aplanies à l'aide de la transformation Thin Plate Spine du logiciel QGIS. Cette étape peut prendre une dizaine de minutes par quadrat pour s'assurer de la qualité de l'image, de l'import, du repérage et marquage des balises pour le géoréférencement, du temps de calculs et du découpage de la photographie.



Figure 5 : Suivi d'une parcelle au cours des 3 prises de vues : a) Photographie de mars, b) Photographie de mai, c) Photographie de juin

2) Repérage des colonies et des pissenlits

Depuis le ciel, la présence de campagnols n'est traduite que par la remontée de terre dû à leur activité de forage de galerie. On assimile donc la densité de campagnols à la densité de terre présente en surface. L'étude possédant 20 ha photographiés et une colonie mesurant environ 50 m², ce sont des centaines de colonies potentielles et donc des milliers de tumuli à compter et le nombre de pissenlits est encore plus important. L'automatisation était donc indispensable pour la télédétection.

i. Détermination automatique des colonies

Les images géoréférencées servant au repérage des colonies ont été transformées pour accroître les contrastes entre les différentes couleurs. Pour ce faire, c'est la bande R qui a été modifiée au moyen de l'indice nommée ExGR (aussi appelé ExG-ExR) et initialement conçu pour faire ressortir la végétation (Meyer & Neto, 2008). L'objectif de cet indice est de discriminer fortement la végétation du reste, isolant donc les zones de terre, ce qui permet de n'identifier que les colonies.

Dans chaque image, nous avons donc remplacé la bande spectrale rouge par l'indice EXGR obtenu par l'équation :

$$EXGR = 3 * \varphi_{green} - 2,4 * \varphi_{red} - \varphi_{blue}$$

Où φ_{green} est la bande spectrale verte, φ_{red} est la bande spectrale rouge et φ_{blue} est la bande spectrale bleu.

Les bandes bleues et vertes ont, quant à elle, été laissées brutes. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) aurait été une bonne alternative car c'est un indice reconnu pour discriminer la végétation, cependant il nécessite une bande spectrale en proche infra-rouge, bande dont n'est pas équipé le drone.

Une fois l'image au format jpg transformée en bandes EXGR, G et B, la photographie est traitée sur le logiciel R grâce au package countcolors qui permet de sélectionner les pixels d'intérêts en fonction de leur gamme de couleur, pour ensuite connaître la proportion de terre sur la parcelle. Le fonctionnement de la fonction est décrit en Annexe i.

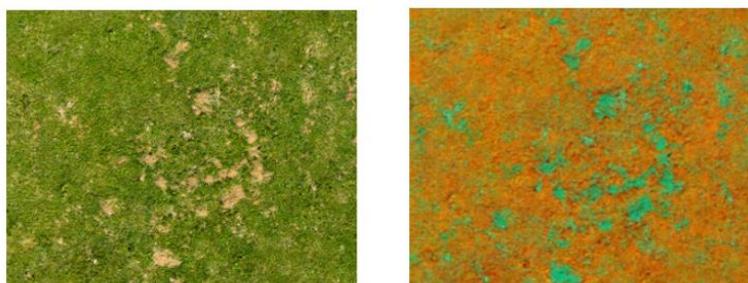


Figure 6 : Application sur une colonie du package countcolors de R : a) colonie prise en photo par le drone RGB, b) Transformation de l'image en fausse couleur (EXGR, G, B), c) Sélection des pixels d'intérêt, d) Extraction de la colonie

ii. Détermination automatique des pissenlits

Pour les pissenlits, la conversion en fausse couleur n'est pas nécessaire car le jaune est une couleur facile à isoler du vert de la prairie. On associe donc la densité de pissenlits à un taux de jaune dans la parcelle. On réutilise le package countcolors décrit précédemment. Le nombre de pixel jaune est ensuite transformée en nombre de fleur en divisant par 7 (environ 7 cm² pour une fleur de pissenlits). Dans un troisième temps, le nombre de fleur est converti en nombre de pied, plus représentatifs car les campagnols consomment principalement les racines des pissenlits. Pour ce faire il faut déterminer le nombre moyen de fleur par pied (calculé à la main sur la portion du quadrat comprise sur la photographie prise à 10m), car ce nombre dépend du stade physiologique de floraison (qui peut aller d'un stade 1 fleurs /pied au début de floraison à une stade 8 fleurs / pieds au pic de floraison sur une parcelle riche) et va donc varier en fonction de l'exposition ou l'altitude de la parcelle.



Figure 7 : Application du package countcolors sur les pissenlits a) Photographie prise par drone, b) Sélection des pixels d'intérêt, c) Extraction des pissenlits

En sortie du traitement par le package countcolors, nous avons des images binaires, appelées raster (chaque pixel étant soit marron/non marron ou jaune/ non jaune) et dont la résolution de pixel est de 1cm de côté. Cette résolution est importante pour détecter les objets recherchés (que ce soient les fleurs de pissenlits ou les taupinières) mais pas cohérente d'un point de vue de la biologie des campagnols. Pour pouvoir traiter cette information de manière statistique, il nous faut donc changer la résolution de l'observation. Une suite d'opérations automatisées est alors réalisée afin de transformer les rasters :

Etape 1 : Changement de la résolution du raster

La résolution du raster est diminuée, chaque pixel faisant désormais 2m de côté. La taille de la résolution a été choisie très inférieure au domaine vital des campagnols afin d'augmenter les probabilités qu'une colonie recouvre plusieurs pixels et donc améliorer leur détection. Pour déterminer le domaine vital des campagnols nous avons calculé le nombre d'adultes mâles par hectare dans le cas de parcelle à haute densité à partir d'une base de données de 54 parcelles suivies sur 3 ans (2017 à 2019). Les foyers dans les colonies pouvant avoir plusieurs femelles, mais qu'un seul mâle, le nombre d'adultes mâles est donc un bon indicateur du nombre de colonies. A haute densité nous considérons que toutes les colonies se touchent et donc que tout l'espace disponible est occupé, ce qui nous permet d'estimer leur domaine vital. Nous avons trouvé une moyenne de 150 adultes mâles par hectare donc un domaine vital de 65m². L'ordre de grandeur trouvé correspond à la bibliographie, qui estime la surface médiane d'une colonie à 55 m² (Airoldi, 1975). Des pixels de 4m² pour la grille permettent un compromis entre des pixels trop large pour la taille des colonies et des tableaux de données trop importants après l'analyse de chaque pixel. Pour chacun des quadrats, le script émet un tableau contenant : le numéro du quadrat, le numéro du pixel de la grille, le pourcentage de jaune en mai sur l'ensemble de la parcelle, de terre en mars et en juin sur l'ensemble de la parcelle, le stade physiologique moyen des pissenlits sur la parcelle (c'est-à-dire le nombre moyen de fleurs par pied) et enfin le pourcentage de jaune en mai et de terre en mars et en juin de chaque pixel (le script détaillé est accessible en Annexe ii).

Tableau 1 : Extrait du tableau issu de l'analyse d'images après l'application d'une grille de 2x2m

N°Quadrat	N°Pixel	Sur la parcelle			Stade physio.	Dans le pixel		
		Taux de jaune en mai (%)	Taux de terre en mars (%)	Taux terre en juin (%)		Taux de jaune en mai (%)	Taux de terre en mars (%)	Taux terre en juin (%)
Q1	1	0.0163	0.0203	0.0025	4	0.0534	0.0157	0.0178
Q1	2	0.0163	0.0203	0.0025	4	0.0309	0.0360	6.5x10 ⁻⁵
Q1	3	0.0163	0.0203	0.0025	4	0.0282	0.0122	1.7x10 ⁻⁵
...

Etape 2 : Création de polygones

La création d'un fichier de type shape contenant les polygones des objets (des fleurs ou des tumuli) permet de réaliser des analyses spatiales où l'on mesure des distances entre deux objets (comme le nombre de fleurs de pissenlits par rapport à la distance à une taupinière). Contrairement à l'application d'une grille de 4m² comme dans l'étape 1, le traitement statistique des polygones permettent de quantifier précisément les mécanismes biologiques interagissant entre les deux objets (par exemple l'effet de la distance à un objet sur la densité d'un second).

Rien que la mise en place de ces 2 étapes a nécessité 5 packages différents de R, plus d'une trentaine de fonction et presque 500 lignes de codes. Il est important de noter que nous avons assemblé de manière autonome tous ces outils et que nous avons dû mettre en place des stratégies d'optimisation de calculs dans le but de travailler avec des informations aussi précises. La partie de développements informatique a utilisé une part non négligeable du temps du stage.

3) Validation de la procédure de télédétection

L'ensemble de nos analyses dépendant de cette première étape de télédétection, nous nous sommes donc intéressés à la fiabilité de notre script. Une précédente étude réalisée par Goulamoussène *et al.* en 2020, s'était déjà penchée sur la question de l'automatisation de la télédétection de colonies de campagnols terrestres à l'aide d'un drone. Bien que n'ayant pas employé le même angle d'approche pour construire le programme, la méthode de validation de ce script utilise les mêmes indicateurs que ceux proposés par Goulamoussène *et al.*

i. Validation du repérage des colonies par le script

Pour valider la télédétection des colonies de campagnols terrestres par le script, deux photographies ont été choisies : une avec des pratiques agricoles n'affectant pas la détection et l'autre avec un épandage de lisier, les plaques de lisier étant confondues à tort avec de la terre par le script. Les 2 photographies sont passées dans le script et les colonies détectées sont contenues dans un fichier de type Shape pouvant être ouvert sur le logiciel de cartographie QGIS.

Sur QGIS, chaque photographie est ensuite divisée en quadrillage avec des carreaux de 2x2m. Pour chacun des 2400 carreaux, il a été déterminé s'ils contiennent ou ne contiennent pas une colonie. Les résultats de l'identification par l'opérateur sont ensuite comparés aux résultats du script. On distingue 4 cas de figure possible :

- Vrai positif (VP) : le carreau contient une colonie et a été repéré par le script
- Vrai négatif (VN) : le carreau ne contient pas de colonie et n'a pas été repéré par le script
- Faux négatif (FN) : le carreau contient une colonie et n'a pas été repéré par le script
- Faux positif (FP) : le carreau ne contient pas de colonie et a été repéré par le script

Sur nos deux quadrats les résultats obtenus sont les suivant :

Tableau 2 : Résultat de la comparaison entre l'analyse des images par le script et par un opérateur (VP : Vrai positif, VN : Vrai négatif, FN : Faux négatif, FP : Faux positif)

	Quadrat 1	Quadrat 2	Moyenne
VP	311	813	562
VN	583	235	409
FP	255	79	167
FN	51	73	62
Total	1200	1200	1200

Le premier indicateur utilisable pour tester la précision du programme est l'accuracy, obtenue par le rapport entre le rapport du nombre de réponse correct sur le nombre de réponse total.

Il est défini par la formule suivante :

$$\text{Accuracy moyenne} = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN}$$

Avec les valeurs indiquées dans le Tableau 2, on obtient une accuracy de 81%.

L'accuracy est un bon indice de fiabilité du script, cependant cet indicateur n'étant pas centré et réduit, il peut être biaisé par la densité de campagnols. Il va être sensible à la différence entre le nombre de carrés positifs et le nombre de carré négatif et n'est donc pas très adapté aux extrêmes : une parcelle fortement infestée ou au contraire très peu infestée.

Un deuxième indicateur possible est donc le coefficient de corrélation de Matthews (MCC), proche de l'accuracy, mais dont les valeurs sont centrées-réduites. Il est défini par la formule suivante :

$$MCC = \frac{(VP * VN) - (FP * FN)}{\sqrt{(VP + FN) * (VP + FP) * (VN + FP) * (VN + FN)}}$$

La MCC obtenue est de 62%. Pour savoir si la source d'erreur est plutôt dû à une surestimation ou à une sous-estimation, on peut calculer la spécificité et la sensibilité. Une forte sensibilité couplée à une faible spécificité va traduire une tendance à la surestimation et inversement pour une forte spécificité mais une faible sensibilité. On les obtient grâce aux formules suivantes :

$$\text{Sensibilité} = \frac{VP}{VP + FN}$$

$$\text{Spécificité} = \frac{VN}{VN + FP}$$

Le calcul nous donne une sensibilité de 90% et une spécificité de 71%, les erreurs sont donc principalement liées à une surestimation du script.

ii. Validation du repérage des pissenlits

Dans un deuxième temps, nous avons voulu vérifier la capacité du script à détecter les pissenlits. Pour ce faire, un carré de 25m² a été extrait de manière aléatoire dans 2 quadrats photographiés en mai. Le premier quadrat avait une faible densité en pissenlits (207 pissenlits dans 25m²) et l'autre avec une plus forte densité (684 pissenlits dans 25m²). Chacune des extractions a été traitée par le script et le fichier de points des pissenlits a été exporté en fichier shape lisible par QGIS. Chacun des pissenlits a ensuite été compté à la main et les fichiers de points de l'opérateur et du script ont été comparés.

On relève 2 types d'erreurs possibles pour le script :

- Un pissenlit n'a pas été compté : 53 pissenlits sur 891 soit environ 6%
- Un pissenlit a été compté 2 fois ou un pissenlit a été compté alors que ça n'en est pas un : 215 pissenlits sur 891 soit environ 24% des cas.

Le script a donc une précision de 70% pour le comptage de pissenlits, avec une tendance à la surestimation.

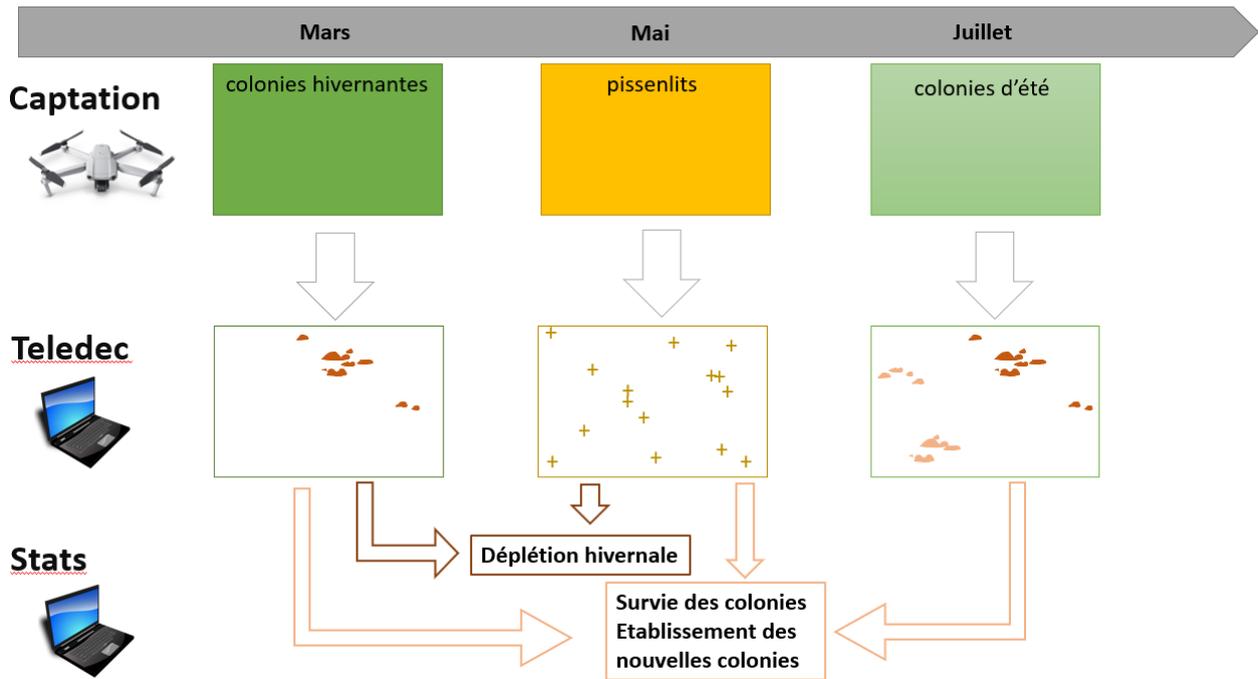


Figure 8 : Schéma de synthèse des deux approches mises en place dans cette expérimentation

C- Etude statistique des relation campagnols-pissenlits

1) Effets de la présence de colonies hivernantes sur la densité de pissenlits

i. Etude à l'échelle de la parcelle

Les prises de vue de mars et de mai nous permettent d'observer les interactions entre les pissenlits et les campagnols réalisées au cours de l'hiver. L'importance du pissenlit dans l'alimentation des campagnols avait déjà été observée grâce à l'analyse du contenu des silos ou en terrarium mais aucune étude n'a constaté directement l'impact de cette consommation dans le champ. Notre hypothèse est que les campagnols ont consommé les pissenlits autour de leur colonie, et donc que la densité de pissenlits à proximité des colonies hivernantes est inférieure à celle de la moyenne parcellaire.

Dans un premier temps, l'observation se fait à l'échelle parcellaire, afin de détecter une tendance générale. On cherche à déterminer si la répartition des pissenlits dans les parcelles est aléatoire en présence de colonies. En écologie, on appelle ce genre d'analyse à large échelle un patron (*pattern* en anglais). Il est défini par « une observation montrant une structure non aléatoire et contenant des informations sur les mécanismes dont elle émerge. » (Grimm *et al.*, 2005).

Les données contenues dans le tableau de l'étape 1, présentée précédemment (Tableau 1), sont donc analysées afin de chercher l'existence d'une corrélation entre la densité de pied de pissenlits et les indices de présence des campagnols. Pour observer une corrélation, et nos

variables ne suivant pas une loi normale, on applique un *glm* (modèle linéaire généralisé). Les *glm* sont des fonctions disponibles sur R permettant de réaliser des régressions linéaires et pouvant être affinées en prenant en compte plusieurs variables explicatives. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer quel type de *glm* utiliser puisque ces derniers sont répartis en famille. La famille de *glm* à choisir dépend de la nature des données à expliquer. Dans le cas du nombre de pied de pissenlits, on a une donnée discontinue et composée de nombres entier (issu d'un comptage), ce qui correspond à une loi de poisson. On utilise donc un *glm* poisson. Dans un second temps, il faut étudier la ou les variables explicatives qui nous serviront dans notre réduction linéaire, ce qui revient à produire différent modèle où la densité de pied de pissenlits est comparée à plusieurs variables explicatives (le taux de terre de la parcelle, le taux de terre par pixel, les pratiques agricoles et la moyenne de pissenlits parcellaire). La pertinence du modèle testé est jugée grâce au critère d'information d'Akaike (AIC) qui permet de déterminer la précision du modèle tout en prenant en compte la quantité de variables explicatives utilisées. Le meilleur modèle étant celui permettant d'obtenir l'AIC le plus faible avec un nombre minimal de variables explicatives. Une fois le meilleur modèle choisi on observe la p-value entre ce modèle et les variables explicatives retenues pour savoir s'il existe une corrélation et si elle est significative.

Pour connaître la variance expliquée par notre modèle, la fonction *glm* permet de calculer un pseudo R^2 grâce à la formule :

$$\text{Pseudo } R^2 = 1 - \frac{\text{Residual Deviance}}{\text{Null Deviance}}$$

ii. Etude à l'échelle de la colonie

Le pattern permet d'avoir une indication de la corrélation entre la densité de pissenlits et la présence de campagnols sur l'ensemble des parcelles étudiées mais il ne permet pas d'établir une distance de consommation explicite. Pour cerner le mécanisme biologique, nous avons sélectionné 16 colonies dans 6 quadrats différents. Les colonies sont ensuite extraites par un découpage d'une emprise de 20x20m. Un script rédigé sur R (disponible en Annexe iii) permet ensuite de comparer la densité de pissenlits en fonction de la distance avec la colonie.

Dans un premier temps, le script repère les colonies selon la même méthode que celle décrite en C.1.i. Ensuite des anneaux concentriques sont dessinés autour de chaque tumulus, de taille différente selon l'éloignement à la colonie, et suivant une fonction logarithmique entre 5 cm et 5 m. La distance de 5m a été choisie après avoir fait tourner le script sur l'ensemble d'une parcelle permettant d'avoir un ordre de grandeur (l'opération prenant plusieurs jours nous avons ensuite décidé de limiter l'étude à l'échelle des colonies). Dans chacun de ces anneaux, le nombre de pissenlits est compté et comparé à la moyenne de l'image.



Figure 9 : Schéma du dénombrement des pissenlits à l'aide de buffers consécutifs

2) Influence de la densité de pissenlits sur la colonisation par les campagnols

i. Détermination des nouvelles colonies

Pour pouvoir déterminer les critères pouvant influencer la localisation des nouvelles des colonies, nous devons dans un premier temps dissocier les anciennes colonies des nouvelles. Lors de la photographie de juin, nous appliquons la même technique de détection des colonies qu'à la sortie de l'hiver, à savoir en utilisant le script et en appliquant une grille avec des pixels de 2m par 2m. Dans un deuxième temps, il s'agit de comparer les photographies de sortie d'hiver avec celles de l'été afin de pouvoir déterminer quelles sont les colonies hivernantes des nouvelles. Nous avons donc comparé pixel par pixel la colonisation, en considérant qu'un pixel était colonisé lorsque le taux de terre dépassait un seuil de 2,5% soit environ 1000 cm², ce qui correspond à 10 tumuli de 10x10cm. Cependant, les colonies hivernantes ont pu aussi s'étendre durant la période du printemps pour chercher de la nourriture plus loin, les nouvelles ramifications pouvant alors coloniser de nouveaux pixels. Il était alors important de prendre en compte la présence de terre dans le même pixel 4 mois avant, mais également, la présence de terre en mars dans les pixels adjacents (le script est disponible en Annexe iv).

Dans chaque pixel, il y a donc 3 situations possibles :

- Le pixel était déjà colonisé en mars : ce n'est donc pas une nouvelle colonie
- Le pixel a un voisin direct qui était colonisé en mars : ce n'est pas une nouvelle colonie mais une ramification de l'ancienne

- Le pixel n'était pas colonisé en mars et ne touche pas de pixel qui était colonisé en mars : c'est donc une nouvelle colonie

ii. Effet de la densité de pissenlits sur le taux de croissance en campagnols de la parcelle

Si la dynamique des populations de campagnols est affectée par la densité de pissenlits, le premier indicateur visible est une différence du taux de croissance entre les parcelles en fonction de leur densité. Nous avons donc comparé la croissance démographique des parcelles en fonction de la densité moyenne de pissenlits de ces dernières. La formule utilisée est :

$$\text{Taux de croissance} = \frac{\text{Taux de terre en juin}}{\text{Taux de terre en mars}}$$

iii. Effet de la densité de pissenlits sur la localisation intra-parcellaire des colonies

Les pissenlits peuvent impacter le taux de croissance de deux manières différentes :

- Ils peuvent être un critère de choix pour l'installation des nouvelles colonies, les campagnols choisissant de s'établir dans les zones plus denses en pissenlits
- Ils peuvent permettre une meilleure survie pour les colonies déjà présentes, permettant aux individus d'avoir plus d'événements de reproduction.

Nous nous sommes donc penchés sur ces deux influences possibles des pissenlits sur la démographie des campagnols.

Une fois les nouvelles colonies isolées de la manière décrite en C.2.i, nous avons d'abord voulu déterminer si les pixels colonisés sont ceux contenant plus de pieds de pissenlits que la moyenne de la parcelle. Cette analyse permet de savoir s'il y a une installation préférentielle dans les pixels à haute densité de pissenlits. Pour étudier la densité de pissenlits, nous avons choisi de calculer des anomalies, c'est-à-dire de s'intéresser non pas directement au nombre de pieds du pixel mais à la différence entre le nombre de pieds du pixel et la valeur moyenne de la parcelle. Les anomalies permettent donc une prise en compte de la moyenne de pissenlits de la parcelle, ce qui diminue l'effet de l'hétérogénéité inter-parcellaire. Cette étude déterminera donc s'ils sélectionnent les zones les plus dense en pissenlits dans ce qui les entoure. L'indice d'anomalie assume cependant que le campagnol est capable d'estimer la densité de pissenlit à l'échelle de notre quadrat d'étude ce qui est probablement plus difficile pour un individu localisé sur le bord du quadrat que pour un individu localisé en plein milieu.

La comparaison des anomalies des pixels initialement vides et maintenant colonisés nous permettra de déterminer si les pissenlits sont un critère d'installation. Nous avons donc appliqué une nouvelle fois une réduction linéaire à l'aide de la fonction *glm* mais de famille binomiale cette fois avec le booléen « le pixel s'est fait coloniser en juin » ou « le pixel ne s'est pas fait

coloniser en juin » en fonction du nombre de pied. Ensuite, l'utilisation de la fonction *predict* de R permet de récupérer la fonction issue de la réduction linéaire afin de calculer la probabilité de colonisation d'un pixel.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au maintien des pixels déjà colonisés en mars afin de déterminer si le pissenlit est un critère de maintien des colonies dans le milieu. La même méthode que pour la colonisation a été appliquée avec l'utilisation de la fonction *glm* binomiale avec le booléen « le pixel est resté colonisé en juin » ou « le pixel n'est plus colonisé en juin » en fonction du nombre de pieds de pissenlits. Puis enfin une nouvelle utilisation de la fonction *predict* permet de déterminer la probabilité d'une colonie à se maintenir dans un pixel en fonction du nombre de pieds de pissenlits.

III-Des interactions trophiques campagnols-pissenlits mises en évidence pendant ce stage

A- Une consommation des pissenlits par les colonies hivernantes

1) Diminution de la moyenne de pieds de pissenlits autour des colonies hivernantes

Afin de déterminer si la présence de colonies hivernantes a un impact sur la densité de pissenlits, nous cherchons tout d'abord à représenter le nombre de pieds de pissenlits par m² d'herbe en fonction de la proportion de terre de chaque pixel. Au sein des pixels, le taux de jaune est d'abord transformé en nombre de pieds en divisant par la surface moyenne d'une fleur et par le nombre moyen de fleurs par pieds. Dans un second temps, on ramène ce nombre de pied à la surface d'herbe, c'est-à-dire la surface du pixel moins la surface colonisée, afin de pouvoir comparer la densité de pissenlits en fonction du taux de terre.

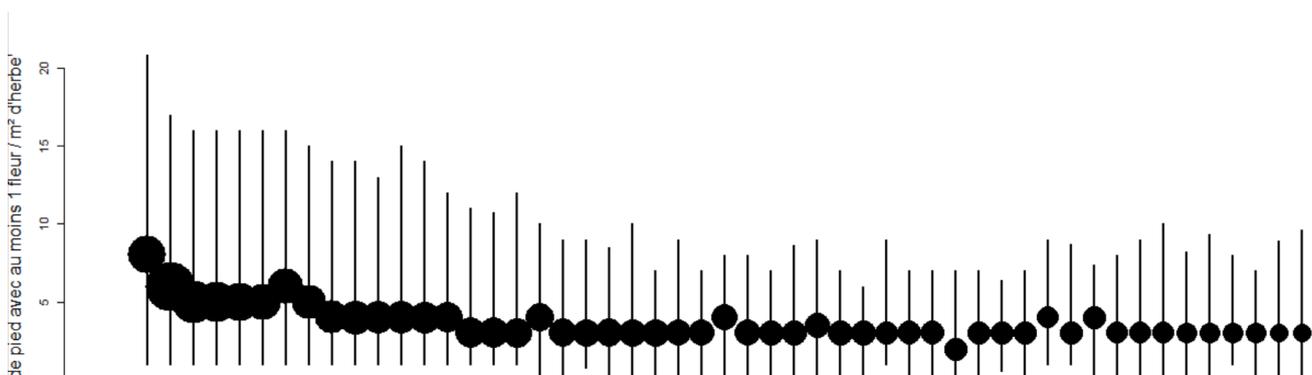


Figure 10 : Evolution du nombre de pieds de pissenlits portant au moins une fleur par m² d'herbe en fonction de la proportion de terre dans le pixel.

Sur la représentation graphique ci-dessus, le nombre de pieds a été tracé en fonction du pourcentage du taux de terre (entre 0 et 50%). Les barres verticales représentent les valeurs comprises entre le 15^e centile et le 85^e centile. Elles représentent donc la répartition de 70% de l'échantillon. Les points centraux représentent la médiane de chaque catégorie. On observe graphiquement une légère décroissance du nombre de pieds de pissenlits en fonction de la proportion de terre mais une régression linéaire est nécessaire pour confirmer.

Comme précisé précédemment, la distribution du nombre de pieds ne suit pas une loi normale, ce qui est courant avec une donnée issue d'un processus de comptage (ici le comptage de pieds de pissenlits sur une surface). On ne peut donc pas appliquer une régression linéaire classique pour vérifier la corrélation entre le taux de terre et le nombre de pieds de pissenlits. Les données de type comptages suivent une loi de distribution appelée Loi de Poisson, reconnaissable graphiquement à son allure dissymétrique et à son décroissement rapide sur les premières valeurs. On applique donc une fonction *glm* de type poisson. Il faut cependant s'assurer que des valeurs extrêmes n'affectent pas la régression linéaire. Dans l'idéal il faudrait réussir à normaliser notre variable du taux de terre par pixel, mais le modèle produisant un excès de zéro (les pixels vides étant surreprésentés par rapports aux autres), on se contentera d'avoir un écart entre la moyenne et la médiane très petit devant la dispersion des valeurs. Pour ce faire on applique une fonction log à la variable explicative.

Plusieurs modalités sont testées afin de déterminer quels paramètres peuvent influencer la distribution dans ceux qui ont été relevés dans le tableau. Pour chacune d'entre elles, on relève l'AIC.

La fonction *glm* a été appliquée sur 4 variables explicatives potentielles détaillées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats des AIC entre la densité de pied par pixel et les 4 variables explicatives étudiées.

Modalité testée par le glm	AIC
Densité de pied ~1 (modèle nul)	2 283 046
Densité de pied ~ log (taux de terre du pixel + Constante)	2 264 645
Densité de pied ~ Taux de terre moyen de la parcelle	2 270 124
Densité de pied ~ Densité moyenne de pieds de pissenlits/m ² d'herbe (à l'échelle de la parcelle)	2 271 787
Densité de pied ~ Pratiques agricoles de mars pouvant altérer la visibilité	2 209 264

L'AIC la plus faible est d'abord pour la variable des pratiques agricoles en mars. Une partie de la variance observée est donc induit par la détérioration de la visibilité dû à des pratiques agricoles ($p\text{-value} < 2 \times 10^{-16}$).

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats des AIC entre la densité de pied par pixel, les pratiques agricoles et les 3 autres variables explicatives étudiées.

Modalité testée par le glm	AIC
Densité de pied ~ Pratiques agricoles de mars	2 209 264
Densité de pied ~ Pratiques agricoles de mars + log (taux de terre du pixel + Constante)	2 146 231
Densité de pied ~ Pratiques agricoles de mars + Densité moyenne de pieds de pissenlits/m ² d'herbe (à l'échelle de la parcelle)	2 200 700
Densité de pied ~ Pratiques agricoles de mars + Taux de terre moyen de la parcelle	2 160 324

On applique une nouvelle fois la même méthode en combinant les paramètres. L'AIC le plus faible est obtenu grâce à la combinaison de la variable des pratiques agricoles et le taux de terre corrigé (AIC= 2 146 231). Le coefficient est de -0,1159 +/- 0,0001. On obtient un R² de 0,07 et une p-value inférieur à 2×10^{-16} . Le taux de terre dans le pixel impacte donc bien négativement et de manière significative la densité de pieds de pissenlits dans l'herbe.

- 2) Mesure du taux de déplétion des pissenlits en fonction de la distance à la colonie

Pour observer l'effet de la consommation des pissenlits par les campagnols, le nombre de pieds de pissenlits dans un rayon de 5 mètres a été compté autour de 16 colonies. Les courbes obtenues pour chacune des colonies sont intégrées dans la figure ci-dessous.

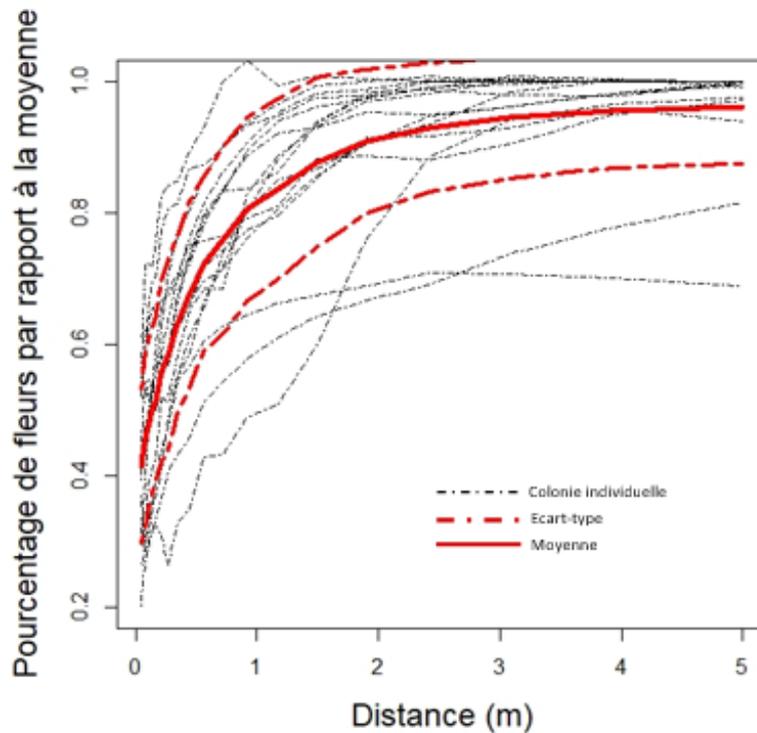


Figure 11 : Pourcentage de pissenlits par rapport à la moyenne en fonction de l'éloignement à la colonie.

En noir l'évolution de chaque colonie, en rouge la moyenne (trait plein) et l'écart-type (pointillé).

On observe une augmentation du nombre de pissenlits lorsqu'on s'éloigne de la colonie jusqu'à atteindre un plateau aux environs de la moyenne parcellaire, pour tous les quadrats à l'exception de deux courbes qui n'atteignent respectivement que 70% et 80% de la moyenne parcellaire à 5 mètres. Cette différence peut s'expliquer d'une part, par la haute densité en pissenlits de ces deux quadrats, d'autre part, par le fait que sur les 40m² extrait pour l'analyse, la colonie ne prend pas tous l'espace. La moyenne de pissenlits au sein du quadrat est donc plus élevée que dans le rayon des 5 mètres. On obtient donc une stabilisation inférieure à la moyenne parcellaire.

Ce résultat permet tout d'abord de confirmer la tendance dégagée précédemment lors de l'analyse du patron, à savoir que la densité de pissenlits est moins importante à proximité des colonies hivernantes. On observe ensuite que la densité réaugmente progressivement lorsqu'on s'éloigne de la colonie pour arriver à la moyenne parcellaire. L'action de déplétion, c'est-à-dire de consommation des pissenlits, semble donc être réalisée dans un rayon allant jusqu'à 2,5 mètres de la colonie.

A retenir :

Les colonies hivernantes sont localisées au sein de la parcelle dans des zones où la densité de pissenlits est plus faible. Ceci peut s'expliquer par la consommation des racines de pissenlits à proximité pendant l'hiver.

Le campagnol a une activité de déplétion autour de la colonie sur une surface d'environ 2,5 mètres.

B- Une colonisation influencée par la densité de pissenlits

1) Effet de la densité de pissenlits sur le taux d'installation des campagnols

Pour savoir si les parcelles denses en pissenlits sont les plus sujettes à la pullulation, on observe l'évolution du taux de croissance en fonction du nombre de pieds moyens de pissenlits par m².

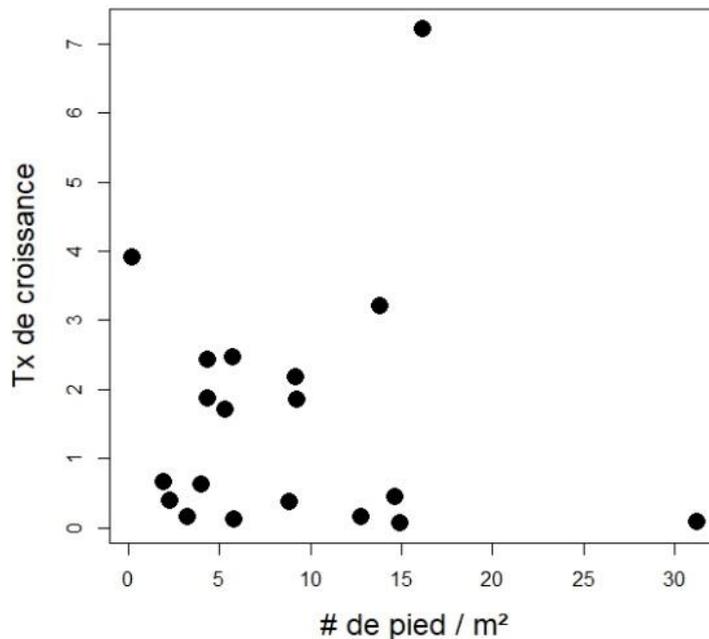


Figure 12 : Taux de croissances des parcelles en fonction du nombre de pieds de pissenlits par m²

On ne peut pas distinguer un effet clair du nombre de pieds de pissenlits sur le taux de croissance. Une partie des points ont un faible taux de croissance compris entre 0 et 1 (10 points sur 19), ce qui se traduit par un faible ou une absence de recrutement sur la parcelle. Un biais possible serait que certaines de nos parcelles soient dans une période du cycle de basse densité, qui se caractérise par une stagnation du nombre d'individus, et non pas dans la période de croissance. Un mélange de parcelles en croissance et en stagnation pourrait dissimuler l'action des pissenlits sur le taux de croissance. Ce biais ne pourrait être écarté qu'avec un suivi temporel de ces parcelles afin de s'assurer de la phase du cycle dans laquelle elles se trouvent.

2) Sélection des zones denses en pissenlits au sein de la parcelle

i. Influence de la densité de pissenlits dans la colonisation de nouveaux pixels

Afin d'étudier la corrélation entre la densité en pissenlits du pixel et la colonisation on utilise une fonction *glm binomiale*. La densité de pissenlits peut s'envisager non seulement à une échelle extrêmement locale (d'un pixel de surface) mais aussi à une échelle légèrement plus large (un pixel et ceux qui l'entoure), puisqu'il est probable que l'animal cherche un environnement général propice à son développement. On choisit d'utiliser des anomalies afin de prendre en compte l'hétérogénéité parcellaire dans notre étude. Les modalités étudiées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Valeur des AIC pour les 2 variables explicatives étudiées dans la colonisation des pixels par les campagnols

Modalité testée par le glm	AIC
Colonisation en juin ~1 (modèle nul)	12784,46
Colonisation en juin~ Anomalie dans le pixel	12784,47
Colonisation en juin~ Anomalie des pixels environnants	12780,32

L'AIC le plus faible est pour l'anomalie des pixels environnants. Il semblerait que la densité supérieure de pissenlits dans les pixels environnants soit un critère influençant significativement la colonisation (coeff = 0,03641 +/- 0.01459 avec une p-value= 0,0126). Il faut cependant relever que le pixel en lui-même, isolé, n'apparaît pas comme influençant significativement la colonisation. Il semblerait donc que les campagnols choisissent préférentiellement les zones plus riches en pissenlits que le reste de la parcelle. Cependant, cette sélection est réalisée à une échelle de l'ordre de la trentaine de m² (un carré de 9 pixels faisant 36m²) plutôt qu'à l'échelle du pixel (4m²). Les colonies atteignant généralement la cinquantaine de m² de superficie, la sélection d'un habitat optimal sur l'ensemble de cette surface est cohérente.



Figure 13 : Evolution de la probabilité pour un pixel d'être colonisé en fonction de l'écart entre la densité de pissenlits de son environnement et celle de la parcelle

ii. Influence de la densité de pissenlits dans le maintien des colonies existantes

La persistance de la colonie est ici considérée comme la capacité du pixel à rester coloniser entre mars et juin. Pour savoir si la présence de pissenlits a un impact sur la survie des colonies on étudie 2 variables explicatives détaillées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Valeur des AIC pour les 2 variables explicatives étudiées dans la survie des pixels colonisés par les campagnols

Modalité testée par le glm	AIC
Survie en juin~1 (modèle nul)	10406,57
Survie en juin~ Anomalie dans le pixel	10386,52
Survie en juin~ Anomalie des pixels environnants	10394,24

La variable expliquant le mieux la survie des colonies de mars à juin est l'anomalie de pissenlits dans le pixel (AIC= 10386,52). Une densité de pissenlits supérieure à la moyenne parcellaire augmente en effet la probabilité de persistance d'une colonie (coefficient = 0.10638 +/- 0.02449) de manière significative ($p_value = 1.4 \times 10^{-5}$). Ceci peut s'expliquer par la possibilité que les galeries menant aux pixels possédant le moins de pissenlits soient progressivement délaissées, les campagnols favorisant plutôt les déplacements vers les endroits les plus riches de nourriture.

Le pseudo-R² est cependant de 0,002, donc même si les pissenlits exercent une influence significative, la variance expliquée par cette variable est très faible. Les critères de maintien de la c

olonisation sur des pixels doivent donc être plus complexes, les déplacements devant être influencés par l'organisation du terrier comme la localisation du nid par exemple.

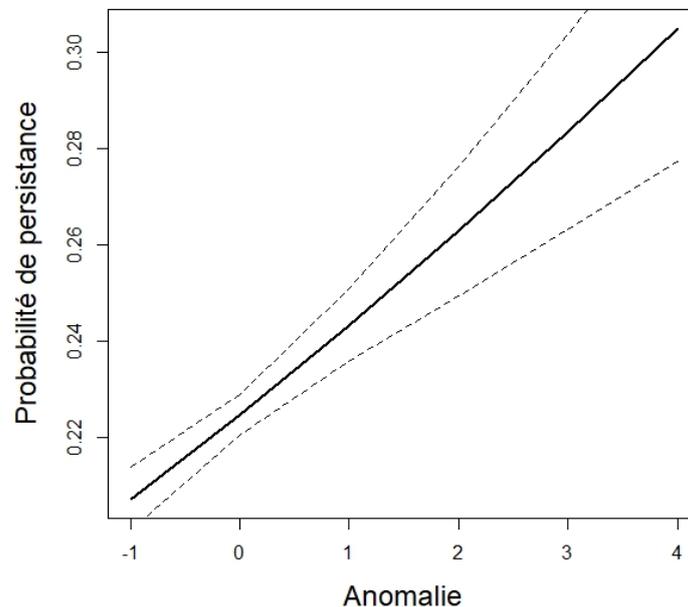


Figure 14 : Evolution de la probabilité pour un pixel d'être colonisé en fonction de l'écart entre la densité de pissenlits de son environnement et celle de la parcelle

A retenir :

Bien qu'aucune tendance ne se dégage à l'échelle parcellaire sur les taux de croissance, les résultats montrent que les pissenlits influencent le comportement de colonisation des campagnols à l'échelle intra-parcellaire. Ils colonisent de préférence les zones d'une superficie d'une trentaine de m² dont la densité de pissenlits est supérieure à la moyenne parcellaire.

Les pissenlits semblent aussi augmenter les chances pour une colonie de se maintenir dans le même pixel, les pixels dont la densité de pissenlits étant inférieure à la moyenne parcellaire étant délaissés.

IV-Perspectives et discussion : les prémices d'un contrôle des populations ?

A- Limites et biais de l'étude

Notre étude a permis de mettre en lumière une corrélation entre la densité de pieds de pissenlits et la présence de colonies de campagnols. Les colonies hivernantes ont tendance à être dans des zones à faible densité de pissenlits, ce qui s'explique probablement par la consommation des pissenlits environnant lors des périodes de repos végétatif. A l'inverse, les colonies de printemps s'installent dans des endroits où la densité est plus importante, ce qui nous laisse supposer que les jeunes individus sélectionnent la localisation de leur colonie en fonction de la ressource alimentaire. Toutefois la proportion de variance expliquée reste assez faible. Autrement dit, la mise en évidence d'un coefficient de corrélation significativement différent de 0 montre qu'il existe une relation indéniable entre la densité de pissenlits et la présence de campagnols, mais la faible proportion de variance expliquée montre que le bruit statistique contenu dans la distribution des pissenlits n'est que faiblement expliquée par la présence de campagnol. Ceci s'explique d'abord parce que les critères de distribution d'une plante anémochore (avec un mécanisme de dispersion des graines lié au vent) comme le pissenlit sont sans doute plus complexes et que, même sans campagnol, la distribution des pissenlits dans un champs n'est ni homogène ni aléatoire. Ensuite des biais dans l'étude peuvent aussi contribuer à masquer la force de l'interaction pissenlits-campagnols.

Le campagnol terrestre est un animal dont le cycle de vie est assez complexe, puisqu'il comprend des variations de populations interannuelles (sur 6 ans) et intra-annuelles (en fonction des saisons) dans notre zone d'étude. On peut supposer que la variation de densité au cours du cycle peut entraîner des changements comportementaux notamment dans la sélection de la localisation de la nouvelle colonie. Si la variation interannuelle a été prise en compte comme critère dans l'élection des parcelles (les quadrats ont été choisis préférentiellement en zone de basse densité dans le but de pouvoir identifier les nouvelles colonies, donc soit en « phase de basse densité », soit en « phase de croissance »), la variation intra-annuelle implique un suivi des populations tout au long de la saison de reproduction. Il est vraisemblable d'imaginer des critères de sélection différents entre les colonies s'installant au printemps et celles s'installant en automne. Au printemps, la ressource en végétaux est grande et le besoin de stockage est faible puisque l'herbe pousse continuellement et qu'il reste encore plusieurs mois avant la saison froide. L'importance de la densité de pissenlits autour de colonie pourrait se faire ressentir principalement pour les colonies qui s'installent à l'automne et donc on observerait une corrélation encore plus forte entre la localisation des colonies de septembre et la densité de pissenlits. Une dernière prise de vue est prévue en septembre et octobre afin de tester cette hypothèse, et il sera alors possible de valider ou d'invalider l'influence de la saisonnalité sur l'importance des pissenlits dans l'installation.

L'autre source de biais possible est due au choix de la terre comme indicateur de densité de population de campagnols. La terre était le meilleur indicateur disponible pour repérer l'activité des campagnols à l'aide de la télédétection. Cependant, sa fiabilité repose sur l'hypothèse que la terre visible en surface est proportionnelle au nombre de campagnols vivant sur la parcelle. Dans la pratique, la terre est surtout liée à l'action de forage des galeries pour l'affouragement souterrain et aérien. Si la densité est basse et que les colonies sont étendues, par exemple parce que la parcelle est maigre et qu'il faut prospecter une grande surface pour couvrir les besoins nutritifs, la quantité de terre remontée par colonie sera plus importante que si la densité est haute et que les colonies sont petites car la parcelle est très riche. De plus, le

travail du sol va biaiser cette relation. En absence de travail de sol, des tumuli seront visibles au printemps, même si ces animaux sont morts au début de l'automne ou au cours de l'hiver. En effet, une parcelle hersée à l'automne, sera moins salie par la terre au printemps qu'une parcelle non travaillée, pour une densité de campagnols équivalente. A l'inverse, une partie des individus n'aura pas survécu à la saison froide : parce qu'ils sont trop vieux pour survivre jusqu'au printemps, parce que la saison aura été trop rigoureuse pour eux ou encore parce qu'ils auront été prédatés par un mustélidé. Le nombre de colonies hivernantes en mars sera donc surestimé, ce qui peut créer du bruit dans nos résultats, notamment de déplétion. La présence de jeunes de l'année a aussi été observée dans des galeries plus anciennes, lors de piégeage les années précédentes. Plutôt que de s'éloigner et de creuser leur propre terrier, les jeunes peuvent aussi se réapproprier des galeries déjà existantes. Ces colonies sont considérées par le script comme ayant été occupées durant tout l'hiver car elles sont visibles en mars, alors qu'aucune activité de déplétion n'a eu lieu pendant la saison. Une session de piégeage avait été planifiée pour vérifier l'âge des individus dans les colonies au mois de juin, après la première fauche. Cependant les conditions météorologiques n'ont pas permis le piégeage car, en raison de la météo pluvieuse, la fauche a eu entre 1 mois et 2 mois de retard et qu'il n'est pas possible de piéger dans une parcelle non fauchée (le piégeage engendrant une dégradation de la parcelle et l'herbe haute entraînant une mauvaise détection des colonies). Une session de rattrapage aura lieu cet automne avec les dernières photographies.

Si l'étude a permis de mettre en évidence l'importance des pissenlits dans la dispersion des campagnols, elle ne permet toutefois pas de déterminer s'ils sont la source du déclin. On peut supposer que la diminution de plus en plus importante du nombre de pieds de pissenlits rendra la parcelle de moins en moins attractive pour les nouvelles colonies, et la densité de population va diminuer au profit de parcelles voisines. Une autre hypothèse c'est qu'une faible densité de pissenlits va permettre de constituer de moins grosses réserves et le taux de survie hivernale va chuter soudainement. Le nombre de survivants après l'hiver sera bien plus faible et ceux-ci seront en moins bonnes conditions corporelles, ce qui empêchera la croissance habituelle au printemps. Le suivi des parcelles par télédétection tout au long des phases du cycles permettrait d'observer l'évolution de la densité de pissenlits en fonction de la densité de population, afin de savoir si la période de déclin correspond à une quasi-disparition de la ressource en pissenlit. On pourrait imaginer coupler cette surveillance avec une technique de capture, marquage, recapture. Un marquage serait effectué sur les individus à l'automne au sein des quadrats afin de savoir si le déclin d'une parcelle est dû à une forte mortalité. Si à la sortie de l'hiver, au moment du déclin, aucun adulte marqué n'est capturé alors on pourrait en déduire que le taux de survie hivernale est faible. Le déclin serait, dans le cas présent, causé par une forte mortalité et non pas par une dispersion des jeunes dans d'autres parcelles.

B- Comparaison à d'autres recherches sur les rongeurs

Les recherches sur le lien possible entre les pissenlits et le déclin des populations de campagnols terrestres sont assez récentes. Nos résultats restent cependant cohérents avec les études menées à l'échelle paysagère par l'unité de recherche, en 2019. Ils avaient, en effet, relevé au cours d'une étude, un signal significatif de proportionnalité entre le taux de croissance

des campagnols et la densité de pissenlits à l'échelle d'une trentaine de zones de piégeage de 400m². Lors de la même expérimentation, il avait également été démontré l'existence d'une corrélation entre la diminution de la densité de pissenlits et le nombre d'individus présent sur la parcelle, mais la mesure des populations de pissenlit a été réalisée de manière opportuniste et les modalités du suivi n'étaient pas adaptées à une analyse statistique de grande fiabilité. Nos résultats, bien plus précis cette année grâce à l'utilisation du drone, nous permettent de démontrer que la colonisation dépend non seulement du nombre moyen de pissenlits sur la parcelle mais aussi que leurs hétérogénéités de distribution jouent également un rôle à l'échelle intra-parcellaire.

Si l'importance des pissenlits dans le cycle n'apparaît que récemment, l'hypothèse de la végétation comme responsable des cycles intra-annuelles des rongeurs est, en revanche, une idée qui a déjà permis la publication de plusieurs articles. On peut mentionner par exemple l'existence d'une synchronicité entre la qualité du régime alimentaire des campagnols de Californie (*Microtus californicus*), et leur capacité de reproduction au cours des saisons. En effet, pour cette espèce, les variations de densité intra-annuelle correspondraient à un changement de régime alimentaire (Batzli, 1971). De plus, une fois clôturés pour être préservés des prédateurs et nourris par des compléments alimentaires tous l'hiver, les campagnols agrestes (*Microtus agrestis*) perdent leur dynamique saisonnière, en ce maintenant tout l'hiver (Huitu *et al.*, 2003). La ressource alimentaire semble donc un facteur prépondérant dans l'établissement de cycle intra-annuelle. L'hypothèse d'une réaction analogue sur un cycle de plusieurs années est donc plausible.

C- Des recherches au service du développement agricole

1) La télédétection : un outil supplémentaire pour la surveillance des populations de campagnols

La télédétection représente un des outils les plus prometteur dans la surveillance des populations et de l'environnement. Initialement mis au point avec les satellites, la télédétection permet d'étudier des dynamiques de populations animales et végétales à une échelle inenvisageable jusqu'à présent. De plus, la rapidité de l'acquisition de l'image, incomparable avec le temps nécessaire à un relevé exhaustif sur une zone d'une telle superficie, a permis la mise en place d'études aux dimensions spatiales et temporelles inédites. On peut par exemple citer l'utilisation de la télédétection comme outil de suivi de la déforestation en Guyane et au Brésil, qui permet de suivre l'évolution du couvert forestier, dans une des zones les moins praticable de la planète, à une échelle régionale soit plusieurs dizaines de km² (Tsayem Demaze, 2002). Faisant suite aux satellites, le drone a pu trouver sa place dans le suivi des surfaces à moyenne échelle (de l'ordre de plusieurs hectares). Désormais autorisé aux civils et à un prix abordable, cet outil a permis de démocratiser la télédétection, rendant ce type de surveillance accessible aux particuliers et aux organismes publics du territoire.

L'utilisation du drone dans l'agriculture a d'abord été envisagée comme une aide à la décision pour la fertilisation, notamment avec l'émergence de prestataires fournissant des cartes des besoins en azote des cultures. Cependant, l'idée de l'utilisation de drone comme outil de

gestion des ravageurs apparaît peu à peu, plus particulièrement dans le suivi d'insectes ravageurs des grandes cultures (Moses-Gonzales & Brewer, 2021).

C'est dans cette continuité que s'inscrit notre étude, qui propose un outil de détection des campagnols. Les tumuli sont souvent plus facilement repérables depuis le ciel que depuis la terre, car les traces de terre sont aisément dissimulées par la hauteur de la végétation. Un survol de l'exploitation permettrait de surveiller l'ensemble des parcelles en quelques dizaines de minutes. La télédétection participerait donc à la détection à basse densité, repérant les premières traces de colonisation et assurant une plus grande réactivité dans la lutte. Le drone utilisé lors de l'expérimentation est un drone de moyenne gamme (800 à 1000€), avec certes une caméra de bonne qualité, mais uniquement composée des trois bandes spectrales habituelles (rouge, vert et bleu). Il est télécommandable avec un smartphone, après l'obtention d'un test en ligne, d'une heure environ, autorisant l'opérateur à utiliser la machine. Mise à part les conditions météorologiques à respecter pour pouvoir assurer le vol ainsi que les contraintes d'ordres militaires (le Massif central est une zone d'entraînement aérien ce qui engendre régulièrement des interdictions de vols), les contraintes techniques et financières de l'acquisition des images sont réduites avec ce type de drones. Il peut donc facilement être utilisé par un exploitant ou un prestataire.

Les principales contraintes sont liées à l'analyse d'images. C'est l'étape de la télédétection la plus coûteuse en temps et en puissance de travail. La sélection d'une gamme RGB adaptée à la couleur de la terre et à la couleur de l'herbe peut être difficile à déterminer en fonction de l'exposition de la parcelle, ou de la sécheresse de la végétation. En dehors du temps nécessitant l'intervention de l'opérateur, le fonctionnement du script en lui-même est gourmand en puissance d'ordinateur. Une photographie d'un demi-hectare avec une résolution 1cm² peut prendre environ 15 min avec un ordinateur classique de dernière génération (Core I7 et 8 Giga de RAM). L'analyse d'une image de plusieurs hectares pourrait prendre plusieurs heures. Enfin, le script discrimine la présence de terre dans un champs. Il n'est donc efficace que dans un champ avec une bonne couverture végétale et dont la présence de terre est un indice de la présence de campagnol. Si une partie est retournée après des passages de sangliers, de tracteurs, ou simplement à nue, le programme indiquera la présence d'une colonie.

Le temps de traitement peut être optimisé en fonction des attentes de l'opérateur. Afin de s'assurer de la détection des pissenlits lors de notre étude, nous avons choisi une résolution fine de 1cm². De plus, notre gamme RGB devait être la plus exacte possible car nous voulions avoir l'intégralité des colonies du quadrat pour que notre étude soit la plus précise possible. Dans le cadre d'une surveillance, une simple information de présence ou d'absence est souvent le résultat recherché. La diminution de la résolution et un calibrage moyen de la gamme de couleur seront probablement suffisants pour un contrôle de routine. L'évolution du script dépendra aussi de l'opérateur. Dans le cas où le programme serait utilisé par un prestataire, ou un organisme comme la DRAAF, l'acquisition d'un matériel adapté et d'un opérateur formé est envisageable. Si l'outil est à destination des agriculteurs, une évolution du script avec une interface plus ergonomique devrait être envisagée. L'exploitant paramètrerait la résolution et la gamme de couleur lors de la première utilisation, et se contenterait par la suite d'un simple dépôt des images. Le logiciel lui retournerait ensuite le nom des parcelles nécessitant son attention.

Ainsi, cet outil permettrait une surveillance des populations de campagnols à différentes échelles : à l'échelle de l'exploitation pour l'agriculteur, mais aussi à l'échelle du territoire pour

les organismes d'état comme la DRAAF ou la DREAL. La démocratisation de la surveillance par drone permettrait une lutte coordonnée contre les campagnols à l'échelle du territoire. Même si des acteurs comme la FREDON ou la DRAAF entreprennent déjà une surveillance à l'échelle des communes, un outil permettant de surveiller une telle superficie faciliterait la prévention de la pullulation.

2) Une première étape vers la prédiction et un contrôle des pullulations

La possibilité de pouvoir réagir rapidement en cas d'apparition de campagnols est une condition indispensable à une lutte raisonnée afin de pouvoir appliquer une faible quantité de produit. Le piégeage quant à lui, n'est envisageable qu'à basse densité car il faut réussir à attraper la majorité, si ce n'est la totalité, des individus pour interrompre la croissance démographique. Toutefois, la découverte de la densité de pissenlits comme critère de sélection pour l'implantation de nouvelles colonies pourrait changer complètement le rapport à la lutte. Bien au-delà de la simple réaction rapide à l'apparition des campagnols, il serait possible d'anticiper les pullulations en déterminant au préalable les endroits sensibles. Là encore, plusieurs échelles sont envisageables. A l'échelle de l'exploitation, l'agriculteur pourrait suivre en priorité sur son exploitation les parcelles les plus denses en pissenlits. Mais à l'échelle du territoire, les politiques publiques auraient la possibilité, à partir d'images drone ou satellite, de suivre les îlots de densité de pissenlits pour pouvoir coordonner l'action de lutte. Le survol et la détection des pissenlits par drone pourrait permettre l'établissement de cartes où le taux de croissance potentiel des campagnols serait calculé en fonction de la densité de pissenlits et dont la précision serait à l'échelle parcellaire.

Si le nombre de pissenlits observé par drone peut être corrélé avec les observations de satellite, dont la précision est de quelque mètre, et à accès gratuit comme Sentinel, des cartes pourraient être réalisées à plus large échelle encore. La principale limite de l'utilisation de satellite est d'une part la période de survol (il faut un survol au bon moment et sans couverture nuageuse). D'autre part, seules les parcelles à très haute densité de pissenlits seraient visibles par satellite, étant donné la précision (entre 10 et 60m). Comme il existe déjà des bulletins d'irrigation ou de gestion des indications de fauche dans les chambres d'agriculture, on pourrait imaginer un bulletin avec des cartes de sensibilité et des indications de communes à surveiller à l'échelle du département.

Une piste envisageable pour réduire la pression exercée par les campagnols est aussi de diminuer la densité de pissenlit au sein des parcelles. Pour l'instant nous n'avons pas pu attribuer directement le déclin à une diminution du nombre de pieds de pissenlits. Toutefois, un contrôle de la densité de pissenlits pourrait rendre la parcelle moins attractive pour les campagnols, et donc permettre d'avoir des pics démographiques moins importants avec un nombre d'individus maximum moins élevé. Le pissenlit est une plante dont la capacité reproductrice est très élevée. Il produit de nombreuses graines avec un fort pouvoir de germination : 94% des graines éclosent dans le mois après leur impact avec le sol (Longyear, 1918) et peuvent survivre dans le sol pendant plusieurs années. Chacune de ses graines possède une structure nommée pappus formant une sorte de parachute aidant la graine à être transportée

par le vent, ce qui permet à cette plante d'atteindre des grandes distances de colonisation. Elle est également vivace et supporte des conditions climatiques très variables, allant aussi bien du soleil et de la sécheresse qu'à l'ombre et à l'humidité. Elle réussit également à s'implanter dans une large gamme de sol. On observe toutefois une préférence pour les sols riches en matière organique et pour les portions de sol nu. Il est donc conseillé d'éviter le surpâturage et la fertilisation trop importante. Les fauches trop tardives (après la formation des graines) participent aussi à la dispersion (Chambre d'agriculture de Normandie).

De plus, des études ont été menées pour déterminer des moyens de lutte agroécologique contre les pissenlits, se focalisant sur l'utilisation d'insectes ou de micro-organismes capables de réduire la capacité de germination des graines. La piste des champignons comme auxiliaire de culture a également été approfondie, comme pour le *Sclerotinia minor*, un ascomycète qui permettrait de réduire la production de graines. La principale limite de ces méthodes est la non-spécificité des auxiliaires, qui pourraient aussi affecter d'autres plantes d'intérêts comme les trèfles (Abu-dieyh & Watson, 2007).

D- Une étude à poursuivre avec une expérimentation de colonisation dirigée

Une alternative à la gestion des campagnols serait aussi de contrôler la colonisation, de manière à attirer les ravageurs dans une bande en limite de champs. La méthode Push-pull en écologie, consiste à diminuer l'attractivité de l'environnement que l'on désire protéger des ravageurs, tout en offrant simultanément un endroit possédant l'ensemble des critères d'intérêt de l'espèce pour la concentrer et faciliter son élimination (Cook *et al.*, 2007). Il serait intéressant de tester si la colonisation des campagnols peut être dirigée en fonction de la densité de pissenlits, ou si les campagnols se rabattraient sur d'autres espèces d'intérêts comme le trèfle. Nous nous attacherons donc dans cette partie à proposer un protocole pour étudier la faisabilité de la méthode push-pull dans le cas des campagnols.

Une expérimentation en plein champs ou dans une ferme expérimentale de l'INRAE de Clermont Ferrand, pourrait être mise en place pour tester cette hypothèse. Afin de déterminer si la colonisation peut être concentrée dans des bandes fleuries, il s'agirait de créer un champ avec une succession de bandes fleuries et de bandes dénuées de pissenlits. A l'aide du drone et de la télédétection, on pourrait observer si les bandes sans pissenlit sont délaissées au profit des bandes semées. Le champ devra contenir aussi des campagnols, en phase de croissance pour observer une colonisation, mais encore à basse densité pour éviter de saturer les bandes fleuries en cas déplacement. Cette expérience repose principalement sur la réussite de 2 actions :

- Semer des bandes de pissenlits afin d'avoir des zones à très haute densité de fleurs.
- Eliminer les pissenlits des bandes intermédiaires pour rendre les bandes fleuries plus appétentes mais sans labourer pour conserver le reste de la prairie.

Les graines de pissenlits sont facilement trouvables sur le marché et comme expliqué précédemment, sa nature vivace rend cette plante facile à faire germer. On peut également réutiliser des graines ou des plants sauvages en récoltant les graines ou tout le pied au printemps. Le semis doit se réaliser entre avril et juin, après les dernières gelées et la levée prend entre 15 jours et 1 mois.

La plus grosse difficulté va être de trouver une manière de retirer les pissenlits dans les bandes intermédiaires sans endommager le reste de la végétation. L'idéal serait de trouver un champ avec une faible densité de pissenlits initiale mais quelques campagnols, afin de n'avoir que le semis à effectuer. Sinon des solutions sont envisageables en fonction de la taille du champ testé :

- Les retirer à l'aide d'un arrache pissenlits en prenant garde de bien retirer la racine pour éviter la repousse.
- Appliquer des désherbants dit naturels comme du vinaigre pour tuer la plante, mais son utilisation obligerait une application spécifique sur le pissenlit pour ne pas éliminer les autres espèces.
- Utiliser un herbicide spécifique du commerce (type allié) mais qui aura un effet sur toute la communauté de dicotylédones, ce qui comprend des plantes d'intérêt pour les agriculteurs comme les légumineuses.

Même si l'ensemble des pissenlits n'est pas retiré au sein des bandes non-fleuries, il faut que la moyenne de pissenlits de ces dernières soit significativement plus faible que celle des bandes semées pour pouvoir avoir un résultat interprétable.

Une autre modalité à étudier pour la réalisation de cette expérience est la détermination de la taille des bandes non fleuries et des bandes fleuries. Si la colonisation dirigée fonctionne et est destinée à être applicable dans le monde agricole, il faut que la distance entre les bandes fleuries soit grande afin que l'agriculteur conserve un maximum de la surface de sa parcelle pour la fauche. Le but de cette expérience serait donc non seulement de déterminer si le déplacement des colonies peut être induit, mais aussi si cette méthode est une alternative de lutte viable et applicable pour les agriculteurs. Lors de notre expérience, nous avons observé qu'une colonie pouvait déléter les pissenlits dans un rayon d'environ 2,5 mètres. On peut supposer que la bande fleurie doit donc faire au moins cette taille pour soutenir une colonie dans la largeur. Une bande fleurie de 5 mètres permettrait de s'assurer la possibilité de l'implantation d'au moins une colonie tout en laissant une marge d'erreur. C'est aussi une taille raisonnable pour les agriculteurs, puisqu'il s'agit par exemple la taille des bandes tampons exigées en bordure de champs lors de la présence d'un cours d'eau.

Les mécanismes de dispersion chez les campagnols terrestres sont peu connus. Il a été prouvé que les juvéniles quittent la colonie parentale vers l'âge de 2 mois pour fonder leur propre colonie (Saucy & Schneiter, 1997). L'acte de dispersion est réalisé au cours de la nuit, de préférence une nuit pluvieuse, pour se protéger au mieux des prédateurs. La distance parcourue par les jeunes est malheureusement peu documentée, les seuls déplacements quantifiés sont compris entre 30 et 50m en moyenne, et peuvent atteindre plus rarement les 100m (Saucy & Schneiter, 1997). Lors de l'expérimentation, la distance entre 2 bandes fleuries doit donc être au minimum de 30 mètres. Il pourrait être intéressant de faire augmenter progressivement cette distance jusqu'au dépassement des 100 mètres, de manière à observer si la colonisation peut être dirigée avec des surfaces moins contraignantes pour les agriculteurs.

Conclusion

Ainsi, c'est pour proposer aux agriculteurs une alternative durable face à la pression exercée par les campagnols terrestres sur les prairies que l'unité USC1233 de VetAgro Sup a rejoint la recherche sur les causes du déclin cyclique des populations. Ce stage, inscrit dans une des étapes d'un programme FEDER, avait pour but de mettre en évidence les interactions entre les campagnols et les pissenlits. Afin d'estimer si cette espèce peut représenter un levier d'action, il est nécessaire de connaître son importance dans la dynamique des populations de ces ravageurs.

A l'aide de la télédétection et d'image prise par drone, nous avons dans un premier temps pu confirmer la déplétion des pissenlits par les colonies au cours de l'hiver. Les colonies s'étant installées à l'automne, et ayant passées l'hiver, se retrouvent dans des espaces où la densité de pieds de pissenlits est significativement plus faible que dans le reste de la parcelle. L'activité de prélèvement des pissenlits s'observent jusqu'à 2,5 mètres autour des tumuli de la colonie.

Il a ensuite été démontré que les pissenlits influencent la localisation et la persistance de la colonie dans un endroit. On relève que les nouvelles colonies s'installent préférentiellement au milieu de zones d'une trentaine de m², dont la densité de pieds de pissenlits est supérieure à la moyenne parcellaire. A l'inverse, les zones colonisées en mars et dont la densité de pissenlits est désormais inférieure à celle de la moyenne parcellaire sont délaissées en juin.

La capacité de la télédétection à percevoir les campagnols sur une grande surface est une perspective prometteuse dans la surveillance des foyers de pullulation, même si le lien entre la quantité de terre visible et le nombre d'individus présent reste encore difficile à établir. Cependant, le véritable gain de cette étude est la mise en avant d'une relation entre la présence de pissenlits et la colonisation. Une surveillance du territoire par drone, voire éventuellement par satellite, permettrait de connaître en amont quelles sont les parcelles à risque. Il pourrait également être pertinent de réaliser une étude afin de déterminer si la colonisation, au-delà de la simple prédiction, peut être dirigée. La création de bande fleuries, localisées en périphérie des champs, et pourraient éventuellement servir à concentrer les campagnols afin de protéger la culture. Si elle fonctionne, cette méthode offrirait un moyen peu onéreux aux agriculteurs pour lutter contre les campagnols, tout en réduisant leur dépendance aux molécules biocides du commerce.

Bibliographie

Abu-dieyh, M., Watson, A. K. (2007). Grass overseeding and a fungus combine to control *Taraxacum officinale*. *Journal of applied ecology*. 44(1), 115-124.

Airoldi, J. P. (1975). Le terrier de la forme fouisseuse du campagnol terrestre, *Arvicola terrestris* scherman Shaw (Mammalia, Rodentia). *Zeitschrift für Säugetierkunde : im Auftrage der Deutschen Gesellschaft für Säugetierkunde e.*, 41, p.23-42.

AGRESTE (2010), Superficie agricole utilisée des exploitations [en ligne] https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/G_2003/detail/

Anisiu, M. C. (2014). Lotka, Volterra and their model. *Didáctica matemática*, 32, p.9-17.

Batzli G., Pitelka F. (1971) Condition and diet of cycling populations of the California vole, *Microtus californicus*. *Journal of Mammalogy*. 52,1, p.141-163.

Butault JP., Delame N., Jacquet F., Zardet G. (2012). Productions & Filières. L'utilisation des pesticides en France : état de lieux et perspectives de réduction. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Notes et études socio-économique, 35, p7-26 [en ligne] <https://agriculture.gouv.fr/lutilisation-des-pesticides-en-france-etat-des-lieux-et-perspectives-de-reduction>

Butet A., Burel F., Delettre Y., Michel N. (2007). Bocages et biodiversité, évolution des assemblages d'espèces sous l'effet de l'intensification de l'agriculture. In : Antoine A., Marguerie D. *Actes du colloques « Bocages et biodiversité »*. Presses Universitaires de Rennes. p 231-238.

Chambre d'agriculture de Normandie (s.d). Désherbage des prairies. Agricultures & territoires, chambre d'agriculture de Normandie [en ligne] <https://normandie.chambres-agriculture.fr/conseils-et-services/produire-thematiques/elevage/fourrages/prairies/desherbage-des-prairies/>

Coeurdassier M., Berny P., Couval G., Decors A., Jacquot M., Queffélec S., Quintaine T., Giraudoux P. (2014). Evolution des effets non intentionnels de la lutte chimique contre le campagnol terrestre sur la faune sauvage et domestique. *Fourrage*. 220, p.327-335.

Cook S., Khan Z., Pickett J. (2007). The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*. 52(1), p.375-400.
DOI : 10.1146/annurev.ento.52.110405.091407

Dalgaard T., Hutchings N., Porter J. (2003). Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 100, p.39-51.
DOI : 10.1016/S0167-8809(03)00152-X

Delattre P, Giraudoux P (2009) Le campagnol terrestre : prévention et contrôle des populations, *Quae*, 307p (Collection *Savoir-faire*)

Direction Régional de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (2016) Panorama en chiffres et en cartes, *Agreste Auvergne-Rhône-Alpes Références*. 1, 86p.

Direction Régional de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (2018) La première prairie de France : analyse croisée de son évolution depuis 1955, *Agreste Auvergne-Rhône-Alpes Références*. 11, 4p.

Duriez, JL. (2010). Mission d'expertise concernant les destructions occasionnées par les campagnols en Franche-Comté, dans le Massif-Central et dans le Massif des Alpes. *Rapport du conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux*. 10 176. 67p.

Gillissen C. (2015). Introduction, in : Rynne F., Pole A., *La grande famine en Irlande*. Neuilly-sur-Seine : Atlande, 2015, p. 15-33.

- Giraudoux P., Delattre P., Harbert M., Quéré J.P, Deblay S., Defaut R., Duhamel R., Moissenet M., Salvi D., Truchetet D., (1997), Population dynamics of fossorial water vole (*Arvicola terrestris scherman*): a land use and landscape perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environnement*, 66, p.47-60.
- Goulamoussène Y., Perrot E., Toumazet JP., Michelin Y., Dureau R., Vautier F. (2020) Développement d'une méthode de surveillance par drone pour la lutte raisonnée contre les campagnols terrestres. *Fourrages*, 243, p.21-30.
- Graham I, Lambin X (2002). *The impact of weasel predation on cyclic field- vole survival : the specialist predator hypothesis contradicted*. *Journal of Animal Ecology*, 71(6), 946-956.
- Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W. M., Railsback, S., Thulke, H.-H., Weiner, J., Wiegand, T., DeAngelis, D. L (2005). Pattern-oriented modeling of agent based complex systems: lessons from ecology. *Science*, 310, 987–991.
- Huitu O., Koivula M., Korpimäki E., Klemola T., Norrdahl K., Winter food supply limit growth of Nother vole population in the absence of predation. *Ecology*, 84, 8, p.2108-2118.
- Kopp, R. (1988) Les choix alimentaires de la forme fouisseuse du Campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*) : essais en terrarium. *EPPO Bulletin*, 18, p393-400.
- Leroux, S. J., Loreau, M. (2015) Theoretical perspectives on bottom-up and top-down interactions across ecosystems. In : *Trophic Ecology: Bottom-up and Top-down Interactions across Aquatic and Terrestrial Systems*. Cambridge University Press. p3-28.
- Longyear B. (1918), The dandelion in Colorado. *Agricultural Experimental Station Agriculture College of Colorado*, Colorado : Experiment station of Ford Collins, 236, p.1-35.
- Meyer, G. E., & Neto, J. C. (2008). Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
- Morilhat C. (2005) Influence du système sol – végétation – pratiques agricoles des prairies franc - comtoises sur la dynamique de population de la forme fouisseuse du campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman shaw*, 1801). Thèse. Science de la Vie. Université de Franche-Comté. 209p.
- Moses-Gonzales N., Brewer M. (2021) A Special Collection : Drones to Improve Insect Pest Management. *Journal of Economic Entomology*. 81, <https://doi.org/10.1093/jee/toab081>
- Note, P., Poix, C. (2006). Simulations spatialisées des pullulations de campagnols terrestres: Etude de l'influence des structures paysagères. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, (s.d) La lutte contre les ravageurs. FAO [en ligne] <http://www.fao.org/focus/f/SpeclPr/spro12-f.htm>
- Pingali, P. L. (2012). Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Science*. 109(31), p12302-12308.
- Riba G., Silvy C. (1989). Combattre les ravageurs des cultures : enjeux et perspectives. INRA. Paris. 233p.

Sache Y. (2021) Mondialisation des échanges et des changements climatiques : plantes, parasites et ravageurs sans frontières. In : Société Nationale d'Horticulture de France, *Santé des plantes : mieux les protéger dans leur environnement* (Colloque du 1^{er} au 8 février 2021). Paris. p.13-16

Saucy F. (1988). Description des cycles pluriannuels d'*Arvicola terrestris* scherman en suisse occidentale par la méthode de l'analyse des séries temporelles. *Bulletin OEPP* (European and Mediterranean Plant Protection Organization),18, p401-413.

Saucy, F., Schneiter, B. (1997). Juvenile dispersal in the vole *Arvicola terrestris* during rainy nights: a preliminary report. *Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles*, 84(4), p.333-345.

Sobczyk-Moran G. (2018). *Structures des populations de campagnols terrestres en lien avec la végétation à la sortie de l'hiver*. Mémoire universitaire. Sciences de l'Univers, environnement, évolution. Paris : Université Paris-Saclay. 38p.

Thomine E. (2019) *Effet de la diversification spatiale et temporelle des cultures à l'échelle du paysage agricole sur le biocontrôle et les ravageurs de culture*. Thèse. Sciences agricoles. Université Côte d'Azur.

Tricault Y. (2010) *Paysage : quel impact sur les ravageurs et leurs auxiliaires ?* [en ligne] Rapport des journées techniques fruits et légumes biologiques. Angers. p39-42

Truchetet D., Couval G., Michelin Y., Giraudoux P. (2014) Genèse de la problématique du campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*) en prairies. *Fourrages*, 220, p.279-284

Tsayem Demaze M. (2002) *Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection : application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil*. Thèse. Sciences de l'Homme et Société. Université d'Orléans.

Villette P. (2018). *Spatial and Temporal Characteristics of Bacterial Parasite Communities in Outbreking Fossorial Water Vole (*Arvicola terrestris*) Populations : Static Uniformity or Dynamic Heterogeneity ?* Thèse. Environnement-santé. Université Bourgogne Franche-Comté. 176p.

ANNEXES

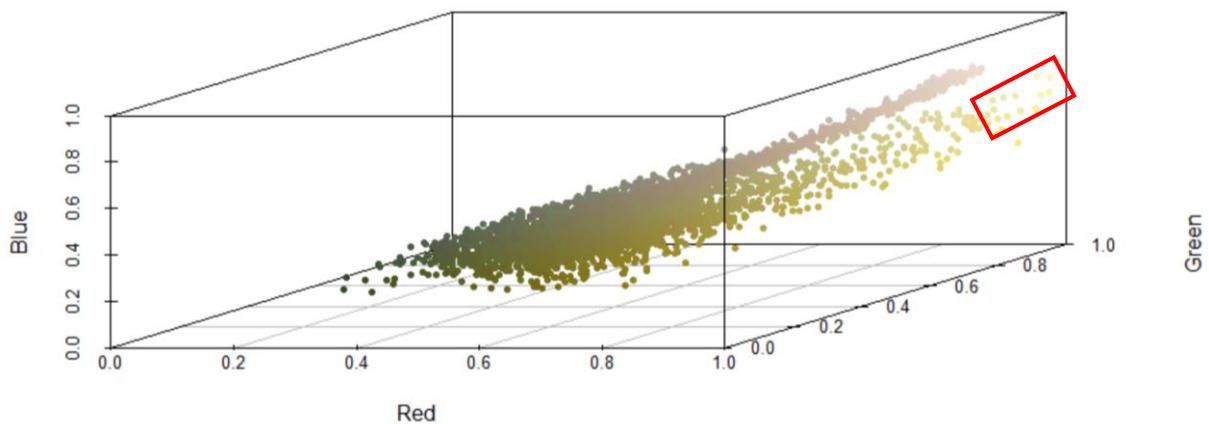
Liste des Annexes

Annexe i : Fonctionnement de la fonction countcolors de R	1
Annexe ii : Script R de l'analyse d'image grâce à une grille de 4m ²	2
Annexe iii : Script R pour la mesure de la distance de déplétion des pissenlits par campagnols	4
Annexe iv : Détermination des pixels colonisés en juin	8

Annexe i : Fonctionnement de la fonction countcolors de R

La fonction `countcolors` se trouve dans le package R éponyme. Elle permet de sélectionner les pixels d'une image, contenus dans une gamme de couleur définie à l'aide d'un rang inférieur et un rang supérieur. La fonction nécessite des images au format JPG et contenant les 3 bandes de couleurs rouge, verte et bleue (RGB), chaque bande de couleur étant comprise entre 0 et 1.

```
low_rectangular_PI <- c(0.6, 0.7, 0.0)
upper_rectangular_PI <- c(1, 1, 0.90)
img_Mai_PI <- countcolors::rectangularRange(img_Mai ,upper = upper_rectangular_PI, lower =
low_rectangular_PI)
```



Sélection des pixels dont la couleur est relative aux pissenlits

Annexe ii : Script R de l'analyse d'image grâce à une grille de 4m²

```

library(countcolors)
library(raster)
library(sp)
library(terra)
library(imager)

# <><><><> Etape 1 : importation la photographie

img_Mars <- jpeg::readJPEG("Q1_decoup.JPG")
img_Mai  <- jpeg::readJPEG("Q1_decoupe_pissenlit.JPG")

paste("img_Mars, R:",range(img_Mars[,1]), ", G:", range(img_Mars[,2]), ", B:",range(img_Mars[,3]))
paste("img_Mai, R:",range(img_Mai[,1]),", G:", range(img_Mai[,2]), ", B:",range(img_Mai[,3]))

# <><><><> Etape 2 : Conversion de la photographie avec l'indice ExGR
image <- load.image("Q1_decoup.JPG")
r<-R(image); g<-G(image); b<-B(image)

ExGR    <- (3*g-2.4*r - b)
EXGR_red  <- (ExGR[,1,1]+abs(min(ExGR[,1,1]))) #Retrait des valeurs négatives non prises par
countcolors
EXGR_red_cent <- EXGR_red/max(EXGR_red) #Centré

img_MarsMod  <- img_Mars
img_MarsMod[,1] <- t(EXGR_red_cent)
plotArrayAsImage(img_MarsMod)

# <><><><> Etape 3 : Détermination de la gamme de couleur à sélectionner
low_rectangular_TER <- c(0, 0, 0)
upper_rectangular_TER <- c(0.38,0.8, 1)

low_rectangular_PI <- c(0.6, 0.7, 0.0)
upper_rectangular_PI <- c(1, 1, 0.90)

# <><><><> Etape 4 : Sélection des pixels d'intérêt

img_Mars_selected_TER <- countcolors::rectangularRange(img_MarsMod ,upper =
upper_rectangular_TER, lower = low_rectangular_TER)

img_Mai_selected_PI <- countcolors::rectangularRange(img_Mai ,upper = upper_rectangular_PI,
lower = low_rectangular_PI)

```

```
plotArrayAsImage(img_Mars_selected_TER$indicator.img)
plotArrayAsImage(img_Mai_selected_PI$indicator.img)
```

<><><><> Etape 5 : Transformation de la photographie en image binaire

```
BIN_TER <- img_Mars_selected_TER$indicator.img[,1]
BIN_TER[,] <- 0
Xpiss <- img_Mars_selected_TER$pixel.idx[,1]
Ypiss <- img_Mars_selected_TER$pixel.idx[,2]
for(i in 1:length(Xpiss)){
  BIN_TER[Xpiss[i], Ypiss[i]] <- 1
}
BIN_PI <- img_Mai_selected_PI$indicator.img[,1]
BIN_PI[,] <- 0
Xpiss <- img_Mai_selected_PI$pixel.idx[,1]
Ypiss <- img_Mai_selected_PI$pixel.idx[,2]
for(i in 1:length(Xpiss)){
  BIN_PI[Xpiss[i], Ypiss[i]] <- 1
}
```

<><><><> Etape 6 : Transformation de l'image binaire en raster

```
EXT <- c(0,8000,0,6000)
RAST_ter_row <- raster(BIN_TER)
RAST_ter_row@extent@xmax <- EXT[2]
RAST_ter_row@extent@ymax <- EXT[4]
RAST_pi_row <- raster(BIN_PI)
RAST_pi_row@extent@xmax <- EXT[2]
RAST_pi_row@extent@ymax <- EXT[4]
```

<><><><> Etape 6 : Mise en place d'une grille de 2x2m

```
GridSize <- 200

GRID_2b2 <- raster(nrow=abs(EXT[4]-EXT[3])/GridSize ,ncol=abs(EXT[2]-EXT[1])/GridSize )
GRID_2b2@extent@xmin <- EXT[1]
GRID_2b2@extent@xmax <- EXT[2]
GRID_2b2@extent@ymin <- EXT[3]
GRID_2b2@extent@ymax <- EXT[4]

RAST_ter_2b2 <- resample(RAST_ter_row, GRID_2b2, method="bilinear")
RAST_pi_2b2 <- resample(RAST_pi_row, GRID_2b2, method="bilinear")
RAST_ter_2b2_V2 <- RAST_ter_2b2
RAST_ter_2b2_V2@data@values[] <- 0
RAST_ter_2b2_V2@data@values[RAST_ter_2b2@data@values>0.025] <- 1
```

```
# <><><><> Etape 6 : Export des informations sous la forme d'un tableau
```

```
RESP <- data.frame(Quadrat      = "Q1",
  num_pixel      = 1 : length(RAST_pi_2b2@data@values),
  Moyjauneparcelle = mean(RAST_pi_2b2@data@values),
  Moyterreparcelle = mean(RAST_ter_2b2@data@values),
  Sum_carre_occ   = sum(RAST_ter_2b2_V2@data@values),
  Stade_physio   = 2,
  Indice_taupe   = 0,
  Pratiques_pb_mars = "B",
  Pratiques_pb_mai  = "A",
  Perc_terre_mars = RAST_ter_2b2@data@values,
  Perc_jaune_mai  = RAST_pi_2b2@data@values)
write.table(RESP, "Q1.txt", sep="\t")
```

Annexe iii : Script R pour la mesure de la distance de déplétion des pissenlits par campagnols

```
library(countcolors)
library(raster)
library(sp)
library(terra)
library(imager)
library(rgeos)
```

```
# <><><><> Etape 1 : Importation de la photographie
```

```
Img_Mars <- jpeg::readJPEG("Q39_decoup.JPG")
Img_Mai <- jpeg::readJPEG("Q39_decoupe_pissenlit.JPG")
image <- load.image("Q39_decoup.JPG")
```

```
# <><><><> Etape 2 : Conversion de la photographie avec l'indice ExGR
```

```
r<-R(image); g<-G(image); b<-B(image)
ExGR <- (3*g-2.4*r - b)
EXGR_red <- (ExGR[,1,1]+abs(min(ExGR[,1,1])) )
EXGR_red_cent <- EXGR_red/max(EXGR_red)
Img_MarsMod <- Img_Mars
Img_MarsMod[,1] <- t(EXGR_red_cent)
plotArrayAsImage(Img_MarsMod)
```

```
# <><><><> Etape 3 : Détermination de la gamme de couleur à sélectionner
```

```
low_rectangular_TER <- c(0, 0, 0)
upper_rectangular_TER <- c(0.35,0.7, 1)
```

```
low_rectangular_PI <- c(0.90, 0.90, 0)
upper_rectangular_PI <- c(1, 1, 0.90)
```

```
# <><><><> Etape 4 : Sélection des pixels d'intérêt
```

```
Img_Mars_selected_TER <- countcolors::rectangularRange(Img_MarsMod ,upper =
upper_rectangular_TER, lower = low_rectangular_TER)
```

```
Img_Mai_selected_PI <- countcolors::rectangularRange(Img_Mai ,upper = upper_rectangular_PI,
lower = low_rectangular_PI)
```

```
# <><><><> Etape 5 : Transformation de la photographie en image binaire
```

```
BIN_TER <- Img_Mars_selected_TER$indicator.img[,1]
BIN_TER[,] <- 0
Xpiss <- Img_Mars_selected_TER$pixel.idx[,1]
Ypiss <- Img_Mars_selected_TER$pixel.idx[,2]
for(i in 1:length(Xpiss)){
  BIN_TER[Xpiss[i], Ypiss[i]] <- 1
}
```

```
BIN_PI <- Img_Mai_selected_PI$indicator.img[,1]
BIN_PI[,] <- 0
Xpiss <- Img_Mai_selected_PI$pixel.idx[,1]
Ypiss <- Img_Mai_selected_PI$pixel.idx[,2]
for(i in 1:length(Xpiss)){
  BIN_PI[Xpiss[i], Ypiss[i]] <- 1
}
```

```
# <><><><> Etape 6 : Vectorisation
```

```
# Cadrage de l'image et rasterisation (1pixel=1cm)
```

```
Xpix <- length(BIN_PI[1,])/100
Ypix <- length(BIN_PI[,2])/100
```

```
RASTPisAll <- raster(BIN_PI,xmn=0, xmx=Xpix, ymn=0, ymx=Ypix)
RASTTerAll <- raster(BIN_TER,xmn=0, xmx=Xpix, ymn=0, ymx=Ypix)
```

```

# -----
# Boucle pour la vectorisation
# -----
CutBy = 10    # Découpage en bande pour ne pas dépasser la capacité de R

Xsummits <- seq(extent(RASTPisAll)[1],extent(RASTPisAll)[2],length.out=(CutBy+1))
Ysummits <- c(extent(RASTPisAll)[3],extent(RASTPisAll)[4])

for(Poly in 1 : (CutBy)){

  # A - Création des polygones
  p=Polygon(data.frame(X=c(Xsummits[Poly],Xsummits[Poly],Xsummits[Poly+1],Xsummits[Poly+1]),Y=c
(Ysummits[1],Ysummits[2],Ysummits[2],Ysummits[1])))
  ps = Polygons(list(p),1)
  sps = SpatialPolygons(list(ps))

  # B - Recadrage par petits polygones
  RASTER_intermed <- crop(RASTPisAll,sps)
  RASTER_intermed2 <- crop(RASTTerAll,sps)

  # C - vectorise small raster
  POLYGON_intermed <- rasterToPolygons(RASTER_intermed,function(x){x==1},n=8,dissolve = T)
  POLYGON_intermed2 <- rasterToPolygons(RASTER_intermed2,function(x){x==1},n=8,dissolve = T)

  # D - Numéro de la bande
  print(paste(Poly,"/",CutBy))

  # E - Conservation des polygones plus petits que le seuil
  Threshold <- 0.03*0.03
  Large_yellow<- vector()
  for (i in 1:length(POLYGON_intermed@polygons[[1]]@Polygons)){ # Mesure de l'aire de chaque
polygone
  if (POLYGON_intermed@polygons[[1]]@Polygons[[i]]@area>Threshold) Large_yellow<-
rbind(Large_yellow,i)
  }

  Threshold <- 0.05*0.05
  Small_taches <-vector()
  for (i in 1:length(POLYGON_intermed2@polygons[[1]]@Polygons)){
  if (POLYGON_intermed2@polygons[[1]]@Polygons[[i]]@area<Threshold) Small_taches<-
rbind(Small_taches,i)
  }
}

```

```

# F - Sélection des polygones retenus pour la terre et les pissenlits
POLY_pi2 <- POLYGON_intermed
POLY_pi2@polygons[[1]]@Polygons <- POLYGON_intermed@polygons[[1]]@Polygons[-
as.vector(Large_yellow)]

POLY_ea2 <- POLYGON_intermed2
POLY_ea2@polygons[[1]]@Polygons <- POLY_ea2@polygons[[1]]@Polygons[-
as.vector(Small_taches)]

# H - Collecte des centroïdes
Centroids_pi <- data.frame(X=NA,Y=NA,Area=NA)
for(j in 1:length(POLY_pi2@polygons[[1]]@Polygons) ){
  Centroids_pi <- rbind( Centroids_pi,
c(POLY_pi2@polygons[[1]]@Polygons[[j]]@labpt,POLY_pi2@polygons[[1]]@Polygons[[j]]@area))}
Centroids_pi <- na.omit(Centroids_pi)

# I - Transformation des centroïdes en point spatial
PPI_to_trash <- SpatialPoints(Centroids_pi[,c(1,2)], bbox = sp::bbox(POLY_pi2))

# J - Conservation des points dans un objet transitoire
if(Poly == 1){POINT_pi <- PPI_to_trash ; POLY_camp <- POLY_ea2 }
if(Poly > 1) {POINT_pi <- bind(POINT_pi,PPI_to_trash) ; POLY_camp <- bind(POLY_camp,POLY_ea2) }
}

# -----
# Fin de la boucle avec un objet contenant l'ensemble des polygones des colonies, et un objet avec
les centroïdes des pissenlits
# -----

plot(POINT_pi,col="yellow")
plot(POLY_camp,add=T)

# <><><><> Etape 7 : Mise en place des buffers

# Création d'un tableau pour contenir les résultats
RESP <- data.frame(Dist = exp(seq(log(0.05),log(5),length.out=10)),
  Surf = NA,
  Nflower = NA)

# Mise en place des polygones
p = Polygon(data.frame(X=c(0,0,Xpix,Xpix),Y=c(Ypix,0,0,Ypix)))
ps = Polygons(list(p),1)
sps = SpatialPolygons(list(ps))
POLY_ea3 <- disaggregate(POLY_camp)

```

```

# Boucle de création des buffers
for(d in 1:length(ESP$Dist)){
  Buf1 <- buffer(POLY_ea3, width=ESP$Dist[d])
  Bufc <- gIntersection(Buf1,sps)

  ESP$Surf[d] <- area(Bufc)/(1000000)
  Buff_rast <- raster(Bufc,ext=extent(0, Xpix, 0, Ypix))

  ESP$Nflower[d] <- length(POINT_pi[Bufc]@coords[,1])
  print(paste(d,"/",length(ESP$Dist)))
}

# Compilation
ESP$Dflower <- ESP$Nflower/ESP$Surf
ESP$DflowerMean <- length(Centroids_pi[,1])
AverAge <- max(ESP$DflowerMean)/ max(ESP$Surf)
ESP$Dflowers <- ESP$Dflower/AverAge

##Extraction de l'information dans un tableau
RESUME <- data.frame(Quadrat = "Q39",
  Distance= Dist,
  Densite= ESP$Dflower,
  Densite_moy =ESP$Dflowers)
write.table(RESUME, "Q39.txt", sep="\t")

# Figure finale
plot(Dflowers*100 ~ l(Dist),data=RESUME,type="l",lwd=4,col="red",ylab="Pourcentage de fleurs par
rapport à la moyenne",xlab="Distance (m)",cex.lab=1.5)

```

Annexe iv : Détermination des pixels colonisés en juin

```

##Application de la même méthode que dans l'Annexe ii. pour les images de juin
# <><><><> Etape 1 : Création d'un fichier avec toutes les informations
A<-dir()
B <- substring(A,1,nchar(A)-4)
for(i in 1:length(A)){
  assign(B[i],read.table(A[i])) # sep="/t",dec=".",head=T

TOTAL <- get(B[1])
for(i in 2:length(B)){

```

```

TOTAL <- rbind(TOTAL,get(B[i])) }
write.table(TOTAL, "TOTAL_final.txt", sep="\t",head=TRUE)

# <><><><> Etape 2 : Préparation du fichier à l'étude

Pixel_table <- read.table("TOTAL_final.txt",sep="\t",head=T)

Nom_quadrat <- unique(as.factor(Pixel_table$Quadrat))

FirstP <- seq(1,length(Pixel_table$Quadrat),1200) #1er pixel de chaque quadrat
LastP <- seq(1200,length(Pixel_table$Quadrat),1200) #Dernier pixel de chaque quadrat
# seuil de terre à partir duquel on considère que le pixel est colonisé
treshold <- 0.025

# <><><><> Etape 3 : Boucle pour calculer la présence des indices en fonction des voisins

## boucle 1 : Délimitation de chaque quadrat
for(i in 1:length(Nom_quadrat)){

  SUB <- Pixel_table[Pixel_table$Quadrat == Nom_quadrat[i],]
  SUB$ColMars <- 0
  BORDER <- c(c(1:40),seq(41,1160,40),seq(80,1160,40),c(1160:1200)) #On détermine les pixels des
bordures pour pouvoir ensuite ne pas les prendre en compte car sans voisins
  SUB$AvNb_pied <-0

  ## boucle 2 : Comparaison de la colonisation des pixels avec leurs voisins
  for(i_pix in c(c(1:1200)[- BORDER] )) {
    Yellow <- SUB$Perc_jaune_mai[SUB$num_pixel%in% c(i_pix+c(-c(41:39),-1,+1,+c(39:41)))]
    SUB$AvNb_pied[i_pix] <- (mean(Yellow)*40000/7)/ SUB$Stade_physio[i_pix]
    BROWN <- SUB$Perc_terre_Mars[SUB$num_pixel%in% c(i_pix+c(-c(41:39),-1,+1,+c(39:41)))]
  # récupération de la teneur en terre des voisins directs du pixel étudié

  # <><><><> Etape 4 : Marquage des pixels nouvellement colonisés

  if(length(BROWN[BROWN>treshold]) > 0 ) {SUB$ColMars[i_pix] <- 1}
  }
  SUB$ColJuin <- 0
  SUB$ColJuin[SUB$Perc_terre_juin>treshold] <- 1

  # <><><><> Etape 4 : Calcul des champs nécessaire à l'analyse

  SUB$HT <- as.factor(paste(SUB$ColMars,SUB$ColJuin,sep="" ) ) #Evolution de la colonisation du
pixel : 00, 01, 10,11 (avec 0 non colonisé et 1 colonisé)
  SUB$Nb_pied <- ((SUB$Perc_jaune_mai *40000/7)/ SUB$Stade_physio )
  SUB$Mean_pied <- mean(SUB$Nb_pied )
  SUB$ANOM <- (SUB$Nb_pied-SUB$Mean_pied )/ SUB$Mean_pied

```

<><><><> Etape 5 : Retranscription dans la table d'origine

```
Pixel_table$ColMars[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- SUB$ColMars
Pixel_table$ColJuin[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- SUB$ColJuin
Pixel_table$Nb_pied[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- ((SUB$Perc_jaune_mai *40000/7)/
SUB$Stade_physio )
Pixel_table$Mean_pied[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- mean(SUB$Nb_pied )
Pixel_table$ANOM[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- (SUB$Nb_pied-SUB$Mean_pied) / SUB$Mean_pied
Pixel_table$AvNb_pied[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- SUB$AvNb_pied
Pixel_table$AvterreAv[c(FirstP[i]:LastP[i])] <- mean(SUB$Perc_terre_Mars )
Pixel_table$HT <- as.factor(paste(Pixel_table$ColMars,Pixel_table$ColJuin,sep="" )
}
```

Résumé :

Bien que l'évolution du modèle agricole au cours du siècle passé ait permis d'assurer des rendements jusqu'alors inenvisageables, elle eut également pour conséquence une sensibilité accrue des cultures aux ravageurs. En effet, depuis les années 1970, le Massif central doit faire face à la présence envahissante du campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*). Capable d'atteindre de très hautes densités d'individus par hectare en période de pullulation, ce rongeur est responsable de la destruction des prairies, provoquant des pertes économiques conséquentes. Afin de trouver une alternative agro-écologique à l'usage de la bromadiolone VetAgro Sup, soutenu par des financements FEDER, recherche des leviers agronomiques pouvant être utilisés par les agriculteurs afin de réduire la pression exercée par ce ravageur. Cette étude s'intéresse à l'influence du pissenlit (*Taraxacum officinale*), connu pour être une part importante de leur alimentation, dans la dynamique des populations de campagnols. A l'aide d'un drone, un suivi par télédétection a pu être réalisé sur une vingtaine d'hectares, répartie en 40 quadrats à l'Ouest de la chaîne des Puys (63). Les résultats montrent que les colonies ayant passées l'hiver se trouvent dans des zones moins denses en pissenlits que le reste de la parcelle et que le rayon de déplétion autour de la colonie est de 2,5 m. A l'inverse, les zones plus denses en pissenlits sont colonisées préférentiellement au cours du printemps et les colonies s'y maintiennent plus longtemps. Cette étude ouvre des perspectives d'utilisation des pissenlits comme un moyen de concentration des campagnols en périphérie des champs.

Mots-clés : campagnol terrestre, pissenlits, télédétection, Massif central, ravageurs

Abstract :

If the evolution of the agricultural model over the past century has provided huge yields, it has also resulted in crop awareness of pests. Since the 1970s, the Massif central has to deal with the troublesome presence of the fossorial water vole (*Arvicola terrestris scherman*). This rodent is capable to reach very high populations during their periodical outbreaks, causing the destruction of grasslands thus significant economic issues. In order to find an alternative to the use of Bromadiolone, VetAgro Sup, supported by FEDER funding, is looking for agronomic levers that can be used by farmers to reduce the pest pressure. This study focuses on the influence of the dandelion (*Taraxacum officinale*) on the dynamics of vole populations knowing that this plant is an important part of their diet, With a drone, the remote sensing was carried out over some 20 hectares which are divided into 40 quadrats in the West part of the Puy chain. The results show that colonies which were established before the beginning of winter, are located in areas less dense with dandelions than the rest of the plot. Their depletion radius around the colony is 2,5m. At the same time, areas concentrated in dandelions are colonized preferentially during spring and the colonies stay longer. This study is the first step for the use of dandelions as a mean of concentrating voles on the periphery of fields.

Key-words : fossorial water vole, dandelion, remote sensing, Massif central, pest