



HAL
open science

Gestion collective d'un risque ravageur pour améliorer la résilience des systèmes fourragers. Modélisation bioéconomique de la gestion des pullulations de campagnols terrestres

Romain Dureau

► **To cite this version:**

Romain Dureau. Gestion collective d'un risque ravageur pour améliorer la résilience des systèmes fourragers. Modélisation bioéconomique de la gestion des pullulations de campagnols terrestres. Economies et finances. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2020. Français. NNT : 2020CLFAD009 . tel-03150835

HAL Id: tel-03150835

<https://theses.hal.science/tel-03150835>

Submitted on 24 Feb 2021

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

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



Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Clermont Auvergne

Ecole d'Economie de Clermont-Ferrand, Université Clermont Auvergne
Ecole doctorale *Sciences Economiques, Juridiques, Politiques et de Gestion* (ED 245)

Unité Mixte de Recherche Territoires

GESTION COLLECTIVE D'UN RISQUE RAVAGEUR POUR AMÉLIORER LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES FOURRAGERS

Modélisation bioéconomique de la gestion des pullulations de campagnols terrestres

Romain DUREAU

Sous la direction de

Pr **Philippe JEANNEAUX**, UMR *Territoires*, directeur

Pr **Yves MICHELIN**, UMR *Territoires*, co-directeur

Soutenue le 9 décembre 2020

Membres du Jury

Mme **Sylvie LUPTON**, enseignante-chercheure, Institut Polytechnique UniLaSalle, **rapporteure**

M. **Alexandre GOHIN**, directeur de recherche INRAE, **rapporteur**

Mme **Claire MOSNIER**, chargée de recherche INRAE

M. **Claude-Denys FLUET**, professeur d'économie, Université Laval (Québec)

M. **Yves MICHELIN**, professeur d'agronomie, VetAgro Sup, **co-directeur de thèse**

M. **Philippe JEANNEAUX**, professeur d'économie, VetAgro Sup, **directeur de thèse**

Mme **Pascale MOTEL-COMBES**, professeure des Universités, Université Clermont Auvergne, **présidente**

*L'université n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans cette thèse.
Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.*

RESUME

Gestion collective d'un risque ravageur pour améliorer la résilience des systèmes fourragers. Modélisation bioéconomique de la gestion des pullulations de campagnols terrestres

Depuis les années 1970, certains territoires d'élevage de moyenne montagne fortement spécialisés dans la production herbagère subissent les pullulations régulières et intenses d'un rongeur ravageur des prairies : le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*). Tous les 5 à 10 ans selon les caractéristiques locales du paysage, les prairies exposées voient leur production fourragère diminuer de 50% en moyenne, déstabilisant les systèmes fourragers et occasionnant des pertes économiques significatives. Malgré les méthodes de lutte directes et indirectes proposées, la dimension collective de la gestion de ce risque sanitaire et les coûts associés à la lutte rendent difficile la mobilisation des éleveurs. Au-delà de l'efficacité technique des méthodes de lutte, nous proposons d'interroger les défaillances de l'action collective au regard des institutions et des incitations mises en place pour augmenter la participation des éleveurs à la maîtrise des populations de rongeurs. Notre objectif est de déterminer la ou les stratégie(s) de gestion les plus pertinentes pour créer les conditions d'un meilleur engagement des éleveurs dans la lutte. Notre méthodologie repose d'une part sur trois séries d'enquêtes qualitatives auprès d'éleveurs et d'acteurs institutionnels, et d'autre part sur une approche par la modélisation des systèmes fourragers en situation d'aléas multiples (jeu sérieux) et des incitations à la lutte contre les pullulations (modèle multiagent informatique). Nous démontrons que les coûts élevés relatifs à l'action collective (coûts directs, coûts d'opportunité, coûts de transaction) sont un élément important pour expliquer la sous-implication des éleveurs, mais qu'il convient d'interroger plus globalement le manque d'action collective comme un manque de coordination. La théorie néo-institutionnelle et la théorie du capital social sont intéressantes pour analyser cette situation paradoxale de groupe latent au sens d'Olson (1965). Nous proposons de concevoir l'action collective comme un iceberg dont la partie émergée (les structures formelles : institutions, contrats, subventions, coûts) ne peuvent exister que s'il existe une partie immergée conséquente (les structures informelles ou capital social : connaissance, partage, confiance, réseaux, information). Notre étude aboutit à la formulation de recommandations de politiques publiques afin de renforcer l'efficacité des dispositifs déjà en place.

Mots-clés : risque, ravageur, action collective, campagnol terrestre, prairie, système fourrager, coordination, assurance

ABSTRACT

Collective management of a pest risk to improve the resilience of fodder systems. Bio-economic modeling of the management of voles' outbreaks

Since the 1970s, some territories located in middle mountain areas and strongly specialized in grass-based breeding have been undergoing intense and frequent outbreaks of a small rodent causing damages to meadows: the vole (*Arvicola terrestris scherman*). Every 5 to 10 years, depending on local landscape, fodder production of exposed meadows can be reduced by 50% on average, which can disrupt fodder systems and cause important economic losses. Despite the direct and indirect control methods which are currently available, the collective dimension of risk management along with the associated costs noticeably reduce breeders' intervention. Beyond the efficiency of control methods, we propose analyzing the failure of collective action regarding institutions and incentives set up to increase breeders' involvement in the collective action to control voles' outbreaks. Our goal is to determine relevant management strategies to create the conditions for a greater involvement of breeders in voles' control. Our methodology relies on three series of qualitative interviews with

breeders and institutional actors as well as on a modelling approach of fodder systems facing multiple risks (serious game) and incentives to collective action (multiagent modeling). We show that the costs of collective action (direct costs, opportunity costs, transaction costs) are an important element to explain the under-investment of breeders. Nevertheless, we argue we should also investigate more globally the lack of collective action as a lack of coordination. New institutionalism and social capital theory are interesting entry points to analyze this paradoxical state of latent group, as defined by Olson (1965). We propose defining collective action as an iceberg whose emerged part (formal structures: institutions, contracts, subventions, costs) couldn't exist without a consistent immersed part (informal structures or social capital: knowledge, sharing, trust, networks, information). Our study leads to public policy recommendations aiming at increasing efficiency of existing institutions.

Key words: risk, pest, collective action, vole, meadow, fodder system, coordination, insurance



J'ai remarqué que même les gens qui affirment que tout est prédestiné et que nous ne pouvons rien y changer regardent avant de traverser la rue.

Stephen Hawking (1942-2018)

Trous noirs et Bébés univers (1993)

Remerciements

L'écriture des remerciements est, paraît-il, l'un des moments les plus difficiles de la rédaction d'une thèse. L'exercice est convenu. Comment remercier toutes celles et tous ceux qui, au moins trois ans durant, auront nourri notre réflexion, notre motivation ou au contraire nos doutes, dans la droite lignée de Descartes, sans oublier quelqu'un ?

Allons à l'essentiel : la vie est trop courte pour lire des remerciements trop longs !

Le lecteur trouvera ci-dessous quelques 240 pages traitant d'un petit rongeur roussâtre qui, bien malgré lui, est au cœur d'un enjeu économique important pour les prairies et les élevages du Massif Central. Avouons dès maintenant la difficulté quotidienne que nous avons rencontrée lorsqu'il nous a fallu expliquer aux uns ou aux autres sur quoi portaient nos travaux !

— « Je fais de l'économie et travaille sur la gestion des campagnols »

— « Ah bon, le campagnol est économe ? »

Bien souvent moqué, j'ai inlassablement cherché à expliciter davantage l'intérêt de mes travaux : le « campagnol » est devenu un « ravageur des prairies » ou « un risque sanitaire » (assimilation bien utile en temps de pandémie...). Il fallait sortir de l'ornière, choisir des pistes de recherche à même de repenser la vision du problème et de proposer de nouvelles approches opérationnelles.

J'ai pu compter pour cela sur la disponibilité, l'enthousiasme et le soutien de mes deux co-directeurs de thèse, Philippe Jeanneaux et Yves Michelin, que je ne remercierai jamais assez de m'avoir permis, pendant trois ans, de continuer à me former sur des thématiques qui me passionnent et de découvrir de nouvelles approches théoriques et méthodologiques. Avec le recul, il y aurait eu quasiment autant à écrire sur les approches que nous avons envisagées et qui ont, pour diverses raisons théoriques ou pratiques, avorté que sur ce que nous pouvons aujourd'hui proposer dans ces pages.

Merci aux équipes du projet DDRAUN (CERDI, MSH, VetAgro Sup) pour nos réunions croisant des travaux de recherche pluridisciplinaires qui ont toujours su aiguïser mon intérêt malgré mon ignorance (fortement persistante !) sur le fonctionnement des capteurs multi-spectraux de la Micasense Rededge. Merci en particulier à Franck Vautier et Youven Goulamoussène (MSH, plateforme IntelEspace) pour avoir développé une méthode de surveillance des prairies par drone que nous avons pu discuter et intégrer dans nos travaux.

Merci à mon collègue écologue Adrien Pinot (VetAgro Sup) pour m'avoir accompagné pendant ces trois années dans la compréhension et la modélisation de l'écologie de ces petits rongeurs pullulants. Nous avons encore du travail 😊

Merci à Christophe Poix (VetAgro Sup) pour son accompagnement dans la mise en œuvre des outils de modélisation multiagent (car nous avons utilisé des *turtles* pour modéliser les campagnols...).

Merci à Patrick Giraudoux (Université de Franche-Comté) pour le partage de son expérience et de ces travaux sur la reproduction et la dispersion des campagnols.

Merci à Elodie Perrot et Stéphane Vidal (VetAgro Sup), duo de choc, pourfendeurs de campagnols devant l'éternel !

Merci à Olivier Aznar, sans qui je n'aurais probablement jamais démarré cette thèse, et à Christophe Déprés et Geoffroy Enjolras, qui se sont toujours intéressés à mes travaux.

Merci enfin aux financeurs du projet DDRAUN, dans le cadre du CPER Défi Attrihum 2015-2020.

Table des matières

Remerciements	8
Table des figures.....	12
Table des tableaux.....	14
Introduction générale.....	18
Partie I. Analyse économique d'un risque ravageur en agriculture, les pullulations de campagnols terrestres	26
Chapitre 1. Le risque en agriculture	28
1.1. Les risques en agriculture.....	28
1.2. Notion de risque en économie	37
1.3. Prise de décision en situation de risque.....	44
1.4. Transaction, risque et théorie des contrats	48
1.5. Gestion des risques en agriculture	53
Conclusion sur l'approche par l'économie du risque	58
Chapitre 2. Caractérisation économique des risques agricoles	60
2.1. Construction d'une grille de caractérisation économique des risques	60
2.2. Les pullulations de campagnols terrestres et leurs conséquences	66
2.3. Particularités du risque de pullulation de campagnols terrestres	80
Conclusion sur les particularités du risque de pullulation de campagnols terrestres.....	86
Bilan de la partie I et problématisation.....	88
Partie II. Quelle(s) stratégie(s) de gestion pour faire face au risque de pullulation ?.....	92
Chapitre 3. Assurabilité des risques « ravageurs » en agriculture.....	94
3.1. Assurabilité des risques en agriculture.....	95
3.2. Modèle d'assurance pour les risques ravageurs	100
3.3. L'assurance est-elle compatible avec l'action collective ?	113
Conclusion sur l'assurance et la mutualisation du risque	114
Chapitre 4. Adaptation d'un système fourrager en situation de risques multiples.....	116
4.1. Système fourrager et capacité d'adaptation face aux risques	117
4.2. Comportement d'éleveurs en situation d'aléas multiples	126
4.3. Les NTIC au service de la gestion des risques.....	140
Conclusion sur l'approche par le système fourrager	154
Chapitre 5. <i>CampaRISK</i> , un jeu sérieux pour accompagner l'action collective face aux pullulations de campagnols terrestres	156
5.1. Présentation du modèle bioéconomique.....	157
5.2. Transcription en règles de jeu	160
5.3. Types de données produites par le jeu et pertinence.....	168

Conclusion sur le jeu sérieux	170
Chapitre 6. Défaillance de l'action collective face aux pullulations de campagnols.....	172
6.1. Cadre d'analyse : renouveler l'analyse de l'action collective par une approche néo-institutionnelle.....	173
6.2. Résultats : comment expliquer le manque d'action collective face à un risque majeur ? 177	
6.3. Discussion : analyse des défaillances institutionnelles et perspectives.....	181
Conclusion sur les défaillances de la coordination	185
Chapitre 7. Quelle stratégie et quelles incitations pour maîtriser les pullulations de campagnols terrestres ? <i>Approche par un modèle bioéconomique spatialisé</i>	188
7.1. Description du modèle	189
7.2. Simulations et résultats.....	206
7.3. Discussion, limites et perspectives	217
Conclusion sur les incitations à la lutte	221
Discussion générale	224
Le syndrome du campagnol : la vulnérabilité des systèmes fourragers	224
La place de l'assurance pour la gestion des risques agricoles.....	226
Intérêt et limites de l'assurance agricole.....	226
Dépendance aux subventions publiques : le marché de l'assurance défaillant	227
Cas de l'assurance Prairies.....	229
Substitution entre assurance et filets de sécurité publics.....	229
Quelle place pour l'assurance ?.....	230
De la classification des « biens » à la classification des « maux »	232
Théorie de « l'iceberg de l'action collective »	233
Importance du capital social pour l'action collective	233
La théorie de l'iceberg de l'action collective	236
Conclusion générale	240
Apports méthodologiques	240
Apports théoriques	241
Apports pratiques	241
Perspectives scientifiques.....	243
Bibliographie.....	244

Table des figures

Figure 1 : Prairie victime des campagnols terrestre en Auvergne (source : haute-loire-paysanne.reussir.fr).....	19
Figure 2 : Les pullulations de campagnols terrestres au prisme du "One Health" (auteur)	20
Figure 4 : Sol irrégulier du temple d'Isis à Philae, Egypte	30
Figure 5 : Les travaux agricoles au XIVE siècle (extrait d'une peinture sur vélin du XVe siècle, collection du Musée Condé)	30
Figure 5 : Cartes de l'évolution des surfaces toujours en herbe entre 1955 et 1988, dans le Cantal et le Puy-de-Dôme (Fichet-Calvet et al., 2000). Le gradient de couleur correspond, du plus clair au plus foncé, à un rapport STH/SAU croissant.....	34
Figure 6 : Cascade de conséquences de la spécialisation herbagère sur les populations de campagnols terrestres et leurs prédateurs. Simplifié et adapté de Truchetet et al. (2014).....	34
Figure 7 : La gestion des risques en agriculture, quelques étapes historiques et changements stratégiques (auteur).....	35
Figure 8 : Représentation opérationnelle du risque (auteur)	40
Figure 9 : Modèle de Cobweb divergeant (cas d'une demande moins élastique que l'offre), d'après Ezekiel (1938)	43
Figure 10 : Niveau d'information et notion de risque (Maichanou, 2014)	44
Figure 11 : Classification des stratégies de gestion du risque (auteur).....	56
Figure 12 : Cartographie des catégories d'instruments de gestion des risques en agriculture, adapté de Cordier et al. (2008).....	57
Figure 14 : Campagnol terrestre.....	66
Figure 14 : Exemple d'un cycle de pullulation de campagnols terrestres (Duriez, 2010)	67
Figure 15 : Répartition des 4 grands types de pullulation de campagnol terrestre en France (Truchetet et al., 2014).....	67
Figure 16 : Cartographie du risque de pullulation en fonction des données historiques dans le Puy-de-Dôme et le Cantal (1985-2001) (auteur, données SRPV).	69
Figure 17 : Cartographie des populations de campagnols terrestres maximales observées entre 2002 et 2016 (données CampaNet, cartographie Stéphane Vidal, VetAgro Sup)	69
Figure 18 : Carte de notation de la présence de campagnols générée à partir des données de l'application mobile (BSV Prairie n°67, 2019, département du Cantal)	70
Figure 19 : Orientation technico-économique des communes auvergnates (Agreste, 2010)	72
Figure 20 : Nombre d'exploitations par OTEX en Auvergne (Agreste, 2000 et 2010).....	72
Figure 21 : Répartition des OTEX par département en Auvergne (Agreste, 2010)	72
Figure 22 : Part de la surface toujours en herbe dans la surface agricole utile en Auvergne (Agreste, 2010).....	73
Figure 23 : Variations de la récolte globale annuelle du domaine de Marcenat de 1980 à 1996 (F,M et D : années climatiquement "favorables", "moyennes" et "défavorables") (Quéré et al., 1999).....	75
Figure 24 : Cascade de conséquences liées aux pullulations de campagnols terrestres (auteur)	77
Figure 25 : Acteurs impliqués dans la gestion des pullulations de campagnols terrestres en France (auteur).....	80
Figure 26 : Dispersion des dommages compensables suite à la pullulation de 2016 (moyenne par exploitation, en €/ha).....	101
Figure 27 : Génération du fCover par AIRBUS (Pottier et al., 2017)	103
Figure 28 : Relevés du fCover par AIRBUS pour la Petite Région Fourragère de Marcenat (15190), au 18/07/2019.....	103

Figure 31 : Mesure du taux de terre en surface par drone (Vautier, F., Goulamoussene, Y., 2017 ; plateforme IntelEspace, MSH Clermont-Fd)	104
Figure 31 : Carte des fractions de sol (taux de terre) d'après les données produites par AIRBUS, Massif Central (Nigou, 2017)	104
Figure 32 : Modèle prédictif linéaire	106
Figure 32 : Modèle prédictif binomial et modèle prédictif linéaire (pour comparaison)	107
Figure 33 : Effet d'une subvention à l'assurance sur les coûts.....	111
Figure 34 : Indemnité optimale dans le cas d'une second-best solution (Bourgeon et Picard, 2019)	113
Figure 35 : Indemnité optimale dans le cas d'une third-best solution (Bourgeon et Picard, 2019) ...	113
Figure 36 : Courbe-type de croissance d'une prairie au cours du temps (source : G. Lemaire, gnis.fr)	117
Figure 37 : Représentation du système fourrager adaptée de Duru et al. (1988c)	118
Figure 38 : Exemple de cartes utilisées lors de l'entretien sur les risques.....	126
Figure 39 : Gradient utilisé pour l'entretien sur les risques.....	126
Figure 40 : Evolution des surfaces nationales a) de prairies et cultures fourragères et b) détail pour les prairies artificielles au cours des dernières décennies (Huyghe, 2009).....	133
Figure 41 : Evolution des surfaces a) de STH, b) de prairies temporaires, c) de cultures fourragères annuelles entre 1960 et 2005 dans les différents départements français (en % de 1960 ; les départements en gris foncé sont ceux où les surfaces se sont maintenues, voire ont augmenté), d'après Huyghe (2009)	134
Figure 42 : Surface annuelle de la France touchée par la sécheresse entre 1959 et 2014. Source : Météo France	137
Figure 43 : Effets attendus du dérèglement climatique sur la pousse de l'herbe à horizon 2050 (source : Institut de l'Élevage).....	137
Figure 44 : Schéma de positionnement de différents leviers de sécurisation par rapport à la sécheresse, selon 2 axes : tactique/stratégique, prévention/compensation (Moreau et al., 2014).....	138
Figure 45 : Nombre cumulé de publications scientifiques concernant l'agriculture de précision entre 1960 et 2006 (Schellberg et al., 2008). Carrés pleins = « precision » et « agriculture », carrés vides = « precision agriculture », ronds pleins = « précision » et « agriculture » et « prairies », ronds vides = « precision agriculture » et « prairies ».....	141
Figure 46 : Réflectance et densité de végétation (Nicolas et Dusseux, 2016)	147
Figure 47 : Discriminer les pratiques agricoles avec l'évolution temporelle du LAI (Nicolas et Dusseux, 2016).....	147
Figure 48 : Détection des tumuli grâce aux données produites par drone (Vautier, F., Goulamoussene, Y., 2017 ; plateforme IntelEspace, MSH Clermont-Fd).....	148
Figure 49 : Système de lutte "2.0" contre les campagnols terrestres intégrant les NTIC	153
Figure 50 : Citations utilisées par des éleveurs pour définir le campagnol terrestre	156
Figure 51 : Modèle bioéconomique du jeu	160
Figure 52 : Plateau du jeu CampaRISK.....	161
Figure 53 : Dynamique des populations de campagnols terrestres à l'échelle du territoire	164
Figure 54 : Suivi de la trésorerie (courbes), des coûts des aléas divers (histogramme) et d'une pullulation (histogramme estompé) (données issues d'un test du jeu sur 4 années)	169
Figure 55 : Nombre d'actions de lutte menées par les joueurs (partie sur 4 années)	169
Figure 56 : Cadre d'analyse de la coordination proposé (auteur).....	176
Figure 57 : Facteurs limitants de la coordination des actions de gestion des pullulations (auteur) ..	182
Figure 58 : Sous-modèles et fonctions principales.....	191
Figure 59 : Eléments de base du modèle et représentation	191
Figure 60 : Terrain modélisé.....	196

Figure 61 : Morcellement des exploitations et distance moyenne aux foyers	197
Figure 62 : Modélisation des variations cycliques du potentiel reproductif et des populations de campagnols terrestres.....	199
Figure 63 : Dispersion des campagnols terrestres sur des courtes (gauche) ou longues (droite) distances (Marilleau et al., 2018)	200
Figure 64 : Structure des coûts de la lutte	208
Figure 65 : Simulation 0 – Production fourragère et densités de campagnols terrestres sur le territoire (moyenne/ha).....	210
Figure 66 : Synthèse des résultats des simulations 0 à 3 (moyennes sur le territoire modélisé)	213
Figure 67 : Effet de l'aléa moral sur la lutte et son efficacité (simulation 4)	215
Figure 68 : Pertes fourragères par exploitation en fonction du nombre de participants à la lutte (simulation 4).....	215
Figure 69 : Effort de lutte par exploitation en fonction du nombre de participants à la lutte (simulation 4).....	216
Figure 70 : Effet de la probabilité générale d'engagement dans la lutte sur l'efficacité des actions (simulation 4-b)	217
Figure 71 : Coût moyen de la lutte en €/patch (simulation 2-a)	218
Figure 72 : Sensibilité du modèle à l'efficacité du piégeage (exemple de la coordination volontaire)	220
Figure 73 : Théorie de l'iceberg de l'action collective (auteur)	237

Table des tableaux

Tableau 1 : Matrice d'information	44
Tableau 2 : Principaux courants de la théorie des contrats et comparaison avec la théorie walrasienne (Brousseau et Glachant, 2000)	50
Tableau 3 : Méthode d'analyse des risques, adapté d'après Stohlgren et Schnase (2006)	61
Tableau 4 : Classification des risques selon leur type et leur caractère idiosyncratique / systémique (OCDE, 2009)	63
Tableau 5 : Grille de caractérisation économique des risques (auteur)	64
Tableau 6 : Comptes des exploitations professionnelles auvergnates en 2014 (Agreste, 2015).....	71
Tableau 7 : Production fourragère en Auvergne en 2014 (Agreste, 2015)	73
Tableau 8 : Approximation de la valeur de la production fourragère exposée au risque de pullulation	74
Tableau 9 : Analyse comparative des récoltes globales annuelles, d'après Quéré et al. (1999)	75
Tableau 10 : Simulation des conséquences des pullulations en fonction des conditions climatiques en base 100, d'après Quéré et al. (1999)	76
Tableau 11 : Hiérarchie des facteurs de contrôle des pullulations en fonction des échelles spatiales, des processus biologiques identifiés ou pressentis, des effets observés sur les populations de campagnols et leviers d'actions possibles pour les éleveurs (Couval et al., 2014)	78
Tableau 12 : Caractérisation du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres (auteur)	81
Tableau 13 : Pistes de recherche proposées.....	90
Tableau 14 : Critères d'assurabilité des risques (auteur)	97
Tableau 15 : Résultats de l'étude visant à estimer les pertes occasionnées par les campagnols terrestres (Nigou, 2017)	104
Tableau 16 : Résultats de la régression linéaire Taux de perte = f(Taux de terre).....	105
Tableau 17 : Résultats de la régression binomiale Taux de production = f(Taux de terre)	106
Tableau 18 : Assurabilité du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres	108
Tableau 19 : Distribution des coûts selon le taux de subvention	111

Tableau 20 : Matrice des quatre grands types de processus adaptatifs et modes de planification associés (Alcaras et Lacroux, 1999).....	121
Tableau 21 : Classes de fonctionnement des élevages et gestion des pullulations, d’après Michelin et al. (2014).....	125
Tableau 22 : Premier jeu de cartes, représentant les risques en agriculture	127
Tableau 23 : Deuxième jeu de cartes, représentant les modalités de gestion du système fourrager	127
Tableau 24 : Perception des risques par les éleveurs enquêtés	130
Tableau 25 : Classification des risques selon les éleveurs enquêtés	131
Tableau 26 : Leviers de gestion de la variabilité des rendements fourragers par les éleveurs enquêtés	132
Tableau 27 : Comparaison des sécheresses de 1976 et de 2003, d’après Lemaire et Pflimlin (2007)	135
Tableau 28 : Matrice de confusion utilisée pour calculer les indicateurs de performance issus de l’intersection entre les quadras (colonnes) et l’image classifiée (lignes).....	149
Tableau 29 : Illustration des différents cas issus de la matrice de confusion sur des quadras (Goulamoussène et al., 2020)	150
Tableau 30 : Comparatif du temps nécessaire pour la surveillance par la méthode pédestre et l’utilisation d’un drone pour un territoire de 100 hectares sur l’Impluvium de Volvic (Goulamoussène et al., 2020).....	152
Tableau 31 : Estimation des quantités récoltées selon l'année et le niveau de pullulation des campagnols (Quéré et al., 1999)	159
Tableau 32 : Tâches et aléas du plateau du jeu selon les saisons.....	162
Tableau 33 : Détermination de l’intensité (F = Forte, f = faible) de la pullulation en année n sur le territoire en fonction de la lutte collective menée en $n - 1$ ($\beta n - 1$).....	164
Tableau 34 : Pertes liées aux campagnols terrestres en fonction des conditions climatiques.....	165
Tableau 35 : Pertes liées aux campagnols terrestres en année météorologique normale ou bonne pour un éleveur donné selon l’effort de lutte cumulé	165
Tableau 36 : Pertes liées aux campagnols terrestres en année météorologique normale ou bonne, avec un paysage favorable aux pullulation ($s_j = 1,2$), pour un éleveur donné selon l’effort de lutte cumulé	165
Tableau 37 : Tirage aléatoire de la météorologie et production fourragère	166
Tableau 38 : Prix des fourrages selon la météorologie pour l'exploitation bovin lait AOP Saint-Nectaire	166
Tableau 39 : Récapitulatif des éléments et processus principaux, des variables du modèle et leur transcription en outils de jeu	167
Tableau 40 : Questions auxquelles les différentes simulations visent à répondre	189
Tableau 41 : Caractéristiques des cell agent (patches) du modèle.....	192
Tableau 42 : Caractéristiques des éleveurs (turtle agents) du modèle.....	193
Tableau 43 : Caractéristiques des variables globales du modèle.....	194
Tableau 44 : Caractéristiques des exploitations modélisées	196
Tableau 45 : Calendrier de simulation des phénomènes biologiques	199
Tableau 46 : Valeur par défaut des paramètres biologiques du modèle.....	201
Tableau 47 : Coût du piégeage.....	205
Tableau 48 : Indicateur de suivi des simulations.....	207
Tableau 49 : Indicateurs de synthèse.....	208
Tableau 50 : Pertes fourragères moyennes par exploitation (en % de la production espérée)	211
Tableau 51 : Ratio de rentabilité de la lutte par exploitation agricole (simulation 2-a)	212
Tableau 52 : Résultats des simulations 0 à 3 (moyennes sur le territoire modélisé).....	214
Tableau 53 : Pertes fourragères de l'exploitation 7 en fonction du nombre d'éleveurs qui luttent ..	215

Tableau 54 : Subventions totales dans le cas des pullulations de campagnols terrestres (pour les exploitations éligibles ayant subi plus de 30% de dommages)	228
Tableau 55 : Répartition des coûts et des gains dans le cadre d'un dispositif FMSE	228
Tableau 56 : Répartition des coûts et des gains dans le cadre d'une assurance subventionnée à 23%	228
Tableau 57 : Effet de substitution entre filet de sécurité public et assurance récolte (OCDE, 2009, p. 38)	230
Tableau 58 : Classification des types de biens (Griffon, 1992).....	232
Tableau 59 : Classification des "maux" et modalités de gestion.....	232
Tableau 60 : Groupes de pensée des éleveurs face au campagnol terrestre, d'après Michelin et al. (2014)	235
Tableau 61 : Répartition des stratégies de lutte des exploitations enquêtées selon leur classe d'exploitation et le groupe de pensée de l'exploitant (source : Michelin et al., 2014)	235

Introduction générale

Renaud Vié Le Sage, ancien délégué aux risques naturels majeurs, écrivait en 1989 : « *Nos sociétés sont de plus en plus vulnérables. Cela peut sembler paradoxal à une époque où elles devraient théoriquement mieux maîtriser les risques auxquels elles sont exposées* » (Vié Le Sage, 1989, p. 171). En 1986, le sociologue allemand Ulrich Beck décrivait « *la société du risque* » et illustre comment les sociétés modernes et industrielles se rendaient à la fois plus soumises aux risques existants mais en créaient également de nouveaux risques (Beck, 1992). Nous pourrions appliquer sans mal ce constat à l'agriculture du XXI^e siècle.

L'agriculture fait face à des perturbations de diverses natures (Urruty *et al.*, 2016) et l'incertitude est inhérente au processus de production agricole (Boussard, 1988, 1994; Moschini et Hennessy, 1999). Du fait de sa dépendance à de nombreux éléments naturels (climat, sol, ravageurs), la fonction de production agricole est très incertaine. De tous temps, les agriculteurs ont dû gérer cette incertitude, et les mutations historiques des systèmes agraires attestent de leur capacité sans cesse renouvelée de gérer la variabilité des conditions de production et donc la variabilité des *outputs* agricoles (Hardaker *et al.*, 2015; Mazoyer et Roudart, 2002). La crise environnementale du XXI^e siècle concerne pleinement la production agricole, dont le développement d'après-guerre est remis en question par le dérèglement climatique ou encore l'érosion de la biodiversité. Face à des aléas climatiques et sanitaires croissants, être capable de poursuivre la réalisation d'objectifs de production alimentaire et de revenu pour les agriculteurs, malgré la survenance de telles perturbations, est devenu un enjeu majeur pour la durabilité des systèmes agricoles et alimentaires (Tendall *et al.*, 2015). D'une part, l'agriculture est d'ores et déjà confrontée à des aléas climatiques ou sanitaires de plus en plus fréquents et intenses, qui perturbent profondément leur fonctionnement. D'autre part, la variabilité courante des conditions de production est également modifiée par des tendances de moyen et long termes. Les systèmes agricoles sont mis à l'épreuve, tant au niveau de leur flexibilité pour gérer ces risques à court terme qu'au niveau de leur plasticité pour s'adapter à ces nouvelles conditions à plus long terme (Alcaras et Lacroux, 1999).

Nous appelons risque une perturbation incertaine, probabilisable mais non prédictible, à l'origine de variations des conditions de production et causant des dommages à un enjeu économique exposé et vulnérable (Cordier *et al.*, 2008; Couty, 1989; Eldin, 1989; Enjolras, 2008; Labonne, 1989; Moschini et Hennessy, 1999; Urruty *et al.*, 2016). Nous venons de voir qu'appliqué à l'agriculture, ce concept pouvait être ambigu : s'agit-il de variations aléatoires mais courantes ou bien de variations aléatoires mais exceptionnelles ? Le risque agricole recouvre ces deux réalités :

- Le risque endogène et courant, qui correspond à la variabilité standard des conditions de production agricole, causant la variabilité des volumes et de la qualité de la production. Cette variabilité courante est inhérente au processus de production agricole et doit en premier lieu être gérée à l'échelle des systèmes de production (solutions techniques, diversification, épargne de précaution...).
- Le risque exogène et exceptionnel, qui correspond à des perturbations peu fréquentes mais d'ampleur non négligeable, dont l'origine est indépendante des caractéristiques du système agricole. Lorsque l'intensité de ces dommages exceptionnels est trop importante pour qu'ils ne soient absorbés par le système agricole, des mesures de compensation (filets de sécurité public, assurance, fonds de mutualisation) sont nécessaires.

Les systèmes agricoles sont des systèmes socio-écologiques composés de facteurs biotechniques et sociaux, dédiés à la production d'*output* économiques, environnementaux et sociaux (Renting *et al.*, 2009). Les systèmes socio-écologiques sont par nature dynamiques et instables (Thompson *et al.*,

2007). Un temps, la modernisation des pratiques et technologies de la « deuxième révolution agricole des Temps Modernes » (Mazoyer et Roudart, 2002) a permis de stabiliser une partie des conditions environnementales auxquelles l'agriculture est soumise, notamment en réduisant la pression des maladies et des ravageurs. Aujourd'hui cependant, nous constatons l'émergence de nouveaux risques dont le développement est en partie liée aux modifications des systèmes agroécologiques (spécialisation des territoires et des exploitations, simplification des paysages, résistance aux pesticides, dérèglement climatique...). Les pullulations de campagnols terrestres sont un exemple de ces risques dont l'importance a fortement crû depuis la deuxième moitié du XXe siècle (Fichet-Calvet *et al.*, 2000; Note et Michelin, 2014).

Le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris scherman*) est un petit mammifère de la famille des rongeurs vivant dans des galeries souterraines et se nourrissant de racines. Dans certains territoires de moyenne montagne marqués par la spécialisation herbagère (Massif Central, Franche-Comté), les dynamiques de populations de ce rongeur connaissent des pullulations dont l'intensité et la fréquence varient selon les conditions locales. Lorsque les campagnols terrestres pullulent, tous les 5 à 10 ans, leurs populations atteignent plusieurs centaines d'individus à l'hectare et causent des dommages importants aux prairies permanentes (Figure 1) : les



Figure 1 : Prairie victime des campagnols terrestre en Auvergne (source : La Haute-Loire Paysanne)

perles fourragères moyennes s'élèvent à 50% de la production espéré (Quéré *et al.*, 1999). En réalité, les conséquences de ces pullulations vont bien au-delà de la simple perte fourragère, et une approche globale des systèmes d'élevage est nécessaire, de la production fourragère aux revenus de l'agriculteur, en passant par ses objectifs et finalités. Landais (1994) donne la définition suivante d'un système d'élevage : « Un système d'élevage est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé par l'homme en vue de valoriser des ressources par l'intermédiaire d'animaux domestiques pour en obtenir des productions variées (lait, viande, cuirs et peaux, travail, fumure, etc.) ou pour répondre à d'autres objectifs. » Ainsi, par répercussion dans les rouages du système d'élevage, les pertes fourragères causées par les campagnols terrestres peuvent avoir d'importantes répercussions sur les revenus d'une exploitation : par exemple, en système AOP Comté, la conséquence des pullulations est estimée à une perte d'EBE¹ de 10 000€/UMO² (Schouwey *et al.*, 2014).

Ainsi, depuis les années 1970, les pullulations de campagnols terrestres sont la cause d'importants dommages qui perturbent le fonctionnement de nombreux systèmes d'élevage dans le Massif Central. A chaque crise, les tensions sont ravivées. La presse a largement fait écho de ce problème : « une terre ravagée », « infestée », « une urgence », « un traumatisme »³, « un péril »⁴, « un fléau »⁵ sont autant d'expressions fortes pour désigner les conséquences des pullulations. La destruction des prairies occasionne des pertes fourragères « alarmantes pour la santé financière des exploitations agricoles »⁶. Les articles de presse montrent bien les réactions de grande détresse que causent ces dommages chez

¹ Excédent Brut d'Exploitation

² Unité de Main d'œuvre

³ La Dépêche du 30/04/2016

⁴ La Montagne (Saint-Flour) du 30/05/2016

⁵ La Montagne (Aurillac) du 12/09/2016

⁶ La Montagne du 06/10/2015

les éleveurs auvergnats : « on n'a pas besoin de ça... déjà qu'avec la sécheresse c'était compliqué... »⁷. Longtemps, il a été demandé de proposer aux éleveurs une molécule rodenticide efficace pour venir à bout du phénomène. A cette heure, le dilemme entre l'efficacité de la molécule et ses effets indésirables sur la faune non-cible n'a pas été résolu : en 2020, la bromadiolone (anticoagulant rodenticide) a été retirée du marché du fait de ses impacts environnementaux décriés depuis les années 1990 (Coeurdassier *et al.*, 2014; Morlans et Michelin, 2014; Pascal, 1998).

Au-delà des perturbations causées aux systèmes d'élevage, nous pourrions encore élargir notre focale en mobilisant le concept de *One Health*, qui offre un cadre d'analyse globale propice à des applications à de nombreux cas d'étude et de nombreuses disciplines (Morand *et al.*, 2020). Cette approche s'avère particulièrement utile pour analyser les systèmes agricoles, qui présentent par nature des intrications étroites entre l'humain (agriculteurs, mangeurs), l'environnement (sols, climat, paysages) et les animaux (domestiques, sauvages). Appliqué au cas d'étude des pullulations de campagnols terrestres, le concept de *One Health* est pertinent (Figure 2) : il met en évidence que l'enjeu de gestion des pullulations de campagnols concerne non seulement la production fourragère et l'alimentation des animaux d'élevage, mais aussi des aspects sanitaires et environnementaux, ce qui ouvre un large questionnement concernant les politiques publiques relatives à la gestion d'un tel phénomène, et notamment le partage de la responsabilité de cette gestion (Kirat, 2003; Kirat et Marty, 2007; Posner et Landes, 1980).

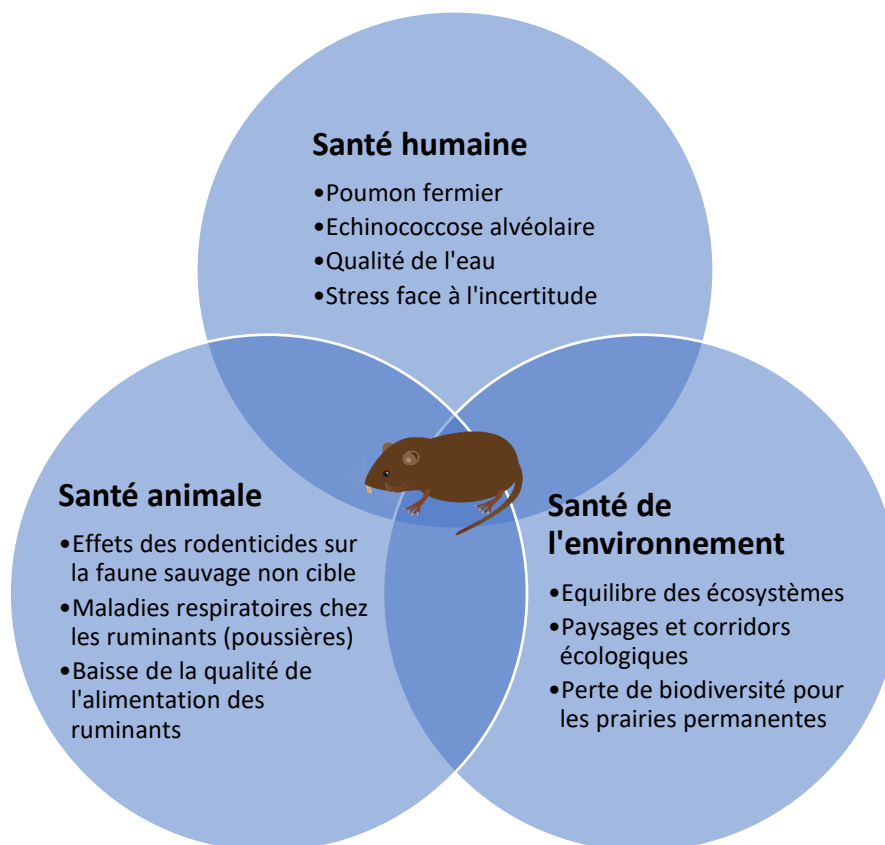


Figure 2 : Les pullulations de campagnols terrestres au prisme du « One Health » (auteur)

Toutefois, la littérature démontre un lien solide entre la fréquence et l'intensité des pullulations de campagnols terrestres et les pratiques agricoles. Il est notamment bien renseigné que le risque de

⁷ *La Montagne* (Besse-et-Saint-Anastaise) du 26/02/2016

pullulation augmente significativement lorsque le rapport surface toujours en herbe/surface agricole utile d'un territoire dépasse 70-80% (Fichet-Calvet *et al.*, 2000). Plus le paysage est homogène et peu fragmenté (openfield de prairies permanentes avec peu d'infrastructures agroécologiques telles que les haies ou bosquets), plus les campagnols terrestres peuvent se disperser et coloniser de nouvelles prairies (Berthier *et al.*, 2014a; Couval *et al.*, 2014; Foltête *et al.*, 2015; Giraudoux *et al.*, 2002). Cette homogénéisation du paysage a également défavorisé la présence et l'activité des prédateurs naturels des campagnols, spécialistes (l'hermine) ou généralistes (rapaces, renards...) qui ont besoin des infrastructures agroécologiques pour se percher ou se cacher. L'usage de molécules rodenticides peu spécifiques aux rongeurs a également montré des effets indésirables sur les prédateurs naturels des campagnols, acteurs importants de l'équilibre des écosystèmes. Enfin, plus les prairies sont exploitées de manière intensive (fertilisation) et moins la gestion du couvert végétal est variée (broyage des refus, alternance fauche-pâture, décompactage ou labour), plus les campagnols terrestres et les taupes, leurs précurseurs, s'installent et se reproduisent aisément (Couval *et al.*, 2014). Cette relation entre le phénomène (et les dommages qu'il cause) et les pratiques agricoles place la responsabilité de la gestion du risque de pullulation au niveau de l'agriculteur. Toutefois, les facteurs de risque prennent majoritairement place à une échelle qui dépasse celle de la parcelle ou même de l'exploitation agricole (diversité et répartition géographique du parcellaire) : la gestion des paysages relève des décisions individuelles des éleveurs mais une coordination est nécessaire pour produire un effet collectif optimal. La littérature insiste sur l'importance de gérer collectivement les facteurs de risque à l'échelle régionale (part du territoire en prairies permanentes) et sectorielle (assolement, fragmentation du paysage) afin de réduire l'intensité et la fréquence des pullulations (Couval *et al.*, 2014; Giraudoux *et al.*, 2017; Truchetet *et al.*, 2014).

La gestion des pullulations sur un territoire donné relève donc de l'action coordonnée des éleveurs exposés au risque. D'une part, la gestion des facteurs de risques aux échelles régionales et sectorielles repose sur le cumul des contributions individuelles de chaque éleveur pour réduire le risque de pullulation (Giraudoux *et al.*, 2017). D'autre part, la gestion des ravageurs revêt les caractères de la production d'un bien collectif de sorte que les efforts individuels bénéficient à l'ensemble des agents exposés au risque (Cornes, 1993; Epanchin-Niell et Wilen, 2015, 2012; Feder et Regev, 1975; Smith *et al.*, 2009). Or, nous avons constaté, lors de nos enquêtes et revues de littérature, que la lutte intégrée, précoce et collective conseillée par les techniciens et les chercheurs n'est effectivement mise en œuvre que sur un faible nombre de territoires. Le caractère chronophage des méthodes de lutte directe proposées est couramment avancé pour expliquer que, malgré l'intérêt collectif évident à maîtriser les populations de campagnols terrestres, l'action effective soit faible. Les coûts de l'action collective (contribution individuelle, coûts de transaction) sont souvent mis en avant comme l'un des facteurs importants pour expliquer le sous-engagement des agents dans la production de biens collectifs (Balme, 1990; Cabon-Dhersin et Ramani, 2007; Oliver, 1993; Olson, 1965). Toutefois, la théorie de l'action collective proposée par Olson (1965), les développements de l'économie néo-institutionnelle (Brousseau, 1992; Brousseau et Glachant, 2000; Menard, 2003; North, 1990; Williamson, 2000, 1979) ainsi que la théorie du capital social (Bornarel, 2007; Bourdieu, 1980; Burt, 1995; Coleman, 1988; Friedberg, 1992; Granovetter, 1983; Lin *et al.*, 2001; Putnam, 2001) nous semblent ouvrir des perspectives plus fines pour expliquer le paradoxe de l'inaction observée, par exemple, dans le cas des pullulations de campagnols terrestres. Les coûts individuels ne sont que la partie émergée de l'iceberg.

***Quand les blés sont sous la grêle
Fou qui fait le délicat
Fou qui songe à ses querelles
Au cœur du commun combat***

Louis Aragon, La Rose et le Réséda (1943)

Nous proposons d'analyser la gestion du risque de pullulation non pas au regard de l'efficacité technique des méthodes de lutte, mais selon une approche mobilisant les cadres d'analyse de l'économie du risque, notamment les trois composantes du concept de risque (l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité), et de l'économie institutionnelle.

Comment peut-on expliquer l'inefficacité actuelle de la gestion du risque de pullulation de campagnols terrestres ? Quelles sont les stratégies de gestion les plus pertinentes compte-tenu des particularités du phénomène ?

Pour répondre à cette problématique, nos travaux se divisent en deux grandes parties. La Partie I comprend deux chapitres et propose une analyse du phénomène de pullulation des campagnols terrestres, de ses conséquences pour les systèmes d'élevage et des modalités de gestion possibles sous l'angle de l'économie du risque. La Partie II comprend cinq chapitres et propose d'explorer plusieurs approches et stratégies de gestion du risque : la compensation *ex-post* par l'assurance de marché ; la diversification et l'ajustement par l'approche à l'échelle du système fourrager ; l'action collective par l'approche de la coordination et de la production d'un bien collectif.

La première partie, intitulée « Analyse économique d'un risque ravageur en agriculture, les pullulations de campagnols terrestres » repose sur deux chapitres.

Le Chapitre 1 (p. 28) est consacré à la définition du concept de risque ainsi qu'à la typologie et la gestion des risques qui affectent l'agriculture. Nous démontrons l'ambiguïté de la notion de risque, désignant, d'une part, la variabilité d'une production aléatoire, et d'autre part, les dommages causés par un événement exceptionnel. Cette ambiguïté nous semble particulièrement commune lorsqu'il s'agit d'étudier les processus de production agricole. Nous proposons donc de réfléchir au statut du risque agricole et aux différentes modalités de gestion qu'il est possible d'envisager, et dans quels cas.

Le Chapitre 2 (p. 60) propose la construction d'une grille de caractérisation économique des risques qui sera appliquée à notre cas d'étude afin d'en déterminer les particularités. Cette approche permettra de définir en quoi les risques ravageurs sont particuliers du point de vue de l'analyse économique et d'en tirer des conséquences en matière de gestion du risque. Nous concluons notamment que les caractéristiques spatiales du risque de pullulation placent sa gestion sous le régime de la production d'un bien collectif, et que les structures de propriété et l'hétérogénéité des systèmes d'élevage génèrent une sous-incitation à produire ce bien collectif que les choix de politiques publiques ne parviennent actuellement pas à corriger.

La deuxième partie, intitulée « Quelle(s) stratégie(s) de gestion pour faire face au risque de pullulation ? », est organisée en cinq chapitres.

Le Chapitre 3 (p. 94) propose l'approche classique de l'assurance de marché pour permettre à un éleveur qui ne peut éliminer un risque auquel il est confronté de le vendre à un assureur capable de le diversifier. Si les pullulations ne peuvent être gérées par la prévention (maîtrise des populations) ni par l'intégration du risque dans les prix (en tant que coût de production), alors les dommages causés par les campagnols terrestres doivent être compensés. Nous commencerons par interroger l'assurabilité des risques en agriculture (3.1) puis proposerons d'appliquer un modèle classique d'assurance au cas des pullulations de campagnols terrestres (3.2) avant de discuter de la compatibilité entre l'assurance et l'action collective (3.3).

Le Chapitre 4 (p. 116) propose une approche systémique du risque de pullulation. Plutôt que de le considérer comme un phénomène exogène au système productif, il s'agit de le réintégrer aux objectifs et au fonctionnement des systèmes fourragers. Cette approche permet de mieux comprendre les

vulnérabilités auxquelles sont confrontés les éleveurs face aux pullulations mais également face au risque de sécheresse. La section 4.1 analyse les capacités d'adaptation d'un système fourrager en situation de risque ; la section 4.2 propose d'étudier le comportement des éleveurs face aux risques qui affectent la production fourragère ; enfin, la section 4.3 interroge la place des NTIC pour la gestion des risques, en particulier le risque de pullulation de campagnols terrestres (test d'une solution drone).

Les trois derniers chapitres proposent d'étudier la coordination et les incitations à la lutte contre les pullulations de campagnols terrestres, considérant qu'agir pour maîtriser les ravageurs revient à participer à la production d'un bien collectif. Le Chapitre 5 (p. 156) présente la conception d'un jeu sérieux dédié à la gestion collective des pullulations de campagnols, de la modélisation de la gestion d'un système fourrager en situation d'aléas multiples à sa transcription en règles du jeu. L'objectif de ce travail est de produire à la fois un outil concret d'accompagnement des éleveurs dans la conception d'une vision partagée du risque et d'une stratégie de lutte commune mais aussi un outil d'économie expérimentale capable de générer des données pour comprendre davantage le comportement collectif des éleveurs. Le Chapitre 6 (p. 172) présente une analyse des défaillances de l'action collective face aux pullulations de campagnols en construisant un cadre d'analyse de la coordination. Il s'intéresse à quatre composantes de la coordination inspirées de l'économie institutionnelle : les institutions, les contrats, l'information, la confiance. Enfin, le Chapitre 7 (p. 188) construit et mobilise un modèle multiagent informatisé pour tester plusieurs scénarios de gestion collective des pullulations et déterminer les incitations qui pourraient générer la plus grande probabilité que les éleveurs s'engagent davantage dans la lutte.

La temporalité du phénomène étudié, qui prend place sur un cycle pluriannuel, ne nous a pas permis d'envisager de déployer « grandeur nature » des outils d'économie expérimentale. De plus, le manque de données précises à l'échelle de l'exploitation agricole sur le risque de pullulation, sa fréquence, son intensité et ses conséquences n'a pas permis la mise en œuvre d'une approche économétrique. Ainsi, du point de vue méthodologique, nos travaux se basent, d'une part, sur trois séries d'enquêtes qualitatives menées en 2017 et 2018 auprès d'éleveurs et d'acteurs institutionnels impliqués dans la gestion des pullulations de campagnols terrestres (4.2, p. 126 ; 6.1.3, p. 176), et d'autre part, sur la modélisation des phénomènes agroécologiques et socioéconomiques. Nous avons conçu un modèle de gestion d'un système fourrager en situation d'aléas multiples sous la forme d'un jeu sérieux (Chapitre 5, p. 156), afin d'aborder avec les éleveurs la question de la coordination des actions de lutte, ainsi qu'un modèle spatial multiagent informatisé pour nous permettre de tester, sur le long terme, plusieurs scénarios de gestion du risque de pullulation (comportement des éleveurs, planification sociale) (Chapitre 7, p. 188).

Une Discussion générale (p. 224) clôturera nos travaux en proposant une analyse globale des pullulations de campagnols terrestres, les replaçant dans le contexte des évolutions des systèmes d'élevage depuis l'après-guerre, puis une analyse de la place de l'assurance pour la gestion des risques en agriculture, et enfin une montée en généralité en formulant la théorie de « l'iceberg de l'action collective ».

Dans la Conclusion générale (p. 240), nous nous attacherons à mettre en évidence les apports méthodologiques, théoriques et opérationnels de nos travaux, ainsi que les perspectives de développement futures.

Partie I. Analyse économique d'un risque ravageur en agriculture, les pullulations de campagnols terrestres

Les dommages importants causés par les pullulations de campagnols terrestres, les fragilités des systèmes d'élevages qui sont exposés à ce risque, l'échec de la stratégie de gestion actuelle et les tensions qui entourent cette question démontrent la complexité du phénomène. Les travaux de recherche ont, jusqu'à présent, mis l'accent sur la compréhension de l'écologie du campagnol terrestre, des facteurs de pullulation et sur le développement d'un panel de pratiques et techniques pour *maîtriser* (et non éradiquer) les populations de rongeur.

Il nous semble important de prendre davantage de recul sur cette thématique, et de proposer une analyse qui, sans l'éluder, dépasse la question de l'*efficacité* des techniques de lutte proposées. D'une part, les pullulations de campagnols terrestres constituent un risque de type sanitaire dont la gestion relève classiquement d'actions techniques dont les agriculteurs sont responsables. D'autre part, le risque de pullulation revêt des caractéristiques particulières qui le distinguent au sein même des risques ravageurs.

L'objectif de la Partie I est de déterminer de nouvelles clés de compréhension du risque de pullulation de campagnols terrestres et de construire la problématique qui guidera nos travaux. Pour cela, nous proposons une entrée générale fondée sur l'économie du risque.

Le Chapitre 1 (p. 28) est consacré à la définition du concept de risque ainsi qu'à la typologie et la gestion des risques qui affectent l'agriculture. Nous démontrons l'ambiguïté de la notion de risque, désignant d'une part la variabilité d'une production aléatoire, d'autre part les dommages causés par un événement exceptionnel. Cette ambiguïté nous semble particulièrement commune lorsqu'il s'agit d'étudier les processus de production agricole. Nous proposons donc de réfléchir au statut du risque agricole et aux différentes modalités de gestion qu'il est possible d'envisager.

Le Chapitre 2 (p. 60) propose la construction d'une grille de caractérisation économique des risques qui sera appliquée à notre cas d'étude afin d'en déterminer les particularités. Cette approche permettra de définir en quoi les risques ravageurs sont particuliers du point de vue de l'analyse économique et d'en tirer des conséquences en termes de gestion du risque. Nous concluons notamment que les caractéristiques spatiales du risque de pullulation placent sa gestion sous le régime de la production d'un bien collectif, et que les structures de propriété et l'hétérogénéité des systèmes d'élevage génèrent une sous-incitation à produire ce bien collectif.

A l'issue de ces deux chapitres, nous proposerons une formulation de notre problématique ainsi que les questions de recherche qui guideront notre réflexion. La Partie II s'attachera à répondre à ces questions de recherche.

Chapitre 1. Le risque en agriculture

L'objectif du Chapitre 1 est de clarifier le concept de risque, sa représentation et l'usage que nous pouvons en faire pour traiter la question de notre cas d'étude, les pullulations de campagnols terrestres.

Il est en effet commun de parler de risque lorsqu'il s'agit d'étudier les activités de production agricole : les « risques climatiques », les « risques du métier », les « risques sanitaires », etc., sont autant de vocables couramment utilisés. Nous pensons toutefois que, du fait des évolutions auxquelles l'agriculture est confrontée (dérèglement climatique, risques émergents) mais aussi et principalement des particularités inhérentes à la production agricole elle-même, la notion de risque et ses implications en termes d'analyse économique doivent être davantage détaillées. Nous remarquons que lorsqu'il est utilisé abusivement, le vocable « risque » peut largement desservir l'analyse en extériorisant du système agricole un certain nombre de phénomènes naturels ou économiques qui sont pourtant endogènes. Toute perturbation de l'activité normale⁸ d'une exploitation agricole ne saurait ainsi être reléguée au rang des événements exogènes sur lesquels l'agriculture n'a aucune prise. Dans un premier temps, nous entendons donc démontrer qu'il est avant tout pertinent d'envisager le risque comme une composante endogène de l'activité agricole, et qu'il est utile d'en adopter une représentation opérationnelle capable d'expliquer l'origine des perturbations et de caractériser les meilleurs modes de gestion (sections 1.1 et 1.2).

Si entre les années 1960 et 2000 la gestion des risques agricoles a été fortement dépendante du *Fonds National de Gestion des Calamités Agricoles* (FNGCA), et repose désormais de plus en plus sur des outils assurantiels privés, nous souhaitons replacer l'agriculteur, c'est-à-dire le pilote du système agricole, comme acteur principal de la gestion des risques. Les risques n'étant pas des perturbations purement exogènes aux systèmes agricoles, leur gestion ne saurait se résumer à une approche compensatrice des dommages. Ainsi, la section 1.3 traite-t-elle de la prise de décision en situation d'incertitude, et la section 1.4 de la place de l'incertitude dans les dynamiques transactionnelles (notamment les contrats). En effet, lorsque la gestion du risque relève principalement de leviers internes au système agricole (comme c'est le cas des pullulations de campagnols terrestres ; voir Chapitre 2, p. 60), il est important de s'intéresser aux modes de prise de décision des agents en situation de risque puis aux incitations contractuelles envisageables pour favoriser des stratégies de gestion du risque pertinentes. Les instruments et stratégies de gestion du risque agricole font l'objet de la dernière section du Chapitre 1 (1.5).

1.1. Les risques en agriculture

1.1.1. Le risque est au cœur de l'activité agricole

Lorsque l'on retrace, ne serait-ce que brièvement, l'histoire de l'agriculture, en France ou ailleurs dans le monde et ce depuis ses débuts au Néolithique (Mazoyer et Roudart, 2002), le risque et sa gestion apparaissent comme des éléments centraux des préoccupations des Hommes. Les premiers Hommes n'étaient pas des agriculteurs : ils étaient des peuples nomades, vivant de chasse et de cueillette. Si l'agriculture – la mise en culture des sols par l'action délibérée de l'Homme – est apparue il y a environ 10 000 ans lors de la révolution Néolithique et dans plusieurs foyers différents, c'était précisément avec l'objectif d'extraire les peuples nomades de la contingence de la chasse et de la cueillette (Hardaker *et al.*, 2015, p. 1). Face au risque de ne rien trouver, de « rentrer bredouille », et donc au risque de famine, l'agriculture avait pour mission de sécuriser l'alimentation de toute une tribu. Ainsi, le processus de sédentarisation consistait-il en la construction d'un espace durable d'habitation, mais

⁸ La norme étant par ailleurs de plus en plus difficile à caractériser étant donnée la variabilité croissante des rendements et des prix.

aussi d'un espace alimentaire sécurisé (cultures, élevages, stockage). Ces deux espaces étaient mêlés, et la production alimentaire occupait une majeure partie du temps et des bras disponibles. L'agriculture est alors vivrière, nourricière : c'est une agriculture de subsistance pour la communauté fondée sur la domestication végétale et animale. Mais c'est aussi une forme d'agriculture qui rend la communauté et son alimentation dépendantes d'un seul et unique lieu de production et donc vulnérable face à de nouveaux aléas localisés (climat, ravageurs, maladies, ...) qu'il faut gérer.

Les premiers agriculteurs font alors face à leurs propres limites et à leur propre vulnérabilité : une forme de vulnérabilité socio-économique (Veyret et Reghezza, 2016), c'est-à-dire un manque de capacités à comprendre, expliquer et gérer ces phénomènes naturels perturbant la production agricole. Si l'espace agricole a été conçu pour sécuriser l'alimentation et sortir des contingences de la cueillette et de la chasse, il n'a pas toujours été totalement compris et maîtrisé. Pour expliquer les risques auxquels ils faisaient face, les Hommes en appelaient à la volonté des dieux, et ont tenté, par la pratique religieuse, d'en réduire la survenance et les effets. Ainsi, dans beaucoup de religions, les croyances ont établi la relation sacrée entre la volonté divine et la production agricole, notamment sa dépendance aux aléas climatiques et sanitaires.

- Un premier exemple est celui du culte de Déméter/Cérès, déesse gréco-romaine de l'agriculture. La croyance veut que l'attention et le soin que porte Déméter à la terre soit la clé d'une bonne récolte et que son humeur soit responsable du cycle des saisons. Des édifices religieux ont été bâtis à sa gloire, comme le temple de Naxos, en Grèce. Plusieurs fêtes, rites et cérémonies, comprenant des sacrifices, en l'honneur de la déesse rythment l'année et accompagnent les différents travaux agricoles et étapes de pousse de la végétation. Face aux risques, les Hommes devaient attirer la bienveillance de la déesse pour assurer une bonne récolte : les cérémonies et sacrifices faisaient office de prime payée à une « assurance divine ».
- Un deuxième exemple est celui de la Bible, qui présente notamment l'espace agricole comme un espace risqué, qu'il faut « *dominer* » (*Genèse 1, 28*). Ceci peut nous faire penser au propos de Descartes : « *Se rendre maîtres et possesseurs de la Nature* »⁹. C'est en maîtrisant la Nature que l'Homme peut s'extraire du risque. Nous retrouvons cette idée encore aujourd'hui dans certains milieux agricoles : il faut maîtriser chaque herbe, chaque insecte, dans l'espace agricole, pour protéger et assurer la récolte. La crainte d'une mauvaise récolte, du manque d'aliments voire de la famine est par ailleurs très présent dans la Bible, comme le rappellent les dix plaies d'Égypte, dans l'*Exode*, dont cinq sont en relation directe avec les risques qui peuvent affecter la production agricole : l'eau, la mort des troupeaux, la grêle, les sauterelles et les ténèbres.

⁹ René Descartes, 1637, *Discours de la méthode*.

- Enfin, un troisième exemple peut être tiré de la mythologie égyptienne. La production alimentaire du pays est dépendante d'un unique phénomène annuel : la crue du Nil. L'agriculture n'est possible qu'au bord de ce fleuve, à condition qu'il inonde ses berges et apporte des sédiments fertiles et de l'eau à la terre. Les égyptiens étaient donc attentifs à célébrer ce phénomène et accueillir ce présent divin comme il se doit. C'est ainsi, par exemple, que le sol du temple d'Isis à Philae possède un dallage inférieur régulier mais un dallage supérieur irrégulier (Figure 3) : celui-ci rappelle le sol craquelé par la sécheresse, attendant les eaux régénératrices. Lors de la crue du Nil, le temple était lui-même inondé, manière de célébrer la déesse et de s'assurer que la récolte future sera bonne (Desroches-Noblecourt, 2004).

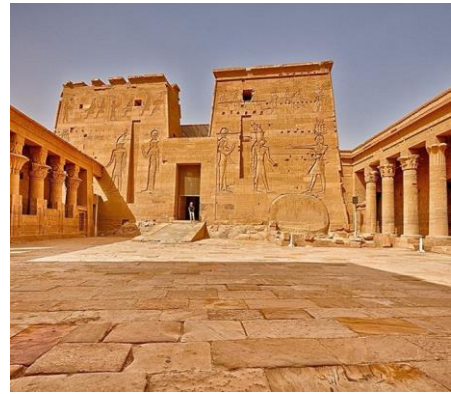


Figure 3 : Sol irrégulier du temple d'Isis à Philae, Egypte

Entre l'apparition de l'agriculture au Néolithique et le 18^e siècle, de réels progrès techniques ont été réalisés, mais ceux-ci n'ont pas transformé profondément les caractéristiques de l'agriculture. Ces changements se sont opérés sur une période de temps relativement longue, entre le 8^e et le 12^e siècle (Figure 4). Les évolutions observées au Moyen-Âge ne concernent pas l'introduction de nouvelles cultures ou de nouvelles méthodes, mais bien une amélioration des techniques existantes : « *le rythme nouveau des cultures permet l'étalement des risques* » mais aussi une meilleure répartition des travaux agricoles dans l'année (Duby, 1954). Ces modifications du système agraire sont significatives mais n'ont pas transformé profondément les caractéristiques de l'agriculture et n'ont, de plus, pas permis d'apporter de réponses solides à la dépendance aux aléas climatiques et sanitaires : « *les éléments du système agraire ne sont pas modifiés, et c'est une faiblesse grave* » (Duby, 1954).

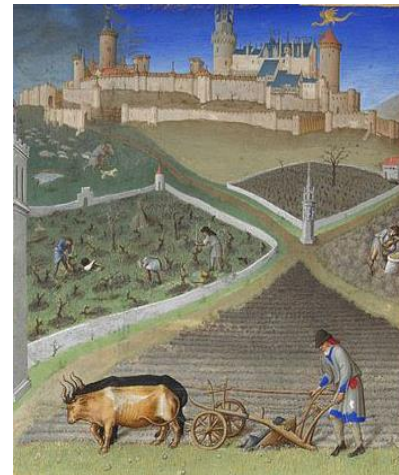


Figure 4 : Les travaux agricoles au XIV^e siècle (extrait d'une peinture sur vélin du XV^e siècle, collection du Musée Condé)

A partir du 12^e siècle, l'économie rurale entame une phase de stagnation. Il faudra attendre le 18^e siècle pour que la *première révolution agricole des Temps Modernes* soit mise en œuvre (Mazoyer et Roudart, 2002; Regnault *et al.*, 2012). Elle repose principalement sur la mise en place de rotations culturales élaborées et de jachères qui permettent de gérer les risques sanitaires et préserver la fertilité des sols. L'apport d'amendements animaux pour augmenter les rendements des cultures a également progressé. Il apparaît que les changements opérés au 18^e siècle s'inscrivent dans la continuité de ceux observés du Moyen-Âge.

La *deuxième révolution agricole des Temps Modernes* marquera le milieu du 20^e siècle (Mazoyer et Roudart, 2002; Regnault *et al.*, 2012). En France, elle est impulsée puis décrite par Michel Debatisse dans son ouvrage *La Révolution Silencieuse* (Debatisse, 1963). Avant les années 1950, l'agriculture française demeurait fondamentalement familiale, artisanale et vivrière : 35% des actifs du pays travaillaient dans l'agriculture, la productivité du travail et de la terre restant faibles. Suite aux ravages de la Seconde guerre mondiale, une politique agricole ambitieuse a été mise en œuvre avec l'objectif d'augmenter à la fois la productivité du travail agricole (pour libérer des bras pour d'autres secteurs économiques et reconstruire une Europe ravagée) et les rendements (afin de renforcer l'autonomie

alimentaire européenne). Ce mouvement s'est poursuivi et se poursuit encore aujourd'hui, avec une industrialisation plus poussée des processus de production agricole. Dans les années 1950, des progrès techniques considérables ont été réalisés : mécanisation et motorisation (pétrole), sélection variétale « en laboratoire », chimie de synthèse (engrais ou biocides), agrandissement des unités de production, spécialisation des fermes et des territoires... C'est en fait une révolution de l'énergie, avec l'incorporation massive d'énergie fossile dans l'agriculture, alors que l'énergie était jusque-là principalement solaire : carburants à base de pétrole pour les machines, mais aussi engrais chimiques dont la fabrication nécessite beaucoup d'énergie fossile. En quelques décennies, les résultats sont sans appel : la France passe d'un espace agricole vivrier à un espace agricole productif, d'une agriculture de subsistance à une agriculture de négoce. Les produits agricoles voient alors leur valeur d'échange supplanter leur valeur d'usage. Entre 1945 et 2000, la productivité du travail agricole a été multipliée par 10, les rendements ont été multipliés par 3 pour le blé et par 5 pour le maïs (Bourgeois et Demotes-Mainard, 2000). Ces gains de productivité et de rendement sont dus à une maîtrise croissante d'un certain nombre de risques affectant l'espace agricole. Les innovations techniques ont permis, au moins dans un premier temps, de rendre l'espace agricole moins risqué et ont conduit *in fine* à un progrès du système alimentaire. La mécanisation devait également permettre de rendre le travail agricole moins pénible pour les agriculteurs et de réduire les aléas personnels (accidents, troubles physiques, etc.).

1.1.2. Typologie des risques en agriculture

Du fait de son lien étroit avec les éléments naturels (sol, climat, ravageurs, pathogènes...), mais aussi de sa place dans l'économie (secteur primaire, inscrit dans la mondialisation des échanges), l'agriculture est un secteur économique soumis à de nombreux et divers risques. Certains de ces risques sont communs à l'ensemble des activités économiques (santé, accident, risques macro-économiques et financiers...), d'autres sont spécifiques à l'activité agricole (Blanc, 2003; Moschini et Hennessy, 1999, p. 2). Nous identifions sept sources de risque pouvant affecter les activités agricoles (Babusiaux, 2000; Cordier, 2008; Lupton *et al.*, 2019; Moschini et Hennessy, 1999; OCDE, 2009; World Bank, 2017) :

- 1° Les **risques de production**, occasionnant des variations de rendement et de qualité des produits. La fonction de production agricole est stochastique et dépend d'un certain nombre d'*inputs* qui ne peuvent parfois pas être prédits ni contrôlés par l'agriculteur, notamment du fait de la temporalité du processus de production agricole, la décision de production étant prise très en amont de la réalisation du produit final. Ces incertitudes relèvent principalement de la contingence du climat (risque climatique) ou du développement de maladies ou ravageurs (risque sanitaire).
 - Les **risques climatiques**. Les événements climatiques peuvent être ponctuels ou de grande ampleur (géographique, temporelle) et causer des pertes quantitatives et/ou qualitatives. En productions végétales, le gel, la grêle et la sécheresse sont considérés comme des événements climatiques « extrêmes ». Les risques climatiques ne sont pas *directement* maîtrisables par l'agriculteur. Cependant, les conséquences d'un aléa climatique sur les systèmes agricoles dépendent de facteurs dont les techniques de production, la durée du cycle de production (vulnérabilité physiologique dite conjoncturelle), les caractéristiques de la plante cultivée (vulnérabilité physiologique dite structurelle) et la fluctuation des prix (qui suivent ou non la production). En productions animales, le risque climatique majeur est la perte de fourrages due à la sécheresse dans la majorité des cas, et qui appelle soit l'achat de fourrage supplémentaire, soit la vente d'une partie du troupeau.
 - Les **risques sanitaires**. Ils correspondent aux maladies et ravageurs, microorganismes et substances chimiques qui peuvent affecter la production agricole. Ces risques sont

a priori maîtrisables par l'agriculteur. Il est important de comprendre si leur survenance est exceptionnelle ou bien tend à être courante, et s'il existe ou non des remèdes durables à ces maux. La caractéristique principale de ces risques sanitaires est leur capacité de dispersion spatiale, d'une parcelle à l'autre, d'une exploitation à l'autre, voire d'un territoire à l'autre.

- 2° Les **risques de prix ou de marché**. Ce risque est lié aux fluctuations des prix des produits ou des intrants. Notamment, le prix n'est pas connu au moment de la prise de décision ; ces incertitudes de prix sont d'autant plus grandes que ces derniers sont volatiles sur les marchés agricoles, particulièrement sur les marchés à l'export soumis à une plus forte concurrence.
- 3° Les **risques liés aux technologies**. Les techniques et technologies de production (machinisme, électronique, génétique...) évoluent rapidement : l'introduction d'innovations peut être à l'origine de gains de compétitivité sur les marchés agricoles mais aussi de nouveaux risques pour l'agriculteur qui les emploie.
- 4° Les **risques institutionnels**. Un changement dans les politiques publiques, commerciales ou agricoles peut constituer un risque pour les agriculteurs.
- 5° Les **risques financiers**. Les variations des taux d'intérêt et des taux de change peuvent affecter les exploitations dont le fonctionnement dépend de l'emprunt ou des marchés à l'export.
- 6° Les **risques humains et professionnels**. La manipulation des animaux, des machines, des outils, de charges lourdes, de produits chimiques..., constitue un risque pour l'intégrité physique et/ou la santé des agriculteurs.
- 7° Les **risques environnementaux**. Du fait du dérèglement climatique et des atteintes à la biodiversité, les conditions de production qui s'imposent à l'agriculture changent rapidement, et certaines conséquences possibles sur la production agricole de ces phénomènes ne sont pas encore totalement connues.

1.1.3. Emergence de nouveaux risques en agriculture

L'agriculture française a connu de profondes mutations, en particulier depuis la fin de la Seconde guerre mondiale (Bourgeois et Demotes-Mainard, 2000; Mazoyer et Roudart, 2002). Les mutations techniques, économiques et sociales de la production agricole ont modifié la nature des risques de production auxquels fait face l'agriculture. L'utilisation de variétés sélectionnées pour maximiser le rendement dans le cadre de monocultures a finalement favorisé leur sensibilité aux risques climatiques et sanitaires. La spécialisation des exploitations a favorisé leur sensibilité aux risques de marché. L'agrandissement des exploitations, la mécanisation et l'utilisation croissante d'intrants a également augmenté l'endettement et les charges des exploitations, fragilisant leurs trésoreries. Ainsi, d'une part, l'agriculture est soumise à des risques croissants, notamment du fait des changements économiques (dérégulation, financiarisation) et environnementaux (changement climatique, modification des écosystèmes) ; d'autre part, les agriculteurs sont conduits à prendre davantage de risque pour faire face à une concurrence exacerbée sur les marchés internationaux (investissements, adoption rapide de techniques et technologies nouvelles). Il est notable que ces risques ne proviennent pas seulement de l'extérieur (l'environnement naturel), mais sont aussi engendrés par les choix techniques et politiques eux-mêmes.

Ce constat de risques croissants est assez général et caractéristique de nombreuses économies du monde. Selon Beck (1992), la modernité n'a pas ainsi tenu ses « promesses » et a engendré de nouveaux risques économiques, sociaux et environnementaux, qui sont le corolaire de l'accroissement de la production de richesses : « *la production sociale de richesses est systématiquement corrélée à la production sociale de risques* ». Ces risques, non maîtrisés, engendrent la peur : « *la communauté de peur vient se substituer à la communauté de misère* ». Parce qu'il permet d'augmenter la productivité et les rendements espérés, le risque semble être devenu une norme des sociétés capitalistes ; la

précaution, quant à elle, apparaît davantage comme un manque d'audace et d'esprit d'entreprise (au sens premier).

De plus, l'agriculture est soumise à une incertitude croissante quant à l'évolution des risques eux-mêmes. Le meilleur exemple est actuellement le dérèglement climatique, compte tenu de l'ambiguïté qu'il existe sur ses évolutions et ses effets à venir sur l'agriculture. Le dérèglement climatique est devenu un enjeu majeur pour l'Humanité : au moins 325 millions de personnes sont déjà directement affectées chaque année par ses conséquences (Gemenne, 2013). Il impacte le niveau des eaux, menace des territoires d'inondation ou d'évènements climatiques extrêmes, menace des populations d'exile, impacte négativement la biodiversité. Le GIEC¹⁰ anticipe plusieurs scénarios de dérèglement climatique, dépendamment des émissions de gaz à effet de serre futures. Si les tendances actuelles se confirment, l'Europe centrale sera durablement affectée par une diminution des précipitations estivales et un accroissement du stress hydrique (Gemenne, 2013). Pour le seul cas de la France, les simulations climatiques prévoient un réchauffement compris entre 1°C et 4°C, selon les scénarios. Au-delà d'une augmentation moyenne de 2°C, les modèles montrent des ruptures et de grandes incertitudes concernant des bouleversements majeurs aux conséquences incalculables. Les climatologues prévoient un assèchement accru des sols français, avec notamment une chute significative de l'humidité des sols à l'automne et en été. Or, c'est en été que se constituent les stocks fourragers des élevages, en particulier les principales coupes de fourrages herbagers et la croissance du maïs. Pour toutes les latitudes, une augmentation de plus de 4°C causerait des effets négatifs pour l'agriculture, les ressources en eau et les écosystèmes. Ainsi, le changement climatique fait peser une menace sur la production agricole. L'état général de l'agriculture française atteste déjà de difficultés croissantes à faire face aux aléas climatiques. Les épisodes de sécheresses se font plus intenses et surtout plus fréquents. Les agriculteurs semblent aujourd'hui démunis face à de telles régressions des rendements, et redoutent les successions d'années sèches davantage encore que l'épisode ponctuel (Mosimann *et al.*, 2017).

Un autre exemple pertinent de l'émergence d'un nouveau risque est celui de notre cas d'étude, les pullulations de campagnols terrestres. Ces pullulations affectent certains territoires de moyenne montagne depuis les années 1970, causant d'importantes pertes fourragères aux exploitations exposées. Note et Michelin (2014) remarquent que « *depuis 1955, les zones de montagne d'Auvergne se spécialisent vers l'élevage et sont caractérisées par une augmentation des surfaces en herbe et une diminution des cultures annuelles* » (Figure 5). Ces profondes modifications des systèmes agricoles coïncident avec l'apparition des premières pullulations de campagnols terrestres en Auvergne. La part de prairies permanentes a augmentée de 30% en moyenne entre 1955 et 1988, et de 60% dans les zones de moyenne montagne (Fichet-Calvet *et al.*, 2000). Ces transformations de l'agriculture auvergnate sont plus globalement celles d'une spécialisation productive des territoires et des exploitations, logique centrale des réformes agraires d'après-guerre (Jeanneaux *et al.*, 2019) et ont affecté l'ensemble des productions agricoles régionales. La Figure 6 présente la cascade de conséquences de la spécialisation herbagère et de la simplification des paysages qui a conduit à une augmentation des épisodes de pullulation de campagnols terrestres (Truchetet *et al.*, 2014). Globalement, les territoires où la part de prairies permanentes a fortement augmenté, jusqu'à dépasser 70-80% de la surface agricole utile, et où les infrastructures agroécologiques ont été grandement simplifiés (disparition des haies...) sont particulièrement concernés par les pullulations de campagnols. Ce phénomène constitue un risque pour les systèmes fourragers des exploitations de moyenne montagne qui dépendent fortement de la ressource en herbe pour nourrir les troupeaux.

¹⁰ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

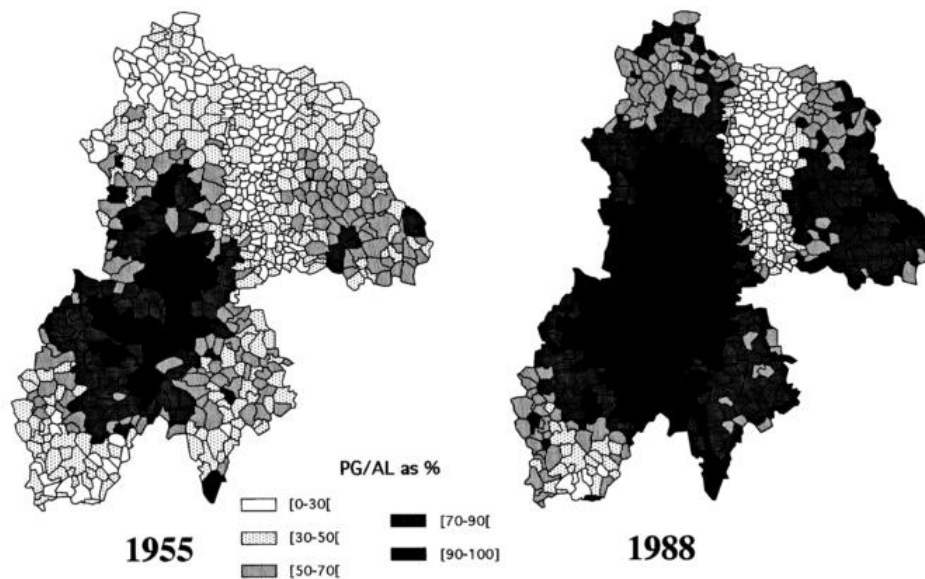


Figure 5 : Cartes de l'évolution des surfaces toujours en herbe entre 1955 et 1988, dans le Cantal et le Puy-de-Dôme (Fichet-Calvet et al., 2000). Le gradient de couleur correspond, du plus clair au plus foncé, à un rapport STH/SAU croissant.

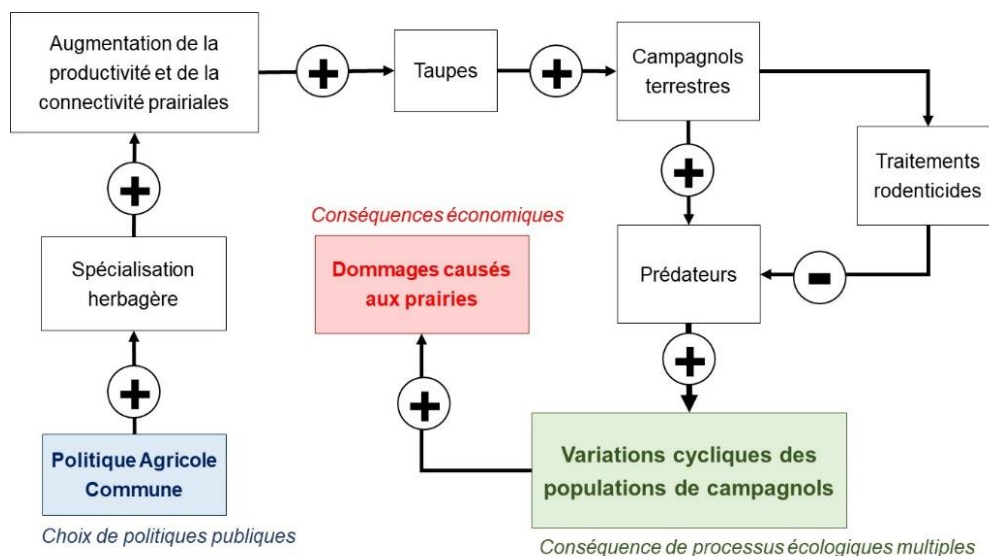


Figure 6 : Cascade de conséquences de la spécialisation herbagère sur les populations de campagnols terrestres et leurs prédateurs. Simplifié et adapté de Truchetet et al. (2014)

1.1.4. Approche historique de la gestion des risques agricoles en France

Face aux multiples risques auxquels l'agriculture est soumise, et face à l'émergence ou à la modification de certains risques, les instruments publics et privés proposés aux agriculteurs pour gérer ces risques ont évolué (Figure 7). De manière générale, à la fin des années 1950, la gestion assurantielle des risques était considérée comme coûteuse et inefficace (Dionne, 2013). Puis, dans les années 1970 et 1980 se sont développés de nouveaux outils de gestion financière des risques (produits dérivés, diversification des portefeuilles). Dans les années 1990, une réglementation internationale des risques a été établie et des modèles de gestion des risques internes aux entreprises ont été développés. Le cas de l'agriculture est plus particulier.

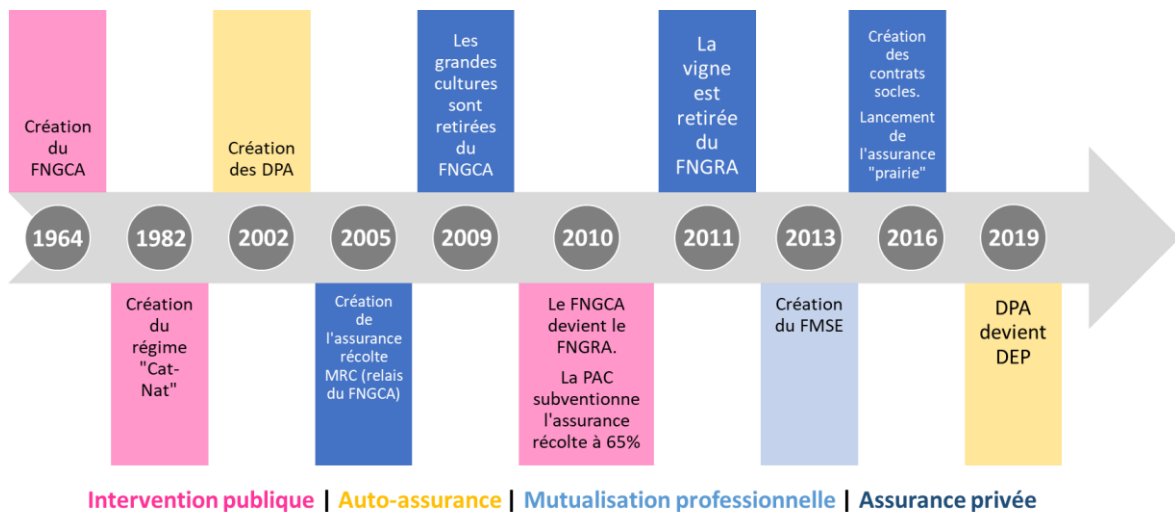


Figure 7 : La gestion des risques en agriculture, quelques étapes historiques et changements stratégiques (auteur)

- Si la gestion financière des risques agricoles a débuté dans les années 1970 à Chicago, en France, la stratégie relevait davantage de l'intervention publique (selon le principe de solidarité nationale) que de la gestion financière. Le Fonds National de Garantie des Calamités Agricoles (FNGCA), devenu Fonds National de Gestion des Risques Agricoles (FNGRA) en 2010, a été créé en 1964 pour permettre la gestion des crises par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR). Il s'agit d'une intervention directe de l'État. Le FNGRA prend en charge les « *dommages non assurables d'importance exceptionnelle dus à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel, lorsque les moyens techniques de lutte préventive ou curative employés habituellement dans l'agriculture n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants* ». Sont ainsi pris en charge par le FNGRA « *les dommages causés aux récoltes non engrangées, aux cultures, aux sols et au cheptel vif hors bâtiment* » (Babusiaux, 2000). Les intérêts du FNGRA sont de permettre, par la solidarité nationale et professionnelle, l'indemnisation de dommages non assurables et leur mutualisation, d'améliorer les délais d'indemnisation et de réduire les coûts de gestion, dans le respect du cadre européen (Babusiaux, 2000). Ses limites résident principalement dans le faible montant des ressources disponibles, qui implique une indemnisation variable selon les années.
- Les dommages non indemnisés par le FNGRA, à savoir les dommages causés aux véhicules, aux bâtiments agricoles et à leur contenu (récoltes, machines ou animaux), sont pris en charge par le Régime des catastrophes naturelles (créé en 1982) dès lors qu'ils sont couverts par un contrat d'assurance des biens. Le régime des catastrophes naturelles est régi par des sociétés d'assurances. Cependant, l'État fixe les taux de prime ainsi que les franchises absolues, et réassure ce régime à l'aide de la CCR. Il s'agit donc ici d'une intervention indirecte des pouvoirs publics, avec pour objectif de créer un effet levier plus important en faveur de l'assurance.
- En 2002, le principe d'une auto-assurance à l'échelle individuelle de l'exploitation est conforté par la création des *Déductions Pour Aléas* (DPA), devenues *Déductions pour Epargne de Précaution* (DEP) en 2019, qui permettent à l'agriculteur de constituer une épargne de précaution en prévision d'éventuels aléas impactant sa production (responsabilité individuelle).
- En 2005 est créée l'assurance récolte multirisque climatique, et l'État se désengage de l'indemnisation directe pour plusieurs productions végétales entre 2005 et 2011 : un choix est fait de soutenir le développement des assurances de marché pour assurer les risques climatiques sur cultures (exception faite de l'arboriculture et de la prairie, qui demeurent dans

le champ du FNGRA) en subventionnant les contrats à 65% du montant des primes payées par l'agriculteur.

- En 2013, face à la recrudescence des risques sanitaires notamment, et à la faveur d'une réforme de la PAC, le Fonds national agricole de Mutualisation du risque Sanitaire et Environnemental (FMSE) est créé, afin d'indemniser les pertes liées à de tels risques, non assurés par le marché. Le FMSE agit pour l'indemnisation des agriculteurs cotisants lorsqu'ils subissent des pertes liées à des incidents sanitaires ou environnementaux. 35% du budget du FMSE sont constitués des cotisations des agriculteurs (collectées par la MSA) et les 65% restants correspondent à des fonds européens (FEADER) ou étatiques (FNGRA). Le FMSE est donc à la fois un outil de solidarité nationale et de mutualisation professionnelle. Il est constitué d'une section commune et de sections spécialisées par filière. La section commune couvre l'ensemble des secteurs de production et possède un budget annuel de 10 millions d'euros. Elle indemnise les pertes dues aux incidents qui touchent plusieurs productions. Les sections spécialisées indemnisent leurs adhérents pour les incidents propres à leur secteur de production et disposent d'un budget annuel moyen de 5 millions d'euros. Ainsi, le FMSE repose sur une double mutualisation professionnelle : tous les agriculteurs cotisent à la section commune (20€ par an et par actif, selon un principe de solidarité professionnelle) puis chaque agriculteur cotise à la section spécialisée qui correspond à sa production (par exemple, 60€ par an et par actif pour la section « fruits », selon un principe de responsabilité de chaque secteur de production spécialisé).
- Enfin, en 2016, les assurances récoltes sont réformées (contrat socle subventionné à 65%, puis contrats complémentaires) et l'assurance indicielle « prairie » est créée. Les prairies demeurent cependant encore, à cette heure, dans le champ du FNGRA¹¹.

Ainsi, historiquement, l'intervention publique pour la gestion des risques agricoles est prégnante et de premier plan en France. En effet, l'agriculture est un secteur primaire dont la déstabilisation peut impacter la sécurité alimentaire mais aussi le fonctionnement économique du pays (Boussard, 2010). La gestion des risques agricoles est un enjeu politique majeur, notamment pour une agriculture aussi productive que l'agriculture française. Toutefois, nous observons, dans un contexte de libéralisation croissante de l'économie et en particulier de l'économie agricole, que le rôle de l'État et la place de l'intervention publique sont de plus en plus relégués à un second plan, au profit des instruments assurantiels privés. Cela va dans le sens du désengagement des pouvoirs publics dans la régulation des marchés agricoles observée depuis les années 1990 en Europe (Loyat, 2012). Pourtant, l'action publique demeure fondamentale dans la gestion des risques agricoles. L'État demeure un législateur (*Code des assurances*, cahiers des charges, ...) mais aussi un financeur important dans le domaine assurantiel. Notamment, l'État prend en charge une partie des primes d'assurance (subventions pouvant atteindre 65% du montant des primes, comme pour les assurances « récolte ») ou bien fournit des aides à la réassurance (Blanc, 2003; OCDE, 2009). Cette intervention publique est bien souvent indispensable à l'existence des outils assurantiels en agriculture (Smith *et al.*, 2017).

La section 1.1 a démontré la diversité des risques auxquels est soumise l'activité agricole. Elle a également permis de mettre en évidence les questionnements relatifs à la fourniture d'instruments pertinents pour gérer et couvrir ces risques. Le cas d'étude du campagnol terrestre illustre cette complexité : pour être en capacité de procéder à une analyse fine de ce phénomène et de sa gestion

¹¹ Le très faible développement de l'assurance Prairies (que nous discuterons dans notre Discussion générale) ne permet pas à l'heure où nous écrivons ces lignes d'envisager le retrait des prairies du FNGRA au profit exclusif de l'assurance de marché.

(qui sera l'objet du Chapitre 2), nous proposons dans la suite du Chapitre 1 une approche théorique de la notion de risque en économie (1.2), de la décision en situation d'incertitude (1.3) et des conséquences de l'incertitude sur les transactions et les contrats (1.4). Nous aborderons enfin la question de la gestion des risques (1.5).

1.2. Notion de risque en économie

1.2.1. Origine et étymologie du mot « risque »

« Le risque est comme l'amour. Nous savons bien ce que c'est, mais nous ne pouvons pas le définir avec précision ». Cette citation attribuée à Joseph Stiglitz par Brossier (1989) ne saurait décourager notre entreprise : définir, représenter et caractériser le risque en général, puis les risques en particulier.

Plusieurs origines du mot « risque » sont avancées par la littérature (Pradier, 2006). Une première thèse lie l'apparition du concept de risque avec l'avènement du capitalisme et d'une économie fondée sur l'accroissement (risquée) du profit. Ce concept pourrait également être apparu dans le vocabulaire nautique, à partir de la racine latine « *resicare* » (« enlever en coupant »), signifiant le danger d'heurter un rocher et d'endommager la coque du bateau. La thèse la plus probable fait du mot « risque » un vocable des marchands, dont la diffusion s'est opérée le long des routes commerciales à partir des grands ports commerciaux italiens (Pradier, 2004). Il n'est alors pas étonnant qu'au XVIIe siècle, le risque soit plus fortement présent dans le vocabulaire économique en désignant ce qui menace les investissements d'un entrepreneur. Au XVIIIe siècle, ère d'aventures et de découvertes, le vocabulaire de l'aléatoire et de l'incertitude se développe davantage. Enfin, au XXe siècle, le concept de risque adopte une certaine polysémie et s'applique à de nombreux domaines qui dépassent le champ économique ou celui de l'intégrité humaine : c'est la « *société du risque* » de Beck (1992). Concrètement, c'est en économie de l'assurance que le concept de risque a été le plus développé, notamment à partir des premières assurances maritimes (Pradier, 2006).

Cette très brève description de l'origine du mot « risque » montre que ce concept s'est construit et enrichi progressivement, au fur et à mesure que les sociétés et les économies se sont transformées. Kermisch (2012) souligne d'ailleurs l'ambiguïté du concept de « risque » en listant les différentes manières de le définir : est-ce un évènement indésirable susceptible de se produire ? ou bien est-ce la cause de cet évènement indésirable ? est-ce la probabilité d'occurrence d'un tel évènement ? ou bien l'espérance mathématique de ses conséquences ? ou bien encore est-ce plus généralement la caractérisation du contexte aléatoire dans lequel a lieu la prise de décision ?

Il nous semble que choisir l'une ou l'autre de ses définitions de manière exclusive amputerait inévitablement le concept de « risque » d'une part significative de sa richesse et de sa capacité à décrire le réel. Dans les deux paragraphes suivants, nous proposons de construire une définition du risque (1.2.2) qui, sans éluder toute la complexité de ce concept, soit en capacité d'en fournir une représentation opérationnelle (1.2.3).

1.2.2. Définition du risque

Le risque est la conséquence d'une information imparfaite sur les états de la nature possibles et/ou leur réalisation effective (Cahuc, 1998; Cayatte, 2009). Il n'y a pas de risque en univers certain, car chaque décision d'un agent ne produit qu'un résultat possible et parfaitement connu *a priori*. En revanche, en univers incertain, l'information imparfaite sur les états de la nature conduit les agents à prendre une décision sans connaître celui qui sera effectivement réalisé : le résultat de leur décision n'est pas certain et connu *a priori*, ce qui limite de fait la possibilité d'une décision optimale et maximisatrice.

Le risque est un évènement probabilisable. Knight (1921, pp. 224-225) a opéré la distinction entre le risque et l'incertitude grâce à la notion de probabilité. Une incertitude correspond à un évènement dont la probabilité de survenance ne peut être calculée ni théoriquement (par un raisonnement *a priori*), ni statistiquement (grâce au traitement mathématique d'une série d'observations historiques). A l'inverse, un risque correspond à un évènement probabilisable, *a priori* ou statistiquement. La fréquence d'un risque, mesurable, est donc l'une de ces principales caractéristiques. Moschini et Hennessy (1999, p. 1 et p. 4) opèrent toutefois une distinction différente de celle de Knight entre *incertitude* et *risque* : l'incertitude correspond à la situation où plusieurs revenus sont possibles pour une même décision d'un agent (selon l'état de la nature effectivement réalisé) ; le risque est associé à une situation d'incertitude dans laquelle tout ou partie des conséquences possibles ne sont pas désirables pour l'agent. L'incertitude correspond alors davantage aux *conditions* dans lesquelles les décisions économiques sont prises, et le risque aux *conséquences* économiques de cette incertitude.

Le risque est un aléa, évènement non prédictible. L'une des caractéristiques importante d'un risque est son caractère aléatoire : un risque est un évènement dont il n'est pas possible de prédire la survenance, c'est-à-dire de savoir avec précision quand il va survenir. Dans le cas contraire, nous retrouverions le cas d'un évènement certain. Ce caractère aléatoire du risque est une caractéristique majeure lorsqu'il s'agira d'analyser son assurabilité (Enjolras, 2008).

Le risque est une source de dommages. Le risque est un danger, une menace, un évènement indésirable, redouté. Beck (1992) décrit d'ailleurs la « *société du risque* » comme celle de la peur. Le risque est la cause de dommages (manque à gagner ou dégradation du capital) qu'il est souvent possible d'évaluer. Le risque est alors caractérisé par son intensité. Cette caractéristique induit deux corollaires : (1) l'existence d'un enjeu économique pouvant être affecté par la survenance d'un tel évènement ; (2) la propension d'un tel enjeu à subir des dommages, c'est-à-dire sa vulnérabilité (Décamps, 2007; Enjolras, 2008; Sneessens *et al.*, 2017; Urruty *et al.*, 2016). La vulnérabilité peut également être conçue comme l'incapacité d'un système à se protéger des risques auxquels il est exposé (Chambers, 1989; Folke *et al.*, 2002; Veyret et Reghezza, 2016).

Mathématiquement, le risque est souvent défini comme la **dispersion d'une variable aléatoire autour de son espérance** (Cayatte, 2009; Markowitz, 1952; Pradier, 2006). Cette définition est héritée de l'essor de la finance et de la nécessité pour les investisseurs de choisir l'investissement le plus rentable ou encore de celle pour les assureurs de garantir leurs capacités à payer les indemnités de sinistres. Dans ces modèles statiques, l'espérance mathématique est le rendement moyen et l'écart-type traduit le risque. La décision face au risque revient alors à un arbitrage entre une rémunération moyenne plus grande et un risque plus élevé (Sharpe, 1964).

Nous proposons de définir le risque comme **une perturbation incertaine, probabilisable mais non prédictible, à l'origine de variations des conditions de production et causant des dommages à un enjeu économique vulnérable.**

1.2.3. Vers une représentation opérationnelle du risque

Le risque est un concept économique à part entière dont il est utile de préciser l'ensemble des caractéristiques. Nous proposons de construire une représentation opérationnelle du risque à même d'offrir un cadre d'analyse efficace pour la suite de nos travaux.

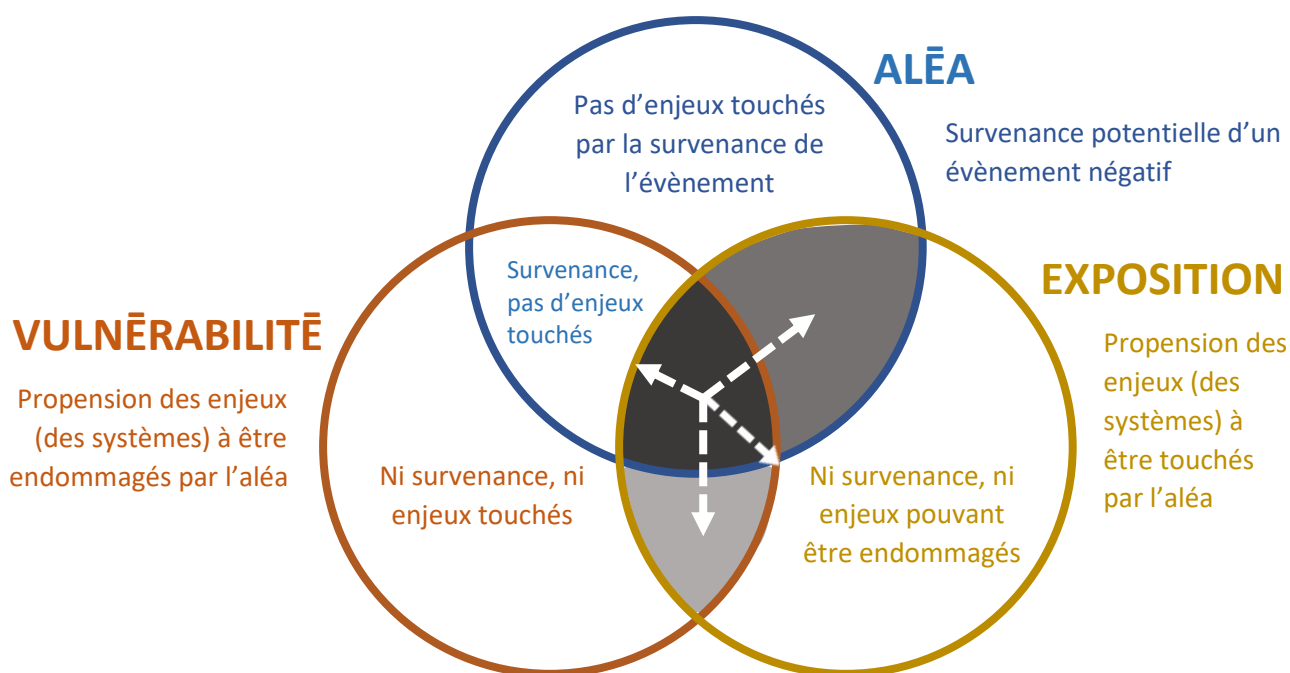
Nous représentons le risque comme la concomitance entre l'exposition d'un enjeu économique (caractérisée par sa localisation géographique, par sa valeur propre ou celle de sa production espérée...), un aléa pouvant potentiellement affecter cet enjeu (évènement aléatoire caractérisé par sa fréquence et son intensité) et la vulnérabilité de cet enjeu (ensemble de caractéristiques intrinsèque à l'enjeu déterminant sa propension à être endommagé par la survenance de l'aléa).

Cette représentation permet une définition opérationnelle du risque car elle repose sur une analyse graduelle de ce concept (Figure 8).

- (1) Premièrement, le risque dépend des caractéristiques de l'aléa, d'une part sa fréquence (délai de retour), qui correspond à sa probabilité d'occurrence, et d'autre part son intensité, qui peut correspondre à une mesure du potentiel de dommage de l'aléa. Les caractéristiques d'un aléa peuvent changer selon la zone géographique considérée. Une maison située dans une zone à forte pluviométrie sera plus fréquemment et plus fortement soumise au risque d'inondation qu'une maison identique située dans une zone de plus faible pluviométrie, ces deux zones ayant des topographies identiques. Ces deux maisons sont soumises à un risque différent car elles sont soumises à une perturbation (aléa) différente.
- (2) Deuxièmement, il n'y a risque que si un enjeu que l'on souhaite préserver est exposé à l'aléa, c'est-à-dire qu'il peut être potentiellement affecté en cas de survenance de l'aléa. Cette exposition est souvent une caractéristique dépendante de la localisation géographique de l'enjeu. Par exemple, deux maisons identiques, l'une située dans une cuvette et l'autre en hauteur, ne seront pas exposées au même risque d'inondation, quelles que soient les caractéristiques propres de ces maisons et à pluviométrie égale. Le risque est différent car l'exposition à des dommages est différentes, pour un même niveau de perturbation.
- (3) Troisièmement, le risque est d'autant plus grand que les enjeux sont vulnérables, fragiles, face à la survenance de l'aléa. Souvent, les décisions de prévention visent à diminuer la vulnérabilité des enjeux lorsqu'il n'est pas possible d'agir directement sur l'aléa lui-même. La vulnérabilité est une caractéristique intrinsèque de l'enjeu, dépendante des actions humaines. Pour terminer avec l'exemple de maisons soumises à un risque d'inondation, deux maisons soumises à une même exposition au même aléa ne seront pas endommagées de la même manière si leurs caractéristiques ne leur confèrent pas la même vulnérabilité. L'une d'elles sera peu vulnérable si sa construction ou bien encore la mise en place de digues la protège davantage ; l'autre sera plus vulnérable si aucune mesure particulière de protection ne sont mises en place ou bien si sa structure initiale était plus fragile.

L'analyse des risques est donc un problème en trois dimensions indissociables : la perturbation (aléa), l'exposition et la vulnérabilité. La frontière entre l'exposition et la vulnérabilité à un aléa est parfois tenue (Dauphiné et Provitolo, 2007), et cette distinction peut apparaître comme artificielle. Il nous semble toutefois utile d'être en capacité de distinguer les enjeux exposés (valeur, part affectée par la survenance d'un aléa) et la vulnérabilité du système (caractéristiques opérant le passage du phénomène-cause au dommage). Nous pouvons considérer ces trois éléments (aléa, exposition et vulnérabilité) selon des gradients : un aléa plus ou moins fréquent et intense, une exposition plus ou moins forte, une vulnérabilité plus ou moins importante.

L'objectif de la gestion des risques est de parvenir à extraire l'enjeu de sa position centrale dans ce diagramme, en mobilisant la capacité d'adaptation du système économique. Cette capacité d'adaptation sera différente selon les marges de manœuvres effectives : est-il possible d'agir directement sur l'aléa pour en réduire la fréquence et l'intensité ? est-il possible de réduire l'exposition de l'enjeu économique et faire en sorte qu'il soit moins touché par l'aléa quand il survient ? est-il possible de réduire la vulnérabilité de l'enjeu et donc réduire les dommages qu'il subit ? Plusieurs stratégies de gestion des risques sont donc théoriquement possibles (voir 1.5). Il convient de choisir la plus efficace pour parvenir, *in fine*, à réduire le risque voir idéalement s'en extraire, c'est-à-dire subir de moindres dommages ou bien ne plus en subir.



Légende :






-  Présence d'enjeux pouvant être touchés et endommagés par un aléa pouvant survenir sur la zone
-  Présence d'enjeux pouvant être touchés mais peu endommagés par un aléa pouvant survenir sur la zone
-  Présence d'enjeux pouvant être touchés et endommagés par un aléa ne survenant pas sur la zone
-  Pas d'enjeux pouvant être touchés, endommagés ou concernés par la survenance d'un aléa
-  Capacité d'adaptation, i.e. possibilité de réduire le risque, d'une manière ou d'une autre

Figure 8 : Représentation opérationnelle du risque (auteur)

1.2.4. Particularité du risque en agriculture

Nous venons de donner, dans le cadre d'une approche générale, une définition du concept de risque. Cette définition générale est-elle applicable au cas de l'agriculture ?

Cela semble *a priori* difficile : de nombreux déterminismes et de nombreuses interrelations existent entre les différents éléments d'un agrosystème, et les risques agricoles semblent parfois être davantage des événements incertains et irréguliers que des événements purement aléatoires (Eldin, 1989). Moschini et Hennessy (1999, p. 13) résumant ainsi la situation de risque inhérente à la prise de décision en agriculture : « *les prix de vente ne sont pas connus avec certitude lorsque les décisions de production sont prises et le processus de production lui-même comprend des sources inhérentes d'incertitude* ». Boussard (1988, p. 72) insistait sur ce second point : « *L'incertitude joue en agriculture un rôle particulièrement grand, du fait que même la fonction de production est extrêmement incertaine* ».

Une distinction particulièrement importante semble devoir être opérée entre le « risque-cause » (la perturbation, l'aléa) et le « risque-effet » (les conséquences, les dommages dus à sa survenance) (Eldin, 1989). Le « risque-cause », couplé aux caractéristiques du système (vulnérabilité, contraintes), détermine l'importance du « risque-effet ».

Ils ne mouraient pas tous, mais tous étaient frappés

Les Animaux malades de la Peste, Jean de La Fontaine, Fables, 1678-1679

Ainsi, l'agriculteur est soumis à au moins deux niveaux de risque : le risque « naturel » qui affecte directement la qualité et la quantité de sa production ; le risque « économique » qui affecte le prix de vente de sa production (Labonne, 1989) :

- « **Le risque naturel** se caractérise par une baisse de la production attendue, liée à un phénomène naturel : perturbations climatiques, sécheresse, inondation, attaque incontrôlable de parasites animaux ou végétaux, épidémies, grands incendies, etc. » Ce premier niveau de risque concerne donc la production de produits agricoles en tant que matière première. Comme nous l'avons vu au début précédemment (1.1.1), l'agriculture a une longue histoire de gestion de ces risques naturels, si bien que de nombreuses pratiques et techniques agricoles existent pour les gérer à l'échelle de la parcelle (lutte biologique, lutte chimique, choix des variétés, rotations, cultures associées, irrigation...), de l'exploitation agricole (diversification, agencement spatial des cultures) ou de la communauté (solidarité, assurance...).
- « **Le risque économique** se manifeste par une baisse du revenu liée à une diminution des prix, souvent provoquée par un excédent d'offre. » En réalité, le risque économique en agriculture est complexe, et sa compréhension a été très tardive dans l'histoire de la pensée économique (Boussard, 2010). Notamment, la forte variabilité des prix sur les marchés agricoles (Boussard, 1988, p. 14) n'est pas seulement explicable par la survenance d'aléas naturels tels que décrits précédemment, mais également par le décalage temporel qu'il existe entre la décision de production et la réalisation de la récolte. L'ajustement des prix a été expliqué par la théorie du *Cobweb*, formalisée par Ezekiel (1938) : pour une culture annuelle telle que le blé, par exemple, l'offre de l'année n , Q_n , dépend des prix observés à l'année $n - 1$, P_{n-1} , i.e. $Q_n = f(P_{n-1})$ (Boussard, 1994; Muet, 1993, p. 67). Ce décalage aboutit à une succession d'évolutions des prix dans le temps selon un diagramme en forme de toile d'araignée (*Cobweb*, Figure 9). De plus, la demande en produits agricoles étant généralement peu élastique en fonction du prix (loi de King), les surplus de production ne peuvent pas être écoulés au prix du marché, ce qui accentue les baisses de prix liées à l'augmentation des volumes produits. Les marchés agricoles sont ainsi structurellement instables, et la variabilité des prix sera d'autant plus dangereuse pour le revenu des exploitations que le fonctionnement des marchés n'est pas suffisamment fin pour prendre en compte la réalité des coûts de production de chaque région agricole dans la construction des prix. En l'absence de coordination, les marchés agricoles internationaux sont marqués par d'importantes asymétries d'informations et leur fonctionnement est déstabilisé par de nombreuses erreurs d'anticipation. La dépendance couplée aux aléas naturels et à la concurrence sur les marchés mondiaux peut conduire certains Etats à mettre en place des mécanismes contra-cycliques de régulation des prix agricoles (Dufumier, 1989) ou encore des politiques de stockage public (Boussard, 2010).

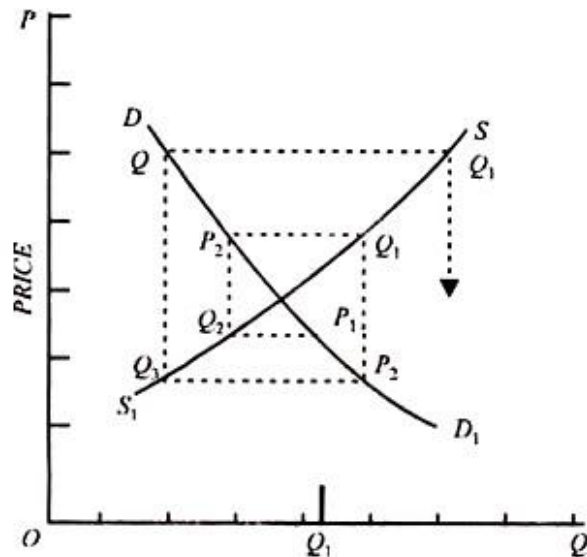


Figure 9 : Modèle de Cobweb divergeant (cas d'une demande moins élastique que l'offre), d'après Ezekiel (1938)

Au-delà des fortes interrelations entre les pratiques agricoles, la vulnérabilité des systèmes de cultures ou d'élevage et les dommages qu'ils sont susceptibles de subir, nous devons nous interroger sur l'*omniprésence* du risque dans le secteur agricole, et plus précisément sur le caractère parfois non-aléatoire des risques agricoles. En effet, ce qui n'est pas ou peu aléatoire, ce qui n'est pas exceptionnel et imprévisible, ne rentre pas *a priori* dans la définition du risque que nous avons esquissée précédemment. Pourtant, le terme « risque » et ses concepts sont plus que couramment utilisés dans le milieu agricole. L'hypothèse d'un simple abus de langage est peu crédible tant les conséquences productives, économiques et humaines d'une sécheresse, pour ne prendre que cet exemple, peuvent être lourdes pour les exploitations agricoles et les systèmes alimentaires.

Le risque agricole provient d'une part du caractère aléatoire de certains événements indésirables, mais aussi et surtout de l'incertitude relative à la concomitance de plusieurs événements négatifs, aléatoires ou non : « *le risque agricole peut être défini comme tout un ensemble de facteurs contraires à une production stable et économiquement satisfaisante* » (Cochereau, 1989). De plus, la mise en œuvre de nouvelles pratiques ou l'augmentation du niveau de consommations intermédiaires ne sauraient de manière certaine prémunir contre la survenance de dommages : le risque agricole est encore « *l'absence de liaison sûre et garantie entre un certain volume d'intrants et une certaine quantité de produit* » (Couty, 1989). Sans renier la définition générale du risque, et surtout la représentation opérationnelle que nous en avons donné, nous proposons de la compléter dans le cas de l'agriculture : **le risque agricole correspond à l'instabilité de la production et des revenus, inhérent au processus de production lui-même et à sa dépendance aux éléments naturels, et ce pour tout niveau d'intrants consenti par l'agriculteur**. Le risque est donc le fait d'une perturbation, non nécessairement aléatoire, mais source de variabilité.

Il nous semble important, pour lever l'ambiguïté du concept de risque, de distinguer deux grands types de risques en agriculture :

- Le **risque endogène et courant**, qui correspond à la variabilité standard des conditions de production agricole, causant la variabilité des volumes et de la qualité de la production. Cette variabilité courante est inhérente au processus de production agricole et doit en premier lieu être gérée à l'échelle des systèmes de production.
- Le **risque exogène et exceptionnel**, qui correspond à des perturbations peu fréquentes et d'ampleur non négligeable, dont l'origine est plutôt indépendante du système agricole.

Lorsque l'intensité de dommages exceptionnels est trop importante pour qu'ils ne soient absorbés par le système agricole, des mesures de compensation sont nécessaires.

Dès lors, nous posons une implication majeure pour la suite de nos travaux : il n'est pas envisageable de supprimer les risques auxquels est soumise l'agriculture puisqu'ils sont consubstantiels au processus de production agricole. Cela pousse les agriculteurs à chercher des compensations dans l'espace et dans le temps et à définir des *stratégies* de gestion du risque : nous devons donc maintenant nous attacher à étudier la prise de décision en situation de risque (1.3).

1.3. Prise de décision en situation de risque

1.3.1. Décision en univers incertain

Le risque et l'incertitude sont le résultat d'une insuffisance d'information sur les états de la nature (Cahuc, 1998; Cayatte, 2009). Un état de la nature (ou état du monde) est un « événement qui détermine la conséquence d'une action » (Cayatte, 2009, p. 20). La conséquence d'une décision n'est donc pas déterministe, mais stochastique. En situation d'information imparfaite, l'étude du comportement des agents rationnels prend un autre sens, puisque la seule maximisation de l'utilité ou du profit ne saurait définir la rationalité d'un comportement. En effet, l'état de la nature qui sera réalisé n'est souvent pas connu au moment de la prise de décision, ce qui conduit Keynes (1937) à contester la possibilité d'un comportement parfaitement rationnel et calculeur, car l'incertain n'est en réalité que très rarement considéré dans les prises de décision.

Le concept de risque est ainsi lié à la prise de décision en univers incertain, c'est-à-dire où plusieurs options s'offrent à l'agent et que l'état de la nature n'est pas précisément connu (Cayatte, 2009). Pour prendre sa décision, l'agent construit une matrice d'information qui croise les états de la nature E et les actions A possibles pour fournir des résultats attendus dans chaque cas (Tableau 1). Ainsi, en situation d'incertitude, les revenus sont des variables aléatoires données par la fonction $c(A, E)$ (Moschini et Hennessy, 1999, p. 5-6).

Tableau 1 : Matrice d'information

	Etat de la nature e_1	Etat de la nature e_2	...	Etat de la nature e_n
Action a_1	$c(a_1, e_1)$	$c(a_1, e_2)$	...	$c(a_1, e_n)$
Action a_2	$c(a_2, e_1)$	$c(a_2, e_2)$	...	$c(a_2, e_n)$
...
Action a_m	$c(a_m, e_1)$	$c(a_m, e_2)$	...	$c(a_m, e_n)$

Selon le niveau d'information accessible, il est possible de définir quatre situations (Figure 10) : (1) en situation de certitude, l'information est parfaite et connue de tous (connaissance commune) ; (2) en situation de risque, l'information est imparfaite et peut être subjective (perception par l'agent) ; (3) en situation d'incertitude, l'information est imparfaite et le doute est accru ; (4) en situation d'ignorance, l'information est nulle.

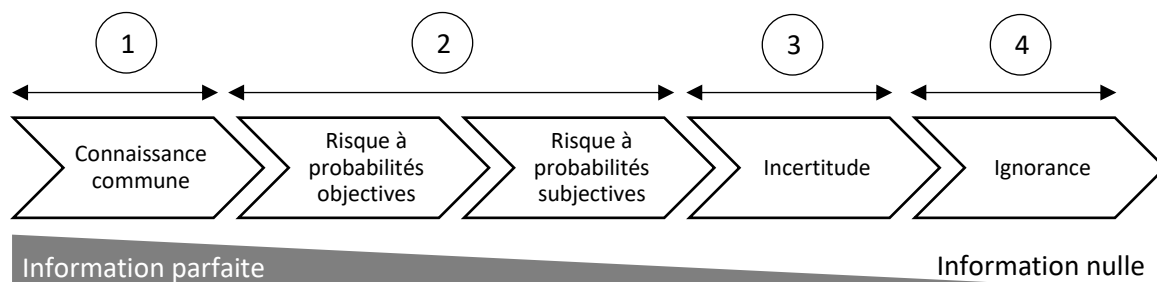


Figure 10 : Niveau d'information et notion de risque (Maichanou, 2014)

La décision face au risque dépend donc du niveau d'information disponible au moment de la prise de décision : selon l'information qui lui est accessible, un agent prendra des décisions différentes car il n'attribuera pas aux états de la nature les mêmes probabilités.

1.3.2. Comportement face au risque et utilité

La décision face au risque dépend également des préférences et du comportement propre de l'agent face au risque, c'est-à-dire de son niveau d'aversion pour le risque. Un exemple bien connu illustre ce phénomène : le paradoxe de Saint-Pétersbourg (Cayatte, 2009, p. 40).

Considérons le jeu consistant à lancer une pièce jusqu'à ce qu'elle tombe sur le côté « pile ». Le nombre de lancers N est aléatoire. La question posée par Nicolas Bernoulli en 1713 était de connaître le prix b maximal qu'un individu dont l'unique intérêt est le gain acceptera de payer pour participer à ce jeu. Classiquement, cet individu a des préférences représentées par l'espérance de sa richesse. Si ω est sa richesse initiale, le prix b qu'il acceptera de payer est tel que :

$$E(\omega - b + 2^N) \geq E(\omega)$$

$$\omega - b + E(2^N) \geq \omega$$

$$b \leq E(2^N)$$

Cela signifie qu'un tel individu serait prêt à payer un prix b inférieur ou égal à l'espérance de gain du jeu. Or, l'espérance de gain $E(2^N)$ est infinie, ce qui signifie qu'un individu dont les préférences sont représentées par l'espérance de la richesse serait prêt à payer une somme infinie pour participer à ce jeu. Evidemment, personne ne serait prêt à cela, et Bernoulli n'est pas parvenu à trouver une seule personne à la cour de Saint-Pétersbourg qui accepterait de payer ne serait-ce que 20 ducats pour ce jeu. L'espérance de gain n'est donc pas le calcul qui gouverne le choix des individus en situation de risque ou d'incertitude, mais davantage la satisfaction que l'individu en retire. Ce critère est de fait beaucoup plus subjectif qu'un critère purement statistique.

Le paradoxe de Saint-Pétersbourg illustre un principe économique bien connu : l'aversion au risque. Un agent économique cherchera à minimiser le risque qu'il encourt. Bien sûr, le degré d'aversion au risque varie fortement selon les agents considérés, leur caractère et leur condition d'existence.

Pour comprendre le comportement d'un agent en situation de risque, il est utile de représenter les préférences des agents à l'aide d'une fonction de Markowitz, composée de deux arguments : l'espérance et la variance de la richesse (Cayatte, 2009, p. 44-45; Markowitz, 1952). La variance est une représentation du risque. La fonction représentant la richesse s'écrit : $W = \omega + X$, avec ω la part certaine de la richesse et X sa part variable. Son espérance et sa variance s'écrivent respectivement : $E(W) = \omega + E(X)$ et $V(W) = V(X)$. L'utilité de la richesse d'une fonction de Markowitz est donc : $U(W) = f(E(W), V(W))$. La fonction U est supposée croissante par rapport à l'espérance de richesse : $\frac{\partial U}{\partial E(W)} > 0$.

Il est globalement possible de classer les individus selon trois comportements face au risque :

- Un individu **neutre face au risque** aura des préférences représentées par la fonction espérance de la richesse. Un tel individu sera indifférent entre une richesse aléatoire et une richesse certaine (l'espérance de la richesse aléatoire) et sensible uniquement au critère d'espérance de la richesse : $\frac{\partial U}{\partial V(W)} = 0$. La fonction d'utilité d'un agent neutre face au risque sera linéaire et telle que $\forall X \in \mathbb{R}, u(E(X)) = E(u(X))$.

- Un individu **averse au risque** aura une utilité décroissant avec le risque : à espérance donnée, il préfère la richesse qui présente le risque le plus faible. Mathématiquement, cela signifie que $\frac{\partial U}{\partial V(W)} < 0$. Quelle que soit la mesure du risque, un agent a de l'aversion pour le risque s'il préfère strictement l'espérance d'une richesse aléatoire à cette richesse. La fonction d'utilité d'un individu averse au risque est concave et telle que $\forall X \in \mathbb{R}, u(E(X)) > E(u(X))$. Plus basiquement, un individu sera considéré comme averse au risque si, pour toute loterie $F(w)$ donnée, il préfère l'équivalent certain w à la loterie $F(w)$ (Moschini et Hennessy, 1999, p. 9).
- Un individu ayant **du goût pour le risque** aura une utilité croissante avec le risque : à espérance donnée, il préfère la richesse qui présente le risque le plus élevé. Mathématiquement, cela signifie que $\frac{\partial U}{\partial V(W)} > 0$. Cette proposition est très théorique et peu observée dans les faits : un agent a du goût pour le risque s'il préfère strictement une richesse aléatoire à l'espérance de cette richesse. La fonction d'utilité d'un individu ayant du goût pour le risque est convexe et telle que $\forall X \in \mathbb{R}, u(E(X)) < E(u(X))$.

Le degré d'aversion pour le risque d'un agent, dont la fonction d'utilité est $u(\cdot)$, peut être mesuré grâce au coefficient d'Arrow-Pratt (Cayatte, 2009, p. 117; Moschini et Hennessy, 1999, p. 9), défini par $-\frac{u''(E(W))}{u'(E(W))}$ ou encore $-\frac{u''(w)}{u'(w)}$, avec w la valeur certaine de $E(W)$. De plus, l'aversion au risque est une fonction de la richesse et il est ainsi possible de définir trois indices d'aversion pour le risque :

- Le coefficient d'Arrow-Pratt correspond à une mesure de l'aversion absolue pour le risque, $A_a(W)$.
- L'aversion relative pour le risque est définie par $A_r(w) = -w \left(\frac{u''(w)}{u'(w)} \right)$.
- L'aversion partielle pour le risque est définie par $A_p(w, \omega'') = -\omega'' \left(\frac{u''(w)}{u'(w)} \right)$, avec ω la partie certaine de la richesse aléatoire W .

Il existe une relation évidente entre ces trois indices : $A_a(w) = \frac{A_r(w)}{w} = \frac{A_p(w, \omega'')}{\omega''}$.

Classiquement, les fonctions d'utilité définissant les préférences des agents doivent avoir quatre caractéristiques (Cayatte, 2009, p. 125) :

- $u'(w) > 0$, selon l'hypothèse de non satiété ;
- $u''(w) < 0$, selon l'hypothèse d'aversion pour le risque ;
- $\frac{dA_a(w)}{dw} < 0$, selon l'hypothèse de décroissance de l'aversion absolue par rapport à la richesse ;
- $\frac{dA_r(w)}{dw} \geq 0$, selon l'hypothèse de non croissance de l'aversion relative par rapport à la richesse.

Il est donc difficile de déterminer *a priori* le comportement d'un agent en situation de risque. En fonction de leur degré d'aversion face au risque, les agents auront des modes de décision différents. Comme nous l'avons vu, les problèmes liés à la prise de décision en situation de risque ou d'incertitude peuvent se présenter sous la forme d'une matrice d'information (Tableau 1). Plusieurs lectures de ces matrices et donc plusieurs prises de décision sont possibles, selon les préférences de l'agent (Cayatte, 2009, p. 52-53) :

- Un individu pessimiste, craignant que ce soit l'état de la nature le plus défavorable qui se réalise effectivement, peut ne considérer que la richesse la plus faible dans sa prise de décision, et choisir l'action qui lui offrira le « maximum de ces minimums » : c'est le critère de Wald ou fonction « *maximin* ». C'est une manière de sécuriser son gain minimum.

- A l'inverse, si l'individu est optimiste, pariant sur la réalisation de l'état de la nature le plus favorable, il choisit l'action garantissant le maximum des maximums : c'est la fonction « *maximax* ».
- Si une mesure du pessimisme de l'agent, notée α , est connue, il est possible de pondérer *maximin* et *maximax* avec une fonction de Hurwicz : $U(\omega + X) = \alpha \cdot m(\omega + X) + (1 - \alpha) \cdot M(\omega + X)$.
- Enfin, les fonctions de regret consistent à construire une « matrice des regrets » qui correspond à la différence entre le résultat de chaque action et celui de la meilleure action possible, pour chaque état de la nature. Pour chaque action de la matrice, on somme les regrets ainsi calculés. Selon le critère de Savage, l'agent devrait choisir l'action qui minimise cette somme des regrets.

Nous voyons à travers ces exemples que ni l'espérance de richesse, ni même la variance ou les probabilités connues, ne peuvent prétendre définir à elles-seules l'ensemble des modes de décision possibles. La perception du risque par l'agent est un élément central de la prise de décision.

1.3.3. Perception du risque

A l'image du paradoxe de Saint-Pétersbourg, nous retrouvons le débat sur la rationalité des agents dans le cas spécifique de l'économie du risque. D'une part, Von Neumann et Morgenstern (1944) considèrent que le risque est défini par des probabilités objectives, c'est-à-dire issues de la rationalité froide et analytique de l'agent. D'autre part, Savage (1954) montre que les probabilités associées au risque sont subjectives et dépendent du degré de confiance de l'agent dans la réalisation des différents états du monde. Ceci est aisément compréhensible lorsque l'on considère la représentation du risque proposée précédemment (Figure 8), le risque n'étant pas défini par le seul aléa mais également par les caractéristiques du système économique auquel il s'applique.

Caractériser un risque correspond aussi bien à estimer le risque (quantification) qu'à évaluer la perception du risque par la population concernée (qualification) (Amblard *et al.*, 2009). L'évaluation « objective » du risque ne suffit pas à prédire ou expliquer le comportement des acteurs économiques face au risque. La perception qu'en ont ces derniers est un facteur important à considérer pour expliquer la manière dont ils vont l'aborder et le gérer : action ou inaction, quel degré et niveau de gestion, etc. Cette perception est déterminée à l'aide de deux critères, ensuite représentés sur un graphique en abscisse et en ordonnée : la connaissance (abscisse) et la crainte du risque (ordonnée). Or, la crainte et la peur sont précisément des notions extrêmement subjectives (Beck, 1992). Analyser la perception du risque revient à considérer toute ou partie de ce risque comme un artefact construit par le sujet : le risque n'a alors plus d'existence indépendante des procédures qui permettent de l'évaluer. Le contexte socioculturel ne peut plus être éludé pour comprendre le comportement des agents économiques face au risque. Les probabilités associées au risque sont, comme le montrait Savage (1954), subjectives. La plupart des décisions étant prises selon une fonction d'utilité, la mesure du risque est elle-même contingente à l'utilité et sera donc subjective (Moschini et Hennessy, 1999, p. 4; Pradier, 2006). C'est précisément le caractère subjectif des probabilités qui conduit certaines approches à écarter la distinction de Knight (1921) entre incertitude et risque, et à considérer ces notions comme majoritairement interchangeable (Cayatte, 2009, p. 26; Moschini et Hennessy, 1999, p. 4).

La difficulté posée par le concept de risque est donc d'ancrer dans le réel – c'est-à-dire dans le quotidien – une notion dont le caractère aléatoire et hypothétique semble l'extraire du réel. Dès lors qu'il est *probable*, bien que ses conséquences effectives dépendent des circonstances futures, un événement devient un élément physique du monde (Kermisch, 2012; Starr *et al.*, 1976, p. 631). Cette conception « réaliste » du risque est issue de l'analyse et correspond aux probabilités objectives de

Von Neumann et Morgenstern (1944). Une telle caractérisation est indispensable à la décision publique et nécessite des données, dûment collectées et traitées, qui font parfois défaut.

1.4. Transaction, risque et théorie des contrats

1.4.1. Asymétries d'information

Nous venons de voir les conséquences d'une information imparfaite sur les décisions d'un agent isolé. L'incertitude et l'imperfection de l'information qui en découle ont également des implications majeures lorsqu'une transaction (au sens large) lie au moins deux agents économiques.

Etudiant le marché des voitures d'occasion, Akerlof (1970) met en évidence les imperfections d'information concernant la qualité des produits et leurs conséquences sur le comportement des agents dans une transaction. Lorsqu'un agent vend une voiture d'occasion, qu'il possède depuis un certain temps, il possède une information plus précise de la qualité effective de cette voiture que le futur acheteur, qui dispose uniquement d'une idée *a priori* et générale sur sa qualité (marque, modèle, kilométrage, etc.). Or, du fait de cette information cachée, les « bonnes » voitures et les « mauvaises » voitures seront vendues au même prix sur le marché de l'occasion, avec pour conséquence de décourager les propriétaires des « bonnes » voitures de les vendre à ce prix. La proportion de « mauvaises » voitures sur le marché de l'occasion a donc tendance à augmenter. Ce comportement frauduleux qui consiste à cacher la qualité d'une « mauvaise » voiture à l'acheteur a un double coût : celui qui incombe à l'acheteur qui est trompé, et celui qui découle de la sortie des « bonnes » voitures du marché. Ce sont les coûts de la « malhonnêteté ». Akerlof (1970) établit un parallèle entre son cas d'étude, le marché des voitures d'occasion, et l'assurance maladie. L'assureur ayant une moins bonne connaissance de la santé de l'assuré que ce dernier, il n'est pas en capacité de définir une prime actuariellement juste au niveau individuel. En effet, si le prix de l'assurance augmente, seules les personnes dont les risques de santé sont les plus avérés continueront de souscrire à un tel contrat. Arrow (1971) aboutit à des conclusions similaires en étudiant les asymétries d'information, en particulier sur le marché de l'assurance. Akerlof (1970) et Arrow (1971) ont ainsi déterminé les conséquences d'une information imparfaite sur les transactions entre agents économiques. Les asymétries d'information fournissent à l'une des parties des avantages informationnels que l'autre partie ignore. Pour réduire ces asymétries d'informations, cette autre partie doit mettre en œuvre des schémas de révélation de ces informations cachées afin de garantir une transaction mutuellement avantageuse.

1.4.2. Antisélection et aléa moral

Les deux exemples d'asymétrie d'information traités par Akerlof (1970) et Arrow (1971) mettent en évidence deux mécanismes qui, fournissant un avantage informationnel à l'une des parties, rendent plus difficile la tenue d'une transaction mutuellement avantageuse (Dionne *et al.*, 2004) :

- 1) On appelle **antisélection** (sélection adverse, ou encore information cachée) la situation où seule l'une des parties (que nous appellerons ci-après l'agent), connaît ses propres caractéristiques, qui demeurent imparfaitement connues de l'autre partie (que nous appellerons le principal).
- 2) On appelle **aléa moral** (risque moral, ou encore action cachée) la situation où le principal ne peut observer directement le comportement (les actions) de l'agent après l'acceptation du contrat.

Nous convoquerons les concepts d'antisélection et l'aléa moral ainsi que leurs conséquences dans le cas de l'assurance (voir Chapitre 3, p. 94) et de l'action collective (voir Chapitre 6, p. 172). En effet, l'observabilité des caractéristiques et des comportements des agents est un enjeu majeur dès lorsqu'un contrat, même implicite, lie plusieurs agents.

1.4.3. Théorie des contrats

La présence d'asymétries d'information a conduit à une remise en cause de la théorie des prix et des marchés walrasiens parfaits. Née dans les années 1970, la théorie des contrats s'appuie sur l'étude des imperfections de l'information disponible et traite trois questions principales : les incitations, l'incomplétude des contrats et les coûts de transaction (Brousseau et Glachant, 2000). Trois courants principaux ont émergé au sein de la théorie des contrats (Tableau 2).

La **théorie des incitations** suppose que les agents disposent d'informations complètes sur les états de la nature possibles et qu'ils considèrent la probabilité d'occurrence de chacun d'entre eux soit à partir de données objectives, soit à partir de leurs représentations subjectives. Cette situation, qui s'apparente au risque au sens de Knight (1921), repose toutefois sur les hypothèses traditionnelles de l'économie walrasienne, notamment la rationalité substantielle (ou savagienne) des agents (information complète, capacité de calcul infinie, ensemble complet et ordonné de préférences), qui permettent à l'agent une décision optimale malgré le risque. Dans ce modèle, les asymétries d'information conduisent à une sélection adverse si ces asymétries sont exogènes (c'est-à-dire si l'agent ne peut manipuler l'information qu'il détient) ou à un aléa moral si elles sont endogènes (si l'information est manipulable par l'agent).

La théorie des incitations aboutit à l'étude de modèles Principal-Agent, où l'agent détient un avantage informationnel sur le principal (Holmstrom, 1979). Nous détaillerons plus précisément ces modèles dans la sous-section 1.4.5 (p. 51). Globalement, dans le cadre de ces modèles, le Principal est contraint par les asymétries d'information à créer un schéma d'incitations qui amène l'Agent à révéler son information (en cas de sélection adverse) ou à adopter le comportement désiré par le Principal (aléa moral). Par exemple, si le Principal est en capacité d'observer des « signaux » lui permettant de connaître, même indirectement, le comportement de l'Agent, il peut envisager une rémunération conditionnelle aux efforts de l'Agent. Ce schéma d'incitations doit être acceptable parmi les préférences de l'Agent et reposer sur une information/un signal vérifiable par un tiers, en cas de litige.

La **théorie des contrats incomplets** propose des hypothèses proches de la théorie néoclassique, notamment en considérant des agents dotés d'une rationalité substantielle dont l'information est symétrique. La conception et la mise en œuvre des contrats sont soumises à une information imparfaite lors de la prise de décision, ce qui nécessite une négociation en deux temps : l'implémentation *ex-ante* d'un mécanisme de révélation qui pourra, *ex-post*, forcer l'agent à révéler son véritable niveau d'investissement en cas de litige. Cependant, la plupart des contrats sont incomplets, c'est-à-dire que l'état effectif de certaines variables pourtant fondamentales dans la transaction ne peuvent pas être vérifiées *ex-post* par un tiers (le juge).

Enfin, la **théorie néo-institutionnelle des coûts de transaction** pose l'hypothèse d'une rationalité « bornée » (au sens de Simon), non savagienne : les agents ont une capacité de calcul limitée, dans un contexte d'incertitude radicale qui les empêche d'envisager l'ensemble des états de la nature possible et donc de rédiger des contrats complets. De plus, les institutions elles-mêmes sont défailtantes, notamment le juge qui dispose également d'une rationalité limitée. Coase (1960) développait déjà l'idée que la justice souffrait d'une information imparfaite et que la négociation et l'arrangement entre les parties (c'est-à-dire la transaction) est plus efficace économiquement que la décision de justice, à condition que les coûts de transaction soient nuls ou inférieurs au coût de recours au juge. Le contrat doit donc prévoir des procédés pour décider *ex-post* des actions de chaque partie et mettre en œuvre des moyens pour assurer *ex-post* l'exécution de leurs engagements. Des mécanismes de supervision et de coercition sont nécessaires pour affecter les droits de décision (à l'une des parties, aux deux parties ou à un tiers). L'existence de tels mécanismes de coordination nécessite la mise en place d'un cadre institutionnel qui doit « *crédibiliser les sanctions garantissant l'exécution des engagements* »

contractuels » (Kirat, 2003, p. 15), ce qui pose un dilemme entre les incitations à l'engagement et flexibilité du système de coordination. C'est ce cadre institutionnel qui détermine quels engagements contractuels sont effectivement réalisables, et notamment les normes formelles et informelles sur lesquelles les institutions reposent (North, 1990). Or, les coûts de négociation du contrat sont d'autant plus élevés que les parties y intègrent des clauses précises : ces coûts de transaction sont une source déterminante de l'incomplétude des contrats (Ayrest et Gertner, 1989).

Nous voyons que la théorie néo-institutionnelle considère deux sources d'incomplétude des contrats : d'une part, les asymétries d'information et le risque moral qu'elles occasionnent, d'autre part, la connaissance imparfaite des états de la nature futurs. Si la négociation peut conduire l'agent à révéler ses préférences, il existe toujours une contingence majeure liée à la réalisation des états de la nature mais aussi à l'observabilité du comportement réel de l'agent. L'incomplétude des contrats est inhérente à l'existence d'un risque ou d'une incertitude, et constitue donc une forme d'imprévision (Kirat, 2003) : (1) l'évènement perturbateur n'est pas raisonnablement prévisible, (2) il est indépendant des actions du principal ; (3) il est la cause de dommages non prévus dans les termes du contrat.

Tableau 2 : Principaux courants de la théorie des contrats et comparaison avec la théorie walrasienne (Brousseau et Glachant, 2000)

Théorie	Rationalité	Information des contractants	Institutions extérieures aux contractants	Problématique principale
Théorie walrasienne	Savagienne	Complète et symétrique	Parfaites (garantissant l'absence de déviations par rapport aux plans annoncés)	Etablissement centralisé et simultané de tous les prix (et donc des quantités échangées)
Théorie des incitations	Savagienne	Complète et asymétrie	Parfaites (garantissant l'exécution des engagements)	Schémas de rémunération révélateurs et incitatifs
Théorie des contrats incomplets	Savagienne	Complète et symétrique	Imparfaites (incapables de vérifier certaines variables)	Allocations de droits de décision et de droits de surplus résiduel pour inciter à réaliser un investissement non contractualisable
Théorie des coûts de transaction	Simonienne	Incomplète et asymétrique	Très imparfaites (incapables de vérifier certaines variables et soumises à la rationalité limitée)	Construction d'un dispositif de prise de décision <i>a posteriori</i> et d'un mécanisme pour rendre exécutoire l'engagement

1.4.4. Risque et partage des responsabilités

La théorie des contrats est fortement marquée par la question des responsabilités, de leur partage entre les parties et du mode de traitement des litiges ou conflits (Kirat et Marty, 2007). Les règles de responsabilité doivent, d'une part, permettre une allocation optimale des coûts des dommages, et d'autre part, fournir une structure incitative efficace pour susciter des comportements aptes à minimiser les accidents (prise de précautions, ajustement du niveau d'activité...).

Cette réflexion autour du partage des responsabilités provient directement de la notion de risque que nous avons présentée précédemment (Figure 8). En effet, si le caractère aléatoire du risque (plus précisément, de l'évènement qui cause le risque, que nous avons appelé aléa) semble éloigner sa gestion de la portée d'action de l'agent et donc de la responsabilité de ce dernier, l'exposition et la vulnérabilité sont des caractéristiques qui dépendent au moins en partie du comportement de l'agent, dont les décisions affectent la probabilité de survenance de dommages et/ou leur intensité.

Il convient donc de distinguer plusieurs régimes de responsabilité qui permettent, en cas de litige, le partage des dommages entre les agents (Kirat et Marty, 2007). Tout l'enjeu du choix *ex-ante* du régime de responsabilité signifié dans le contrat est de déterminer celui qui sera le plus efficace pour, en allouant au mieux les coûts entre les parties, les inciter à mettre en œuvre le niveau de précaution le plus adapté (Posner et Landes, 1980).

- La **responsabilité pour faute** considère la possibilité d'une part de négligence, évaluée à partir d'un standard légal de précaution. Cela suppose que l'agent ait accès à l'ensemble des informations lui permettant de décider quelles mesures de précaution sont possibles et pertinentes.
- La **responsabilité stricte** considère l'agent comme responsable, qu'il soit fautif ou non. C'est donc lui qui doit considérer l'ensemble des externalités liées à son activité et les intégrer dans son calcul économique, ce qui devrait conduire à un comportement économiquement efficace (réduction et prévention des risques). Si la mise en œuvre de mesures de prévention n'a aucun effet sur la survenance des dommages, le risque est intrinsèque à l'activité économique elle-même, et non au comportement d'un agent en particulier.
- La **responsabilité limitée** intervient lorsque « *le dommage n'est pas imputable au comportement d'un acteur économique donné, mais à un risque social de nature systémique* » (Kirat et Marty, 2007).

Le questionnement posé par la théorie néo-institutionnelle sur la rationalité limitée du juge est particulièrement prégnant dans le cadre de la détermination des régimes de responsabilités. Dans le cas de la responsabilité pour faute, le juge doit être capable d'évaluer le niveau de prévention mis en œuvre par l'agent et s'il a été suffisant, comparativement à un « standard » légal. Dans le cas de la responsabilité stricte, le juge doit évaluer le montant du préjudice et l'indemnisation nécessaire. Comment le juge accède-t-il aux informations nécessaires à la prise de décision, si elles sont disponibles ? Comment traite-t-il ces informations ? L'hypothèse que le juge ait lui-même accès à une information imparfaite conduit à envisager la possibilité qu'un jugement erroné soit rendu (Fluet, 2002). Dans tous les cas, le juge doit disposer de la confiance des deux parties, et les modalités de règlement des litiges doivent être clairement établies dans le contrat, grâce à une négociation *ex-ante*.

1.4.5. Modèle Principal-Agent

1.4.5.1. Relation Principal-Agent en situation d'information imparfaite

Holmstrom (1979) a développé un modèle principal-agent dont l'objectif est de trouver le partage optimal du risque (par le partage optimal de l'*output* x , au sens de Pareto) en situation d'aléa affectant l'*output* (θ) et en intégrant le choix de production de l'agent (a) : l'*output* est donc fonction de ces deux paramètres, $x(a, \theta)$. La fonction d'utilité du principal ne dépend que de la richesse : $G(w)$. Celle de l'agent dépend à la fois de la richesse et de l'action choisie : $H(w, a) = U(w) - V(a)$. a est un effort productif qui cause une désutilité pour l'agent¹². Alors que le principal souhaite que l'agent augmente cet effort (pour augmenter l'*output*), l'agent lui, souhaite le diminuer, ce qui crée une différence entre les objectifs du principal et de l'agent. L'objectif d'Holmstrom (1979) est de déterminer le partage optimal de l'*output* tel que l'utilité du principal est maximale et celle de l'agent supérieure à un seuil donné.

Il est souvent difficile d'observer directement le comportement de l'agent, et donc de connaître précisément le niveau d'effort a . Il est possible dans un premier temps d'estimer le comportement de l'agent par l'observation de l'*output*. Il s'agit là d'une situation d'information imparfaite qui augmente

¹² Cette approche va plus loin que celles présentées précédemment dans la prise en compte des préférences de l'agent, en considérant non seulement l'utilité de la richesse produite (classiquement, le résultat final) mais également la désutilité de l'action choisie.

le risque moral et rend difficile la mise en place d'une politique incitative qui serait une *first-best solution* : il est difficile d'amener l'agent à fournir des *inputs* productifs quand ses actions ne peuvent pas être observées et intégrées directement dans un contrat. Une observation plus fine du comportement de l'agent peut dans certains cas permettre l'augmentation du gain. Le principal doit alors trouver un nouveau signal y , en plus de l'*output* x , qui dépend également de a , l'effort de l'agent. Ainsi, pour une même valeur de x , le revenu qui reviendra à l'agent sera différent selon l'observation de y . Ce signal aura une valeur informative d'autant plus forte que son observation permettra d'améliorer le bien-être de l'agent et du principal. Si y est un signal informatif, on aura donc :

$$\hat{y} = \begin{cases} y & \text{si } x \leq \bar{x} \\ 0 & \text{si } x > \bar{x} \end{cases}$$

Enfin, l'approximation qui consiste à considérer que l'agent décide de son effort a sans connaissance de l'état de la nature aléatoire θ est en réalité peu convaincante. Il est probable que l'agent soit en capacité d'observer un signal z qui concerne θ et détermine son effort en fonction de cette observation : $a(z)$. Si le principal n'est pas en capacité d'observer z , on retrouvera une situation d'asymétrie d'information.

1.4.5.2. Aléa moral et action collective

Holmstrom (1982) s'est ensuite intéressé au risque moral en présence de nombreux agents, notamment aux phénomènes de passager clandestin (*free riding*) et de compétition qui peuvent apparaître lorsque le comportement de chaque agent ne peut pas être directement observé ou n'est que partiellement observé. Par anticipation d'application du modèle à notre cas d'étude, nous ne traiterons pas ici le cas de la compétition entre agents.

Soit un groupe de n agents notés i . Chaque agent i réalise une action a_i non observable pour un coût individuel non monétaire v_i . On notera $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ l'ensemble des actions individuelles qui déterminent un revenu collectif x à répartir entre les agents, chaque agent touchant une part du revenu notée $s_i(x)$. Holmstrom considère que la fonction d'utilité de l'agent i est additive, différentiable entre monnaie et action, et linéaire en monnaie : $U_i(m_i, a_i) = m_i - v_i(a_i)$. Ce modèle appelle à trouver un équilibre de Nash a^* (équilibre tel qu'aucun agents n'a intérêt à modifier son comportement) qui satisfasse l'optimum de Pareto pour $x(a) - \sum_{i=1}^n v_i(a_i)$. Naturellement, il n'est pas possible d'obtenir à la fois un équilibre budgétaire et un équilibre de Nash qui satisfasse l'optimum de Pareto car les agents peuvent maquiller une action inappropriée derrière l'incertitude de détermination des responsabilités individuelles. Il est donc nécessaire de faire intervenir un principal qui surveille les comportements individuels des agents mais aussi d'autoriser à ce que tout le revenu ne soit pas distribué. En effet, le relâchement de la contrainte budgétaire permet d'envisager des pénalités suffisantes pour infléchir le comportement des agents (condition pour obtenir un équilibre de Nash). Par exemple, il est possible que chaque agent touche un revenu de base puis un bonus de groupe si les objectifs sont atteints. Si le modèle est complexifié en intégrant les incertitudes, c'est-à-dire $x(a, \theta)$, les pénalités fonctionnent également. θ , réalisation de l'état de la nature, est variable et les agents ont des perceptions différentes de la répartition des états de θ . Dans ce modèle, le rôle du principal est davantage de fournir des pénalités (taxe pigouvienne) ou des bonus (rémunération pour la production d'un bien collectif) que de surveiller les comportements. Comme dans le modèle principal-agent, la *first-best solution* n'est pas possible dans le cas d'une incertitude sur le revenu ou dans le cas où les agents sont averses face au risque (ou ont des dotations limitées).

Si la *first-best solution* n'est pas naturellement possible, le principal doit tenter d'observer les comportements individuels. L'utilité de l'agent est additive et séparable entre $u_i(m_i)$ l'utilité de la monnaie et $v_i(a_i)$ la désutilité de l'action. Le principal est considéré comme neutre face au risque, c'est-à-dire qu'il n'a aucun intérêt financier dans le partage du revenu. L'ensemble du revenu $x(a, \theta)$

est donc partagé entre les agents. Toutefois, cette répartition s'effectue en observant un signal y qui peut permettre de distinguer les comportements individuels et donc de distinguer la contribution individuelle de l'*output* total.

Si le système d'information est suffisamment riche, l'*output* total peut être séparé en les différentes contributions individuelles : $x(a, \theta) = \sum_{i=1}^n x_i(a_i, \theta_i)$ et les x_i sont observés séparément. Si les θ_i (états de la nature) ne sont pas aléatoires, alors chaque agent peut être considéré comme responsable de son propre *output*.

1.5. Gestion des risques en agriculture

Face aux risques auxquels ils sont confrontés (1.1, p. 28), les agriculteurs doivent prendre des décisions pour gérer ces risques et éviter qu'ils ne causent des perturbations trop importantes à leurs systèmes de production.

1.5.1. Gestion des risques : définitions et objectifs

Du fait que les risques sont consubstantiels à l'activité agricole, la gestion des risques est un élément central du quotidien des agriculteurs, même si ceux-ci peuvent souvent ne pas l'explicitier ainsi. De plus, les risques étant pour partie endogènes aux systèmes agricoles (notamment une part significative des facteurs de vulnérabilité), une discussion générale sur la gestion des risques ne saurait fournir de recommandations immédiates, mais plutôt un cadre d'analyse intéressant pour la suite de nos travaux (Moschini et Hennessy, 1999, p. 54).

Si le concept de risque peut connaître plusieurs définitions, représentations et approches, il en va de même pour celui de gestion des risques :

- Pour Moschini et Hennessy (1999, p. 53), « *l'objectif de la gestion des risques est de **contrôler les conséquences négatives potentielles de l'incertitude** qui peut découler des choix de production.* » La gestion des risques ne vise pas à « *augmenter les profits à proprement parler, mais plutôt à **transférer les profits des états de la nature les plus favorables vers les états de la nature les moins favorables, augmentant ainsi le bien-être espéré de l'individu averse au risque.*** » Ce transfert peut supposer des coûts d'opportunité importants.
- Pour Vinet (2002), la gestion des risques recouvre « *l'ensemble des comportements, des moyens techniques ou financiers destinés à **atténuer les effets d'un fléau naturel.*** »
- Pour l'OCDE (2009), la gestion des risques correspond à l'affectation des facteurs de production ou instruments de marché (assurances, marchés à terme) dans le but de **réduire les dommages** subis par la production agricole.
- Pour Cordier et al. (2008), « *l'objectif de la gestion du risque consiste à modifier le **niveau d'exposition au risque de l'entreprise afin de le porter à un niveau acceptable.*** »

La gestion des risques est donc un **mode d'affectation des facteurs de production et/ou d'utilisation d'instruments de marché pour réduire la variabilité des résultats** d'un système économique, et les stabiliser à un seuil acceptable, c'est-à-dire qui ne met pas en danger la viabilité de ce système.

1.5.2. Production agricole en situation de risque

1.5.2.1. Problème de production en situation de risque

En considérant qu'à la fois le prix et la fonction de production elle-même sont stochastiques, le problème de production peut s'écrire comme suit (Moschini et Hennessy, 1999, p. 15) :

$$\tilde{\pi} = \tilde{p} \cdot \tilde{e} \cdot H(x) - rx - K$$

avec $\tilde{\pi}$ le profit incertain, \tilde{p} le prix incertain, \tilde{e} un vecteur de variables aléatoires indépendantes des actions de l'agriculteur, $H(.)$ la fonction de production, x le vecteur des *inputs*, r le vecteur de coût des *inputs* et K les coûts fixes.

Dans ce modèle de base, le profit est bien aléatoire et repose sur deux sources d'incertitudes : le prix \tilde{p} et les états de la nature \tilde{e} . Mentionnons que l'incertitude relative au prix dépend également de nombreux autres facteurs pouvant eux-mêmes être aléatoires et qui demeurent exogènes à l'exploitation agricole (Boussard, 2010, 1994). Ce modèle est statique et ne considère le temps qu'en deux points : la prise de décision et la réalisation de la production. En effet, une fois une culture semée, il est impossible de revenir sur cette décision pour, compte-tenu des évolutions constatées *ex-post* des conditions climatiques, sanitaires ou économiques, semer une autre espèce ou variété. La fonction de production agricole est très rigide à l'échelle de la campagne, voire à l'échelle de la rotation culturale (cf. modèle du Cobweb présenté en 1.2).

Sans rentrer dans les détails d'une quelconque résolution, nous constatons simplement la complexité des problèmes de production en agriculture. D'une part, aussi bien le prix que la quantité produite sont incertains et souvent déconnectés, du fait de la faible élasticité-prix de la demande en produits agricole (mais également de la fusion des marchés agricoles au niveau international). D'autre part, l'incertitude provient d'un vecteur de plusieurs variables aléatoires du fait des nombreuses sources de risque présentées précédemment (risque climatique, sanitaire, technologique...). Un agriculteur qui doit décider d'un plan de production est contraint de choisir au préalable les variables qu'il souhaite traiter, ce qui implique d'en délaiser d'autres. Cela suggère que même les décisions relatives à la gestion des risques ne sauraient être complètes (hypothèse de rationalité limitée).

1.5.2.2. Comportement des agriculteurs en situation de risque

Comme nous l'avons vu précédemment, le risque ne peut pas être considéré comme un élément extérieur au système économique : « *Le risque est une incertitude à laquelle on attache de l'importance [...]. L'incertitude (situation dans laquelle un individu ne sait pas avec certitude ce qui se produira) est indispensable à l'existence du risque, mais elle n'aboutit pas nécessairement à une situation de risque* » (Harwood *et al.*, 1999). Les agents économiques ne sont pas de simples « spectateurs » ou victimes des risques : leur comportement influe fortement sur le niveau des risques voire sur l'émergence même des risques (Beck, 1992; Bidou et Droy, 2013). La gestion des risques est donc un objet complexe qui ne peut se résumer à la compensation *ex-post* des dommages.

Brossier (1989) observe que les agriculteurs ne font pas toujours le choix le plus « rentable ». Si la rationalité économique des agriculteurs fait l'objet de discussions (Boussard, 1988), il est considéré, ne serait-ce que comme un axiome méthodologique fondamental, que « *les agriculteurs ont des raisons de faire ce qu'il font* » (Petit *et al.*, 1975). L'aversion au risque des agriculteurs est communément admise (OCDE, 2009) et demeure un facteur explicatif crédible du comportement des agents en situation d'incertitude ; elle n'est toutefois qu'un facteur parmi d'autres pour comprendre les décisions de production des agriculteurs (Just et Pope, 2003).

Les agriculteurs poursuivent un double objectif (Brossier, 1989) : (1) la réduction des risques, (2) l'obtention des meilleurs résultats économiques possibles. La notion de perte admissible globale permet de comprendre le comportement des agriculteurs face au risque : il s'agit de la valeur à laquelle l'agriculteur est prêt à renoncer en prenant une décision (Brossier, 1989). Il est également utile de décomposer le risque global sur la production en risques partiels sur chaque facteur de production, afin de connaître les seuils de maîtrise des risques pour un facteur donné. Ainsi, pour analyser la prise de décision d'un agriculteur face à un risque, le modèle de base de l'économie de marché peut être pertinent mais sera certainement incomplet. En effet, l'agriculteur ne cherchera pas toujours à

maximiser son profit : ses décisions auront également pour objectif de réduire le risque auquel il est (ou pense être) confronté et seront impactées par la perception qu'il a de ce risque.

En tout état de cause, du fait de la multiplicité des sources de risques, de leur interrelation et de leur dépendance aux conditions climatiques et environnementales locales, ainsi qu'aux pratiques agricoles elles-mêmes, l'agent le mieux placé pour connaître, caractériser et gérer les risques est l'agriculteur lui-même (OCDE, 2009). La gestion d'un agrosystème est complexe et dynamique, tout comme devrait être la modélisation du comportement des agriculteurs (Feola et Binder, 2010; Komarek *et al.*, 2020).

1.5.3. Stratégies et instruments de gestion des risques

Si les objectifs généraux de la gestion des risques sont aisés à qualifier, ce n'est pas évident lorsque l'on s'intéresse spécifiquement à la gestion d'un risque donné ou d'une catégorie de risques. Les objectifs, les stratégies mises en œuvre pour les atteindre et les instruments concrets employés dans ce but seront fortement variables et dépendants des caractéristiques des risques considérés mais également des marges de manœuvre des systèmes économiques. Nous détaillerons dans le Chapitre 2 (p. 60) les éléments de caractérisation économiques des risques que nous utiliserons dans la suite de nos travaux, et ne retenons que trois d'entre-eux à ce stade :

- La fréquence de survenance de l'évènement ;
- L'ampleur des dommages potentiels qui lui sont associés ;
- La corrélation entre les risques individuels.

Il existe plusieurs classifications des stratégies de gestion des risques (Banque Mondiale, 2014; OCDE, 2009; World Bank, 2017). Nous appelons « stratégie » **un ensemble d'actions et d'instruments mis en œuvre pour faire face à un ou plusieurs risques auxquels est soumis un système agricole**. Les instruments de gestion des risques sont choisis et agencés par l'agriculteur en fonction des capacités de l'exploitation agricole (contraintes pédoclimatiques et topographiques, contraintes financières, contraintes en main d'œuvre, compétences et connaissances, information...).

Nous proposons une analyse des stratégies et instruments de gestion des risques selon deux axes (Figure 11) : l'échelle institutionnelle de mise en place de la stratégie de gestion du risque et son échelle temporelle (*avant* ou *après* la survenance des dommages). Il est possible de corrélérer ces deux critères avec la sévérité des dommages qu'il s'agit de gérer.

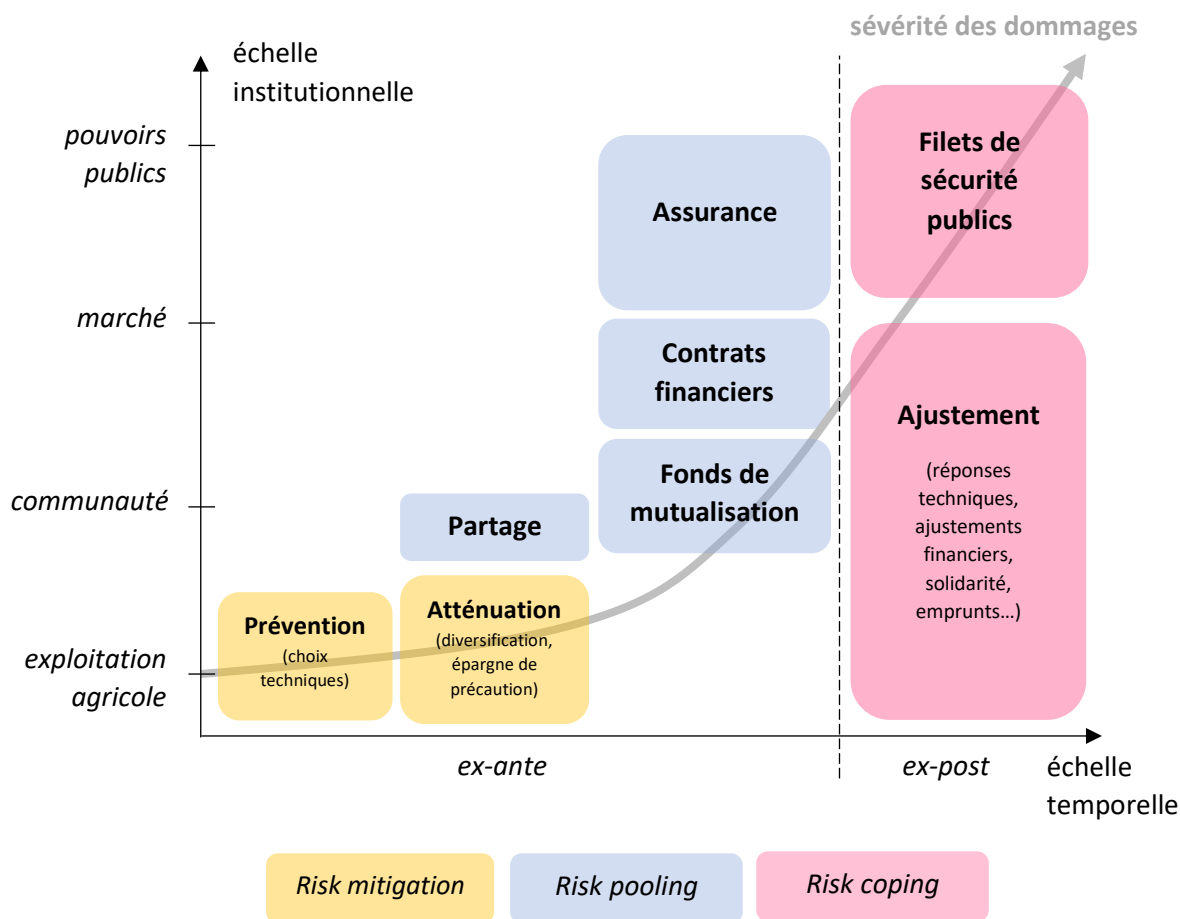


Figure 11 : Classification des stratégies de gestion du risque (auteur)

Une telle classification permet de mettre en évidence trois catégories de stratégies (Banque Mondiale, 2014; World Bank, 2017) et plusieurs instruments de gestion des risques (Cordier *et al.*, 2008; OCDE, 2009). Les deux premières catégories de stratégies sont mises en place *ex-ante*, avant la survenance de dommages, la troisième *ex-post*, après leur survenance.

- La première catégorie de stratégies de gestion des risques consiste à anticiper, à l'échelle de l'exploitation agricole, la survenance d'événements préjudiciables afin de **réduire le risque** (*risk mitigation*). D'une part, les agriculteurs peuvent mettre en place des actions de **prévention** (ou autoprotection), qui reposent sur une approche technique, dans l'objectif de réduire la probabilité que la perte se produise ; d'autre part, ils peuvent mettre en place des actions d'**atténuation** (ou auto-assurance), telles que la diversification des activités ou des cultures ou l'épargne de précaution, afin de réduire l'intensité de la perte, lorsqu'une perte se produit. Cette stratégie de réduction du risque repose principalement sur les décisions de production de l'agriculteur à l'échelle de son exploitation (Ehrlich et Becker, 1972). De telles stratégies sont possibles pour des risques de faible ampleur, même si leur fréquence est élevée ou moyenne.
- La seconde catégorie de stratégies de gestion des risques est la **mutualisation**, au sens large (*risk pooling*). L'objectif est de profiter de la dissociation temporelle des risques individuels pour en lisser les effets en constituant une réserve financière collective par anticipation de potentiels dommages. De telles stratégies sont possibles lorsque les risques individuels sont peu ou non corrélés, afin de réduire le coût des réserves financières nécessaires au versement des indemnités. La mutualisation concerne principalement des risques d'intensité forte ou

moyenne et à la fréquence moyenne ou faible. La mutualisation peut concerner un simple **partage** des risques entre deux agriculteurs ou bien un partage plus large grâce à un **fonds de mutualisation** professionnel ou coopératif. L'**assurance** est une forme particulière de mutualisation recourant au marché. Enfin, des **contrats financiers** (contrats à terme, intégration verticale...) sont également utilisés pour gérer le risque « prix ». Les assurances et les contrats financiers sont des outils de transfert du risque (*risk transfer*) d'un agent ne pouvant pas le supporter à un agent en capacité de le diversifier.

- Enfin, la troisième catégorie de stratégies de gestion des risques est l'**adaptation ex-post** face aux dommages subis (*risk coping*). Lorsque les dommages subis sont d'ampleur faible ou moyenne, un **ajustement** pour en réduire les effets est possible à l'échelle de l'exploitation agricole (réponses techniques), de la communauté (solidarité, diversification des revenus...) voire du marché dans certains cas (ajustements financiers, emprunts...). Si les dommages subis sont trop importants, le dernier recours repose sur des **filets de sécurité publics** permettant, au nom de la solidarité nationale par exemple, de compenser une partie des pertes.

Cordier et Debar (2004); Cordier *et al.* (2008) utilisent une classification des instruments financiers de gestions des risques légèrement différente, reprise par l'OCDE (2009), croisant deux caractéristiques des risques : d'une part, la corrélation entre les risques individuels, et d'autre part, la fréquence et l'intensité de l'aléa (Figure 12). Cette classification produit une cartographie des instruments de gestion des risques semblable à celle que nous utilisons : la corrélation entre les risques est en lien avec l'échelle institutionnelle de mise en œuvre de la gestion des risques, et l'indicateur de « sévérité » du risque que nous avons représenté (Figure 11) correspond aux dommages potentiels liés à la survenance de l'aléa.

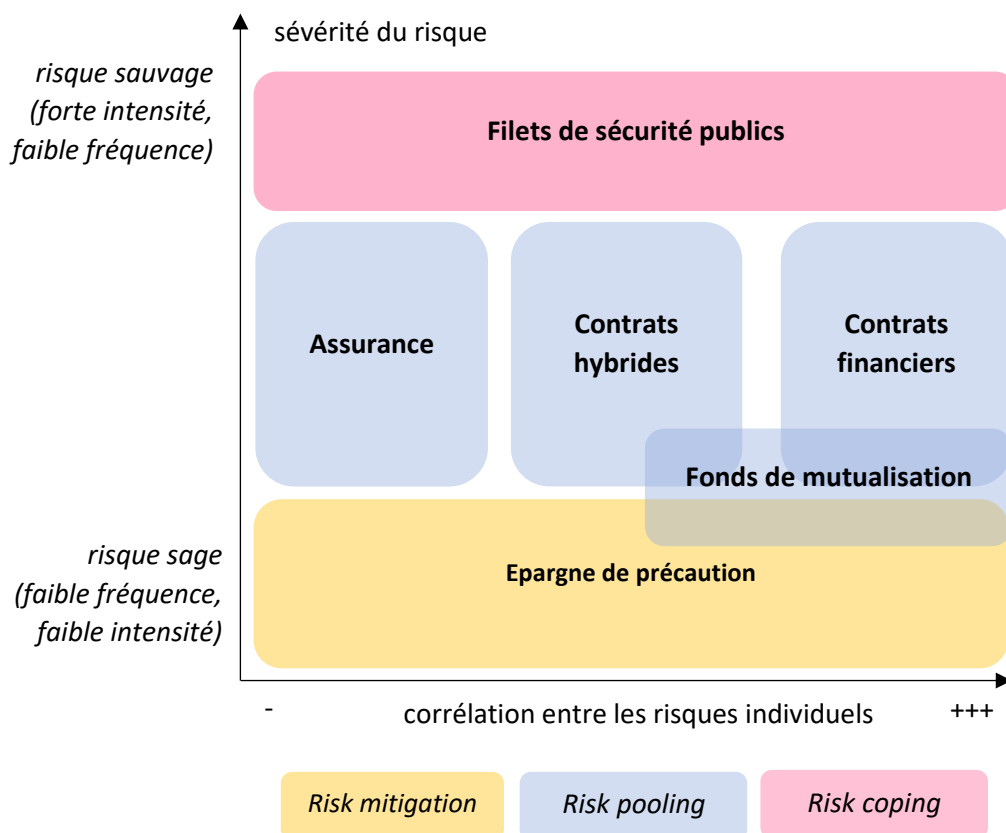


Figure 12 : Cartographie des catégories d'instruments de gestion des risques en agriculture, adapté de Cordier *et al.* (2008)

Nous notons l'importance de définir l'échelle à laquelle nous analysons le risque et l'échelle à laquelle les décisions de gestion prennent place : « *Si, pour chaque individu ou chaque famille, la survenance d'un sinistre constitue un événement exceptionnel, la sinistralité globale est en revanche, un phénomène relativement prévisible (à partir des outils de calcul de probabilités), en un mot **parfaitement gérable par une collectivité bien organisée*** » (Chiappori, 1997, p. 33). Ces différentes façons de gérer les risques amènent à énoncer deux théorèmes fondamentaux de l'économie du risque selon Chiappori (1997, p. 35) :

- Premier théorème : les gros sinistres dont la taille est suffisante pour affecter de façon significative la collectivité dans son ensemble, ne peuvent être totalement compensés.
- Deuxième théorème : la gestion collective des risques desserre les contraintes au niveau individuel et permet aux agents de tirer parti d'occasions intéressantes sans être paralysés par des impératifs de risque minimal.

Conclusion sur l'approche par l'économie du risque

Lorsque l'Homme devient agriculteur, il construit un espace alimentaire sécurisé qui réduit le risque de famine, à l'échelle de la communauté. Les innovations techniques et les progrès de la connaissance ont permis aux agriculteurs de maîtriser de mieux en mieux les processus de production agricole et de réduire leur exposition et leur vulnérabilité aux risques naturels : l'augmentation de la productivité de la terre et du travail ont permis d'augmenter fortement la production alimentaire et de réduire les coûts de production.

Pourtant, l'agriculture est soumise à des risques croissants, dont la nature a été modifiée par les évolutions des systèmes agricoles et des modes de production. Le processus de production agricole est toujours dépendant d'aléas naturels (climat, ravageurs) qui rendent la fonction de production incertaine. De plus, comme l'explique le modèle du Cobweb, les décalages d'ajustement entre les prix et les volumes de production ne permet pas au marché d'équilibrer les prix et les coûts de production, c'est-à-dire que le risque de production n'est pas intégré correctement dans les prix du marché. Cette instabilité des volumes et des prix est inhérente au processus de production agricole, risquée par nature. Ainsi, en agriculture, il convient de distinguer d'une part la variabilité courante de la production et/ou des revenus, endogène aux systèmes agricoles et dont la gestion doit être internalisée par l'entreprise (prévention, épargne, diversification), et d'autre part, les perturbations exogènes plus exceptionnelles par leur fréquence et de grande ampleur, qui nécessitent la mise en place d'un dispositif de compensation des dommages (filet de sécurité public, assurance).

La gestion des risques est un enjeu majeur pour l'avenir de l'agriculture. D'une part, les producteurs se trouvent actuellement dans une situation de forte ambiguïté sur l'évolution des conditions de production. Le désengagement de l'Etat augmente l'insécurité des exploitations agricoles face à un certain nombre de risques, et la montée en puissance des outils assurantiels ne semble pas rassurer les producteurs face à des aléas et dommages de plus en plus fréquents, que l'assurance n'est pas à même de gérer. Ce contexte changeant est indéniablement propice à un renouveau de la pensée économique et des stratégies de gestion de l'exploitation agricole. De nombreux systèmes agricoles hérités de l'après-guerre sont remis en question par la crise écologique : trop vulnérables, trop peu résilients, voire contre-productifs en cela qu'ils génèrent leurs propres risques (dérèglement climatique, érosion de la biodiversité auxiliaire), ils semblent en décalage avec les conditions de production émergentes, qui conduisent l'agriculture à rentrer définitivement dans l'ère du risque et de l'ambiguïté.

L'agriculture est-elle prête à faire face à ces nouveaux risques ? Les instruments de gestion du risque que nous avons présentés seront-ils suffisamment pertinents et efficaces ? La prise de décision face

aux risques prend place à l'échelle de l'exploitation agricole. Or, la construction d'une matrice d'information en situation de risques multiples est difficile : un agriculteur ne peut pas prendre en considération l'ensemble des contraintes internes et externes à son système de production pour mettre en place un plan de production et de gestion des risques. La rationalité de la prise de décision est donc imparfaite et limitée, et une exploitation agricole ne peut absorber l'ensemble des risques, y compris l'ensemble des risques endogènes et courants. La gestion des risques est ainsi un objet complexe ; elle a pour objectif de stabiliser les résultats d'un système économique soit par une affectation plus optimale des facteurs de production (internalisation du risque) soit par la mobilisation d'instruments de marchés (externalisation du risque). La gestion des risques peut s'avérer d'autant plus complexe qu'elle repose sur une action collective (comme c'est le cas des risques ravageurs) : les dynamiques transactionnelles comprennent de formes asymétries d'information et frictions qui rendent coûteuse la coordination par le marché.

Enfin, nous avons vu que les stratégies et instruments de gestion du risque mobilisables dépendent des caractéristiques du risque, par exemple la sévérité des dommages potentiels ou bien encore la corrélation entre les risques individuels. Pour pouvoir décider de la meilleure stratégie et des meilleurs instruments de gestion du risque, il est d'abord important de connaître, caractériser précisément le phénomène-cause des perturbations et les dommages qu'il génère. L'objet du Chapitre 2 est de construire une grille de caractérisation économique des risques puis de l'appliquer à notre cas d'étude, les pullulations de campagnols terrestres.

Chapitre 2. Caractérisation économique des risques agricoles

Les risques auxquels l'activité agricole est exposée sont de diverses natures. Les risques endogènes et courants sont une source de variabilité pour les résultats des systèmes de production agricole dont la plupart des outils de gestion prennent place à l'échelle de l'exploitation agricole. Les risques exogènes et exceptionnels dont les dommages sont d'ampleur importante peuvent au contraire nécessiter la mobilisation d'outils à une échelle dépassant l'exploitation agricole individuelle, que ce soit la communauté, le marché ou l'intervention publique. Le positionnement de certains risques est ambigu, notamment lorsqu'ils sont à l'origine de dommages trop importants pour être absorbés à l'échelle du système agricole mais trop fréquents pour être couverts par un contrat d'assurance : c'est par exemple le cas des pullulations de campagnols terrestres.

Nous montrons dans un premier temps que définir et caractériser un risque suppose d'adopter une approche systémique, des origines du risque à ses dommages. La section 2.1 propose la construction d'une grille de caractérisation économique des risques à partir d'un état de l'art. Cette grille rassemble les critères qu'il est important de renseigner pour être capable de déterminer, *in fine*, les particularités du risque étudié et en tirer les conséquences en termes de gestion. Globalement, nous proposons une démarche de caractérisation du risque en cinq étapes : la caractérisation de l'aléa, la caractérisation de l'exposition, la caractérisation de la vulnérabilité, la caractérisation des dommages et enfin la caractérisation des enjeux de gestion du risque.

Dans la section 2.2, nous présentons une revue de littérature permettant de décrire le plus précisément possible les caractéristiques du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres, en adoptant la démarche méthodologique proposée.

La section 2.3 propose d'appliquer notre grille de caractérisation des risques au cas des campagnols terrestres et aboutit à la détermination des particularités des risques ravageurs en agriculture.

2.1. Construction d'une grille de caractérisation économique des risques

Selon la Banque Mondiale (2014), le prérequis à toute stratégie de gestion est la **connaissance des risques**. S'il n'est *a priori* pas possible de prédire la survenance d'un risque, il est en revanche possible de quantifier et de qualifier ses conséquences potentielles, ainsi que sa loi fréquence-intensité. C'est la connaissance des risques qui permet de les caractériser, de définir les stratégies de gestion possibles et pertinentes, et *in fine* de choisir le corpus d'instruments efficaces pour parvenir à faire face au risque.

A ce stade de nos travaux, nous avons besoin de construire un cadre d'analyse économique des risques agricoles à même de fournir les clés de compréhension nécessaires à leur gestion : nous proposons, à partir d'un état de l'art, de construire une grille de caractérisation économique des risques. Pour cela, nous retirons de la littérature un certain nombre de critères à renseigner et de questions à traiter pour analyser les caractéristiques d'un risque en agriculture.

2.1.1. Etat de l'art : analyse et caractérisation des risques

Le Chapitre 1 a déjà proposé un état de l'art significatif à propos de la définition, la représentation et la gestion des risques en agriculture. Nous le complétons pour renforcer la pertinence de l'analyse.

Stohlgren et Schnase (2006), étudiant les risques liés aux invasions biologiques d'espèces non endémiques, proposent une méthodologie d'analyse du risque en quatre étapes dont l'usage peut être élargi à l'ensemble des risques de production en agriculture (Tableau 3). Après avoir étudié la formation du problème et le phénomène écologique en cause, il s'agit d'opérer le passage vers une caractérisation économique du risque puis de définir les possibilités de gestion du risque.

Tableau 3 : Méthode d'analyse des risques, adapté d'après Stohlgren et Schnase (2006)

1 ^e étape Formation du problème	Cadrer l'importance du problème	<i>Mérite-t-il une attention et des moyens particuliers ? Pourquoi ? Quels sont les enjeux ?</i>
	Définir les contours des enjeux	<i>Quelle est la valeur et l'intérêt des enjeux à protéger ?</i>
2 ^e étape Analyse du phénomène écologique	Information sur les caractéristiques de l'espèce	<i>Quelles sont les caractéristiques biologiques de l'espèce en cause ? Sont-elles particulières ?</i>
	Habitats concernés par l'espèce	<i>Dans quelles conditions d'habitat l'espèce en cause se développe-t-elle ? Dans quelles conditions pose-t-elle problème ?</i>
	Estimation de l'exposition	<i>Quels territoires sont concernés ? Quels systèmes économiques sont concernés ?</i>
	Déterminer la distribution et l'abondance actuelle	<i>Peut-on cartographier les territoires et les systèmes économiques concernés ?</i>
3 ^e étape Caractérisation du risque	Complétude des données disponibles	<i>Dispose-t-on de données suffisamment complètes et précises pour caractériser le risque ?</i>
	Estimation de la distribution et de l'abondance potentielles	<i>Peut-on cartographier les territoires et les systèmes économiques à risque ? Peut-on définir une gradation pertinente du risque ?</i>
	Estimation de la dispersion potentielle	<i>Comment le risque peut-il s'étendre spatialement ?</i>
	Effets et coûts attendus	<i>Quelles sont les conséquences du risque ? Quels sont les coûts/dommages monétisables ?</i>
4 ^e étape Gestion du risque	Méthodes de maîtrise possibles, coûts et coûts d'opportunité	<i>Quelles méthodes peuvent-être employées pour maîtriser le risque ? Quels sont les coûts de ces actions ? Y a-t-il des coûts d'opportunité relatifs à leur application ?</i>
	Cadre légal et considérations sociales	<i>Quel est le cadre légal dans lequel ces actions de contrôle peuvent-être menées ? Quelles sont les implications sociales de ces actions ?</i>
	Besoins en connaissance et en technologies	<i>Les connaissances et technologies actuelles sont-elles suffisantes pour gérer correctement le risque ? Quels sont les besoins supplémentaires en la matière ?</i>

De la définition du risque proposée au Chapitre 1 découlent trois critères basiques de caractérisation du risque (Babusiaux, 2000; Eldin, 1989; OCDE, 2009, p. 22) :

- **Quelle est l'origine du risque ?** Est-il spontané (naturel) ou induit par l'Homme ?
- **De quel type de risque s'agit-il ?** Nous avons présenté une typologie des risques agricoles dans la partie 1.1 (p. 28).
- **Quelle est sa fréquence (probabilité d'occurrence) ?**
- **Quelle est son intensité (ampleur du phénomène et des dommages) ?**

Des critères plus précis peuvent ensuite être étudiés (Cordier *et al.*, 2008; OCDE, 2009, p. 22; World Bank, 2017) :

- **Le risque est-il systématique ou aléatoire ?** Un risque est systématique lorsqu'il se répète dans le temps. Il est non systématique, ou spécifique, dans le cas contraire. Un risque systématique ne pourra pas être considéré comme aléatoire au sens strict.
- **Le risque est-il indépendant ou systémique ?** Un risque est dit indépendant (ou idiosyncrasique) s'il n'affecte pas tous les agents exposés en même temps. La mutualisation est alors possible ; le risque peut être considéré comme assurable : un calcul de la prime d'assurance à partir de la loi des grands nombres et de la valeur moyenne de la perte est possible (par exemple, la grêle est un risque indépendant). A l'inverse, un risque systémique affecte une grande partie voire l'ensemble des agents exposés en même temps et n'est pas ou peu mutualisable (par exemple, le risque « prix » est systémique). On parlera de risque « covariant » lorsqu'il affecte un groupe plus réduit d'agents.
- **Le risque est-il « sage » ou « sauvage » ?** On parle de risque sage lorsque la perte potentielle est faible à moyenne, et que la loi de distribution du risque (fréquence) est bien connue grâce à un historique des faits. On parlera de risque sauvage pour une perte « catastrophique », même si, en général, la probabilité de tels sinistres est très faible.
- **Le risque est-il unitaire ou combiné ?** Un risque unitaire est rattaché à une variable unitaire, telle que le prix, le rendement agricole, la qualité du produit ou encore le coût de production. Ces variables sont simples et aisément mesurables. En revanche, un risque combiné est mesuré par une variable combinée, telle que le chiffre d'affaire ou la marge de l'exploitation, qui est elle-même une combinaison de plusieurs variables.

Enjolras (2008) ajoute à ces critères une caractérisation des dommages eux-mêmes. **Les dommages sont-ils tangibles ou intangibles ?** Un dommage est tangible lorsqu'il correspond à des pertes monétaires attribuables à une catastrophe naturelle, qu'elles soient directes (après survenance du sinistre) ou indirectes (avec un délai). Un dommage est intangible lorsque les pertes ne font pas facilement identifiables et mesurables.

Enfin, deux questions importantes doivent être traitées pour envisager une stratégie de gestion pertinente (Eldin, 1989) :

- **Quel type de prévention est-il possible ?** Il existe des risques que l'on peut supprimer ou atténuer, d'autres que l'on peut éviter (ou contourner), d'autres auxquels on ne peut que s'adapter (ou se préparer).
- **A quel niveau une action peut-elle être organisée ?** On distingue ici les risques qui appellent une réponse à l'échelle de l'unité de production (parcelle, exploitation) de ceux qui nécessitent la mise en place d'un système de lutte collective (communauté, marché, Etat).

La mise en évidence de ces critères d'analyse des risques permet d'envisager de nouvelles classifications des risques agricoles. L'OCDE (2009) propose une classification (Tableau 4) en croisant le type de risque et la corrélation entre les risques individuels (risque idiosyncratique, covariant ou systémique). Cette classification, même si elle n'est pas la seule que nous pourrions envisager, démontre l'importance d'une caractérisation précise des risques pour mettre en œuvre une ou des stratégies de gestion adaptées. Par exemple, tous les risques de production ne peuvent pas être gérés de la même manière, même si tous tirent leur origine d'aléas naturels. Les aléas climatiques peuvent illustrer ce point : la grêle est un risque idiosyncratique dont la faible corrélation permet la mise en place efficace d'une stratégie de mutualisation, tandis que les sécheresses constituent un risque systémique difficilement mutualisable. Ainsi, l'assurance grêle est-elle bien développée en agriculture, tandis que les contrats couvrant les risques de sécheresse, tels que l'assurance Prairies, peinent à proposer des tarifs attractifs aux agriculteurs.

Tableau 4 : Classification des risques selon leur type et leur caractère idiosyncratique / systémique (OCDE, 2009)

Type de risque	Micro-économique (idiosyncratique) Risque affectant une exploitation agricole	Méso-économique (covariant) Risque affectant un groupe d'exploitations agricoles	Macro-économique (systémique) Risque affectant une région entière (nombreuses exploitations)
Marché / prix		Variation des prix des terrains, nouvelles exigences de la filière agro-alimentaire	Variation des prix des intrants ou des produits sous l'effet de chocs, de politiques commerciales, de nouveaux marchés, de la variabilité endogène...
Production	Grêle, gel, maladies non contagieuses, aléas personnels (maladies, décès)	Pluies, glissements de terrain, pollution	Inondations, sécheresses, ravageurs, maladies contagieuses, technologies
Financier	Variation des revenus provenant d'autres sources (non agricoles)		Variation des taux d'intérêt, de la valeur des actifs financiers, d'accès au crédit
Institutionnel / juridique	Risque de responsabilité	Modification des politiques ou réglementations locales	Modification des politiques et réglementations régionales ou nationales, de la législation environnementale, des paiements agricoles

2.1.2. Proposition d'une méthode de caractérisation économique des risques agricoles

Nous proposons une démarche de caractérisation du risque en cinq temps :

- (1) **La caractérisation de l'aléa**, c'est-à-dire du phénomène sous-jacent au risque (le « risque-cause » comme défini dans la partie 1.2), responsable de la variabilité des conditions de production. Identifier la cause, la nature, les informations et données disponibles, la fréquence, l'intensité ou encore le caractère aléatoire ou systématique du phénomène sont des premières étapes indispensables à la caractérisation d'un risque.
- (2) **La caractérisation de l'exposition**, c'est-à-dire des enjeux économiques concernés par l'aléa, est la deuxième étape de caractérisation du risque. Les enjeux peuvent être de plusieurs natures (économiques, humaines...). Définir voire quantifier les enjeux est important pour l'analyse du risque. Lorsqu'une monétisation est pertinente, on cherchera à déterminer la valeur des enjeux concernés. De plus, le croisement de la localisation géographique des enjeux et de la survenance historique connue de l'aléa permet de déterminer une cartographie des « zones à risque » (dans le cas des risques de production en particulier).
- (3) **La caractérisation de la vulnérabilité** permet de définir les facteurs, caractéristiques endogènes du système, qui opèrent le passage du « risque » (dommage potentiel) au « sinistre » (dommage effectif). La vulnérabilité est classiquement pensée à l'échelle individuelle de l'unité de production (l'exploitation agricole, parfois la parcelle), mais elle doit également être pensée à l'échelle collective (territoire, Etat, région du monde...), selon le caractère idiosyncratique ou systémique du risque.
- (4) **La caractérisation des dommages (ou conséquences)** eux-mêmes mérite une attention particulière. Les dommages liés à la survenance d'un risque peuvent être tangibles (c'est-à-dire exprimés à l'aide d'un indicateur monétaire) ou intangibles (lorsqu'il n'est pas possible ou pertinent de monétiser les dommages). Il s'agit de caractériser ici le « risque-effet ».
- (5) Enfin, grâce à la caractérisation du risque ainsi opérée, il devient possible de définir des éléments généraux concernant **la gestion du risque**. Il s'agit d'analyser l'échelle d'action

pertinente, les stratégies et instruments qu'il est possible de mobiliser, *ex-ante* ou *ex-post*, le cadre institutionnel dans lequel prend place la gestion des risques, ainsi que les marges d'amélioration nécessaires (connaissances, technologies, ...).

La grille proposée (Tableau 5) reprend ces critères de caractérisation économique et présente leur intérêt. Une telle approche permet une caractérisation précise, bien que principalement phénoménologique et qualitative, des risques. Il est évidemment possible que les dichotomies proposées pour caractériser un risque soient trop manichéennes. Par exemple, un risque naturel (sécheresse) peut avoir des conséquences exacerbées par l'action de l'Homme (choix de variétés peu résistantes à la chaleur). De même, un risque peut être décomposé en deux composantes, l'une indépendante, spécifique à l'agriculteur, diversifiable et mutualisable, et l'autre systémique, non diversifiable, à l'origine d'une corrélation, plus ou moins forte entre les rendements individuels (Blanc, 2003; Mahul, 1998). La caractérisation d'un risque doit permettre de mettre en évidence toute la nuance nécessaire à sa bonne gestion, tout en explicitant clairement les responsabilités, étapes indispensables au choix d'une stratégie de gestion.

Tableau 5 : Grille de caractérisation économique des risques (auteur)

	Critère	Intérêt du critère
L'aléa ou risque-cause	Origine du risque-cause	Quelle est la cause initiale du phénomène ? Le risque est-il « naturel » ou induit par l'Homme ? Est-il lié ou indépendant des pratiques humaines ?
	Nature du risque-cause	Quelle est la nature du risque ? Est-ce un risque naturel (climatique, sanitaire) ? Est-ce un risque économique (prix, financier, institutionnel...) ? Quel est le problème posé par ce risque ?
	Informations et données disponibles	De quelles informations et données dispose-t-on ? Comment sont-elles collectées et traitées ? Sont-elles suffisantes pour caractériser le risque ?
	Fréquence du risque-cause	Quelle est la fréquence d'occurrence du phénomène ? C'est-à-dire le délai de retour entre deux réalisations de l'aléa sur un même système économique. Il s'agit de probabiliser l'évènement.
	Intensité du risque-cause	Peut-on mesurer objectivement l'intensité du phénomène ?
	Caractère aléatoire du risque-cause	Le phénomène est-il effectivement aléatoire ? Le risque est-il systématique ou spécifique ? Un phénomène aléatoire est probabilisable mais non prédictible. S'il est possible de prédire sa survenance, l'évènement n'est pas aléatoire, mais systématique.
L'exposition	Enjeux concernés	Quels sont les enjeux économiques concernés ? Quelle est leur nature et leur valeur ?
	Distribution spatiale et temporelle du risque	Le risque est-il spatialement localisé ou étendu ? Quels sont les territoires concernés par le risque ? Il s'agit d'une part de déterminer les zones à enjeu, et d'autre part les espaces concernés par la survenance de l'aléa. Recouper les deux zonages permet de définir les zones « à risque ».
La vulnérabilité	Facteurs de vulnérabilité	Quels sont les facteurs de vulnérabilité ? C'est-à-dire quelles sont les conditions (de quelque nature que ce soit) qui favorisent la survenance et/ou l'importance de dommages pour le système économique considéré. Ces facteurs dépendent du système économique lui-même et peuvent augmenter la probabilité d'occurrence du phénomène et/ou l'importance de ses conséquences économiques.
	Risque indépendant ou systémique	Le risque est-il indépendant ou systémique ? Un risque est dit indépendant (ou idiosyncrasique) s'il n'affecte pas tous les agents à risque en même temps. La mutualisation est alors possible, et le risque est considéré tel que la loi des grands nombres s'applique. Par

		<i>exemple, la grêle est un risque indépendant. A l'inverse, un risque systémique affecte tous les agents à risque en même temps et n'est pas ou peu mutualisable (par exemple, le risque « prix » est systémique).</i>
Les dommages	Conséquences	Quelles sont les conséquences de la survenance de l'aléa ? Les dommages sont-ils tangibles ou intangibles ? Un dommage est tangible lorsqu'il correspond à des pertes monétaires attribuables à une catastrophe naturelle, qu'elles soient directes (après survenance du sinistre) ou indirectes (avec un délai). Un dommage est intangible lorsque les pertes ne font pas facilement identifiables et mesurables.
	Dommages tangibles	Quelle est la valeur des dommages tangibles ? Quelle(s) méthode(s) permet(tent)-elle(s) de les évaluer ? De quels facteurs dépendent-ils ?
	Risque unitaire ou combiné	Le risque est-il unitaire ou combiné ? Un risque unitaire est rattaché à une variable unitaire, telle que le prix, le rendement agricole, la qualité du produit ou encore le coût de production. Ces variables sont simples et aisément mesurables. En revanche, un risque combiné correspond à une variable combinée, telle que le chiffre d'affaire ou la marge de l'exploitation, qui est elle-même une agglomération (combinaison) de plusieurs variables et qui doit être calculée.
	Risque sage ou sauvage	Le risque est-il « sage » ou « sauvage » ? On parle de risque sage lorsque la perte potentielle est faible à moyenne, et que la loi de distribution du risque (fréquence) est bien connue grâce à un historique des faits. On parlera de risque sauvage pour une perte « catastrophique », même si, en général, la probabilité de tels sinistres est très faible.
La gestion	Echelle d'action pertinente	Quelle est l'échelle géographique et institutionnelle, la plus pertinente pour gérer ce risque ? Est-ce à l'échelle de la parcelle, de l'agrosystème, du territoire ? Est-ce à l'échelle individuelle ou collective ? Professionnelle ou étatique ? Selon les caractéristiques du risque présentées ci-dessous, une première conclusion peut ainsi être tirée en termes de gestion du risque.
	Cadre institutionnel	Quel est le cadre institutionnel, légal et réglementaire qui concerne la mise en œuvre de la gestion du risque ?
	Gestion ex-ante	Quels instruments de gestion peuvent être mobilisés pour gérer le risque avant la survenance de dommages ?
	Gestion ex-post	Quels instruments de gestion peuvent être mobilisés pour gérer le risque après la survenance de dommages ?
	Stratégie(s) pertinente(s)	Quelle(s) est/sont la/les stratégies de gestion la/les plus pertinente(s) pour gérer le risque ?
	Besoins en connaissances et en technologies	Quels sont les besoins en connaissance et/ou en technologies pour augmenter l'efficacité de la gestion du risque ? A quelle échelle de temps ces avancées sont-elles envisageables ?

Nous n'avons pas encore, à ce stade de notre revue de littérature, convoqué la notion de « facteur de risque ». Efficace et commode à première vue, elle nous semble toutefois fortement ambiguë. Basiquement, un facteur de risque peut être défini comme une condition qui peut augmenter la probabilité et/ou l'intensité des dommages causés par l'aléa considéré. Ces facteurs de risque peuvent être :

- Des **facteurs exogènes** au système économique étudié. Ils influent alors directement sur la probabilité et/ou l'intensité du phénomène lui-même, *i.e.* le risque-cause, sans que l'agent supportant le risque (par exemple, l'agriculteur) ne puisse agir sur ces facteurs.

- Des **facteurs endogènes** au système économique étudié. Ces facteurs peuvent concerner l'exposition (les enjeux) ou bien la vulnérabilité de ces enjeux. Ils représentent des caractéristiques, fixes ou non, du système économique lui-même. Le cas le plus classique concerne des facteurs de vulnérabilité qui, à intensité du phénomène égale, occasionnent des dommages économiques plus importants.

Ainsi, la difficulté de l'étude des facteurs de risque réside dans l'interrelation qu'il peut exister entre le phénomène, les enjeux exposés et la vulnérabilité de ces enjeux. Notamment, certains facteurs endogènes peuvent augmenter directement la probabilité et/ou l'intensité de l'aléa (c'est par exemple le cas des risques sanitaires ; voir 2.3.2).

Notre grille de caractérisation des risques (Tableau 5) ainsi que la représentation du risque qui a permis d'y aboutir (1.2, p. 37) constituent l'un des apports méthodologiques de notre thèse. D'une part, elle est suffisamment générique pour s'appliquer largement, même si elle convient d'avantage aux risques de production. D'autre part, elle permet de diviser l'analyse en plusieurs temps et donc de distinguer aléa, exposition et vulnérabilité, ce qui est indispensable au choix des stratégies les plus pertinentes.

La section 2.2 présente le phénomène de pullulation de campagnols terrestres et ses conséquences sur le fonctionnement des exploitations d'élevage du Massif Central. Puis, la section 2.3 propose l'application de la grille au cas des pullulations de campagnols terrestres afin d'en déterminer les particularités.

2.2. Les pullulations de campagnols terrestres et leurs conséquences

2.2.1. Le phénomène : les pullulations de campagnols terrestres

Le campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*) est un mammifère de la famille des rongeurs (Figure 13), dont le poids varie de 80 à 160 g et l'espérance de vie de 6 à 8 mois. Sous sa forme fouisseuse (*scherman*), que l'on trouve dans des sols frais et humides, le campagnol terrestre vit dans un réseau de galeries souterraines qu'il creuse à l'aide de ses dents et/ou colonise à partir des taupinières (Truchetet *et al.*, 2014). Un campagnol consomme chaque jour l'équivalent de son poids en racines. Il est particulièrement attiré par les prairies riches en dicotylédones (diverses légumineuses, pissenlit) et certaines graminées (ray-grass, fétuque...) (Truchetet *et al.*, 2014).



Figure 13 : Campagnol terrestre
(photo : Adrien Pinot)

Sa dynamique de population est caractérisée par un cycle pluriannuel comprenant de fortes pullulations. Les capacités de reproduction du campagnol sont en effet très élevées (stratégie de type *r*) : il atteint sa maturité sexuelle dès l'âge de 5 semaines. La durée de la gestation est de 3 semaines, et chaque femelle peut engendrer 4 à 6 portées par an, avec 4 à 6 petits par portée en moyenne (Note et Michelin, 2014; Quéré et Le Louarn, 2011; Truchetet *et al.*, 2014). Sa période de reproduction principale s'étale du printemps à l'automne (avril-octobre). La Figure 14 présente l'évolution des densités de population de campagnols terrestres au cours d'un cycle de pullulation. Nous notons qu'il existe également des variations saisonnières des populations de campagnols. Les mécanismes écologiques fins responsables de l'augmentation cyclique de la reproduction des campagnols sont encore peu connus et peuvent dépendre de plusieurs facteurs influençant le taux de croissance de l'espèce (ressource alimentaire, prédateurs, pathogènes...).

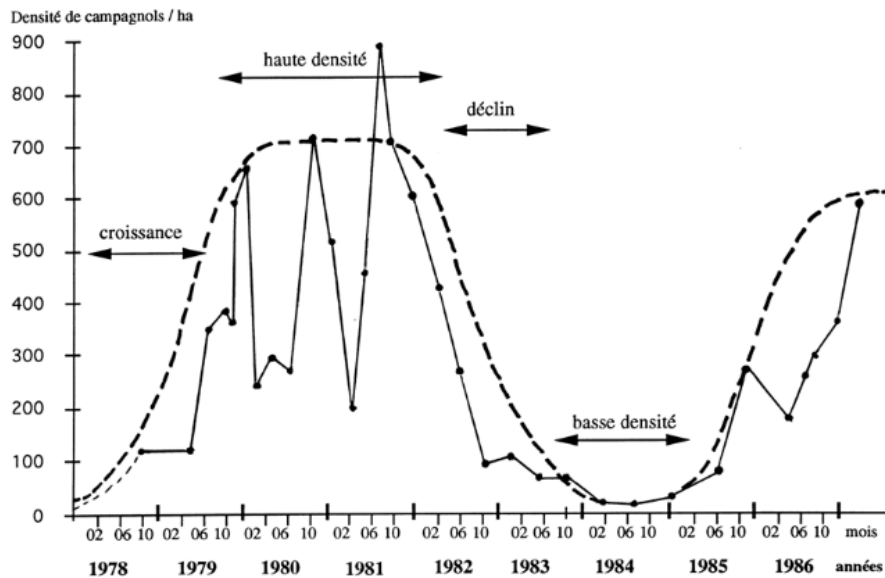


Figure 14 : Exemple d'un cycle de pullulation de campagnols terrestres (Duriez, 2010)

Lorsque les populations de campagnols terrestres deviennent trop nombreuses par rapport à l'espace et aux ressources alimentaires disponibles, les jeunes individus se dispersent à la recherche d'un nouvel habitat pour s'y installer : ils forment des « vagues voyageuses » (Berthier *et al.*, 2014a; Berthier *et al.*, 2014b; Giraudoux *et al.*, 2002). Cette dispersion est d'autant plus importante que le paysage est uniforme et peu fragmenté.

Plusieurs types de pullulations ont pu être identifiés à l'échelle nationale (Truchetet *et al.*, 2014). En Auvergne et en Franche-Comté, il s'agit de pullulations spatialement étendues et de fréquence régulière, avec une durée moyenne du cycle de 4 à 8 ans (Figure 15). Ce type se caractérise par l'ampleur des étendues touchées en phase de pullulation. De plus, la durée relative de chaque phase du cycle est variable, et probablement liée à des facteurs locaux (parcelle, micro-territoire) influençant le taux de reproduction du campagnol. Notamment, les phases de pullulation peuvent s'étendre sur une ou plusieurs années, selon les territoires concernés. En Auvergne, des pics réguliers de pullulation sont observés tous les 4 à 6 ans, et de fortes pullulations tous les 10 ans, dans les zones herbagères traditionnelles du Puy-de-Dôme et du Cantal.

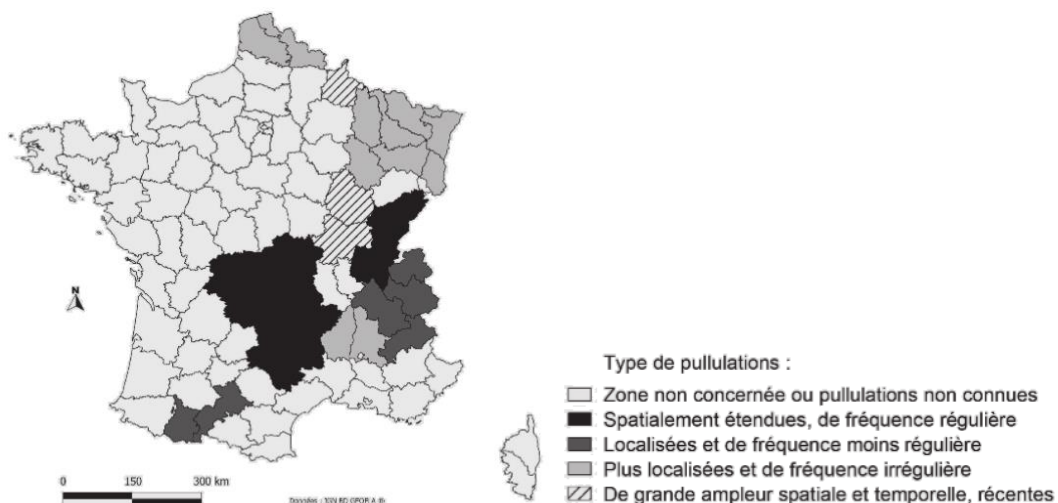


Figure 15 : Répartition des 4 grands types de pullulation de campagnol terrestre en France (Truchetet *et al.*, 2014)

2.2.2. Cartographie du risque en Auvergne

Nous manquons de données pour décrire précisément le risque à une échelle plus fine, que ce soit celle d'un micro-territoire ou celle de l'exploitation agricole. Seules quelques études concrètes ont été menées sur le terrain (Lestrade, 2016; Nigou, 2017). La surveillance biologique des populations de campagnols terrestres a connu plusieurs phases, adoptant des méthodologies différentes, ce qui rend d'autant plus difficile l'harmonisation des données pour obtenir une série temporelle conséquente.

- Entre 1985 et 2001 (sur une durée de 16 ans), les observations sont réalisées par le Service Régional de Protection des Végétaux (SRPV) : un score annuel est attribué à chaque commune prospectée selon un barème de 1 (pas de populations observées) à 4 (pullulation généralisée). Cette surveillance concernait les 730 communes du Puy-de-Dôme et du Cantal. Parmi elles, 243 n'ont jamais été prospectées et 64 n'ont été prospectées qu'une fois. La surveillance a été ciblée sur les communes où la survenance de pullulations était déjà avérée. Cette méthode de surveillance a produit des séries de données assez complètes pour les communes les plus affectées par les pullulations et permettent de dresser une cartographie générale et indicative de l'historique du risque de pullulation à l'échelle des deux départements (Figure 16). Ces cartes montrent que nombreuses communes de l'ouest du Puy-de-Dôme et de la majeure partie du Cantal (hormis le sud-ouest du territoire) sont affectées par des pullulations faibles ou fortes. La problématique des pullulations de campagnols terrestres est ainsi fortement territorialisée, et ne peut être gérée qu'en considérant cette donnée géographique.
- Puis, entre 2002 et 2016 (sur une durée de 15 ans), cette mission de surveillance biologique du territoire est transmise aux Organismes à Vocation Sanitaire (OVS) en charge d'animer la lutte contre les ravageurs et maladies des végétaux. Une base de donnée, appelée *CampaNet*, est créée et alimentée par les techniciens des OVS¹³. L'observation a été étendue au département de Haute-Loire. La méthode de surveillance consiste à découper le territoire en carrés d'un kilomètre de côté et d'attribuer à chaque carré observé une note comprise entre 0 (pas de populations observées) et 3 (pullulation généralisée). Plus précise, cette méthode d'observation se révèle également plus fastidieuse, si bien qu'entre 2008 et 2016 les données sont très lacunaires. Il est toutefois pertinent, comme avec les données produites par le SRPV, de cartographier les populations maximales de campagnols terrestres observées sur l'ensemble de la période de collecte (Figure 17). Les deux jeux de données (SRPV d'une part, CampaNet d'autre part) fournissent une cartographie du risque similaire.
- Enfin, depuis 2017, un partenariat avec VetAgro Sup (campus agronomique de Clermont-Ferrand) a permis le développement d'une application mobile de surveillance du territoire et d'une centralisation des données plus solide afin d'augmenter l'efficacité (gain de temps par rapport à la version papier de la surveillance) et la précision des données (géolocalisation). Ces données sont ensuite traitées plus finement grâce à un logiciel de SIG (Figure 18).

¹³ Organismes à Vocation Sanitaire (ici, les FREDON et FDGDON).

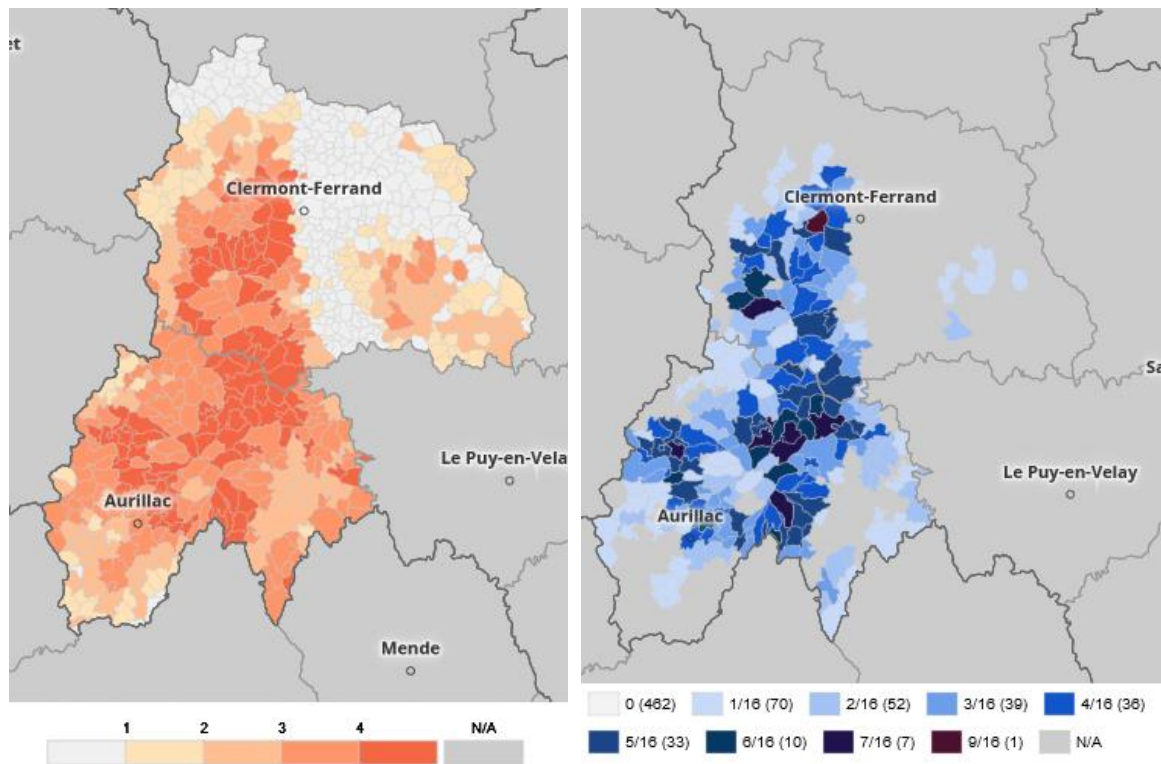


Figure 16 : Cartographie du risque de pullulation en fonction des données historiques dans le Puy-de-Dôme et le Cantal (1985-2001) (auteur, données SRPV).

A gauche, la carte représente le niveau maximal des populations de campagnols estimé (note de 1 à 4).

A droite, la carte présente la fréquence des pullulations, en années (notes 3 et 4).

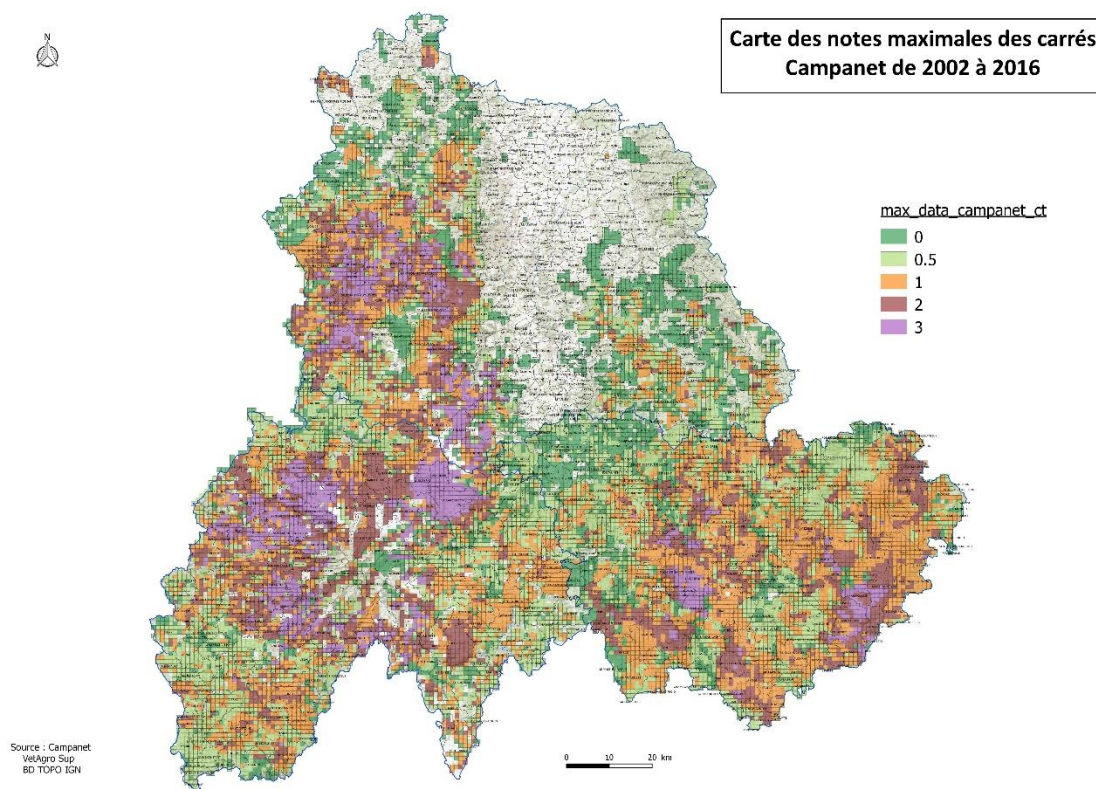


Figure 17 : Cartographie des populations de campagnols terrestres maximales observées entre 2002 et 2016 (données CampaNet, cartographie Stéphane Vidal, VetAgro Sup)

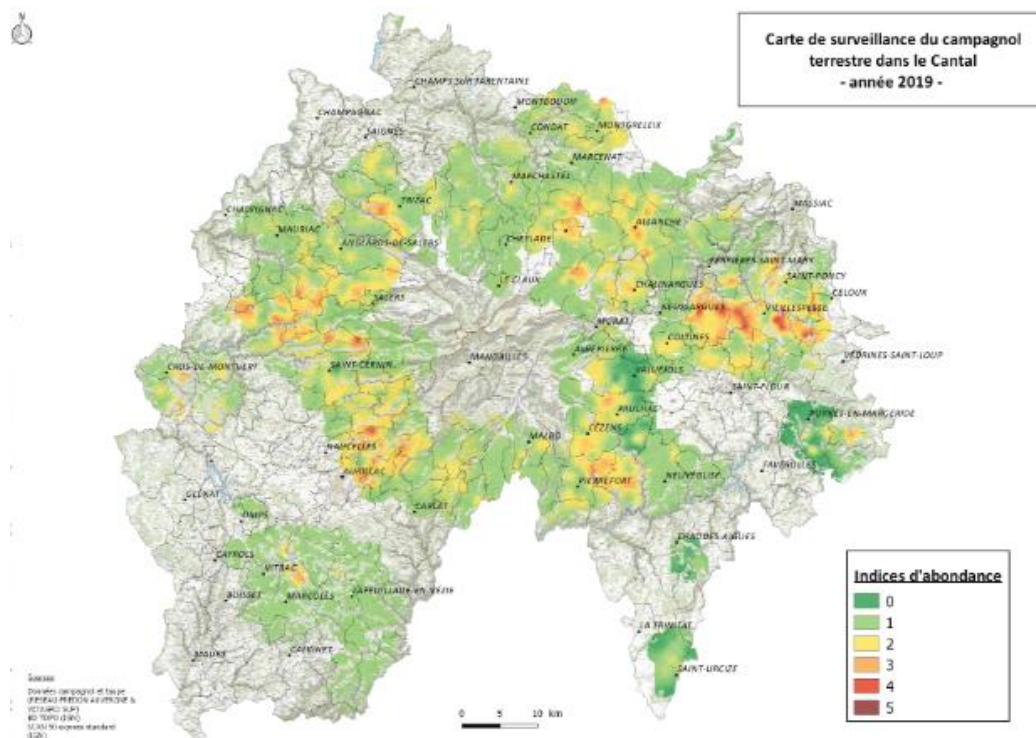


Figure 18 : Carte de notation de la présence de campagnols générée à partir des données de l'application mobile (BSV Prairie n°67, 2019, département du Cantal)

2.2.3. Les conséquences des pullulations pour les systèmes d'élevage herbager

Du fait des fortes interactions entre les différents éléments du système d'élevage (voir Introduction générale), les conséquences des pullulations de campagnols terrestres sont multiples.

- Les conséquences les plus évidentes et significatives des pullulations concernent la baisse de la productivité des prairies. Par la consommation des racines et la remontée en surface de *tumuli* de terre, les campagnols sont la cause d'importantes pertes de production fourragère en quantité : lors des pics de pullulation, elles représentent en moyenne 50% de la production espérée, et peuvent atteindre 80% à 100% de ce rendement lorsqu'aucune récolte n'est possible (Couval *et al.*, 2014; Destrez *et al.*, 2014; Quéré *et al.*, 1999). Ces pertes de production fourragère sont liées d'une part à la baisse des rendements globaux des prairies (première et deuxième coupe) mais aussi à une moindre surface exploitée en deuxième coupe (Quéré *et al.*, 1999). De plus, la présence des *tumuli* de terre en surface ou de terre dans les fourrages conservés provoque des refus au pâturage ou à l'auge (Quéré *et al.*, 1999). Par exemple, Quéré *et al.* (1999) a estimé que la contamination de l'herbe par la terre a conduit à augmenter les surfaces proposées en pâturage de 30% en période sèche et de 50% en période de pluie. Cette baisse de la production fourragère rend nécessaire, pour beaucoup d'exploitations, l'achat de fourrages à l'extérieurs, dont le prix et la qualité sont fluctuants.
- Les fourrages se dégradent également en qualité nutritive, et les prairies voient de plus leur végétation modifiée, avec « une disparition des 'bonnes espèces' (légumineuses) et une apparition des espèces non fourragères (chardon, rumex, renoncule) » (Destrez *et al.*, 2014).
- Les pullulations posent également des problèmes pour la santé des animaux d'élevage comme pour celle de l'agriculteur, du fait de la présence de terre et de poussières dans les fourrages conservés : *Listeria* et *Echinococcose* alvéolaire, maladie du poumon fermier (Truchetet *et al.*, 2014). Des coûts vétérinaires supplémentaires peuvent alors être nécessaires.

- D'autres coûts annexes non négligeables peuvent être induits par les pullulations de campagnols terrestres : les coûts de la lutte, les coûts de remise en état des prairies (semences, engrais), les coûts d'usure ou de casse du matériel... (Lestrade, 2016).

2.2.4. Les enjeux autour de la production herbagère en Auvergne

L'Auvergne est un territoire français fortement rural et agricole (Agreste, 2015). L'agriculture représente 4,9% des emplois auvergnats, contre 2,5% au niveau national. La part de l'agriculture et de la sylviculture dans la valeur ajoutée de l'économie auvergnate est légèrement plus importante qu'au niveau national (2,1% contre 1,8%) ; c'est également le cas pour l'industrie agro-alimentaire (3,0% contre 2,4%). Malgré la part plus importante de l'agriculture dans l'économie auvergnate, les revenus agricoles moyens sont inférieurs en Auvergne que pour l'ensemble du pays (Tableau 6), du fait de produits d'exploitation et d'une valeur ajoutée moindres (particulièrement en bovin viande), que les subventions publiques légèrement plus élevées ne parviennent pas à compenser.

Tableau 6 : Comptes des exploitations professionnelles auvergnates en 2014 (Agreste, 2015)

Pour 3 OTEX et toutes OTEX confondues (Moyenne par exploitation en millier d'€ courants)	Auvergne				France métr.
	COP ⁽¹⁾	Bovins lait	Bovins viande	Toutes exploita- tions	Toutes exploita- tions
= Production de l'exercice	125,7	129,7	75,1	122,4	204,3
- Charges d'approvisionnement	54,9	47,7	36,1	53,4	76,2
- Autres achats et charges externes (nc fermages)	39,3	35,0	29,7	36,9	54,0
= Valeur ajoutée	31,6	47,0	9,3	32,1	74,6
+ subventions d'exploitation	29,2	30,4	44,2	37,4	29,0
+ Indemnités d'assurance	6,1	0,9	1,3	1,9	2,4
- Fermage	13,3	6,0	8,5	8,6	14,4
- Impôts et taxes	2,4	1,3	1,4	1,5	2,2
- Charges de personnel	4,8	2,6	0,5	3,3	14,9
= Excédent brut d'exploitation (EBE)	46,4	68,4	44,4	58,0	74,5
- Dotations aux amortissements	30,1	27,3	21,9	26,3	31,3
+/- Résultat financier	- 1,6	- 3,0	- 2,8	- 3,1	- 4,3
= Résultat courant avant impôts (RCAI)	15,2	38,3	19,7	28,9	39,2
RCAI moyen par UTANS (millier d'€ courants)	12,8	27,0	15,6	21,0	27,2
Evolution de la moyenne triennale (en %)	- 23,5	+ 10,3	- 6,6	- 3,6	- 8,4

L'herbe est une ressource majeure pour l'agriculture auvergnate. En effet, si la production agricole française est relativement diversifiée au niveau national, aujourd'hui, hormis dans la plaine de la Limagne qui s'étend dans le Puy-de-Dôme et l'Allier, la majeure partie du territoire auvergnat vit de l'élevage herbager, en particulier de l'élevage bovin (Figure 19, Figure 20). Une part significative du territoire auvergnat est en zone de montagne, dont les conditions pédoclimatiques apparaissent défavorables à la plupart des cultures annuelles, si bien que la STH¹⁴ est plus importante en Auvergne qu'à l'échelle nationale (33% de la SAU¹⁵ contre 14%). La Figure 21 montre cette très forte spécialisation régionale, principalement pour les départements de la Haute-Loire et du Cantal, dont l'économie agricole repose à environ 90% sur des exploitations d'élevage¹⁶. L'Auvergne rassemble

¹⁴ Surface Toujours en Herbe

¹⁵ Surface Agricole Utile

¹⁶ Attention : si les OTEX des exploitations montre cette spécialisation économique, cela ne signifie pas que ces territoires sont exemptes de cultures végétales annuelles. Il s'agit simplement de montrer que l'élevage est la principale source de revenu des territoires agricoles et des exploitations.

globalement 8,4% de la surface fourragère nationale, pour 5,7% de la production de matière sèche, 8,4% du cheptel bovin, 6,9% du cheptel ovin, 2,3% du cheptel caprin et 5,5% des équins.

Orientation technico-économique de la commune

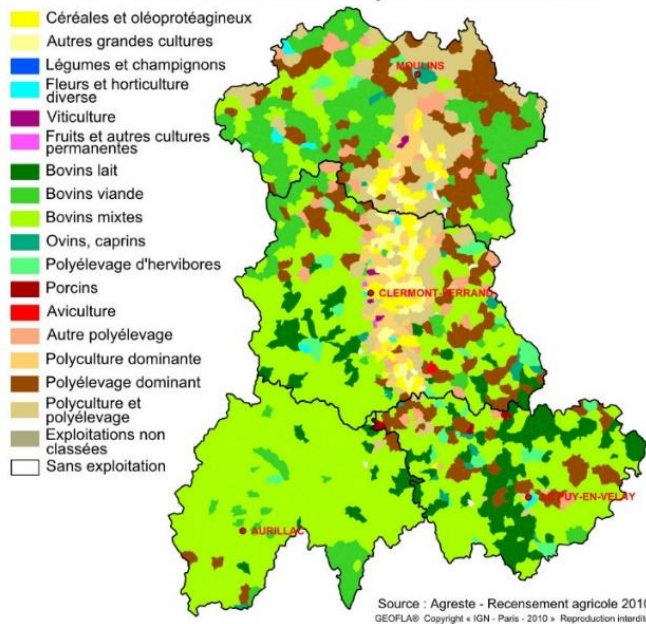


Figure 19 : Orientation technico-économique des communes auvergnates (Agreste, 2010)

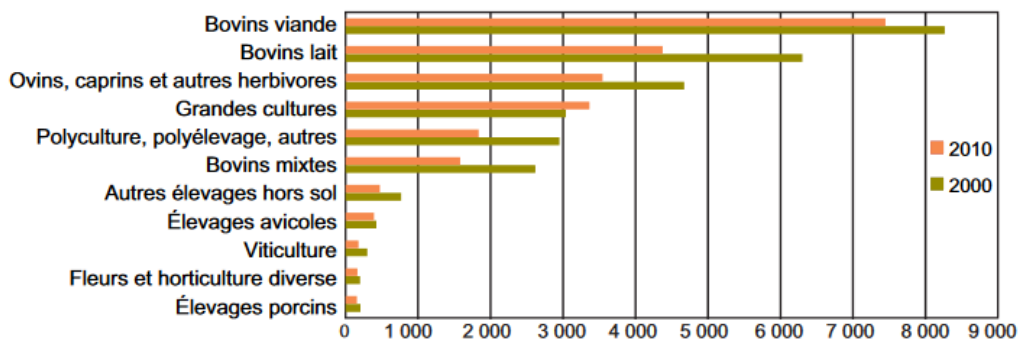


Figure 20 : Nombre d'exploitations par OTEX en Auvergne (Agreste, 2000 et 2010)

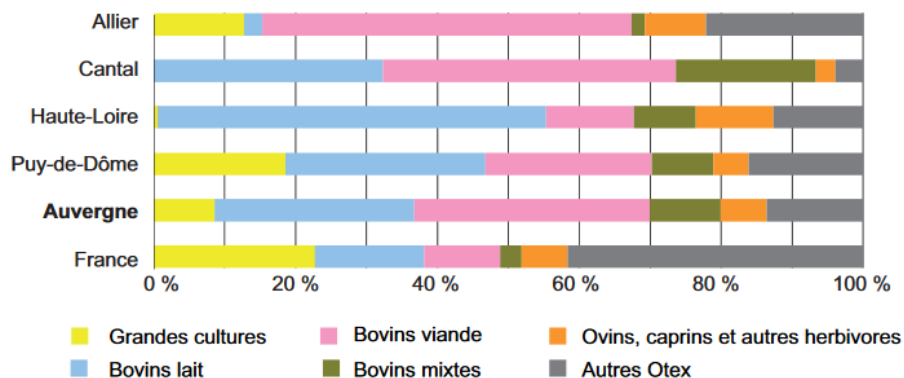


Figure 21 : Répartition des OTEX par département en Auvergne (Agreste, 2010)

La prairie permanente (STH) est un élément majeur pour l'alimentation des troupeaux du fait de sa place dans la SAU auvergnate (Figure 22). Historiquement, l'herbe était consommée selon une logique de « cueillette » (pastoralisme) et les prairies permanentes n'étaient que peu concernées par des

interventions de l'homme ; le passage à une logique de « culture de l'herbe » a été initié à partir des années 1950 mais n'a toutefois pas rapidement diffusé dans le monde agricole, alors même qu'il permettait des gains de productivité rentables (Petit, 1971). Deux phénomènes accompagnent le passage de la logique « pastorale » à la logique « culturelle » : (1) l'intensification fourragère, à savoir l'augmentation de la production par hectare en intensifiant l'usage des facteurs de production autres que la terre (travail, intrants...), ce qui correspond à un déplacement le long de la fonction de production ; (2) le progrès fourrager, c'est-à-dire la modification de la fonction de production elle-même suite à un progrès technique. Ainsi, les systèmes fourragers auvergnats reposent principalement sur la ressource herbagère (Tableau 7) : le maïs fourrage produit en Auvergne ne représente que 2,7% de la surface fourragère auvergnate, pour 6,2% de la quantité de matière sèche produite. Les prairies permanentes représentent quant à elle 75% des surfaces fourragères auvergnates et 60% de la production de matière sèche, ce qui démontre bien leur importance pour l'équilibre des systèmes fourragers en Auvergne.

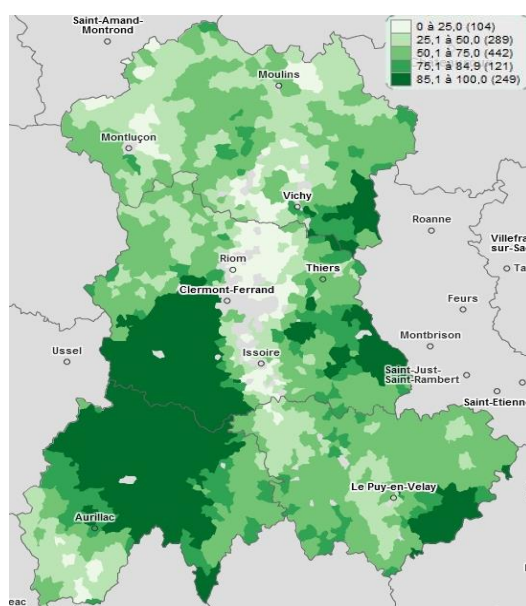


Figure 22 : Part de la surface toujours en herbe dans la surface agricole utile en Auvergne (Agreste, 2010)

Tableau 7 : Production fourragère en Auvergne en 2014 (Agreste, 2015)

S : Surface (ha) P : Production (1 000 q de MS) ⁽¹⁾		Allier	Cantal	Haute-Loire	Puy-de-Dôme	Auvergne	France métro.
Fourrages annuels	S	10 050	6 650	9 550	6 490	32 740	1 621 570
	P	1 383	861	1 043	871	4 158	208 671
dont maïs fourrage	S	9 700	6 600	9 400	6 400	32 100	1 411 666
	P	1 358	858	1 034	864	4 114	200 998
Prairies artificielles	S	1 500	600	600	3 000	5 700	226 753
	P	178	53	58	363	652	22 904
Prairies temporaires	S	114 500	56 900	40 300	48 500	260 200	3 087 219
	P	7 374	4 302	2 978	3 264	17 918	271 134
Surfaces toujours en herbe	S	234 350	277 200	146 100	242 700	900 350	9 280 312
	P	9 406	13 765	5 765	10 960	39 895	469 168
dont STH peu productives	S	2 900	28 000	18 900	7 700	57 500	2 448 189
	P	55	1 081	397	173	1 706	40 138

Du fait du manque de données présenté précédemment, il est difficile de déterminer et chiffrer les enjeux affectés par les pullulations de campagnols terrestres. Toutefois, il nous semble utile de

proposer un calcul approximant les enjeux économiques sous-jacents au risque de pullulation de campagnols terrestres. Pour cela, nous construisons une table de donnée très simple comprenant, pour chaque commune du Puy-de-Dôme et du Cantal :

- La note maximum relative aux populations de campagnols terrestres (entre 1 et 4), issue des données collectées par le SRPV (1985-2001).
- La fréquence de ce niveau maximum de populations de campagnols terrestres (entre 0 et 1).
- La surface toujours en herbe de la commune, en hectare, issue des données Agreste 2010.

Nous considérons, pour chiffrer les enjeux économiques, que chaque hectare de prairie permanente représente un capital de 900€. Ce chiffre est celui du barème « coup dur » des assurances Prairies (Bergot, 2016) et correspond globalement à une production estimée de 4,5 tonnes de fourrage par hectare, pour un prix de 200€/t. Ainsi, les surfaces de prairies permanentes des communes exposées à un risque de pullulation forte (4) ou moyenne (3) représentent, avec cette méthode d'estimation, une production de 285 millions d'euros (Tableau 8).

Tableau 8 : Approximation de la valeur de la production fourragère exposée au risque de pullulation

Note maximale de la commune	Surface de prairies permanentes concernée (ha)	Valeur estimée de la production annuelle (€)
4	156 186 ha	140 567 400 €
3	160 571 ha	144 513 900 €
2	88 822 ha	79 939 800 €
1	48 643 ha	43 778 700 €

Cette estimation approximative permet de mettre en évidence l'important enjeu économique posé par le risque de pullulation de campagnols terrestres. Toutefois, l'évaluation des pertes fourragères, et à plus forte raison des pertes économiques, induites par les pullulations demeure une opération délicate (voir 2.2.5 ci-dessous). En considérant un taux de perte moyen de 50% pour les communes touchées par de fortes pullulations et de 25% pour les communes touchées par des pullulations moyennes, on obtient une estimation de dommages s'élevant à 120 millions d'euros. Toutefois, il est évident que ce chiffre est largement surestimé, car toutes les surfaces ne sont en réalité par affectées par les pullulations de la même manière (notamment du fait de l'hétérogénéité du paysage). Les dommages causés par la pullulation de 2016 estimés par le FMSE s'élèvent à 20 millions d'euros pour les exploitations ayant subi des pertes supérieures à 30% de leur production fourragère espérée (51 010 hectares concernés).

2.2.5. La difficile évaluation des pertes fourragères et économiques

Quéré *et al.* (1999) ont mené un suivi de long terme (sur 17 ans) de la productivité des prairies du domaine expérimental de Marcenat (Cantal, 15), en croisant la production fourragère avec la présence de pullulations de campagnols terrestres et les conditions climatiques. Ce domaine, situé en zone de moyenne montagne (Cézallier, 1100 m), comprend 430 ha de prairies permanentes, exploitées en fauche et pâture (40%) ou en pâture exclusive (60%). La production fourragère dépend d'abord des conditions climatiques :

- Les années « favorables », la production dépasse le seuil des 7 tMS/ha/an.
- Les années « défavorables », la production est inférieure à 5,5 tMS/ha/an.
- Les années « moyennes », la production est comprise entre 5,5 et 7 tMS/ha/an.

Durant les 17 années de suivi, les prairies du domaine expérimental ont été affectées par trois pullulations de campagnols terrestres : de l'automne 1979 au printemps 1981, de l'automne 1986 à

l'automne 1989 et durant l'année 1994 (Figure 23). En 1989, lors du premier cycle, une perte d'environ 2 tMS/ha a été enregistrée sur une partie du domaine expérimental, ce qui est comparable aux pertes moyenne dues aux déficits hydriques en année défavorable (1,5 tMS/ha). L'effet cumulatif des deux conditions défavorables (potentiel climatique défavorable et pullulation de campagnols terrestres) cause une perte très significative de 46% par rapport à une année au climat « favorable » sans pullulation. Il est important de noter que les conséquences d'une pullulation dépendent non seulement du niveau des populations de campagnols terrestres, du type de prairies et de leur conduite, mais aussi des conditions climatiques, qui influent elles-mêmes sur le niveau de production fourragère.

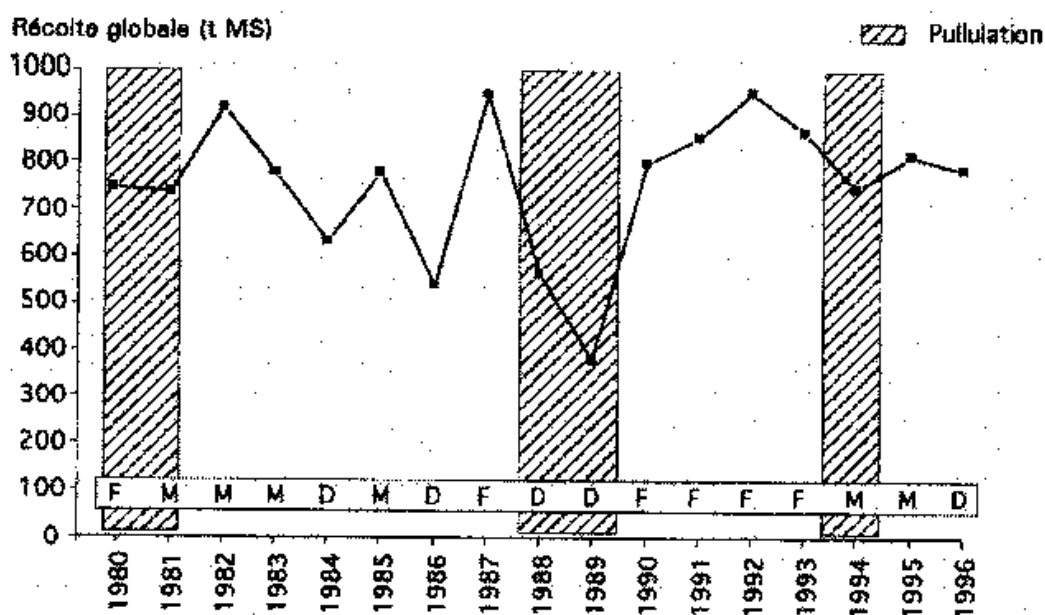


Figure 23 : Variations de la récolte globale annuelle du domaine de Marcenat de 1980 à 1996 (F, M et D : années climatiquement "favorables", "moyennes" et "défavorables") (Quéré et al., 1999)

Quéré et al. (1999) ont pu mener une analyse comparative des récoltes globales annuelles (en tMS/an) sur le domaine expérimental, en fonction du type d'année climatique et de l'existence de pullulations (Tableau 9). Pour mieux comprendre ces données, nous ramenons à la base 100 la production fourragère d'une année « moyenne » sans pullulation. Ces données démontrent que les pullulations de campagnols terrestres aggravent fortement les pertes subies par le domaine expérimental dans le cas d'une année défavorable, causant le doublement du déficit fourrager.

Tableau 9 : Analyse comparative des récoltes globales annuelles, d'après Quéré et al. (1999)

Climat de l'année →	« favorable »			« moyen »			« défavorable »		
	Récolte (tMS)	Récolte base 100	Perte base 100	Récolte (tMS)	Récolte base 100	Perte base 100	Récolte (tMS)	Récolte base 100	Perte base 100
Sans pullulation	880	107	+7	820	100	0	650	79	-21
Avec pullulation	744	91	-9	738	90	-10	470	57	-43

Du fait de la très forte dépendance des dommages causés par les campagnols terrestres aux conditions climatiques mais aussi agroécologiques (paysage, type de prairie, conduite des prairies, fertilisation, etc.), il est difficile de proposer une estimation générique des pertes fourragères associées aux pullulations. Globalement, les données collectées par Quéré et al. (1999) suggèrent que les pertes fourragères s'élèvent de 15% (pour une pullulation d'intensité moyenne, dans un climat favorable) à 45% des récoltes espérées (pour une pullulation de forte intensité, dans un climat défavorable). En

Franche-Comté, des valeurs comparables sont avancées, avec des pertes de fourrage de 25 et 33% dans des exploitations respectivement traitées (tardivement et partiellement) et non traitées contre le campagnol terrestre.

Pour monter en généralité, Quéré *et al.* (1999) ont enfin proposé une simulation de l'impact des pullulations sur le bilan de récolte pour une exploitation herbagère de moyenne montagne à la conduite similaire à celle du domaine de Marcenat. Nous adaptons ces résultats et les présentons en base 100 (Tableau 10). Ces données serviront, pour la suite de nos travaux, de références pour calibrer nos différents modèles (jeu sérieux au Chapitre 5, modèle multiagent au Chapitre 7).

Tableau 10 : Simulation des conséquences des pullulations en fonction des conditions climatiques en base 100, d'après Quéré *et al.* (1999)

Climat de l'année →	« favorable »		« moyen »		« défavorable »	
	Production	Variation	Production	Variation	Production	Variation
Sans pullulation	124	+24	100	0	68	-32
Pullulation moyenne (automne)	115	+15	90	-10	63	-37
Pullulation forte (printemps, automne)	90	-10	71	-29	39	-61

Ces pertes de fourrages en quantité et en qualité mettent à mal l'autonomie alimentaire des exploitations (achats extérieurs pour nourrir le troupeau productif) mais aussi la qualité et la quantité de leur production (lait ou viande). *In fine*, ce sont les revenus et la trésorerie des exploitations qui sont affectés : les pertes pouvant atteindre en moyenne 10 000 € d'Excédent Brut d'Exploitation par Unité de Main d'œuvre en système AOP Comté (Schouwey *et al.*, 2014). Il existe donc une cascade de conséquences liées aux pullulations de campagnols terrestres (Figure 24, p. 77), si bien que le passage de l'évaluation des pertes fourragères à celle des pertes économiques reste délicat. Comme nous le verrons dans le Chapitre 4 (p. 116), les caractéristiques du système fourrager jouent un grand rôle dans l'importance des conséquences économiques d'une pullulation pour une exploitation d'élevage donnée. Dans tous les cas, il est évident que les pullulations constituent un risque important, intense et fréquent, pour les exploitations d'élevage de moyenne montagne, et que la mise en place d'un système de gestion du risque est rendu nécessaire.

2.2.6. La gestion du risque de pullulation

Le principe général de la gestion du risque de pullulation repose actuellement la mise en place d'une lutte précoce et raisonnée (Couval et Truchetet, 2014). En effet, contrairement aux modes classiques de lutte contre des ravageurs des cultures qui visent à détruire les populations au moment où elles causent de gros dégâts, la maîtrise de ces pullulations nécessite d'agir à basse densité, c'est-à-dire lorsque les campagnols sont peu visibles et peu gênants pour les agriculteurs, en combinant un ensemble de méthodes directes et indirectes. La gestion intégrée des ravageurs (*Integrated Pest Management*) est une approche classique en agriculture (Barzman *et al.*, 2015; Stenberg, 2017). L'intérêt majeur d'une approche intégrée est de gérer davantage les causes du développement des ravageurs plutôt que de se focaliser sur les symptômes (Ehle, 2006).

« La gestion intégrée des ravageurs est une approche ou stratégie holistique pour combattre les ravageurs des plantes en utilisant l'ensemble des méthodes disponibles et réduisant au minimum l'application des pesticides chimiques. L'objectif n'est pas d'éradiquer les ravageurs, mais de les gérer, en maintenant leurs populations **en-dessous du seuil économiquement dommageable**. » (Stenberg, 2017)

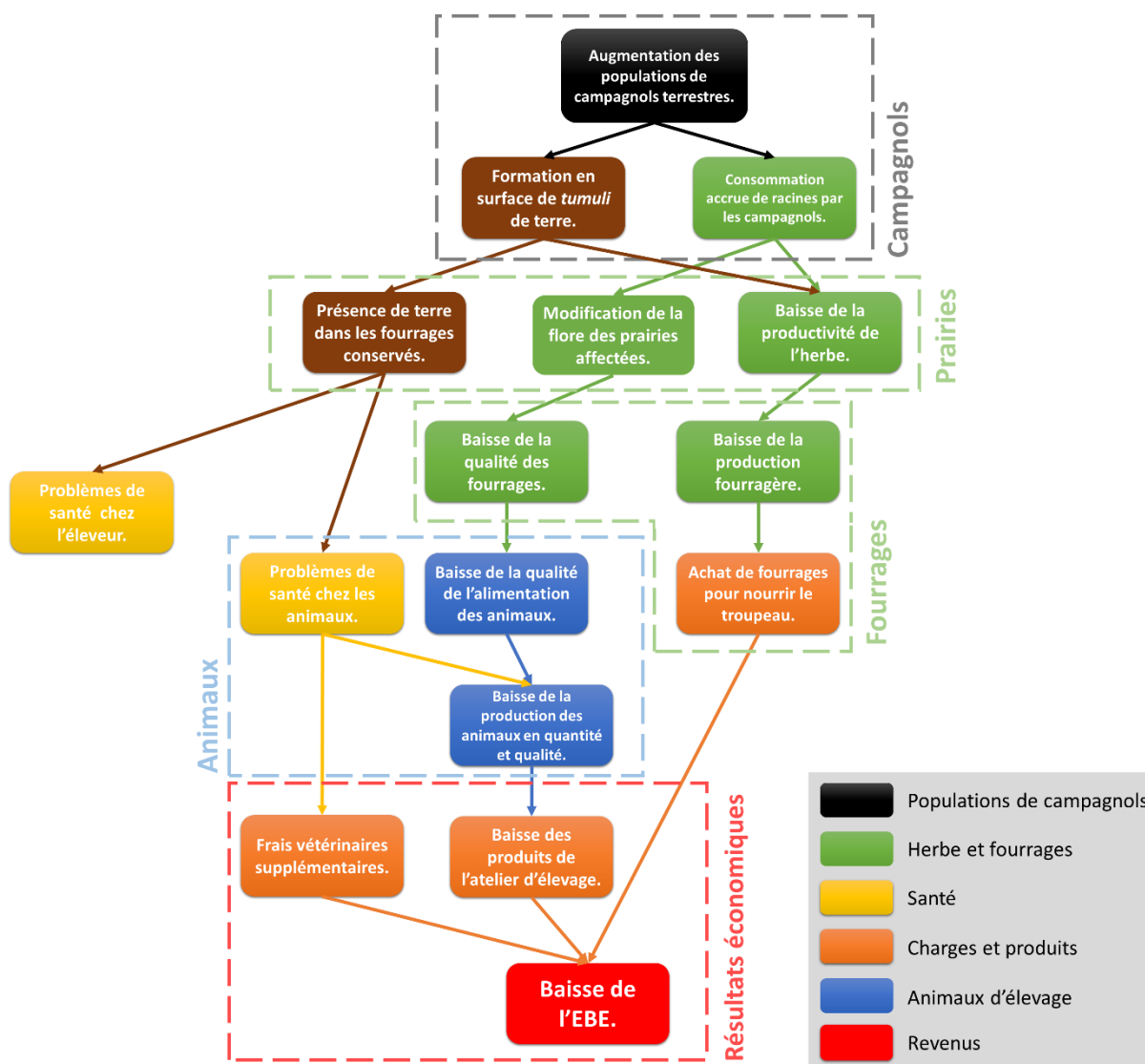


Figure 24 : Cascade de conséquences liées aux pullulations de campagnols terrestres (auteur)

Le corpus de moyens d'action à disposition des éleveurs évolue régulièrement, avec l'entrée de nouvelles méthodes ou nouveaux produits, ou au contraire le retrait de certaines substances. Les méthodes de contrôle des populations de campagnols terrestres peuvent être déclinées en trois catégories (Couval et Truchetet, 2014; Destrez *et al.*, 2014; Schouwet *et al.*, 2014) :

- Les méthodes de **lutte directe** contre le campagnol sont destinées à éliminer les individus : piégeage, phosphore de zinc (gaz toxique).
- Les méthodes dites **alternatives, ou indirectes**, ont pour objectif de défavoriser, de gêner le campagnol, et de contrôler de manière permanente ses populations : travail du sol (labour, décompactage), alternance fauche-pâture (ou rouleau à plots), lutte contre les taupes (piégeage, détapeur, gazage au PH3) et enfin lutte biologique en favorisant la prédation (broyage des refus, entretien des bordures, maintien des haies, installation de perchoirs et de nichoirs).
- **L'adaptation du système d'élevage**, c'est-à-dire de la conduite des parcelles, de la conduite du troupeau et de la gestion des stocks d'aliments...

Selon Couval et Truchetet (2014) et Verilhac *et al.* (2014), il existe trois facteurs de réussite majeur pour la maîtrise des pullulations :

- **L'observation et la surveillance des parcelles**, qui vise à connaître l'état des populations de campagnols terrestres, afin de mettre en œuvre les luttes dès l'apparition des premiers foyers et prévenir à la fois les pullulations localisées mais aussi les phénomènes de dispersion des populations de campagnols d'un territoire favorable à l'autre.
- **L'engagement collectif**, rendu nécessaire par la dimension spatiale du phénomène de pullulation qui peut couvrir de grandes surfaces.
- **L'emploi de méthodes de lutte combinées et préventives**, incluant des méthodes de lutte directe (piégeage et lutte chimique dès l'apparition des premiers terriers) et indirecte (qui agissent sur l'habitat des rongeurs et sur les causes des pullulations), à différentes échelles spatiales.

Couval *et al.* (2014) ont identifié et hiérarchisé les facteurs de contrôle des pullulations de campagnols, qu'ils nomment également « facteurs de risque » (Tableau 11). A différentes échelles spatiales (régionale, sectorielle ou locale), ces facteurs de risque sont fortement dépendants des pratiques agricoles : gestion de la fertilisation et composition de la prairie, conduite du troupeau sur les prairies, répartition spatiale de l'assolement et travail du sol, maintien d'un réseau de haies... Plus le paysage agricole est homogène et riche en prairies permanentes fortement connectées (peu de haies ou autres éléments de fragmentation du paysage), plus le risque de pullulation et de dommages est important. Selon Fichet-Calvet *et al.* (2000), le ratio STH/SAU¹⁷ est déterminant dans le niveau de risque, que ce soit le risque de démarrage d'une pullulation ou le risque de dommages (pertes fourragères).

Tableau 11 : Hiérarchie des facteurs de contrôle des pullulations en fonction des échelles spatiales, des processus biologiques identifiés ou pressentis, des effets observés sur les populations de campagnols et leviers d'actions possibles pour les éleveurs (Couval *et al.*, 2014)

Echelle spatiale	Facteur de contrôle (= facteur de risque)	Processus sous-jacents	Effets mesurables			Leviers d'actions : outils utilisables
Régionale (S ≈ 2 500 km ²)	Composition des paysages : 1- Ratio de STH 2- Ratio de milieux boisés	- Diffusion - Prédation	Diffusion des vagues de pullulation	Observation Collectif	Protection réglementaire des prédateurs	- Organisation spatiale de l'assolement
Sectorielle (S ≈ 25 km ²)	Structure des paysages : 1- Mosaïques boisées 2- Réseaux de haies 3- Formes des lisières, etc.	- Prédation - Dispersion - Parasitisme - Production primaire	- Type de pullulation - Vitesse de colonisation			- Implantation de réseaux de haies et de bosquets - Implantation de perchoirs - Travail du sol et rotation des cultures
Locale (S ≈ 0,01 km ²)	1- Hauteur d'herbe moyenne 2- Réseaux de galeries (de taupes, etc.) ou travail du sol 3- Composition prairiale (% de légumineuses, de pissenlits, etc.)	- Dispersion - Production primaire - Reproduction - Parasitisme	- Vitesse de colonisation - Dynamique de la reproduction			- Lutte directe contre le campagnol terrestre à basse densité - Lutte directe contre la taupe - Travail du sol et rotation des cultures - Alternance fauche pâture - Gestion du couvert végétal

Malgré ces connaissances et l'ensemble de méthodes de lutte proposées, les résultats attendus ne sont pas atteints : les exploitations subissent toujours, à intervalle régulier, de lourdes pertes économiques liées à de fortes pullulations. Pourtant, des retours d'expérience collective en Franche-Comté sur le temps long démontrent qu'une stratégie de lutte raisonnée est pertinente pour maîtriser les populations de campagnols terrestres (Giraudoux *et al.*, 2017). L'une des principales explications avancées à ce jour par la littérature concerne les marges de manœuvre à disposition des systèmes d'élevage pour mener des actions de contrôle des pullulations (Michelin *et al.*, 2014) : main d'œuvre disponible, caractéristiques du parcellaire, possibilités de stocker des fourrages, etc. « Entre 1955 et 2000, le nombre d'exploitations a progressivement décroché, passant de 7 à 2 exploitations pour 100 ha de SAU » (Note et Michelin, 2014).

Enfin, la stratégie de gestion actuelle ne prévoit aucun mécanisme pérenne de compensation, au sens où aucun budget ni aucun financement dédiés ne concernent le risque de pullulation, malgré la montée en puissance des outils assurantiels depuis les années 2000 (voir 1.1.4, p. 34). L'Etat reste

¹⁷ Surface Toujours en Herbe / Surface Agricole Utile

moteur de la gestion des risques sanitaires en agriculture (voir 2.2.7 ci-dessous), et aucun marché assurantiel ne s'est développé pour couvrir les dommages causés par les ravageurs ou maladies : ceci est lié aux particularités techniques et économiques des risques sanitaires (Carlson, 1979; Cochereau, 1989; Gillon, 1989) que nous interrogerons à la fin du Chapitre 2 (voir 2.3.2, p. 84). Nous proposerons une analyse de l'assurabilité du risque de pullulation de campagnols terrestres dans le Chapitre 3 (p. 94).

2.2.7. Cadre institutionnel de la lutte contre les pullulations

Il apparaît que la question de la gestion des pullulations de campagnols terrestres dépasse la simple échelle tant géographique qu'institutionnelle de l'exploitation agricole (Tableau 11, p. 78). Au-delà des aspects techniques *stricto sensu* de la régulation des populations de rongeurs, un cadre réglementaire et système institutionnel d'accompagnement des actions de lutte ont été construits par les pouvoirs publics. Ce cadre réglementaire a été rendu nécessaire pour répondre à la question du partage de la responsabilité face à ce risque et ses conséquences, notamment entre les pouvoirs publics et les agriculteurs.

Avant 2019, ce cadre réglementaire prenait place au niveau national. Les campagnols terrestres étaient considérés comme des organismes nuisibles sous mesure d'action obligatoire sur une zone définie par l'Arrêté ministériel du 31 juillet 2000¹⁸, puis classés comme « dangers sanitaires de catégorie 2 » par le Décret n°2012-245 du 30 juin 2012¹⁹. Cela avait pour conséquence d'attribuer la responsabilité *collective* de leur gestion aux agriculteurs.

Depuis 2019, le règlement européen 2016/2031²⁰ a remplacé l'ancien cadre réglementaire national. Il crée six catégories réglementaires, retranscrites dans le droit français à l'article L251-3 du Code Rural. Aucun organisme nuisible vertébré n'est considéré par la catégorisation européenne. Les Etats membres peuvent toutefois inscrire dans la 6^e catégorie les « *autres organismes nuisibles [...] pour lesquels il peut être nécessaire, dans un but d'intérêt collectif, de mettre en œuvre des mesures de prévention, de surveillance ou de lutte* »²¹. En France, le campagnol terrestre figure à l'annexe A de l'arrêté du 16 avril 2020²², ce qui le classe dans cette 6^e catégorie.

Le cadre réglementaire spécifique à la gestion des pullulations de campagnols terrestres est défini par l'Arrêté ministériel de 2014²³ et n'a pas été modifié par ce changement réglementaire. Il repose sur deux principes majeurs permettant la mise en œuvre d'un levier technique de gestion : (1) la surveillance des populations de campagnols et (2) l'action précoce et collective des éleveurs. Il est demandé aux Organismes à Vocation Sanitaire (OVS) d'encadrer les actions de lutte contre les pullulations et de construire un plan d'action régional. Ces organismes professionnels ont notamment pour mission de coordonner l'action collective entre les agriculteurs (accompagnement technique, formation, achat en commun de matériel et de produits...). Des groupes locaux (GDON²⁴) sont animés

¹⁸ Arrêté ministériel du 31 juillet 2000 établissant la liste des organismes nuisibles aux végétaux, produits végétaux et autres objets soumis à des mesures de lutte obligatoire

¹⁹ Décret n° 2012-845 du 30 juin 2012 relatif aux dispositions générales organisant la prévention, la surveillance et la lutte contre les dangers sanitaires de première et deuxième catégorie

²⁰ Règlement (UE) 2016/2031 du Parlement Européen et du Conseil du 26 octobre 2016 relatif aux mesures de protection contre les organismes nuisibles aux végétaux

²¹ Article L251-3 du Code Rural

²² Arrêté du 16 avril 2020 portant établissement des listes d'organismes nuisibles au titre du 6° de l'article L. 2513 du code rural et de la pêche maritime

²³ Arrêté du 14 mai 2014 relatif au contrôle des populations de campagnols nuisibles aux cultures ainsi qu'aux conditions d'emploi des produits phytopharmaceutiques contenant de la bromadiolone

²⁴ Groupement de Défense contre les Organismes Nuisibles

par les agriculteurs et soutenus par les techniciens de la structure départementale (FDGDON²⁵) ou régionale (FREDON²⁶).

De plus, depuis 2016, le FMSE, Fonds national agricole de Mutualisation du risque Sanitaire et Environnemental, a mis en place des mesures pour « soutenir les actions contre les pullulations de campagnols terrestres » (Lidsky *et al.*, 2017). Le FMSE verse des subventions aux éleveurs signataires d'un « contrat de lutte » contre les pullulations de campagnols pour compenser les investissements de lutte ; aucun dispositif permanent pour compenser les dommages n'est actuellement en place. L'intérêt de ce dispositif est de mobiliser un levier incitatif pour réduire le coût de la lutte supporté par les éleveurs et augmenter la mise en œuvre du levier technique.

Enfin, la grande diversité d'acteurs impliqués (Etat, OVS, chercheurs, éleveurs... ; Figure 25) appelle à une coordination verticale entre eux. Un espace de coordination, animé par un préfet et les services déconcentrés de l'Etat (DRAAF²⁷, DDT²⁸), se réunit environ deux fois par an, à l'échelle du Massif Central et des départements. Le SIDAM²⁹ est l'instance professionnelle en charge du suivi des dossiers (recherche, cadre réglementaire, financements, etc.).

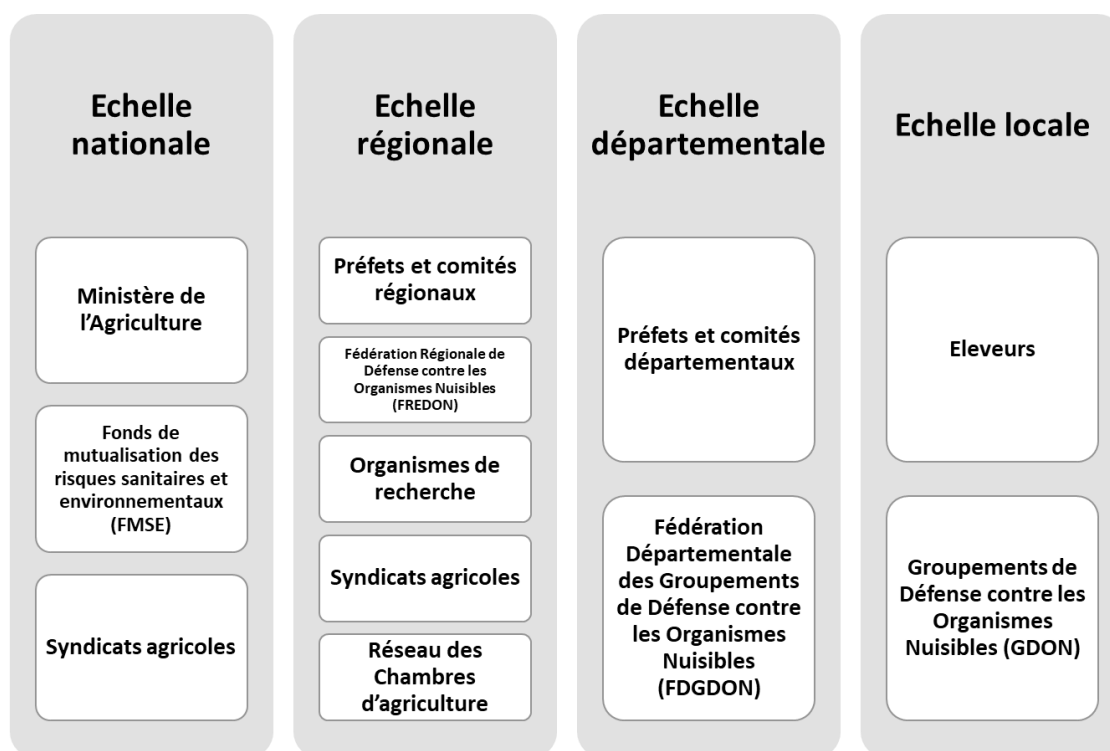


Figure 25 : Acteurs impliqués dans la gestion des pullulations de campagnols terrestres en France (auteur)

2.3. Particularités du risque de pullulation de campagnols terrestres

2.3.1. Application de la grille de caractérisation des risques

Nous venons de résumer en quelques paragraphes les caractéristiques des pullulations de campagnols terrestres, les dommages dont elles sont la cause et les enjeux de gestion sous-jacents. Nous appliquons à présent la grille de caractérisation des risques élaborée précédemment (Tableau 5, p. 64)

²⁵ Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles

²⁶ Fédération Régionale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles

²⁷ Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

²⁸ Direction Départementale des Territoires

²⁹ Service Inter-Départemental pour l'Animation du Massif central (réseau des chambres d'agriculture)

à notre cas d'étude, afin de définir les particularités du risque de pullulation et leurs implications en termes de gestion (Tableau 12).

Tableau 12 : Caractérisation du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres (auteur)

	Critère	Cas des pullulations de campagnols terrestres
L'aléa ou risque-cause	Origine du risque-cause	Un rongeur, le campagnol terrestre (<i>Arvicola terrestris scherman</i>), dont la dynamique de population comprend des pullulations régulières. Comme le montrent le schéma de causalité (Figure 6, p. 34) et l'étude des facteurs de risque (Tableau 11, p. 78), les pratiques agricoles, qui reposent sur des décisions humaines, influent grandement les cycles de développement de ce rongeur. Ainsi, bien qu'induit par un phénomène biologique, le risque en lui-même est bien d'origine humaine : les systèmes d'élevage spécialisés ont créé leur propre exposition et leur propre vulnérabilité face aux pullulations. Toutefois, l'attribution d'une telle responsabilité s'applique principalement <i>collectivement</i> à l'échelle des territoires d'élevage, et non <i>individuellement</i> à l'échelle de l'exploitation agricole.
	Nature du risque-cause	Le campagnol terrestre est un ravageur des prairies : en phase de pullulation, il cause la perte d'une part significative de la production fourragère espérée. Classiquement, ce genre de risque est assimilé à la catégorie des risques « sanitaires », qui inclut les maladies (virus, bactéries) et les ravageurs (insectes, vertébrés).
	Informations et données disponibles	Les données historiques sur l'étendue spatiale et la fréquence des pullulations existent mais demeurent peu précises. Le mécanisme général de pullulation et de dispersion est bien décrit mais encore peu expliqué. Les pertes fourragères moyennes sont connues grâce à des retours d'expérience réguliers et un suivi de long terme de Quéré <i>et al.</i> (1999), mais demeurent difficiles à anticiper au cas par cas du fait de la forte dépendance aux facteurs environnementaux et agronomiques (type de couvert prairial, conduite des prairies, climat...).
	Intensité du risque-cause	Lors des fortes pullulations, les populations de campagnols terrestres atteignent plus de 500 individus/ha (plus de 800 individus lorsque les conditions de développement sont très favorables). Leur consommation d'herbe et de racines est d'autant plus importante que les densités de populations à l'hectare sont grandes. Le suivi et l'évaluation des dynamiques populations de campagnols demeurent difficiles, car la corrélation entre les indices de surface (<i>tumuli</i>) et les populations présentes dans les galeries n'est pas toujours suffisante (Ramadier <i>et al.</i> , 2019).
	Fréquence du risque-cause	En Auvergne, la fréquence des pics de pullulation est de 1/8 à 1/4, et celle des fortes pullulations est de 1/10 (Cantal et Puy-de-Dôme). La loi fréquence-intensité n'est pas précisément connue.
	Caractère aléatoire du risque-cause	L'étude des facteurs de risque et l'historique connu des pullulations permet de prédire la survenance future d'une pullulation de campagnols terrestres. Ce risque n'est donc pas aléatoire, d'autant plus que de nombreux facteurs de risque ne sont pas indépendants des pratiques de l'éleveur.
L'exposition	Enjeux concernés	Les enjeux concernés sont principalement des prairies permanentes situées dans des zones où le rapport STH/SAU dépasse 80%. Le capital fourrager exposé est important (environ 250 millions d'euros).
	Distribution spatiale et	A l'échelle du pays, le risque de pullulation est localisé et touche les régions d'élevage herbager de moyenne montagne (Figure 15). A l'échelle régionale, le risque est plutôt étendu et touche une grande

	temporelle du risque	partie du Cantal et l'ouest du Puy-de-Dôme (Figure 16, Figure 17). Les dommages sont souvent groupés et répartis sur une ou deux années.
La vulnérabilité	Facteurs de vulnérabilité	L'étude des facteurs de vulnérabilité nous semble être l'aspect le plus important mais également le plus complexe de notre analyse. D'une part, ces facteurs de vulnérabilité prennent place à différentes échelles spatiales (régionale, sectorielle, locale) mais également à différentes échelles économiques (parcelle, système fourrager, territoire). Les facteurs de risque présentés ci-dessus (Tableau 11, p. 78) sont d'ordre écologique, paysager, technique. Nous verrons par la suite que d'autres facteurs, d'ordre socio-économique, viennent compléter cette analyse (Chapitre 6).
	Risque indépendant ou systémique	Le risque lié aux pullulations de campagnols terrestres possède une composante indépendante, car tous les territoires ne sont pas touchés de la même façon, et une part systémique, car ce risque est relativement concentré sur des zones connues et sur une ou deux années, ce qui limite l'assiette de cotisation concernée par ce risque et donc les possibilités de mutualisation.
Les dommages	Conséquences	Les dommages tangibles causés par les campagnols sont les pertes de production fourragère, les achats de fourrages induits ainsi que la remise en état des prairies. Le coût de la lutte peut également être considéré comme une perte. La perte de qualité des fourrages ainsi que la perte de production en quantité et en qualité résultante peuvent également être mesurées. Certains dommages restent pour l'instant intangibles, notamment les problèmes de santé de l'agriculteur liés à la présence de terre dans les fourrages et lors de la fenaison.
	Dommages tangibles	50% de la production fourragère est perdue, en moyenne (Quéré <i>et al.</i> , 1999). Jusqu'à 80-100% sur certaines parcelles.
	Risque unitaire ou combiné	Le risque lié aux pullulations est combiné (voir Figure 24, p. 77) : perte de quantité de fourrages, perte de qualité de fourrages, dangers sanitaires pour les animaux et pour les éleveurs, perte de production en quantité et qualité de lait et de viande, achats de fourrages, investissements dans la lutte, usure du matériel... Une seule variable unitaire ne peut suffire à définir de manière complète ce risque et ses conséquences économiques. Il peut être utile de définir une variable combinée, par exemple la perte d'EBE, pour traduire au mieux les dommages consécutifs aux pullulations. La perte a été estimée 10 000 € d'Excédent Brut d'Exploitation de perte par Unité de Main d'œuvre en système AOP Comté (Schouwey <i>et al.</i> , 2014).
	Risque sage ou sauvage	Les pullulations de campagnols sont considérées comme de véritables « catastrophes » pour les systèmes d'élevage herbagers. Toutefois, sa fréquence est trop élevée pour être considérée comme un risque sauvage, et l'intensité des dégâts trop élevée pour qu'il soit considéré comme sage. Ce risque a bel et bien des caractéristiques particulières.
La gestion	Echelle d'action pertinente	Les populations de campagnols terrestres se dispersent par vagues voyageuses autour de foyers de développement : cela rend nécessaire une réponse à une échelle territoriale, comme les facteurs de risque le démontrent, et collective, puisque le phénomène traverse les frontières des propriétés privées (Smith <i>et al.</i> , 2009).
	Cadre institutionnel	Le campagnol terrestre est considéré comme un organisme nuisible dont la gestion relève de « l'intérêt collectif » (code rural). Sa gestion relève de l'implication collective des agriculteurs (arrêté ministériel de 2014). Les OVS sont en charge de la coordination et de l'animation

		de la lutte sur les territoires exposés. Le FMSE débloque des fonds pour financer une partie des investissements relatifs à la lutte contre les pullulations.
	Gestion <i>ex-ante</i>	Les facteurs de risque étant connus et dépendants des pratiques agricoles mises en place tant au niveau territorial que local (parcelle), les possibilités techniques de gestion du risque existent. Ainsi, en amont de la survenance des pullulations (<i>ex-ante</i>), les éleveurs peuvent mettre en place des mesures préventives d'autoprotection dont l'objectif sera de réduire l'intensité de la pullulation (actions de contrôle directes ou indirectes) ou bien encore des mesures d'atténuation des dommages (diversification de l'assolement et des fourrages produits, infrastructures agroécologiques).
	Gestion <i>ex-post</i>	Après la survenance d'une pullulation et l'occurrence de dommages, les possibilités de gestion sont moindres. Lorsque son système fourrager est excédentaire les bonnes années, l'éleveur peut compter sur la mobilisation d'un stock de fourrages pour pallier une partie des pertes. Dans le cas de lourdes pertes de production, des achats de fourrage à l'extérieur de l'exploitation sont nécessaires pour nourrir le troupeau ; ces achats peuvent être financés par la trésorerie de l'exploitation ou bien des aides publiques exceptionnelles.
	Stratégie(s) pertinente(s)	L'intensité et la fréquence de ce risque, mais aussi la vulnérabilité des exploitations d'élevage (aléas climatiques et économiques), rendent nécessaire la mise en œuvre d'une stratégie de gestion du risque. <ul style="list-style-type: none"> • Les difficultés de maîtrise des populations plaident en faveur de mécanismes d'ajustement <i>ex-post</i> pour pallier les pertes, notamment grâce à des stocks fourragers ou un mécanisme de compensation des dommages. • Toutefois, la gestion <i>ex-ante</i> et préventive des pullulations nous semble indispensable à la possibilité même de mise en œuvre de tels adaptations <i>ex-post</i>. Le niveau actuel du risque et son caractère systémique limitent les possibilités de mutualisation des dommages. • La dépendance des facteurs de risque aux pratiques agricoles plaide également pour la mise en œuvre, en priorité, d'un levier technique de gestion.
	Besoins en connaissances et en technologies	Il existe un besoin d'approfondir les connaissances fines des mécanismes de pullulation (notamment les déterminismes des différentes phases du cycle) et de dispersion afin de mieux le gérer. Les moyens d'action <i>directs</i> proposés sont souvent remis en cause pour leur manque d'efficacité et le temps important que leur mise en œuvre nécessite : des travaux de recherche sont menés pour les améliorer.

La caractérisation économique du risque met en évidence les principales particularités des pullulations de campagnols terrestres :

- Il est un risque causé par un agent biologique mais les facteurs de risque sont dépendants des pratiques agricoles et donc d'origine humaine. De ce fait, la grande majorité des actions possibles sont préventives et concerne des leviers d'action techniques.
- Les dommages associés aux pullulations peuvent être considérés comme importants, et leur fréquence d'occurrence élevée. La dimension temporelle cyclique du risque confirme la nécessité d'une gestion préventive et le place dans la catégorie des risques systématiques (non aléatoires).

- Ce risque est localisé à l'échelle nationale (l'assiette de mutualisation est faible) et systémique à l'échelle locale (les dommages sont concentrés sur une ou deux années pour l'ensemble des enjeux concernés). L'assurabilité de ce risque devra être interrogée.
- Le phénomène de dispersion spatiale mis en évidence rapproche ce risque d'un risque sanitaire capable de contaminer de proche en proche des enjeux vulnérables.
- Enfin, la mesure unique des pertes quantitatives de fourrages et donc des achats de fourrages nécessaires pour les compenser ne suffit pas à évaluer le risque : une perte x donnée de fourrages occasionnera une perte d'EBE X supérieure. C'est une variable combinée qu'il convient d'utiliser pour mesurer et évaluer ce risque.

2.3.2. Problèmes économiques sous-jacents à la gestion des ravageurs

Les particularités du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres que nous venons de mettre en évidence sont assez classiquement rencontrées lorsqu'il s'agit de traiter les risques sanitaires. Nous proposons, pour comprendre les problèmes économiques sous-jacents à la gestion des pullulations, d'étudier ce que dit la littérature au sujet de la gestion des risques ravageurs.

Traitant du « risque acridien » (dommages causés par les criquets en Afrique), Gillon (1989) met en évidence que les dommages, massifs et brutaux, ont lieu lors d'une pullulation des insectes qu'il convient d'anticiper : « *Se prémunir contre le risque acridien, c'est prévoir quand et où se produiront les pullulations dans la nature. Lorsque la prévision est assez précoce, la lutte peut être menée à bien, avant l'invasion des cultures.* » Cochereau (1989) insiste quant à lui sur l'étude de la prise de décision et du seuil de dommages au-delà duquel les agriculteurs déclenchent l'intervention : « *Dans le contexte économique actuel de l'Afrique, surtout lorsqu'il s'agit de cultures vivrières, les prix des produits chimiques, des matériels et du carburant augmentent plus vite que la valeur du gain de récolte escomptable, ce qui a pour conséquence d'élever le seuil de dégâts économiques.* » Il semble donc que les agriculteurs confrontés à un problème de gestion d'un ravageur sont au cœur d'un dilemme entre d'une part la mise en place d'une action précoce et efficace pour réguler les populations de ravageurs, et d'autre part le coût de cette action.

La difficulté majeure que nous identifions dans la mise en œuvre d'une stratégie de maîtrise des pullulations de campagnols terrestres réside dans le fait que les éleveurs ne peuvent gérer individuellement ni les facteurs de risque qui prennent place à l'échelle du territoire (paysage, rapport STH/SAU), ni les mécanismes de dispersion des populations : ils doivent coopérer et agir collectivement. Ils partagent en effet un espace productif commun, malgré l'existence de structures de propriété au sens de Coase (1960). Or, l'existence de telles structures de propriété sous-incite à la gestion du risque à l'échelle du territoire (Epanchin-Niell et Wilen, 2015; Fenichel *et al.*, 2014), car l'agriculteur considère que le niveau des populations de ravageurs de la période suivante est une variable exogène, dépendante de facteurs environnementaux et sociaux hors de son contrôle (Feder et Regev, 1975).

Pour comprendre davantage les enjeux liés à notre cas d'étude, nous identifions dans la littérature six problèmes économiques sous-jacents à la gestion des ravageurs :

- (1) Face à un ravageur dont les capacités de développement sont importantes (stratégie de type r), le contrôle doit être appliqué à l'échelle du territoire pour éviter les mécanismes de dispersion : les externalités spatiales sont transférables d'une parcelle à l'autre (Smith *et al.*, 2009). Cela pose problème lorsque les parcelles appartiennent à un nombre croissant de propriétaires (ou sont exploitées par des agents différents), car ces agents prennent des décisions en considérant uniquement les bénéfices et les coûts potentiels qui concernent leurs propres parcelles (Epanchin-Niell et Wilen, 2015). Globalement, chaque agent sera incité à

sous-contrôler le phénomène à l'échelle du paysage/territoire. Le principal facteur induisant un manque de contrôle à l'échelle du territoire est un manque de coordination³⁰. Or, « *les actions individuelles ne sont pas indépendantes et le problème a une dimension temporelle* » (Headley, 1972, p. 284).

- (2) Il se pose donc le problème des interactions spatiales entre des propriétés privées : le marché ne parvient pas à internaliser les processus environnementaux qui traversent les frontières des propriétés privées (Fenichel *et al.*, 2014). Il est probable que les droits de propriété fournissent des incitations insuffisantes pour gérer les processus spatiaux au niveau social optimal (Hansen et Libecap, 2004). Classiquement, il s'agit d'un problème de sous-incitation à la production d'un bien collectif (Cornes, 1993; Hirshleifer, 1983)³¹.
- (3) Il existe également des problèmes de « passager clandestin » et d'aléa moral (voir 1.2, p. 48) classiquement rencontrés dans les cas où l'action collective produit un bien collectif (Balme, 1990; Holmstrom, 1982; Olson, 1965).
- (4) La lutte contre les invasions doit être étendue à l'ensemble des terres privées ; pour cela, il convient de motiver les agents à intervenir. Ceci est d'autant plus difficile que l'échec de la lutte sur une partie des terres crée un « réservoir d'invasion » qui augmente le coût et la difficulté de la gestion pour les terres environnantes. Les efforts de lutte doivent donc être coordonnés. Ainsi, un agent doit à la fois être impliqué par la lutte sur ses propres terres, mais aussi dans la construction d'actions de contrôle collectives (apprentissage, pression sociale...) (Niemiec *et al.*, 2016), ce qui constitue des coûts supplémentaires pour l'agent (coûts de coordination, coûts de transaction, coûts d'opportunité) (Brousseau, 1992; Brousseau et Glachant, 2000; Menard, 2003).
- (5) La gestion des ravageurs pose également des questionnements d'ordre institutionnel : est-il préférable de mettre en œuvre un programme *top-down* (avec un planificateur central) (Epanchin-Niell et Wilen, 2012) ou *bottom-up* (favorisant la coordination locale) pour gérer une invasion biologique à l'échelle d'un territoire plus petit (Epanchin-Niell et Wilen, 2015) ? Cela pose la question de la place de l'intervention publique dans la gestion du risque : intervention directe, subvention, réglementation ou au contraire *laissez-faire* ?³²
- (6) L'optimum social peut-il être atteint ? Il est souvent difficile de mobiliser la totalité des agents face à une problématique d'invasion biologique, et donc peu envisageable d'atteindre l'optimum social, mais un contrôle coopératif peut s'avérer suffisant pour éviter les externalités les plus importantes liées à la diffusion d'une invasion (Epanchin-Niell et Wilen, 2015).

Mumford et Norton (1984) se sont intéressés à la prise de décision pour la gestion des nuisibles : il s'agit, classiquement, d'un problème d'allocation de ressources finies (capital, travail, ...). Comprendre la prise de décision face à un risque ravageur sera une étape importante de nos travaux de modélisation (Chapitre 5, Chapitre 7). A l'échelle de la ferme, quatre modèles économiques ont été identifiés :

- (1) Le modèle de seuil (*threshold model*). Le seuil économique est défini comme « *la densité d'une population de nuisible qui justifiera une intervention.* » Souvent, il est considéré que les dommages occasionnés par le nuisible doivent dépasser les coûts de contrôle. En réalité, les mesures de contrôle n'étant pas parfaitement efficaces, il convient de définir que ce sont les bénéfices du contrôle qui doivent dépasser son coût.

³⁰ L'étude de la coordination et de l'action collective face aux ravageurs sera l'objet des Chapitre 5 et Chapitre 6.

³¹ Cette question sera traitée dans les Chapitre 6 et Chapitre 7.

³² Cette question sera traitée dans le Chapitre 7 grâce à un modèle informatique multiagent.

- (2) Le modèle d'analyse marginale/d'optimisation. L'objectif des entreprises est de maximiser leurs profits (hypothèse discutable dans le cas des exploitations agricoles). L'entreprise a une information parfaite sur ses facteurs de production et leur productivité. Les rendements sont décroissants : par exemple, plus un *input* comme un engrais va être appliqué, moins le gain de production (*output*) par unité supplémentaire sera important.
- (3) Le modèle de décision (*decision theory model*). Il s'agit, comme en théorie des jeux, de croiser un *état de la nature* avec une *décision* pour en connaître le revenu produit, l'état de la nature (ex : niveau d'attaque du nuisible) étant incertain et inconnu au moment de la décision... Il est parfois possible, en se fondant sur l'expérience passée, de connaître la probabilité d'occurrence de chaque état de la nature. Dans ce cas, il est possible de calculer un revenu espéré, pour chaque action, en le pondérant avec les probabilités (cf. 1.3, p. 44).
- (4) Le modèle comportemental (*behavioral decision model*). L'agriculteur juge de l'efficacité du contrôle selon sa propre perception du phénomène. Si le modèle est dynamique, le décideur apprend du résultat de sa décision au pas de temps précédent pour adapter sa décision suivante.

Enfin, la littérature envisage plusieurs solutions pour optimiser la gestion collective d'un ravageur :

- (1) Il est envisageable qu'un agent accepte d'internaliser certaines externalités d'une invasion biologique en développant un accord de coopération avec ses voisins (Wilensky, 2007). Par exemple, un éleveur peut accepter de partager les coûts de contrôle d'un ravageur/d'une maladie afin d'éviter d'être lui-même affecté par la suite. Il conviendrait alors d'estimer son consentement à payer sous forme d'un mécanisme d'entraide ou de cotisation. Ce genre d'accords génère des coûts de transaction, selon la théorie de Coase (1960), d'autant plus élevés que l'échelle spatiale est grande, ou que le nombre d'agents est important. « *Puisqu'il est un bien public, si ce contrôle est laissé aux efforts individuels sans coordination, cela sera insuffisant pour protéger les intérêts publics* » (Perrings et al., 2002).
- (2) Fenichel et al. (2014) mettent en évidence que l'application d'une taxe pigouvienne³³ directement à la source d'une « pollution biologique » peut potentiellement provoquer une incitation aux comportements qui augmentent la diffusion de l'invasion, car une taxe pigouvienne réduit la valeur du capital productif et les incitations à le maintenir.
- (3) Il convient non seulement de développer un système d'information, mais aussi et surtout des incitations pour modifier les comportements à risque (institutions, mécanismes de compensation, bonus-malus...). « *Les incitations les plus efficaces sont celles qui confrontent les agents qui causent le problème au coût total de leur comportement* » (Perrings et al., 2002).

Conclusion sur les particularités du risque de pullulation de campagnols terrestres

Gérer un risque suppose de décider d'une allocation optimale des facteurs de production et/ou de mobiliser un corpus pertinent d'instruments de gestion du risque. Ces choix doivent être éclairés par une connaissance et une caractérisation du risque auxquels les agents font face. Pour cela, nous avons proposé une grille de caractérisation économique des risques reposant sur cinq étapes : la caractérisation de l'aléa, la caractérisation de l'exposition, la caractérisation de la vulnérabilité, la caractérisation des dommages et la caractérisation des enjeux de gestion.

Appliquée à notre cas d'étude, cette grille nous a permis de mettre en évidence les particularités du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres. Notamment, l'intensité des dommages est trop

³³ Nommée d'après l'économiste britannique Arthur Pigou, qui fut le premier à en proposer l'application en 1920, une taxe pigouvienne a pour objectif d'internaliser les coûts sociaux (externalité liée à une activité économique ; exemple : pollution). Il s'agit d'intégrer au marché les externalités négatives.

importante pour que ce risque soit absorbé par le système agricole, et sa fréquence est trop importante et sa survenance trop systémique pour qu'il puisse être aisément mutualisé ou assuré. De plus, les facteurs de risques identifiés par la littérature démontrent que ce phénomène et sa gestion technique prennent place à des échelles qui dépassent celle de la parcelle ou même celle de l'exploitation agricole, ce qui suppose la mise en œuvre d'une gestion collective du ravageur. La dépendance des facteurs de risque aux pratiques agricoles, individuelles (gestion des prairies, assolement) et collectives (paysage), plaide en premier lieu pour la mobilisation d'un levier technique de gestion afin d'enrayer au maximum le phénomène et réduire à la fois sa fréquence et son intensité. La mise en œuvre de ce levier technique semble limitée du fait de son coût de mise en œuvre important (méthodes chronophages) qui augmente le seuil économique d'intervention et désincite les éleveurs à s'engager de manière appliquée et suivie. Dans un second temps, si le phénomène peut être ramené à un seuil acceptable, alors des leviers économiques pour limiter ses effets sur le système agricole peuvent être mobilisés (stocks de fourrages, épargne de précaution, diversification...).

Le fait que les facteurs de risque et de contrôle prennent place à une échelle dépassant le cadre de l'exploitation agricole individuelle rend difficile la gestion du risque par une action technique et préventive : le campagnol terrestre est considéré comme un élément exogène au système productif. Les structures de propriété privée et l'hétérogénéité des systèmes productifs (vulnérabilité) et des agents (comportement et préférences) conduisent à une sous-implication au contrôle du ravageur à l'échelle du territoire. Or, les expériences montrent que lorsqu'une lutte suivie est correctement menée, l'ensemble des éleveurs du territoire en bénéficie (Giraudoux *et al.*, 2017), ce qui place la maîtrise des pullulations de campagnols sous le régime de la production d'un bien collectif.

Face au sous-engagement des agriculteurs, dans l'objectif de faciliter l'action collective et réduire les coûts de transaction, un système institutionnel a été pensé pour assurer la coordination entre l'ensemble des acteurs impliqués, et notamment la coordination entre les éleveurs. Des contrats de lutte ouvrant droit à un accompagnement technique et à des subventions des outils de lutte (consommables, pièges, etc.) ont pour objectif d'augmenter le taux de participation des éleveurs à l'action collective. Cette stratégie incitative n'est toutefois pas parvenue, à ce jour, à augmenter l'action collective face aux pullulations.

Bilan de la partie I et problématisation

L'agriculture est soumise à un ensemble de risques dont la survenance isolée ou croisée est la cause de perturbations des systèmes de production et de variabilités des *outputs* agricoles. La forte dépendance de la fonction de production agricole à de nombreux éléments naturels (sol, climat, ravageurs et maladies) la rend incertaine et instable par nature. Le risque en agriculture peut désigner deux réalités distinctes : le risque endogène et courant, qui relève davantage de la variabilité des *outputs* inhérente au processus de production agricole lui-même, et le risque exogène et exceptionnel, qui ne peut être absorbé par le système agricole isolé.

Les risques sont parfois produits par le système agricole lui-même qui, par ses choix productifs, génère de nouvelles expositions et/ou de nouvelles vulnérabilités. Certains risques sont ainsi très localisés et ne concernent que certains systèmes spécifiques, si bien que le marché n'intègre pas correctement ces coûts de production spécifiques dans la construction des prix, ce qui rend la gestion de ces perturbations d'autant plus difficiles pour les agriculteurs. Ainsi, le risque lié aux pullulations de campagnols terrestres ne concerne-t-il que les systèmes d'élevage herbager de moyenne montagne dont les systèmes fourragers sont particulièrement vulnérables (dépendance forte à l'herbe).

Les dommages causés par les pullulations (environ 50% de la production fourragère espérée) sont trop importants pour être absorbés par les systèmes fourragers sans mettre en jeu leur viabilité, et leur fréquence importante rend difficile la mutualisation des risques. Malgré les méthodes de lutte et les incitations économiques (subventions) proposées aux éleveurs, ils ne sont que peu engagés dans la mise en œuvre de la lutte précoce et raisonnée pourtant appuyée par les techniciens et étayée par des travaux de recherche. Cet échec des stratégies de gestion des campagnols terrestres nous interroge. Les dommages sont suffisamment importants, fréquents et généralisés à l'échelle sectorielle et régionale, pour créer un intérêt commun à la maîtrise des populations de campagnols. De plus, la maîtrise des populations de campagnols terrestres revêt un caractère de bien collectif, puisque l'ensemble du territoire bénéficie des actions de lutte.

Comment peut-on expliquer l'inefficacité actuelle de la gestion du risque de pullulation de campagnols terrestres ? Quelles sont les stratégies de gestion les plus pertinentes compte-tenu des particularités du phénomène ?

D'avantage qu'un problème technique à l'échelle de l'exploitation agricole, nous proposons d'expliquer le sous-engagement constaté des éleveurs dans la lutte contre les pullulations par la défaillance des incitations proposées pour augmenter leur contribution à la fourniture d'un bien collectif. L'économie du risque et l'économie institutionnelle offrent des cadres d'analyse intéressants pour expliquer les incitations des agriculteurs à contribuer individuellement ou non à la maîtrise des populations de campagnols, mais également à se coordonner avec les autres agents concernés par un espace productif commun.

Notre travail de caractérisation du risque montre qu'il est possible d'envisager plusieurs approches de ce risque, selon comment on considère sa place par rapport aux systèmes d'élevage. Ainsi, pour la suite de notre travail de thèse, nous proposons trois approches du risque de pullulation qui aboutissent à trois propositions de gestion (Tableau 13, p. 90). A ce stade de nos travaux, nous ne statuons pas sur l'incompatibilité réelle ou supposée de ces trois approches.

- (1) Les pullulations de campagnols terrestres peuvent être considérées comme exogènes à l'exploitation agricole et non maîtrisables par l'éleveur. D'une part, les facteurs de risque prennent place à des échelles territoriales et leur gestion ne relève pas de la responsabilité exclusive d'un éleveur donné. D'autre part, les mécanismes de dispersion spatiale des

pullulations de campagnols génèrent des externalités qui augmentent les coûts de contrôle au-delà des capacités d'action de l'exploitation. Cette approche permet de ramener, à l'échelle individuelle de l'exploitation agricole, les pullulations de campagnols terrestres plus proche de la définition stricte du risque : un évènement probabilisable dépendant de facteurs extérieurs au système productif et responsable d'importants dommages que ce système ne peut absorber. Dans ce cas, un éleveur averse au risque devrait être intéressé par une solution assurantielle qui lui permettrait de vendre son risque à un assureur neutre au risque et capable de le diversifier. Nous proposons donc une première piste de recherche qui consiste à étudier l'assurabilité du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres : ce sera l'objet du Chapitre 3 (p. 94).

- (2) Une deuxième approche consiste à considérer les pullulations de campagnols terrestres comme la conséquence de la spécialisation productive des territoires de moyenne montagne vers l'élevage herbager, au détriment des cultures annuelles fourragères et commerciales. Cette approche suggère donc que les leviers de gestion ne prennent pas place à l'échelle de la parcelle mais à une échelle supérieure : celle du système fourrager. En effet, d'une part, la spécialisation herbagère rend l'alimentation des troupeaux dépendante d'une unique production fourragère ; d'autre part, le lien entre la proportion de prairies permanentes sur un territoire et la survenance plus fréquente et intense de pullulations de campagnols terrestres est bien renseigné. En se spécialisant, les systèmes fourragers ont créé leur propre exposition (augmentation des habitats favorables aux campagnols) et leur propre vulnérabilité (hausse de la part de l'herbe dans l'alimentation des troupeaux) face au risque de pullulation. Le Chapitre 4 (p. 116) propose d'aborder la gestion du risque de pullulation en le réintégrant dans une approche systémique : celle de la gestion du système fourrager.
- (3) Enfin, une troisième approche consiste à élargir encore davantage la focale de l'analyse. Si l'approche par le système fourrager permet de régler certaines questions relatives aux pullulations et à leurs dommages à l'échelle individuelle, la question des facteurs de risques prenant place à l'échelle du territoire (échelle collective) reste à traiter. Cette troisième approche propose de traiter la gestion des pullulations comme celle de la production d'un bien collectif.
 - Tout d'abord, le Chapitre 5 (p. 156) propose de coupler les enjeux de la gestion du système fourrager et de la production d'un bien collectif par la lutte contre les pullulations grâce à la conception d'un jeu sérieux. En effet, lorsqu'ils prennent des décisions relatives à l'allocation des facteurs de production (temps, assolement, investissements), les éleveurs considèrent d'abord l'intérêt de leur propre exploitation : l'intégration de la production d'un bien collectif dans la gestion de leur système agricole nécessite une coordination entre éleveurs voisins. Le jeu sérieux est un outil intéressant à la fois dans cet optique d'animation et d'accompagnement mais aussi pour acquérir des données expérimentales sur le comportement collectif des éleveurs, notamment sur la manière dont ils partagent l'information.
 - Ensuite, le Chapitre 6 (p. 172) propose d'analyser plus précisément le sous-engagement observé des éleveurs dans la mise en œuvre d'un contrôle collectif des pullulations de campagnols terrestres. Nous étonnant que, malgré les retours d'expérience positifs, la lutte collective ne soit pas davantage développée, nous proposons un cadre d'analyse de la coordination couplant les travaux d'Olson (1965) et les avancées de l'économie néo-institutionnelle. Nous montrons comment la défaillance de l'action collective face aux pullulations tire son origine non pas d'un manque de dispositifs institutionnels mais d'une coordination imparfaite. Notamment, nous étudions la nature des contrats de lutte et des incitations proposées

sous forme de subvention pour montrer qu'elles ne sont pas en capacité d'initier l'action collective là où les structures sociales préexistantes ne sont pas suffisamment solides.

- Enfin, le Chapitre 7 (p. 188) propose la construction d'un modèle bioéconomique spatialisé, multiagent, afin de tester des scénarios de gestion collective du risque de pullulation sous plusieurs régimes d'intervention des éleveurs et plusieurs régimes de planification sociale (laissez-faire ou subventionnement). L'objectif de ce modèle est de vérifier le statut de bien collectif de la lutte contre les pullulations et de discuter la nature des incitations à l'action collective qui seraient le plus efficaces : nous testons l'hypothèse selon laquelle le capital social fournit des incitations à l'action collective plus fondamentales que les subventions, dont nous réinterrogeons le rôle. Nous souhaitons déterminer les conditions sociales et économiques optimales pour que la lutte contre les pullulations de campagnols terrestres ait la plus forte probabilité d'être effectivement mise en œuvre par les éleveurs d'un territoire.

Tableau 13 : Pistes de recherche proposées

Approche et chapitres concernés	Hypothèses sous-jacentes	Questions de recherche
Approche 1 Chapitre 3 (p. 94)	A l'échelle individuelle de l'exploitation agricole, les pullulations de campagnols terrestres constituent un risque exogène au système productif.	Le risque de pullulation de campagnols terrestres est-il assurable ? Si oui, quel serait le montant de la prime payée par les éleveurs ?
Approche 2 Chapitre 4 (p. 116)	Les pullulations de campagnols terrestres sont la conséquence de la spécialisation herbagère trop importante des systèmes fourragers et des paysages associés.	Quelles ont été les conséquences de la spécialisation herbagère sur les systèmes fourragers ? Comment les éleveurs gèrent-ils les risques affectant la production fourragère ? Les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication peuvent-elles aider à la gestion précoce des pullulations de campagnols terrestres ?
Approche 3 Chapitre 5 (p. 156) Chapitre 6 (p. 172) Chapitre 7 (p. 188)	La maîtrise des pullulations de campagnols terrestres revêt le caractère de la production d'un bien collectif qui nécessite des incitations pour limiter le sous-engagement « naturel » des éleveurs à sa production.	Comment modéliser le comportement des éleveurs en situation de risques multiples ? Comment expliquer la défaillance de l'action collective face aux pullulations de campagnols terrestres ? Quelle(s) stratégie(s) et quelle(s) incitation(s) seraient les plus probables d'augmenter la participation des éleveurs à l'action collective ?

Partie II. Quelle(s) stratégie(s) de gestion pour faire face au risque de pullulation ?

L'objectif de la Partie II est de déterminer la ou les stratégie(s) de gestion des pullulations de campagnols terrestres les plus pertinentes compte-tenu des caractéristiques du risque et des capacités d'adaptation et d'action des exploitations d'élevage du Massif Central.

Le Chapitre 3 propose l'approche classique de l'assurance de marché pour permettre à un éleveur qui ne peut éliminer un risque auquel il est confronté de le vendre à un assureur capable de le diversifier. Si les pullulations ne peuvent être gérées par la prévention (maîtrise des populations) ni par l'intégration du risque (en tant que coût de production) dans les prix, alors les dommages causés par les campagnols terrestres doivent être compensés. Nous commencerons par interroger l'assurabilité des risques en agriculture (3.1) puis proposerons d'appliquer un modèle classique d'assurance récolte au cas des pullulations de campagnols terrestres (3.2) avant de discuter de la compatibilité entre l'assurance et l'action collective (3.3).

Le Chapitre 4 propose une approche systémique du risque de pullulation. Plutôt que de le considérer comme un phénomène exogène au système productif, il s'agit de le réintégrer aux objectifs et au fonctionnement des systèmes fourragers. Cette approche permet de mieux comprendre les vulnérabilités auxquelles sont confrontés les éleveurs face aux pullulations mais également face au risque de sécheresse. La section 4.1 analyse les capacités d'adaptation d'un système fourrager en situation de risque ; la section 4.2 propose d'étudier le comportement des éleveurs face aux risques qui affectent la production fourragère ; enfin, la section 4.3 interroge la place des NTIC pour la gestion des risques, en particulier le risque de pullulation de campagnols terrestres.

Les trois derniers chapitres proposeront d'étudier la coordination et les incitations à la lutte contre les pullulations de campagnols terrestres, considérant qu'agir pour maîtriser les ravageurs revient à participer à la production d'un bien collectif. Le Chapitre 5 présente la conception d'un jeu sérieux dédié à la gestion collective des pullulations de campagnols, de la modélisation de la gestion d'un système fourrager en situation d'aléas multiples à sa transcription en règles du jeu. L'objectif de ce travail était de produire à la fois un outils concret d'accompagnement des éleveurs dans la conception d'une vision partagée du risque et d'une stratégie de lutte commune mais aussi un outil d'économie expérimentale capable de générer des données pour comprendre davantage le comportement collectif des éleveurs. Le Chapitre 6 présente une analyse des défaillances de l'action collective face aux pullulations de campagnols en construisant un cadre d'analyse de la coordination. Il s'intéresse à quatre composantes de la coordination proposées par l'économie néo-institutionnelle : les institutions, les contrats, l'information et la confiance. Enfin, le Chapitre 7 construit et mobilise un modèle multiagent informatisé pour tester plusieurs scénarios de gestion collective des pullulations et déterminer quelles incitations pourraient générer la plus grande probabilité que les éleveurs s'engagent davantage dans la lutte.

Chapitre 3. Assurabilité des risques « ravageurs » en agriculture

Dans les années 1960, la création du FNGCA, *Fonds National de Gestion des Calamités Agricoles* (1964) ancrerait l'intervention publique au cœur de la gestion des risques agricoles. Cela était en cohérence avec les orientations de la Politique Agricole Commune d'avant 1992, qui proposait des outils de stabilisation des prix aux agriculteurs européens (Loyat, 2012). Depuis, de profondes évolutions ont affectées les outils de gestion des risques en agriculture (1.1.4, p. 34). Le désengagement progressif des pouvoirs publics, avec l'objectif de réduire les dépenses publiques et de gagner en efficacité, a conduit au développement de nouveaux outils de gestion des risques, notamment les assurances privées (Cordier *et al.*, 2008). En France, depuis les années 2000, l'assurance tend à supplanter les mécanismes de compensation publics. Au fur et à mesure que de nouveaux contrats d'assurance étaient mis sur le marché, les risques et les productions associés étaient retirés du FNGCA : ce fut le cas des grandes cultures en 2009, puis de la vigne en 2011. Plus récemment, en 2016, une solution d'assurance a été ouverte pour couvrir les pertes causées aux prairies par certains risques climatiques.

Depuis les années 1970, les pullulations de campagnols terrestres sont devenues plus fréquentes et intenses, causant régulièrement des pertes de production fourragère significatives aux élevages (2.2.5, p. 74). Les actions de contrôle proposées ne semblent pas venir à bout du phénomène. Pourtant, aucune solution d'assurance n'est proposée aux éleveurs pour compenser ces pertes fourragères.

En France, les risques sanitaires sont inclus dans le FMSE, *Fonds national de Mutualisation du risque Sanitaire et Environnemental*. Si le FMSE aide financièrement les éleveurs à mettre en œuvre des actions de contrôle des populations de campagnols terrestres (1 million d'euros reversés à 1300 fermes en 2016), les pertes fourragères liées aux pullulations ne sont pas censées être compensées par ce fonds (Lidsky *et al.*, 2017). Toutefois, en 2017 et 2018, 6,1 millions d'euros ont été versés à 450 fermes au titre de la compensation des pertes de fourrages consécutives à la pullulation de 2016 (lorsque les pertes de l'exploitation étaient supérieures à 30%)³⁴. Le problème posé par ce mécanisme est que (1) aucun budget spécifique n'est dédié à la compensation des dommages causés par les campagnols ; (2) les éleveurs affectés ne paient pas de prime adaptée à la compensation qu'ils peuvent recevoir. Si le FMSE devait compenser les pertes fourragères dues aux pullulations sur le long terme, un budget spécifique alimenté par un financement dédié serait alors nécessaire. Une telle solution peut être effectivement envisagée, mais elle demeure peu probable : pendant des années, les pouvoirs publics ont essayé d'augmenter la participation des éleveurs à l'action collective et préventive face aux pullulations, considérant que la gestion de ce risque était de la responsabilité collective des agriculteurs.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer les possibilités d'une assurance des dommages causés par les campagnols terrestres à la production fourragère des prairies et d'expliquer les raisons de l'inexistence d'un tel contrat d'assurance. Du fait du manque de données individuelles à l'échelle des exploitations agricoles, notre approche sera principalement qualitative et exploratoire.

Nous nous demandons si une solution assurantielle pourrait fournir un mécanisme de couverture du risque satisfaisant pour les éleveurs et acceptable pour un assureur.

Pour répondre à cette question, nous présentons d'abord des éléments théoriques concernant l'assurabilité des risques et les modèles d'assurance en agriculture (3.1). Puis, nous proposerons un

³⁴ Dans la suite de ce chapitre, si aucune autre source n'est mentionnée, les données utilisées proviennent du FMSE.

modèle d'assurance appliqué au cas des pullulations de campagnols terrestres (3.2). Enfin, nous discuterons de la compatibilité de l'assurance avec l'action collective (3.3).

3.1. Assurabilité des risques en agriculture

Nous avons vu précédemment (1.2.1, p. 37) que la notion de risque avait très rapidement été associée à l'économie de l'assurance (Pradier, 2006). Or, tous les risques ne sont pas couverts par une assurance de marché : pourquoi ?

Selon Levin et Reinhard (2007), « *seuls les risques exceptionnels conduisant à des pertes importantes sont considérés comme assurables* ». Nous discuterons cette assertion en abordant d'abord le rôle de l'assurance pour la gestion des risque (3.1.1), puis le principe de mutualisation des risques (3.1.2) et les critères d'assurabilité des risques (3.1.3). Enfin, nous présenterons le modèle de base de l'assurance récolte proposé par Blanc (2003) (3.1.4).

3.1.1. Rôle de l'assurance

Assurer un risque consiste à réaliser un transfert mutuellement avantageux entre un agent averse au risque et un assureur neutre face au risque (Mahul, 1998).

Le besoin en assurance provient de l'incapacité d'un système agricole à absorber la variabilité de la production que lui imposent des perturbations exogènes, c'est-à-dire de sa vulnérabilité face au risque. Notamment, le besoin en assurance émerge de la difficulté du système à diversifier les spéculations qui composent son assolement. Considérons un système agricole pouvant potentiellement produire n spéculations différentes, chacune caractérisée par l'espérance μ et la variance σ^2 de leur rendement. La corrélation ρ entre les rendements des spéculations (deux à deux) est connue. Ce système agricole est soumis à diverses contraintes : contraintes foncières (surfaces disponibles), contraintes pédologiques (type de sol, fertilité, profondeur), contraintes topographiques (pente), contraintes géographiques (distance aux bâtiments), contraintes climatiques (température, pluviométrie), contraintes sociales (travail), contraintes économiques (exigence des filières, des politiques agricoles), contraintes zootechniques (besoins du troupeau...). Le potentiel de diversification d'un tel système relève de la conjonction de la corrélation entre les spéculations et des contraintes qui s'appliquent au système. Si le potentiel de diversification du système est important (capacité de mettre en place des spéculations dont les rendements sont suffisamment dé-corrélés ou anti-corrélés), alors le risque, c'est-à-dire la variabilité de la production, peut-être réduit et supporté à l'échelle de l'exploitation agricole, si la résolution du programme d'optimisation produit des résultats acceptables pour l'agriculteur. En revanche, si le système possède un faible potentiel de diversification et que la variabilité de la production dépasse sa capacité d'absorption, alors il peut transférer ce risque à un assureur capable de le diversifier.

Ainsi, **s'assurer consiste à transférer un risque que l'on n'est pas capable de diversifier ou d'absorber à un autre agent, l'assureur, qui, lui, est capable de le diversifier**. Les obligations de l'assureur et de l'assuré sont renseignées dans un contrat d'assurance : la société d'assurance s'engage à dédommager l'assuré lors de la réalisation d'un certain sinistre en échange du versement d'une cotisation, la prime d'assurance. L'activité d'assurance est réglementée par le *Code des assurances*³⁵ : les assureurs doivent respecter les règles édictées par ce *Code*, et notamment se doter des réserves financières nécessaires pour respecter leur engagement contractuel d'indemnisation. Un agrément du ministère de l'Économie est obligatoire pour exercer une activité d'assurance, et les assureurs sont contrôlés par un organisme d'État, la Commission de contrôle des assurances. De plus, pour certaines assurances,

³⁵ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006073984>

comme l'assurance récolte, un cahier des charges élaboré par l'État (ici, le Ministère en charge de l'Agriculture) doit être respecté (MAAF, 2016).

3.1.2. Principe de mutualisation des risques

Le principe de base d'une assurance est d'élargir les possibilités de diversification des risques à une échelle supérieure à celle de l'exploitation agricole individuelle. Les risques individuels sont ainsi mutualisés et gérés à l'aide d'un même fonds : cela permet de réduire le coût des réserves financières nécessaires pour indemniser les dommages.

Une telle mutualisation des risques n'est possible que sous certaines conditions. L'assureur doit être capable de déterminer une assiette de cotisation suffisamment large pour renforcer la mutualisation et baisser la prime d'assurance proposée. En effet, l'accessibilité de la prime d'assurance est un facteur important pour limiter la sélection adverse (Enjolras, 2008). La prime et l'indemnité doivent toutes deux correspondre le plus finement possible à la réalité du risque supporté par l'assuré (Babusiaux, 2000). Un contrat d'assurance sera considéré comme actuariellement juste si la prime payée correspond à la moyenne des pertes possibles (Blanc, 2003). De plus, le portefeuille de l'assureur doit comporter des risques individuels suffisamment indépendants pour permettre l'application de la loi des grands nombres et le passage de la probabilité à la fréquence. Il s'agit de bénéficier du décalage temporel de la survenance des dommages afin de réduire le montant des réserves financières nécessaires pour indemniser les assurés. La corrélation entre les risques individuels est probablement le critère essentiel de l'assurabilité des risques : les risques sont d'autant moins assurables qu'ils sont corrélés (Cordier *et al.*, 2008; Levin et Reinhard, 2007).

L'assureur doit donc disposer de données historiques sur le risque afin de déterminer la fréquence (probabilité) et l'intensité (moyenne et maximum, notamment) des dommages. Ces données peuvent également permettre de différencier des niveaux de risque en fonction de données géographiques (localisation...) ou techniques (type de production...). Plus ces données seront précises, plus elles permettront à l'assureur de proposer des tables actuarielles capables d'adapter la prime d'assurance au risque effectif auquel chaque assuré est exposé. L'accessibilité de la prime et l'adéquation des tables actuarielles avec les risques individuels sont deux facteurs importants qui détermineront l'assiette de cotisation et donc la possibilité pour l'assureur de diversifier les risques. Plus l'assiette de cotisation sera large et plus la corrélation entre les risques individuels sera faible, plus la mutualisation du risque sera facile.

Toutefois, pour être en capacité d'assurer les risques à forte composante systémique, plusieurs options s'offrent aux assureurs (Enjolras, 2008; Hazell et Skees, 2005) :

- Une mutualisation des risques entre assureurs est possible : on parle alors de coassurance (Betbeze et Bentoglio, 2005).
- Les assureurs peuvent s'assurer eux-mêmes auprès d'un réassureur, qui est soit privé (la diversification du portefeuille s'effectue alors au niveau international), soit public (*Caisse Centrale de Réassurance*, société anonyme intégralement détenue par l'État).
- Ils peuvent également opérer des titrisations de ces risques sur les marchés financiers, en achetant un titre dont le sous-jacent est un indice du risque considéré (par exemple, la sécheresse) et dont la valeur augmente avec l'intensité du risque. L'objectif est de relier des phénomènes naturels, aux répercussions monétaires indirectes, à des titres financiers. Le prix est alors fixé à l'avance, car le sous-jacent n'est pas monétaire. Les dérivés financiers mobilisables en agriculture sont :
 - Les options, des contrats financiers donnant le droit à leur possesseur d'exécuter une transaction au cours d'une période ou à un moment donné.

- Les contrats à terme, des contrats financiers qui donnent le droit d'acheter ou de vendre un indice climatique (e.g. un degré-jour unifié) ou une culture à un prix et à une date fixés à l'avance.
- Les *swaps*, des contrats par lesquels deux parties échangent des flux financiers au cours d'une période donnée ; ici, l'actif est une matière première.

Une combinaison de ces contrats peut être étudiée pour permettre une meilleure assurance du risque récolte. Les *cat-bonds* ou « obligations catastrophes » sont un exemple de titrisation, pour lesquelles le remboursement des intérêts ou du principal s'effectue sur survenance d'une ou de catastrophe(s) naturelle(s).

3.1.3. Assurabilité des risques et information

3.1.3.1. Critères d'assurabilité des risques

Mahul (1998) définit ainsi les critères d'assurabilité des risques d'après Berliner (1982) : « *un risque est assurable s'il vérifie un certain nombre de critères, tels que l'existence d'un aléa véritable, la possibilité d'estimer le sinistre maximum possible et la perte moyenne par sinistre, et la présence de risques suffisamment indépendants pour que la loi des grands nombres puisse être appliquée* ». Enjolras (2008) abonde dans ce sens : un risque est assurable s'il est modélisable, repose sur un évènement aléatoire (c'est-à-dire difficilement prévisible) et si le prix de la couverture d'assurance est accessible, c'est-à-dire que le risque est mutualisable.

Nous proposons dans le Tableau 14 les huit critères d'assurabilité du risque qui nous semblent les plus fondamentaux.

Tableau 14 : Critères d'assurabilité des risques (auteur)

	Critère	Explication
#1	Données historiques	L'assureur doit disposer de données historiques suffisantes pour calculer des tables actuarielles.
#2	Probabilisation	L'évènement assuré doit être probabilisable et peu fréquent (exceptionnel).
#3	Assiette de cotisation	L'assiette de cotisation doit être suffisamment large pour permettre la diversification des risques.
#4	Corrélation des risques	Les risques individuels doivent être indépendants ou le moins corrélés possibles afin de permettre l'application de la loi des grands nombres.
#5	Prime d'assurance	La prime d'assurance doit être individualisée, actuariellement juste et accessible.
#6	Prédictibilité	L'évènement assuré doit être aléatoire, c'est-à-dire être non prédictible. D'une part, les risques systématiques peuvent être, selon leur intensité, intégrés aux coûts de production du fait qu'ils ne génèrent pas une variabilité exceptionnelle et inattendue. D'autre part, un risque dont la survenance est trop prédictible peut générer un risque moral, c'est-à-dire de potentiels changements de comportement chez l'assuré qui augmenteraient les dommages potentiels (Holmstrom, 1979).
#7	Mesure des dommages	Les dommages doivent être mesurables par un indice qui leur est fortement corrélé (Levin et Reinhard, 2007). D'un point de vue plus opérationnel, l'assureur doit mettre en place une méthode de mesure objective des dommages, directe ou indirecte. L'essor des NTIC en agriculture (voir 4.3, p. 140) permet notamment l'usage d'indices calculés à partir de données spatiales acquises par satellite.
#8	Coûts de transaction	Les coûts de transaction ont un impact négatif sur l'assurabilité des risques, « <i>en particulier quand les risques sont très hétérogènes (gestion de l'antisélection), quand la prévention joue un rôle important dans la sinistralité</i> ».

	(gestion du risque moral) et quand les dommages sont difficiles à observer et à mesurer » (Gollier, 2015).
--	--

Si ces critères sont vérifiés, alors le risque est considéré comme assurable. Nous présenterons dans la sous-section 3.1.4 un modèle classiquement employé pour l'assurance récolte.

3.1.3.2. Information et limites de l'assurance

Historiquement, les problèmes d'information ont été un frein important au développement d'une allocation socialement désirable des risques sur les marchés de l'assurance (Chiappori et Salanié, 2013). Deux mécanismes contradictoires peuvent être rencontrés (Gollier, 2015). Le premier est un trop plein d'information qui menacerait d'effondrement le marché de l'assurance. Il est théorisé que l'augmentation d'une information sur un risque donné éliminera l'incertitude et donc l'assurance elle-même : c'est « l'effet Hirshleifer » (Hirshleifer, 1971). L'augmentation de l'information sur les facteurs de risque augmenterait la segmentation du marché par les assureurs, causant ainsi de fortes disparités de primes d'assurances et une augmentation des inégalités d'accès à l'assurance. A l'inverse, le second mécanisme est un manque d'information qui bloquerait le développement de l'assurance en plaçant l'assureur dans une situation d'ambiguïté sur le risque auquel l'assuré est réellement exposé, mais également sur la sinistralité globale. Cabantous (2007) a montré que les assureurs étaient plutôt averses à l'ambiguïté.

Le cas le plus étudié est celui des asymétries d'information, qui peuvent constituer un frein au développement de l'assurance (Rothschild et Stiglitz, 1976) : l'assureur dispose d'informations incomplètes sur la réalité individuelle du risque, ce qui diminue sa capacité de différencier les individus selon leur exposition et leur vulnérabilité au risque. Les asymétries d'information génèrent classiquement des problèmes d'aléa moral et de sélection adverse qui sont très prégnants dans le cas de l'assurance (Blanc, 2003).

Une situation d'aléa moral est rencontrée lorsque l'assureur n'est pas capable d'observer le comportement réel d'un assuré. Le rôle de l'assurance est de prendre en charge la part des dommages qui ne peut être évitée lorsque l'ensemble des mesures de prévention et de contrôle ont été mises en œuvre, c'est-à-dire que les dommages assurés sont indépendants de la volonté de l'assuré. Cependant, il est assez bien observé que les agriculteurs qui souscrivent à une assurance ont une tendance à modifier leur comportement, en adoptant des pratiques plus productives (au sens où elles augmentent l'espérance du rendement) mais aussi plus risquées (au sens où elles augmentent conjointement la variance du rendement) (Cornaggia, 2013). Ainsi, un écueil du système assurantiel couramment analysé est sa tendance à « *réduire l'incitation des assurés à investir dans la prévention, puisque les coûts de la prévention sont privés et ses bénéfices sont socialisés par la mutualisation* » (Gollier, 2015). La conséquence directe est que l'assuré paie une prime actuariellement inférieure à celle qui correspondrait au risque auquel il est effectivement exposé. Nous retrouvons la situation classique d'aléa moral telle que présentée par Holmstrom (1979) dans le cadre d'un modèle Principal-Agent. Mahul (1998) distingue l'aléa moral *ex-ante* (avant la survenance du sinistre), où l'agriculteur agit sur la distribution des rendements par ses choix et ses actions, et l'aléa moral *ex-post* (après la survenance du sinistre) dans le cas d'une déclaration de sinistre frauduleuse.

Une situation de sélection adverse est rencontrée lorsque l'assureur n'est pas capable, par manque d'information, de proposer une prime actuariellement juste à l'assuré. Cette sélection adverse peut provenir d'une surestimation du risque, conduisant l'assuré à payer une prime supérieure au risque réel, ou bien d'une sous-estimation des dommages lors de l'expertise d'un sinistre, du fait de la corrélation imparfaite entre l'indice mesuré et le dommage effectif (risque de base). La conséquence de ce manque d'information est que certains assurés se voient demander une prime trop élevée par

rapport au risque auquel ils sont exposés, ce qui éloigne les individus à plus faible risque de l'assurance et empêche une mutualisation efficace (déséquilibre budgétaire de l'assurance).

Ces asymétries d'information sont d'autant plus fortes que l'information est coûteuse à acquérir pour l'assureur ; c'est particulièrement le cas en agriculture car (1) les pratiques effectives de l'agriculteur sont difficilement observables, (2) l'information doit être acquise « au champs » et sur des surfaces importantes (Levin et Reinhard, 2007). L'assureur peut mettre en place plusieurs mécanismes pour limiter indirectement les effets de ces asymétries d'information. Notamment, il peut amener l'assuré à révéler son comportement par les choix relatifs à son contrat d'assurance, notamment la sélection de sa franchise : les risques les plus faibles choisiront une franchise plus élevée (accepteront de conserver à leur charge une part plus importante du risque), tandis que les risques les plus élevés choisiront une couverture optimale. De la même manière, un assuré qui déclare peu de sinistres peut être valorisé grâce à un système de bonus-malus rabaisant sa prime d'assurance et l'encourageant à adopter des comportements moins risqués, ou à ne pas solliciter l'assurance pour des dommages qu'il est capable d'absorber.

3.1.4. Modèle classique de l'assurance agricole

Construire une police d'assurance implique de considérer divers facteurs tels que le rendement potentiel, le prix unitaire de la production et le capital total assuré. La prime d'assurance est déterminée d'après une estimation du montant des compensations, la probabilité d'occurrence des dommages et la possibilité de diversification des risques (Betbeze et Bentoglio, 2005). Une franchise – part du risque qui reste à la charge de l'assuré, peut être appliquée afin de compenser la baisse des charges de récolte ou prendre en compte la résilience du système de production, par exemple.

Classiquement, une police d'assurance est conçue en recoupant la demande et l'offre pour une couverture des dommages (Bardsley *et al.*, 1984; Blanc, 2003; Duncan et Myers, 2000). Le marché de l'assurance est composé d'un compagnie d'assurance qui propose un contrat d'assurance à un nombre d'agents suffisamment grand ; ces agents sont supposés identiques et averse au risque. D'un côté, les agents assurés prendront leur décision en fonction du montant de la prime d'assurance. De l'autre, l'assureur devra disposer de réserves financières et d'une réassurance afin d'être en capacité de compenser les dommages potentiels ; ces réserves doivent être d'autant plus importantes que la corrélation entre les risques est grande.

Blanc (2003) propose un modèle d'assurance de base appliqué aux risques climatiques en agriculture. Considérons un assureur qui gère n contrats identiques. L'offre d'assurance dépendra des profits potentiels :

$$\tilde{\pi} = n\varphi w - \varphi \sum_i \tilde{x}_i - rK - na\varphi \quad (1)$$

avec $\tilde{\pi}$ les profits incertains, φ le niveau de couverture, w la prime d'assurance, \tilde{x}_i les pertes individuelles (suivant la même loi de probabilité mais n'étant pas indépendantes), K le besoin en réserves, r le coût unitaire des réserves (taux d'actualisation ou coût de réassurance) et a le coût d'administration d'un contrat.

L'hypothèse de libre entrée sur le marché de l'assurance³⁶ conduit à considérer un profit espéré nul :

³⁶ Cette hypothèse est fortement contestable du fait (1) que le secteur de l'assurance est fortement réglementé par l'Etat, et (2) qu'un assureur doit disposer de réserves financières initiales d'autant plus conséquentes que les risques sont corrélés. Nous la retenons toutefois ici car elle facilite la résolution de notre programme et permet d'avancer dans notre raisonnement sans en changer la généralité.

$$\bar{\pi} = 0 \Leftrightarrow n\varphi w - \varphi n\bar{x} - rK - na\varphi = 0 \Leftrightarrow w = \bar{x} + \frac{rK}{n\varphi} + a$$

La résolution est réalisée de sorte que le risque de faillite de la compagnie d'assurance soit inférieur à un seuil donné (α): $P(\tilde{\pi} + K \leq 0) = \alpha$. Nous obtenons le prix unitaire de la police d'assurance :

$$w = \bar{x} + a + rt_\alpha \sigma \sqrt{\rho} \quad (2)$$

avec $t_\alpha = \frac{K}{n\varphi\sqrt{V(\tilde{\varepsilon})}}$ le quantile d'ordre $1 - \alpha$ de la loi suivie par $\frac{\tilde{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}}{\sqrt{V(\tilde{\varepsilon})}}$, où $\tilde{\varepsilon}$ est la part systémique de $\tilde{x}_i = \tilde{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}_i$; $\rho = \text{corr}(x_i, x_j) = \frac{V(\tilde{\varepsilon})}{\sigma^2}$.

Ce modèle est de toute évidence incomplet : il ne prend en considération ni les caractéristiques des systèmes de culture (auto-assurance, diversification), ni le degré d'aversion pour le risque des assurés, ni les possibilités de titrisation des contrats. Or, ces éléments peuvent influencer de manière significative sur la demande en assurance et sur les profits de l'assureur. Toutefois, notre démarche exploratoire ne nécessite, dans un premier temps, pas de rentrer dans un tel niveau de détail (notamment du fait, nous le verrons, de l'importante lacune des données disponibles sur le risque que nous étudions) : nous considérons que ce modèle, dont la principale qualité est sa simplicité, est suffisant à ce stade.

3.2. Modèle d'assurance pour les risques ravageurs

Nous utiliserons l'exemple des pullulations de campagnols terrestres pour discuter l'assurabilité des risques ravageurs en agriculture. Dans un premier temps, nous évaluons la prime d'assurance théorique du risque lié aux pullulations à partir du modèle présenté précédemment (3.2.1). Puis, après avoir présenté les difficultés relatives à l'évaluation des dommages (3.2.2), nous proposerons une analyse générale de l'assurabilité du risque de pullulation de campagnols (3.2.3). Enfin, nous présenterons deux pistes envisageables pour améliorer l'assurabilité du risque (3.2.4).

3.2.1. Prime d'assurance théorique pour couvrir le risque de pullulation de campagnols

Dans un premier temps, nous considérons le risque lié aux pullulations de campagnols terrestres comme assurable. Nous appliquons l'équation (2) au cas d'étude des pullulations de campagnols afin de déterminer la prime d'assurance théorique.

Nous prenons l'exemple d'une ferme subissant des pullulations de campagnols terrestres tous les 6 ans, avec des dommages moyens correspondant à 50% de la production espérée, ce qui conduit à un taux de perte annualisé de $50\%/6 = 8.4\%$. Nous utilisons le barème de base de l'assurance Prairies pour approximer que chaque hectare de prairie correspond à un capital assuré de 900€ (Bergot, 2016). Les coûts d'administration a représenteront quant à eux 30% de la valeur de \bar{x} (Babusiaux, 2000; Gollier, 2015; Smith *et al.*, 2017). La partie la plus délicate de notre calcul est de déterminer le dernier terme de la somme, $rt_\alpha \sigma \sqrt{\rho}$. En appliquant ce modèle à l'assurance des cultures de blé, Blanc (2003) estime d'après des données historiques les valeurs de $r = 3\%$ et $t_\alpha = 2,3$ (pour $\alpha = 1\%$ et $\tilde{\varepsilon}$ suivant une loi Normal). Le manque de données individuelles historiques sur les dommages causés par les pullulations rend difficile le calcul du coefficient de corrélation entre les risques (ρ) et de la variance (σ). De plus, de la dimension spatiale du phénomène devrait être intégrée à l'étude des corrélations entre les risques (économétrie spatiale). Nous avons déduit de l'analyse du phénomène (2.2, p. 66) que les risques étaient corrélés positivement et plutôt fortement, ce qui aurait pour effet d'augmenter le niveau des réserves financières nécessaires et donc la prime d'assurance. Nous verrons par la suite que la prime hypothétique que nous sommes en train de calculer s'avèrera déjà élevée, sans même prendre en compte la corrélation entre les risques. Ainsi, pour la suite de notre démonstration, nous considérerons que ce terme peut être négligé (τ) dans nos calculs sans que cela n'influe sur nos conclusions :

$$w = (8,4\% \times 900) + [30\% \times (8,4\% \times 900)] + \tau$$

Nous obtenons une prime d'assurance totale $w = 98\text{€}/ha$, soit $w = 75,6\text{€}/ha$ sans les coûts d'administration.

Ainsi, une exploitation agricole qui subit des dommages causés par les campagnols tous les 6 ans pour une perte moyenne de 50% devrait payer une prime d'assurance de $75,6\text{€}/ha$ sans considérer les coûts d'administration.

Il est possible de réduire le montant de la prime d'assurance en ajoutant une franchise à ce contrat, c'est-à-dire une part des dommages qui est considérée comme relevant de la responsabilité de l'agriculteur. Envisageons l'ajout d'une franchise de 25% (similaire à celle proposée dans le cadre des assurances Prairies) à notre modèle précédent. Le taux de perte assuré sera alors de $(50\% - 25\%)/6 = 4.2\%$.

$$w = (4.2\% \times 900) + [30\% \times (4.2\% \times 900)] + \varepsilon$$

Cela permet de diminuer la prime d'assurance à $w = 49\text{€}/ha$ avec les coûts d'administration, soit $w = 37,8\text{€}/ha$ sans les coûts d'administration.

L'ajout d'une franchise de 25% permet de ramener le taux de cotisation à un niveau plus communément rencontré pour l'assurance Prairies (Bergot, 2016). Toutefois, même si l'ajout d'une telle franchise est une bonne manière de réduire la prime d'assurance, elle demeure encore élevée.

En guise de comparaison, en 2016, la perte moyenne due aux campagnols (lorsque les dommages excédaient 30%) était estimée à 46% de la production fourragère espérée, soit $417\text{€}/ha$ (Figure 26). La précédente pullulation ayant eu lieu en 2011 (soit une fréquence de 5 ans), si les agriculteurs avaient reçu une telle compensation des pertes par le biais d'une assurance de marché, ils auraient dû payer une prime de $83\text{€}/ha$, sans même considérer les coûts d'administration. Nous observons par ailleurs une importante dispersion des dommages autour de la moyenne (Figure 26) : la moyenne des compensations est de $417\text{€}/ha$ et l'écart-type standard de $85\text{€}/ha$. Il existe un risque avéré de sélection adverse due à une prime d'assurance qui ne correspondrait pas aux risques les plus faibles.

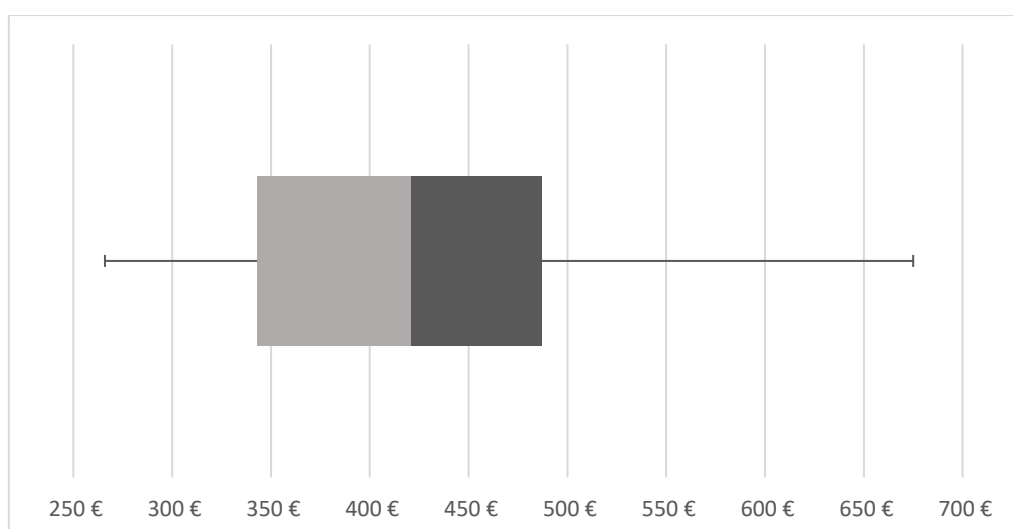


Figure 26 : Dispersion des dommages compensables suite à la pullulation de 2016 (moyenne par exploitation, en €/ha)

Nous pouvons dès à présent souligner les deux premiers obstacles au développement d'une assurance face aux pullulations de campagnols terrestres.

- (1) Le montant de la prime d'assurance théorique qui devrait être payée par l'éleveur pour transférer ce risque à un assureur est assez élevé et pose, d'un point de vue opérationnel, la question du consentement à payer des éleveurs pour acheter un tel contrat. Cette question est également posée dans le cas de l'assurance Prairies (Mosnier, 2015).
- (2) Nous manquons de données concernant la fréquence et l'intensité des pertes fourragères effectives à l'échelle individuelle de l'exploitation agricole. Ce manque d'information rend plus difficile la détermination d'une prime d'assurance actuariellement juste, ce qui augmente le problème de sélection adverse, d'autant plus que les dommages sont très dispersés autour de leur moyenne. Si la prime est plus élevée que le risque réel, un agriculteur faiblement affecté par le risque ne souscrira pas à un tel contrat d'assurance (qu'il considérera comme non-bénéfique), tandis que les exploitations les plus affectées y souscriront volontiers. Pour réduire ce phénomène de sélection adverse, l'assureur devra encourager les assurés à révéler ce qu'ils savent de la fréquence et de l'intensité des dommages qui touchent leur propre exploitation, afin d'ajuster la prime d'assurance et augmenter l'assiette de cotisation. Cette stratégie augmentera les coûts de transaction relatifs à la négociation *ex-ante* du contrat d'assurance.

3.2.2. Mesure des dommages par satellite ou drone

3.2.2.1. Assurance indicielle et risque de base

La question de l'estimation des dommages est importante pour le développement de l'assurance agricole : un écart trop important entre l'estimation et le dommage effectif conduit à une sélection adverse du portefeuille de risque géré par l'assureur. De plus, si l'assuré estime être lésé par une estimation insuffisante des dommages par l'assureur, il peut engager des recours devant un juge, ce qui occasionne inévitablement des coûts supplémentaires pour gérer ce litige.

L'essor des NTIC en agriculture (voir 4.3, p. 140) permet de transformer les modes d'estimation du risque (à partir de données historiques) : par l'acquisition et le traitement de données géolocalisées à l'aide de capteurs au sol ou aériens (drones, satellites), l'assureur peut calculer une meilleure adéquation de la prime d'assurance avec le risque réel auquel une exploitation agricole est exposée, et donc optimiser l'allocation des risques. De plus, l'utilisation des NTIC pour mesurer un indice corrélé avec les dommages permet de réduire les coûts de collecte des données (coûts de transaction), de réduire l'aléa moral et la sélection adverse pour l'assureur (mesure objective), mais aussi de réduire le risque de base pour l'assuré (Cummins et Mahul, 2008; World Bank, 2017). Par la baisse des coûts administratifs, l'assuré peut bénéficier d'une baisse de sa prime d'assurance.

Le manque de précision dans la mesure (souvent non individualisée) des dommages (Collectif, 2016, p. 12) est un écueil souvent reproché à l'assurance agricole. Toutefois, les contrats indiciaires ne semblent pas avoir rassuré les agriculteurs car ils n'éliminent pas le risque de base. En effet, si un agriculteur assuré subit individuellement de lourdes pertes sans pour autant que l'indice ne dépasse le seuil prédéfini, il ne sera pas indemnisé, ce qui remettra en cause la crédibilité de l'assurance, mais aussi sa viabilité (Levin et Reinhard, 2007). Ce manque de crédibilité est notamment un argument avancé par les éleveurs pour justifier leur non-souscription aux contrats d'assurance Prairies (3.2.2.2, p. 102 ; Mosnier (2015)).

3.2.2.2. Exemple de l'assurance Prairies

L'assurance Prairies, proposée en France depuis 2016, est une assurance indicielle. Elle repose sur l'utilisation d'images satellitaires produites par AIRBUS. Ces images sont traitées à l'aide d'un algorithme qui permet la génération d'un indice, le *fCover* (Figure 27), et caractérisent la productivité des prairies (Pottier *et al.*, 2017). L'exploitation de séries temporelles permet la comparaison de la productivité avec une moyenne olympique (les 5 dernières années, en retirant la meilleure et la moins bonne). Cependant, si les passages du satellite sont journaliers, l'impondérable des passages nuageux

ne permet d'extraire une image exploitable que tous les 10 jours. De plus, la résolution reste modeste et d'environ 300 m (Pottier *et al.*, 2017; Vigneau *et al.*, 2014). Ainsi, ces images ne permettent pas un suivi très précis des parcelles et des exploitations individuellement. L'indice est calculé à l'échelle de « petites régions fourragères » (PRF), considérées comme homogènes au regard des données historiques. La production annuelle est estimée par cumul de l'indice entre le 1^{er} février et le 31 octobre de l'année considérée (Figure 28). Or, l'indice grâce auquel sont déterminés les dommages subis par les prairies n'explique que 71% à 90% de la variation de la production fourragère, ce qui signifie qu'il existe un risque de base significatif pour les agriculteurs qui achètent l'assurance (Mosnier, 2015).

Si les satellites peuvent fournir des données intéressantes, le manque de précision des indices actuellement calculés est mal perçu par l'assuré. L'appel à une technologie drone peut être une solution face à ce risque de base, car la précision est d'au moins 10 cm. La solution satellitaire « Sentinel » est intéressante et fournit une précision à 10 m ; ceci est d'autant plus pertinent que la surface à couvrir est conséquente (Pottier *et al.*, 2017). L'un des intérêts du drone peut être la visualisation « en temps réel » des résultats dès la fin de l'acquisition des données ; de plus, la fréquence de passage est parfaitement choisie par l'opérateur (Vigneau *et al.*, 2014). Revers de la médaille, cette précision importante est acquise grâce à un nombre et une résolution d'images plus importants pour couvrir une même surface, ce qui nécessite une capacité de stockage suffisante et des machines suffisamment puissantes pour traiter ces données dans des délais raisonnables.

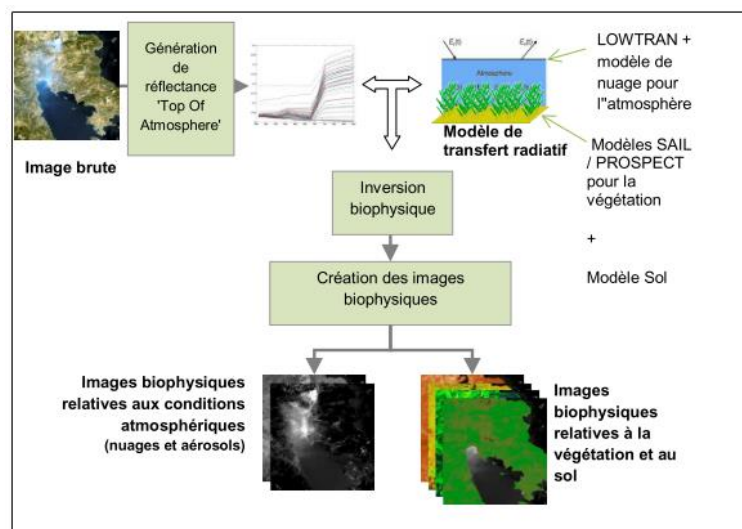
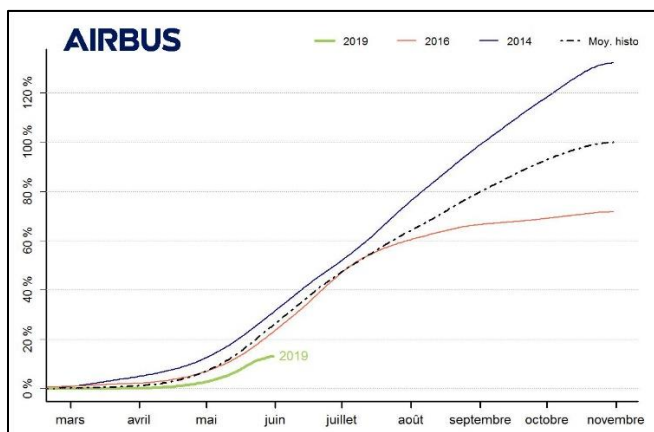


Figure 27 : Génération du fCover par AIRBUS (Pottier *et al.*, 2017)



La courbe verte correspond à l'année en cours. La courbe en pointillés correspond à la moyenne depuis 2001. La courbe rouge correspond à l'année de plus faible production depuis 2001. La courbe bleue correspond à l'année de plus forte production depuis 2001.

Figure 28 : Relevés du fCover par AIRBUS pour la Petite Région Fourragère de Marcenat (15190), au 18/07/2019

3.2.2.3. Mesure des dommages causés par les campagnols terrestres

Le développement d'un contrat d'assurance intégrant les dommages causés par les pullulations de campagnols terrestres pose la question de la mesure de ces dommages. L'indice le plus évident *a priori* est le taux de terre mesurable en surface, du fait de la présence des *tumuli* de campagnols terrestres. Cet indice est aisément mesurable par drone ou satellite (Figure 30), à l'échelle d'une parcelle ou d'un îlot, selon la précision désirée. Toutefois, la corrélation entre le taux de terre et la perte de production fourragère reste à démontrer.

L'indemnisation des pertes subies en 2016 par les exploitations du Massif Central a été réalisée grâce à des données satellitaires acquises par AIRBUS (Figure 30). Les données spatiales ont fourni une carte des taux de terre (appelés fraction de sol) qui ont ensuite été recoupés avec des bilans fourragers réalisés par la Chambre d'Agriculture du Cantal afin de déterminer le taux de perte associé à ce taux de terre (Nigou, 2017).

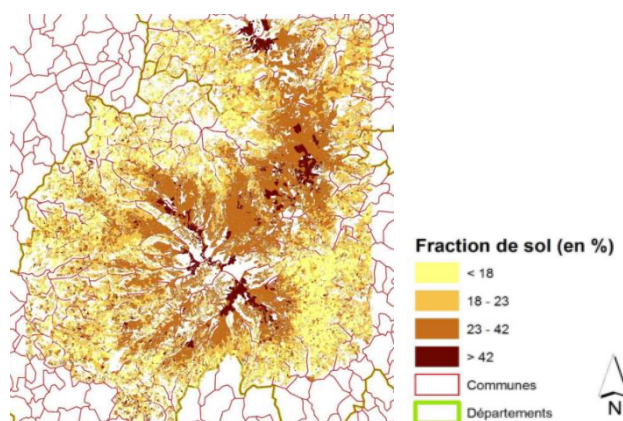
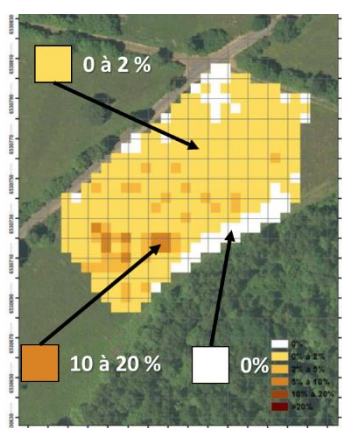


Figure 30 : Mesure du taux de terre en surface par drone (Vautier, F., Goulamoussene, Y., 2017 ; plateforme IntelEspace, MSH Clermont-Fd)

Figure 30 : Carte des fractions de sol (taux de terre) d'après les données produites par AIRBUS, Massif Central (Nigou, 2017)

L'étude a été réalisée sur 18 parcelles pour lesquelles la production potentielle espérée a été comparée avec la production effective afin de réaliser un bilan représentant le taux de perte. Pour chacune des parcelles, le taux de terre a été renseigné d'après les données AIRBUS (Figure 30).

Tableau 15 : Résultats de l'étude visant à estimer les pertes occasionnées par les campagnols terrestres (Nigou, 2017)

ID	Utilisation	Surface (ha)	Production potentielle (tMS)	Production effective (tMS)				Perte (tMS)		Bilan	%terre
				Pâture	Récolte	Prod	Prod /ha	Perte	Perte /ha		
1	Pâture	3,52	17,6	8,42	0	8,42	2,39	-9,18	-2,61	-52%	34%
2	Fauche-Pâture	5,6	33,6	2,72	14,28	17	3,04	-16,6	-2,96	-49%	34%
3	Pâture	26,42	132,1	36,31	0	36,31	1,37	-95,79	-3,63	-73%	36%
4	Fauche-Pâture	3,9	23,4	2,74	5,95	8,69	2,23	-14,71	-3,77	-63%	36%
5	Pâture	2,6	13	16,46	0	16,46	6,33	3,46	1,33	27%	36%
6	Fauche-Pâture	20,65	103,25	0	35,7	35,7	1,73	-67,55	-3,27	-65%	36%
7	Pâture	3	15	7,72	0	7,72	2,57	-7,28	-2,43	-49%	36%
8	Fauche-Pâture	46,72	327,04	64,8	82,96	147,76	3,16	-179,28	-3,84	-55%	34%
9	Fauche-Pâture	24,5	171,5	34,48	13,6	48,08	1,96	-123,42	-5,04	-72%	34%
10	Pâture	2,74	19,18	8,83	0	8,83	3,22	-10,35	-3,78	-54%	34%

11	Fauche-Pâture	2,54	17,78	1,17	8,42	9,59	3,78	-8,19	-3,22	-46%	34%
12	Fauche	4,43	26,58	0	7,62	7,62	1,72	-18,96	-4,28	-71%	45%
13	Fauche-Pâture	3	18	0	5,74	5,74	1,91	-12,26	-4,09	-68%	45%
14	Pâture	43,95	175,8	48,47	0	48,47	1,10	-127,33	-2,90	-72%	45%
15	Pâture	2,64	13,2	3,79	0	3,79	1,44	-9,41	-3,56	-71%	44%
16	Fauche-Pâture	4,2	25,2	3,22	3,98	7,2	1,71	-18	-4,29	-71%	50%
17	Fauche-Pâture	10,4	62,4	1,08	13,18	14,26	1,37	-48,14	-4,63	-77%	59%
18	Fauche	2,35	14,1	0	3,19	3,19	1,36	-10,91	-4,64	-77%	58%

Ce jeu de données, seul disponible à cette heure, est incomplet : d'une part, le nombre d'individus statistiques est faible (18 individus) et d'autre part les données sont concentrées sur une plage très restreinte de taux de terre (34% à 58%). De plus, la méthodologie utilisée pour déterminer les pertes repose sur des dires d'agriculteurs et non des relevés au champs. Néanmoins, nous proposons d'opérer un traitement statistique de ces données afin de déterminer si l'hypothèse d'un lien entre le taux de terre et le taux de perte est robuste. Nous ôtons du jeu de données la parcelle n°5 (*outlier*) qui a bénéficié d'un gain de productivité de 27% malgré un taux de terre mesuré de 36%.

Nous proposons d'abord de réaliser une régression linéaire du taux de production en fonction du taux de terre (Tableau 16). Le coefficient de corrélation entre le taux de perte et le taux de terre est élevé (-0.7268184). Le modèle linéaire permet d'expliquer 52% de la variabilité de la production fourragère observée parmi les données. Toutefois, le passage au modèle prédictif est plus délicat, car le manque de données aux valeurs extrêmes ne permet une prédiction sur l'ensemble des taux de terre possibles (Figure 31).

Tableau 16 : Résultats de la régression linéaire Taux de perte = f(Taux de terre)

```
Call:
glm(formula = (Prod/(Prod + Perte)) ~ (terre))

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.143232 -0.044299  0.009591  0.036794  0.115788

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.73693    0.09363   7.870 1.05e-06 ***
terre       -0.92162    0.22487  -4.098 0.000949 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.005787083)

Null deviance: 0.184015 on 16 degrees of freedom
Residual deviance: 0.086806 on 15 degrees of freedom
AIC: -35.47

Number of Fisher Scoring iterations: 2
```

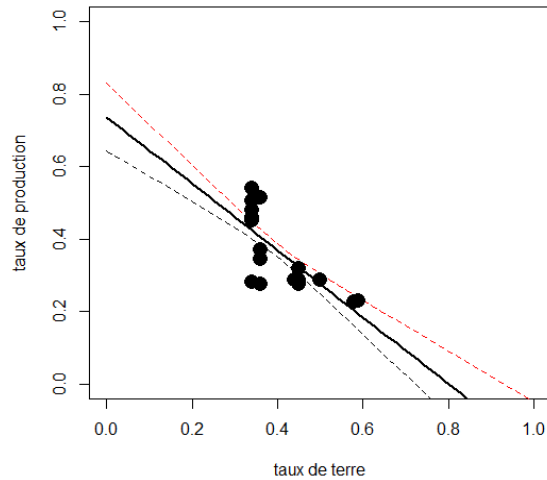


Figure 31 : Modèle prédictif linéaire

Nous supposons donc un comportement différent aux valeurs extrêmes et formulons l'hypothèse d'une saturation du modèle avec le taux de terre. Nous proposons d'utiliser un modèle binomial du taux de production intégrant le logarithme du taux de terre (Tableau 17). Le modèle binomial permet d'expliquer 37% de la variabilité de la production fourragère observée parmi les données. Le passage au modèle prédictif est cependant plus efficace avec ce modèle binomial, l'erreur standard à la moyenne étant extrêmement restreinte (confondu avec la courbe sur la Figure 32).

Tableau 17 : Résultats de la régression binomiale $Taux\ de\ production = f(Taux\ de\ terre)$

```
Call:
glm(formula = BIN ~ log(terre), family = "binomial", data = camp)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-94.360  -2.084    9.106   24.066   73.069

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -2.20019    0.01288  -170.9  <2e-16 ***
log(terre)  -1.62094    0.01295  -125.1  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

    Null deviance: 42670  on 16  degrees of freedom
Residual deviance: 25910  on 15  degrees of freedom
AIC: 26099

Number of Fisher Scoring iterations: 3
```

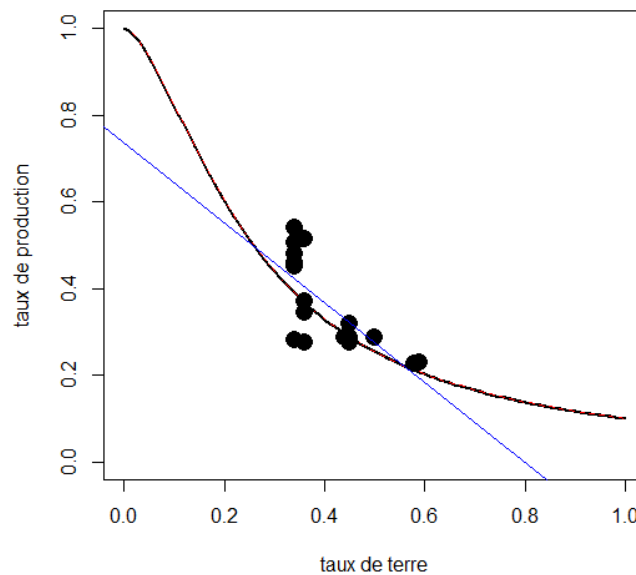



Figure 32 : Modèle prédictif binomial et modèle prédictif linéaire (pour comparaison)

Si la corrélation entre le taux de terre et le taux de production/de perte semble suffisamment robuste pour pouvoir être exploitée, des données plus fournies seront nécessaires pour déterminer le modèle prédictif permettant de passer du taux de terre au taux de perte avec plus de fiabilité. Le comportement aux extrêmes, à savoir pour des taux de terre faibles et élevés, doit notamment être renseigné. En effet, nous observons sur les quelques données à notre disposition une dispersion significative du taux de production pour les taux de perte médians. Pour l'instant, le modèle binomial semble être plus à même de décrire le comportement général auquel nous pouvons nous attendre (saturation aux extrêmes), sans pour autant être plus explicatif que le modèle linéaire sur la plage de valeurs pour lesquels nous disposons de données.

De plus, le taux de terre ne saurait expliquer la totalité de la variabilité de la production fourragère, car celle-ci dépend fortement des conditions climatiques mais aussi des pratiques de gestion du couvert prairial. De plus, comme nous le verrons ultérieurement avec le test du drone comme outil de surveillance des parcelles (4.3.3, p. 148), les algorithmes de traitement ne peuvent parfois pas distinguer les indices de micromammifères d'autres artefacts dont la signature spectrale est proche. Cela signifie que le taux de terre d'une parcelle peut être surévalué par rapport à la réalité observable au sol. Ces deux éléments, à savoir (1) la présence d'autres facteurs explicatifs de la production fourragère que le taux de terre et (2) le risque de surévaluation du taux de terre, peuvent hypothéquer l'usage d'un tel indice pour déterminer un taux de perte et calculer l'indemnisation des dommages.

3.2.3. Assurabilité des risques ravageurs en agriculture

3.2.3.1. Assurabilité du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres

La caractérisation du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres opérée précédemment (2.3, p. 80) ainsi que l'exploration du modèle de base de l'assurance récolte nous permettent de discuter l'assurabilité du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres. Nous appliquons le tableau d'assurabilité des risques (Tableau 14, p. 97) au cas des pertes fourragères causées par les pullulations de campagnols terrestres (Tableau 18).

Tableau 18 : Assurabilité du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres

	Critère	Cas des pullulations de campagnols terrestres
#1	Données historiques	Les données historiques dont nous disposons pour décrire le risque de pullulation (risque-cause) sont incomplètes et assez anciennes (2.2.2, p. 68). Les séries temporelles entre 1986 et 2001 peuvent permettre d'approximer la fréquence à laquelle les pullulations se produisent à l'échelle communale et d'avoir une idée de leur intensité (pullulation généralisée ou localisée). Les pertes fourragères moyennes associées aux pullulations sont notamment connues à l'échelle de la parcelle d'après l'étude de Quéré <i>et al.</i> (1999) mais leur généralisation à l'ensemble du territoire est discutable.
#2	Probabilisation	Il est possible d'approximer la probabilité d'occurrence des pullulations de campagnols terrestres grâce aux données communales (1986 – 2001). La fréquence d'occurrence des pullulations est très importante pour de nombreux territoires (Truchetet <i>et al.</i> , 2014).
#3	Assiette de cotisation	Le risque est assez localisé à l'échelle nationale : les dommages sont subis par des territoires aux caractéristiques particulières, notamment dont le rapport STH/SAU est supérieur à 70-80%. L'assiette de cotisation théorique est donc étroite et limite <i>a priori</i> les possibilités de mutualisation entre territoires.
#4	Corrélation des risques	Les dommages sont concentrés sur une ou deux années, à l'échelle nationale et locale. Ce caractère systémique du risque est dû à une forte synchronie des pullulations et aux mécanismes de dispersion (vagues voyageuses) observés à de larges échelles spatiales. Les risques individuels sont fortement corrélés, ce qui limite la possibilité de mutualiser les risques grâce à un décalage temporel des sinistres.
#5	Prime d'assurance	La forte fréquence et l'intensité importante des dommages potentiels causés par les pullulations de campagnols, ainsi que la faible possibilité de mutualisation entre les risques individuels, ont pour conséquences une prime d'assurance élevée (3.2.1, p. 100). Cette prime d'assurance risque de décourager les éleveurs qui, du fait des caractéristiques propres de leur système fourrager (cf. 4.1 et 4.2), sont moins vulnérables que d'autres éleveurs aux dommages causés par les campagnols terrestres. En effet, les estimations des dommages réalisés par le FMSE suite aux pullulations de 2016 montrent une importante dispersion des dommages autour de la moyenne (Figure 26, p. 101), ce qui laisse présager d'une sélection adverse significative si la prime ne peut pas être davantage adaptée au risque auquel l'agent est réellement exposé.
#6	Prédictibilité	Les pullulations de campagnols terrestres sont cycliques (Figure 14, p. 67). Si leur délai de retour est variable selon les territoires, le phénomène est relativement prédictible au sens où leur occurrence n'est pas stochastique. Les pullulations de campagnols terrestres se rapprochent plus d'un phénomène saisonnier que d'un phénomène aléatoire. Cette prédictibilité est d'autant plus avérée que les principaux facteurs de risque sont connus et entretiennent un lien fort avec les décisions et pratiques agricoles (Couval <i>et al.</i> , 2014; Truchetet <i>et al.</i> , 2014), ce qui place l'assureur dans une situation où l'aléa moral est prégnant : un agriculteur assuré n'aurait que peu d'incitations à adopter des pratiques connues pour réduire le risque, d'autant plus que ces pratiques lui sont coûteuses.
#7	Mesure des dommages	La mesure des dommages aux champs est classiquement fastidieuse et revêt une part de subjectivité. Les pertes fourragères causées par les campagnols terrestres devraient donc pouvoir être mesurées grâce à une méthode

		suffisamment robuste pour réduire le risque de base. Toutefois, nous avons vu dans le paragraphe 3.2.2.3 (p. 104) que si le taux de terre était corrélé au taux de perte, il n'était pas en mesure d'expliquer la totalité de la perte fourragère observée. De plus, différencier les pertes fourragères d'origine climatique de celles causées par les campagnols terrestres peut s'avérer une entreprise délicate, même si les données présentées précédemment (2.2.5, p. 74) d'après l'étude de Quéré <i>et al.</i> (1999) peuvent permettre d'estimer une part climatique d'une part ravageur des dommages observés (c'est ce que nous proposerons dans le Chapitre 5).
#8	Coûts de transaction	Les coûts initiaux de lancement d'un contrat d'assurance « campagnols » semblent très importants, car des travaux complémentaires sont indispensables pour acquérir et traiter des données plus précises et actualisés. De plus, pour corriger les phénomènes de sélection adverse et d'aléa moral, l'assureur devra proposer des tables actuarielles prenant en considération la complexité du phénomène afin d'individualiser au mieux, à l'échelle de la commune mais aussi du système fourrager, la prime d'assurance proposée. Cela suppose également d'être en capacité d'estimer (faute de pouvoir l'observer) le comportement de l'éleveur en termes de prévention et de maîtrise des pullulations. L'acquisition de telles information augmente de fait les coûts de transaction liés à la conception des contrats d'assurance (capacité à prévoir les règles <i>ex-ante</i> , <i>enforceability</i> au sens de North (1990)) et leur mise en œuvre après la signature (estimation des efforts de prévention, mesure des dommages, <i>enforcement</i> au sens de North (1990)).

Le principal frein à l'assurabilité du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres est lié à la nature même du phénomène-cause. En effet, les pullulations de campagnols terrestres et leurs dommages ont largement été amplifiées par les changements de moyen terme dans la composition et l'organisation du paysage, particulièrement l'augmentation significative des surfaces en prairies permanentes (Fichet-Calvet *et al.*, 2000). Les facteurs de risque sont fortement liés aux pratiques agricoles qui favorisent la survenance et augmentent l'intensité des pullulations : réseaux de haies, composition des prairies, fertilisation, conduite du pâturage, gestion des refus... (Couval *et al.*, 2014; Truchetet *et al.*, 2014). L'assurance n'est pas un outil pertinent dans le cas où de tels leviers techniques de gestion du risque existent à l'échelle de l'exploitation agricole.

De plus, une telle assurance ne pourrait reposer que sur une assiette de cotisation très étroite (risque localisé à l'échelle nationale) et la majorité des territoires est affectée sur une courte période de temps (risque systémique à l'échelle des enjeux). En effet, au sein même des territoires exposés, un département est particulièrement affecté, le Cantal. En 2017, ce département a rassemblé 71% des exploitations d'élevage ayant bénéficié du programme de subvention des actions de lutte pour 55% du budget total, ainsi que 95% des exploitations ayant bénéficié du programme de compensation des dommages (données FMSE). Ainsi, les risques individuels sont fortement corrélés, ce qui réduit le potentiel de mutualisation et augmente le coût des réserves financières nécessaires.

Enfin, l'incomplétude, le manque de précision et d'actualisation des données sont également un frein à l'assurabilité du risque de perte fourragère causée par les campagnols terrestres. L'assureur serait contraint d'acquérir sur un temps relativement long des informations coûteuses afin de mieux calibrer ses tables actuarielles : les coûts de lancement, puis les coûts de transaction, seront très élevés, et ne pourront générer que des contrats incomplets et difficiles à mettre en œuvre. Les coûts d'entrée sur le marché sont élevés tandis que l'espérance de profit apparaît faible.

3.2.3.2. Généralisation : assurabilité des risques ravageurs

A notre connaissance, dans le monde, aucune assurance *stricto sensu* ne propose actuellement un contrat pour compenser les dommages causés par un ravageur ou une maladie (risques sanitaires). L'une des explications les plus populaires met en avant l'existence d'autres stratégies de gestion du risque, peu coûteuses, reposant sur l'usage d'intrants (pesticides) ou encore sur la diversification des cultures (Bradshaw *et al.*, 2004), qui se substituerait à l'assurance. Ainsi, la gestion des ravageurs relèverait de l'autoprotection, de l'auto-assurance (réduction du risque, *ex-ante*) et parfois de l'ajustement *ex-post*, lorsque des dommages marginaux se produisent (Figure 11, p. 56). Toutefois, certains ravageurs ne sont aujourd'hui pas maîtrisés (pullulations de campagnols terrestres, pullulations acridiennes...) et sont la source de pertes majeures, menaçant parfois des populations très exposées à la pauvreté et aux famines. La compensation de ces dommages s'avère donc être un besoin assez impérieux pour l'équilibre des exploitations agricoles voire la sécurité alimentaire de certaines régions du monde. Comment expliquer que le marché n'ait pas répondu à ce besoin en proposant des polices d'assurance capables de mutualiser le risque ?

Les limites de l'assurabilité du risque lié aux pullulations que nous avons présenté ci-dessus (3.2.3.1) laissent à penser que les risques ravageurs (ou risques sanitaires, en général) ne sont pas assurables. Un article de Carlson (1979) consacré aux obstacles au développement du marché de l'assurance pour les risques ravageurs corrobore les résultats que nous avons proposé pour notre cas d'étude. Les cinq principaux obstacles identifiés par Carlson (1979) sont : (1) l'aléa moral et la sélection adverse, (2) le manque de données pour déterminer les tables actuarielles, (3) la forte corrélation entre les risques individuels et la faible capacité de mutualisation, (4) la présence de substituts à l'assurance (auto-assurance, autoprotection) et enfin (5) les coûts élevés de l'assurance comparativement aux options de contrôle par les pesticides par exemple.

De plus, la littérature traitant de l'assurance des risques ravageurs semble extrêmement restreinte. Richards *et al.* (2006) décrivent des produits financiers dérivés dont le sous-jacent est corrélé aux populations d'insectes, encore appelés « *bug options* », qui permettent aux agriculteurs de transférer le risque financier dû aux dommages causés par les insectes ravageurs. Plus récemment, Norton *et al.* (2016) ont proposé un modèle d'assurance des ravageurs utilisant un indice climatique comme signal des conditions favorables au développement des ravageurs, afin de réduire le risque moral. Toutefois, ce modèle ne résout pas les importants problèmes liés au risque de base et à l'aléa moral concernant les pratiques agricoles.

3.2.4. Peut-on augmenter l'assurabilité du risque de pullulation ?

3.2.4.1. Subvention et accessibilité de la prime d'assurance

Une méthode classique pour traiter le problème d'accessibilité est d'appliquer des subventions publiques à l'assurance. Par exemple, il existe une subvention publique de 65% pour le contrat de base de l'assurance Prairies. Une subvention appliquée pour développer une police d'assurance dans le cas des pullulations de campagnols terrestres devrait avoir deux caractéristiques (Figure 33).

Premièrement, elle devrait permettre aux éleveurs d'accéder à une prime d'assurance inférieure au coût réel du risque (sans les coûts d'administration). Cela est possible lorsque la subvention représente 22,86% du coût total de l'assurance (point A). En effet, les agriculteurs ont tendance à considérer les assurances subventionnées autant comme des couvertures contre les risques que comme des investissements (Smith *et al.*, 2017) : aux Etats-Unis, « *un agriculteur neutre face au risque peut espérer recevoir un retour de plus de 2 dollars pour chaque dollar qu'il dépense pour acheter l'assurance récolte fédérale* ».

Deuxièmement, étant donné que le cadre légal détermine la gestion des pullulations comme étant de la responsabilité collective des agriculteurs, il est nécessaire de réfléchir au partage du risque entre les pouvoirs publics (solidarité nationale) et les agriculteurs (responsabilité individuelle et collective). Deux approches sont alors possibles. Soit les subventions n'excèdent pas 50% du coût total de l'assurance, ce qui correspond à un taux de subvention de 50% (point B), soit les subventions n'excèdent pas 50% du coût réel du risque, ce qui correspond à un taux de subvention de 38,57% (point C).

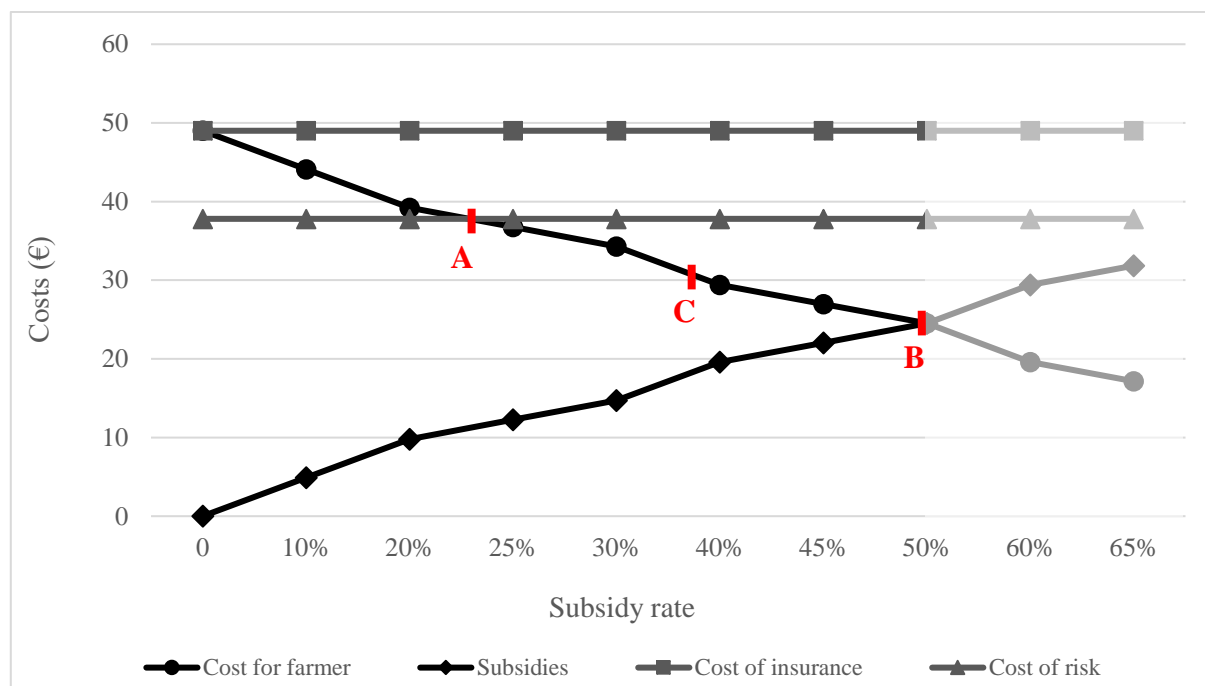


Figure 33 : Effet d'une subvention à l'assurance sur les coûts

En l'absence de subventions, l'ensemble du coût de l'assurance repose sur les agriculteurs assurés, de sorte qu'ils ont à en supporter les coûts d'administration et, du fait de l'absence d'une mutualisation effective, n'obtiendront aucun gain direct (Tableau 19). Dans ce cas, le seul intérêt pour un éleveur de payer un contrat d'assurance est de se débarrasser du risque (hypothèse stricte d'aversion au risque). Si les subventions permettent seulement de ramener la prime au niveau du coût réel du risque, alors les agriculteurs se voient proposer une police d'assurance équilibrée compensant les dommages. Si la subvention est supérieure à 22,86%, les agriculteurs bénéficieront de gains, c'est-à-dire qu'ils toucheront finalement plus d'indemnités qu'ils ne paient de prime d'assurance.

Tableau 19 : Distribution des coûts selon le taux de subvention

Taux de subvention	0%	22.86%	38.57%	50%
Prime payée	49€	37.8€	30.1€	24.5€
Subvention	0€	11.2€	18.9€	24.5€
Gain pour l'agriculteur	- 11.2€	0€	+ 8.6€	+13.3€

En l'absence de mutualisation, et compte tenu du caractère prédictible du risque, le seul cas où une assurance serait plus avantageuse qu'une épargne de précaution individuelle pour un agriculteur est celui où une subvention publique ramène la prime d'assurance effectivement payée en dessous du coût réel du risque. Un tel taux de subvention doit être supérieur à 22.86%.

3.2.4.2. Modèle d'assurance incluant le risque moral

La mise en place conjointe d'une franchise et d'une subvention publique permettent de ramener la prime d'assurance demandée à l'éleveur à un niveau accessible et potentiellement cohérent avec son consentement à payer. Toutefois, ce système ne règle pas la question du risque moral que nous avons soulevée précédemment (1.4.2, p. 48).

Du fait des fortes corrélations entre les pratiques agricoles – qu'elles soient individuelles ou collectives – et la survenance des pullulations, il existe une réelle possibilité de l'existence d'un mécanisme de compensation des dommages induise des comportements et pratiques encore plus à risque. En présence d'un tel risque moral, les asymétries d'information peuvent être la source de conflits ou litiges entre l'assureur et l'assuré. Si l'assureur peut acquérir des informations correctes sur les circonstances dans lesquelles les dommages se sont produits, conditionner les indemnités sur ces circonstances peut être un bon moyen de traiter ce risque moral (Holmstrom, 1979). Toutefois, dans de nombreux cas, ni les contingences influant sur le comportement des assurés, ni une observation parfaite de l'évènement, ne sont utilisés pour construire le contrat d'assurance, du fait des importants coûts d'audit (*enforceability*).

Pour traiter ce problème de risque moral, le modèle d'assurance devrait prendre en compte l'incomplétude des contrats (Bourgeon et Picard, 2019). En situation de risque moral, une *first-best solution* n'est pas possible, car ni les actions entreprises par l'assuré, ni les contingences qui se sont imposées à lui lors de sa prise de décision, ne peuvent être observées, ce qui génère d'inévitables coûts de transaction. Dans notre cas d'étude, la meilleure solution serait une *third-best solution*. En effet, une *second-best solution* (Figure 34) n'est possible que si les asymétries d'information ne concernent que le comportement de l'assuré, et non d'autres facteurs plus exogènes (comportement d'autres agents, aléas extérieurs).

Le modèle aura une *third-best solution* (Figure 35) s'il est coûteux d'obtenir des informations sur les circonstances et si l'assureur ne peut connaître les contingences qui ont conditionné le comportement de l'assuré : « *il est impossible de décrire la relation entre la répartition de l'indemnité et les nombreux états et circonstances de la perte* » (Bourgeon et Picard, 2019). Dans ce cas, l'assureur doit décider s'il est rentable ou non de mener un audit sur la déclaration de sinistre. Acquérir l'information sur les conditions de survenance des dommages est souvent considéré comme difficile ou coûteux en agriculture (Levin et Reinhard, 2007). Par exemple, dans notre cas d'étude, essayer de conditionner les indemnités à la mise en œuvre d'une action de contrôle des populations, individuelle ou collective, pourrait conduire à des protestations de la part des éleveurs assurés, car il existe en réalité très peu de moyens de vérifier si de telles actions ont bel et bien été menées pour déterminer le partage des responsabilités entre les agriculteurs. Une solution est de considérer des « standards de comportement » : si l'assureur considère – comme c'est le cas du cadre légal actuel – que si les actions de lutte sont correctement menées, une part significative des pertes (les plus importantes d'entre elles) peuvent être évitées, alors une sorte de « franchise inversée » pourrait permettre à l'assureur de ne compenser les dommages causés que par les pullulations difficilement contrôlables car finalement exogènes au système agricole (Feder et Regev, 1975).

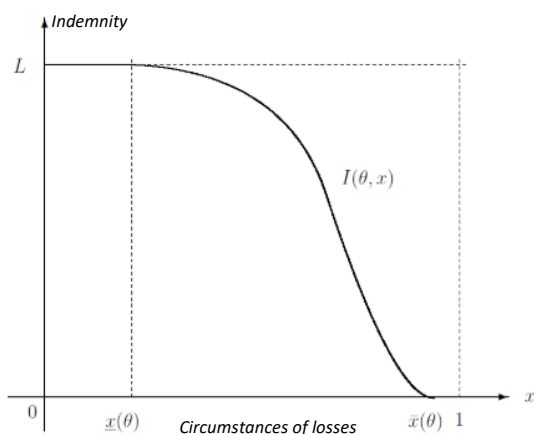


Figure 34 : Indemnité optimale dans le cas d'une second-best solution (Bourgeon et Picard, 2019)

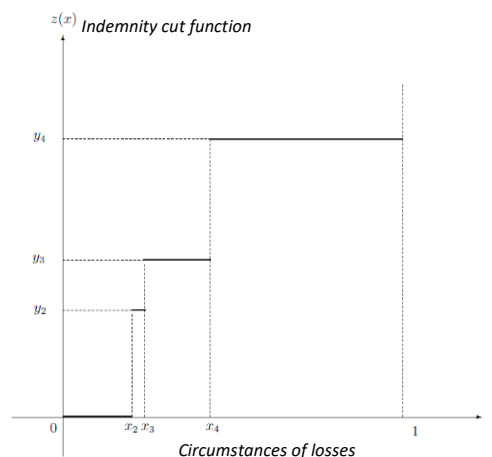


Figure 35 : Indemnité optimale dans le cas d'une third-best solution (Bourgeon et Picard, 2019)

3.3. L'assurance est-elle compatible avec l'action collective ?

Les contrats peuvent s'avérer être d'autant plus incomplets que les performances sont dépendantes d'un processus collectif tel que le travail d'équipe (Bourgeon et Picard, 2019). Le risque moral est une question importante pour l'étude des groupes (Holmstrom, 1982).

Or, la gestion des pullulations de campagnols terrestres nécessite précisément une action technique collective et coordonnée. Il est couramment considéré que l'assurance conduit les agriculteurs à adopter des comportements plus risqués (Cornaggia, 2013; Hazell *et al.*, 2017). Par exemple, il a été observé que la couverture des risques sur les cultures de blé conduisait à une diminution de 30% des dépenses en pesticides et engrais aux Etats-Unis (Smith *et al.*, 2017). Nous pouvons supposer que développer une assurance individuelle contre les dommages causés par les campagnols pourrait aggraver le sous-investissement dans la lutte actuellement observé. D'un côté, décourager l'action collective maintiendrait les pullulations de campagnols au même niveau. De l'autre, la compensation des dommages associés aux pullulations semble être une réelle demande des éleveurs qui ne peuvent absorber de tels niveaux de dommages si fréquemment. Une police d'assurance peut-elle répondre à la fois aux enjeux de court-termes relatifs à la compensation des dommages et les enjeux de moyen terme relatifs à l'action collective ?

Deux types de polices d'assurance sont généralement décrits : l'un est fondé sur les performances individuelles (à l'échelle de l'exploitation agricole), l'autre est basé sur des performances de groupe (à l'échelle d'un territoire rassemblant plusieurs exploitations agricoles). Par exemple, aux Etats-Unis, les *Actual Production History policies* compensent les dommages lorsque les rendements de l'exploitation agricole couverte chutent en-dessous d'un seuil donné, tandis que les *Group Risk Plan policies* compensent les dommages lorsque ce sont les rendements d'une petite région qui baissent sous un seuil donné (Cornaggia, 2013). Toutefois, même avec une assurance de groupe, l'action collective ne s'en retrouverait-elle pas découragée de même, par la création d'un « intérêt collectif » à l'inaction ?

Cela nous conduit à préciser certains éléments de l'analyse du risque de pullulation : à l'échelle collective, les pullulations ne constituent pas un « risque » *stricto sensu*, car elles peuvent être gérées – bien que non éradiquées – par une action collective (Giraudoux *et al.*, 2017). Toutefois, à l'échelle individuelle de l'exploitation agricole, même si un éleveur essaie de contrôler les populations de campagnols terrestres sur ses propres parcelles, il peut subir la dispersion de populations non maîtrisées depuis des parcelles voisines. Ces externalités spatiales (Smith *et al.*, 2009) induites par les structures de propriété privée font des pullulations de campagnols terrestres un risque à l'échelle

individuelle, du fait de l'existence de facteurs extérieurs, bien que d'origine humaine, qui peuvent affecter la situation de l'exploitation : il est possible d'en déduire qu'une partie du phénomène-cause est, selon le référentielle de l'exploitation agricole, exogène au système économique (Feder et Regev, 1975), et constitue donc bien un « risque » à l'échelle de l'exploitation. Cette analyse pourrait conduire à privilégier une approche pigouvienne, en proposant d'affecter des taxes aux éleveurs qui ne mettent pas en œuvre d'action de contrôle des populations sur leurs parcelles : c'est une idée qui semble aujourd'hui considérée³⁷. Elle serait toutefois probablement source de conflits supplémentaires.

Conclusion sur l'assurance et la mutualisation du risque

Le contexte climatique, sanitaire et économique dans lequel les systèmes d'élevage évoluent est fortement et rapidement changeant. Notamment, les risques auxquels les agriculteurs sont confrontés se transforment, se font plus fréquents voire plus intenses. Le désengagement progressif des pouvoirs publics laisse place à de nouveaux outils assurantiels, c'est-à-dire à une mutualisation des risques par le marché. Notre analyse tend à montrer les importantes limites de l'assurance pour la gestion des risques ravageurs : il est peu probable qu'un quelconque assureur propose un tel mécanisme de couverture du risque de pullulation. Le risque moral est particulièrement prégnant dans notre cas d'étude : si l'existence d'une couverture assurancielle devait induire un comportement encore plus à risque, favorisant davantage encore la survenance de dommages considérés comme évitables par une modification des pratiques agricoles, alors un tel contrat s'avèrerait contre-productif.

La littérature montre que les limites de l'assurance que nous avons identifiées ne sont pas seulement le fait des particularités des risques ravageurs, mais sont généralement observées dans le cas de l'assurance agricole (Blanc, 2003; Levin et Reinhard, 2007; Mahul, 1998; Smith *et al.*, 2017). Dans le cas des pullulations de campagnols terrestres, même si le modèle classique de l'assurance incluant une franchise peut proposer un niveau de prime communément rencontré pour l'assurance Prairies, les coûts de l'assurance ainsi que les conséquences sur l'engagement des agriculteurs dans l'action collective de régulation des populations de campagnols compromettent les possibilités d'une mutualisation par le marché. La forte intensité des dommages potentiels, la forte fréquence ainsi que le caractère systémique du risque de pullulation sont les principaux freins à son assurabilité.

L'assurance peut s'avérer utile dans certains cas, notamment pour des risques de faible fréquence mais d'intensité suffisamment forte pour ne pas pouvoir être absorbée par le système lui-même, et dont le phénomène-cause est au maximum exogène aux pratiques agricoles. L'assurance ne peut toutefois pas remplacer d'autres outils de gestion des risques, que ce soit l'auto-assurance (épargne, stocks de fourrages...) ou d'autoprotection (diversification de la production fourragère, contrôle des populations de campagnols...). Dans le cas des pullulations de campagnols terrestres, l'assurance ne semble pas être une piste solide pour constituer un mécanisme pérenne de compensation *ex-post* des dommages du fait de la faible assurabilité du risque. Ainsi, le FMSE semble demeurer l'acteur le plus légitime pour proposer un mécanisme de compensation. Cela suppose toutefois que le FMSE mette en place un budget et un financement dédiés à ce risque, notamment en proposant aux éleveurs une cotisation adaptée à leur risque effectif : situation géographique, part des prairies dans leur SAU, signature d'un contrat de lutte... La mutualisation ne pourrait alors pas reposer sur l'indépendance des risques, mais d'une part sur une solidarité professionnelle (les élevages qui ne sont pas affectés participant tout de même au financement) et sur une solidarité nationale (financement de l'Etat).

Dans la suite de nos travaux, nous élargissons la focale de notre analyse et proposons une approche à l'échelle du système fourrager. Ce concept nous semble pertinent pour aborder la question du comportement des éleveurs en situation d'aléas multiples. En effet, analyser isolément un risque ou

³⁷ Article paru dans *L'Union du Cantal* (19/12/2019)

un type de risque ne peut fournir qu'une vision partielle de la réalité complexe dans laquelle les agriculteurs et décideurs publics sont amenés à prendre des décisions (Komarek et al., 2020). Nous pensons notamment que, dans le cas des risques affectant les systèmes fourragers, une solution qui ne considérerait qu'une seule source de variabilité des rendements, comme l'assurance que nous venons de discuter, ne serait pas fonctionnelle pour améliorer la situation des élevages. Il n'est pas pertinent de considérer la gestion des risques comme la gestion d'une juxtaposition d'aléas isolés : une approche systémique de la gestion des risques est nécessaire. Il existe notamment un lien important entre les conditions climatiques et les dommages causés par les ravageurs. Les données ont montré que les dommages causés par les campagnols terrestres étaient plus élevés dans des conditions climatiques défavorables à la production fourragère (Quéré *et al.*, 1999). Les risques de production affectant les prairies doivent être gérés ensemble et s'intégrer dans une même stratégie de gestion du risque. Cette approche systémique permet de comprendre que ce n'est pas tant l'évènement exceptionnel qui est redouté, même s'il devait être de forte intensité, mais plutôt la succession et la conjonction d'aléas qu'un système agricole peut difficilement gérer de front par une approche réductionniste (Mosimann *et al.*, 2017). Le Chapitre 4 propose de travailler sur l'adaptation des systèmes fourragers en situation d'aléas multiples.

Chapitre 4. Adaptation d'un système fourrager en situation de risques multiples

La difficulté de l'analyse des risques en agriculture consiste à considérer l'ensemble des sources de risques (voir typologie, p. 28). En effet, la conjonction de plusieurs aléas peut démultiplier leurs effets, que ce soit à l'échelle d'une ferme isolée ou de régions entières (Komarek *et al.*, 2020). Analyser individuellement un risque ou un type de risque ne peut fournir qu'une vision partielle de la réalité complexe dans laquelle les agriculteurs et décideurs publics sont amenés à prendre des décisions. Or, l'étude de Komarek *et al.* (2020) démontre que la majorité des travaux de recherche menés entre 1974 et 2019 traitant de la question des risques en agriculture n'adoptent pas une approche holistique des risques et n'étudient que peu leurs effets conjoints. D'une part, 66% des travaux identifiés ne traitent que des risques de production. D'autre part, seuls 15% d'entre eux abordent l'analyse de plus d'un seul risque. Seuls 18 travaux, sur 3283 papiers analysés, étudient conjointement les cinq principaux types de risque identifiés (risques de production, risques de marchés, risques personnels, risques institutionnels et risque financiers).

Tout en traitant le plus précisément possible notre cas d'étude, nous choisissons d'adopter une vision plus holistique des risques qui affectent la production fourragère et de leur gestion. Pour cela, nous choisissons d'analyser la gestion des risques à l'aide du concept de système fourrager. En effet, si le Chapitre 2, par la mise en évidence des particularités du risque lié aux pullulations de campagnols terrestres, a permis de mieux comprendre les enjeux de gestion, il nous semble que la compréhension du fonctionnement et des évolutions des systèmes fourragers est un élément important pour répondre à notre problématique.

Nous étudions dans ce Chapitre 4, d'une part, les évolutions récentes (depuis les années 1950) des systèmes fourragers qui les ont rendus plus vulnérables aux aléas naturels et économiques, et d'autre part, la capacité d'adaptation de ces systèmes en situation d'aléas multiples.

Le changement d'échelle consistant à passer de la parcelle (ou de l'îlot) au système fourrager permet d'effectuer le passage d'une logique « ressource » qui semble encore dominer aujourd'hui dans les modes de gestion (production d'herbe gérée parcelle par parcelle) à une logique « système » (adéquation production-besoins, adaptation à diverses incertitudes causes de variabilité interannuelles...). Ce changement d'échelle permet également de réintégrer les pullulations de campagnols dans un système complexe de risques. En effet, s'il s'agit bien d'un problème collectif (que nous détaillerons dans les Chapitre 5, Chapitre 6 et Chapitre 7), il constitue d'abord un risque à l'échelle individuelle du système fourrager, dont il est nécessaire d'étudier les facteurs de vulnérabilité ainsi que les modes d'allocation des facteurs de productions (temps, surfaces, charges opérationnelles). En cela, l'approche par le système fourrager n'est pas une rupture avec la conception assurantielle du risque, mais un élargissement du cadre de l'analyse. Nous souhaitons étudier plus précisément la prise de décision en situation d'aléas multiples, qui se heurte à la complexité des mécanismes agroécologiques sous-jacents et à l'aspect global du problème causé par les pullulations (perte de quantité mais aussi de qualité des fourrages, problèmes sanitaires ; cumul de la sécheresse et de la pullulation). Dès lors, nous voyons que l'enjeu n'est ni uniquement la compensation *ex-post* des pertes de fourrages dues aux pullulations, ni uniquement le contrôle coûteux des populations de rongeurs, mais bien la conception et la gestion globale du système fourrager.

Nous présenterons d'abord le concept de système fourrager et en quoi il est intéressant pour l'analyse des risques (4.1). Puis nous présenterons les résultats d'une enquête menée auprès d'une dizaine d'éleveurs du Cantal au sujet de la gestion de leurs systèmes fourragers face aux risques (4.2). Enfin, nous proposerons une analyse du potentiel d'intégration d'une solution drone pour améliorer la surveillance des populations de campagnols terrestres (4.3).

4.1. Système fourrager et capacité d'adaptation face aux risques

4.1.1. Particularité de la production de fourrages herbagers et conséquences pour les systèmes d'élevage

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.2.4 (p. 71), la production herbagère fournit une grande part de l'alimentation des troupeaux des élevages du Massif Central. Cette dépendance à l'herbe n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement des systèmes d'élevage. En effet, la ressource prairiale est notamment caractérisée par une forte dépendance aux conditions climatiques (pluviométrie, température ; voir Figure 36) (Brisson *et al.*, 2003; Lemaire *et al.*, 2006). Cette dépendance aux conditions climatiques a deux conséquences : (1) la saisonnalité, ou variabilité intra-annuelle, de la pousse de l'herbe, avec notamment l'absence de croissance lors de la morte saison, l'hiver ; (2) une variabilité interannuelle significative de la production fourragère qui n'est pas forcément le fruit de variations climatiques exceptionnelles (Duru *et al.*, 2008).

Ces variabilités intra-annuelle ou interannuelle conduisent les éleveurs à mettre en œuvre des stratégies de gestion leur permettant d'assurer au maximum l'adéquation entre la production fourragère et les besoins du troupeau, et ceci afin de répondre à leurs objectifs de production. Il semble trivial d'interroger la gestion de la variabilité intra-annuelle par les éleveurs, d'autant plus que cette variabilité est attendue et anticipée : une partie des surfaces est réservée pour la fauche de l'herbe (printemps, été) qui est ensuite stockée sous la forme de fourrages conservés (ensilage, enrubannage, foin) puis distribuée lorsque l'herbe sur pied vient à manquer (automne, hiver, mais aussi été en cas de sécheresse). La question est plus légitime lorsqu'il s'agit de traiter la variabilité interannuelle de la production fourragère qui peut relever davantage de l'aléatoire. Nous proposons d'aborder cette question au travers du concept de système fourrager.

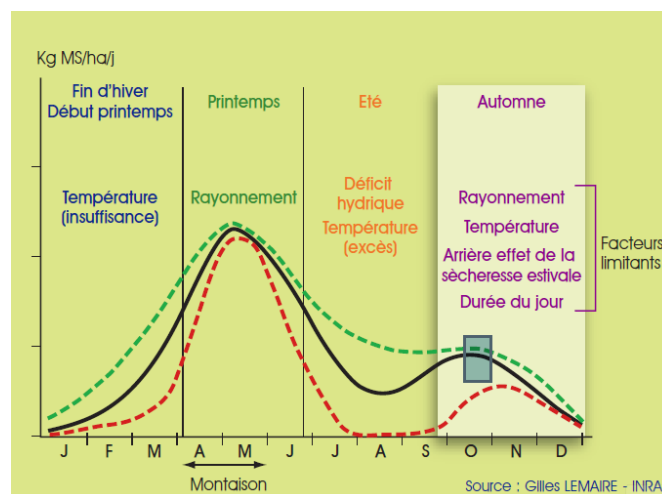


Figure 36 : Courbe-type de croissance d'une prairie au cours du temps (source : G. Lemaire, gnis.fr)

4.1.2. Concept de système fourrager et pertinence pour l'analyse des risques

Le système fourrager (Figure 37) est **un système d'information et de décision**. Il correspond à l'ensemble des moyens de production et des processus ayant pour fonction la mise en adéquation des besoins alimentaires du troupeau et des ressources fourragères de l'exploitation, dans un cadre de contraintes données, tout en intégrant la variabilité de ces deux données dans le temps (Attonaty, 1980; Duru *et al.*, 1988a; Duru *et al.*, 1988b). Cette dimension temporelle est importante : il faut étudier à la fois des états et des flux (de production et de consommation de fourrages) qui varient au cours d'une année (variations intra-annuelles) voire d'une année sur l'autre (variations interannuelles). Un système fourrager est d'autant moins sensible à ces variations que la production et la consommation des fourrages sont dissociées (dé-corrélées ou anti-corrélées) (Gibon *et al.*, 1983).

Le système fourrager est conçu et piloté sous un ensemble de contraintes :

- Les variables expliquant les flux de production sont les surfaces fourragères et leurs caractéristiques (potentialités pédoclimatiques, éloignement au siège d'exploitation...), les troupeaux et leur aptitude génétique ainsi que leur état sanitaire, les équipements de récolte et la conduite des parcelles (itinéraire technique, fertilisation azotée, mise à disposition de surfaces au pâturage...).
- Les variables expliquant les flux de consommation sont le nombre d'animaux dans le lot considéré ainsi que les modalités de rationnement (distribution de stock, conduite du pâturage).

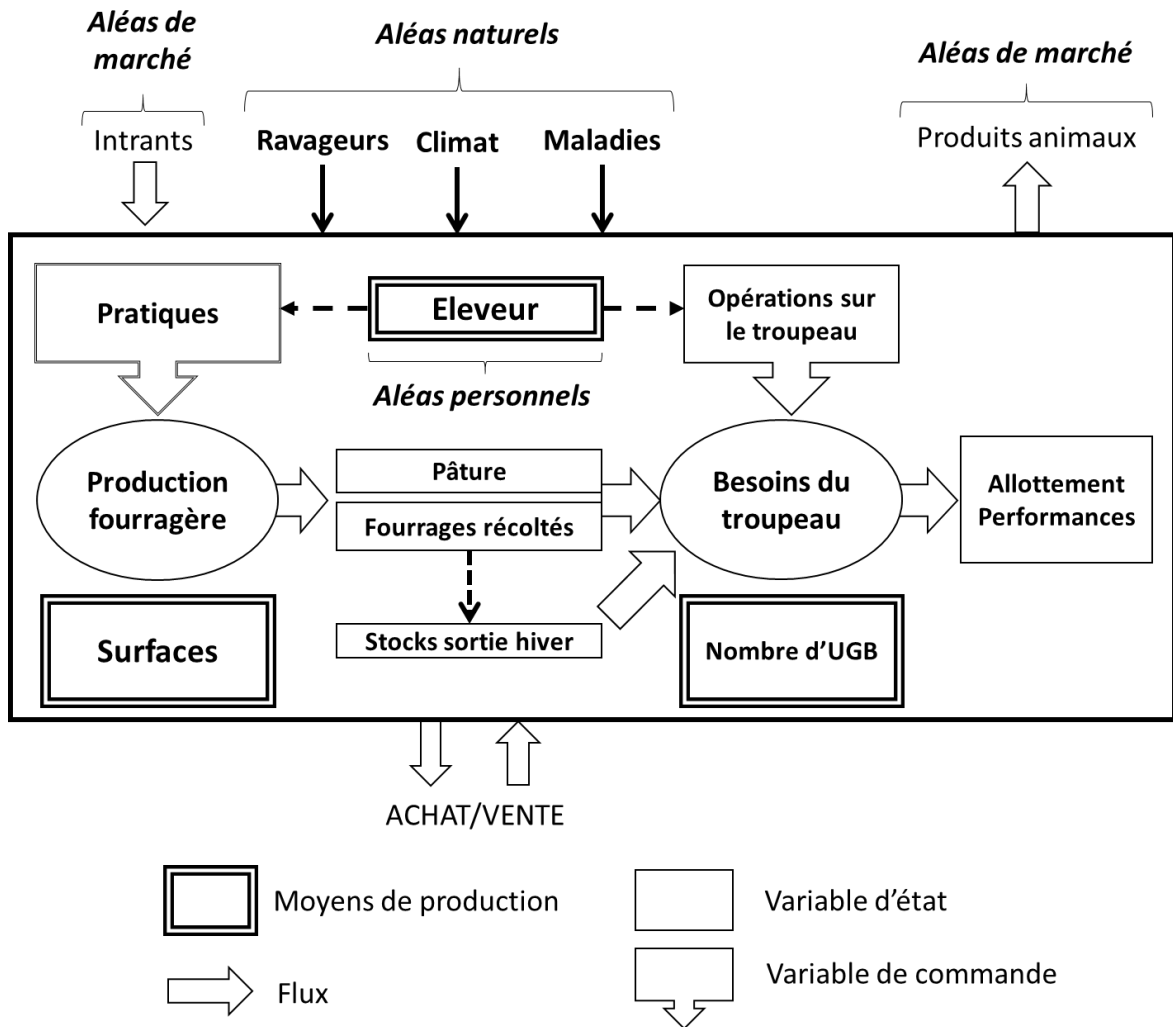


Figure 37 : Représentation du système fourrager adaptée de Duru et al. (1988c)

L'approche par l'étude du système fourrager permet de mieux comprendre les motivations et les objectifs de l'éleveur. Détaillons le fonctionnement basique d'un système fourrager dont la ressource dominante est l'herbe :

- Un troupeau est composé de plusieurs types d'animaux : les vaches productives (dont celles sur le point d'être réformées), les génisses de renouvellement, les broutards mâles et femelles,

les taureaux reproducteurs. Pour simplifier, un troupeau est représenté par un nombre d'UGB³⁸, ce qui rend plus facile les calculs des besoins et du chargement.

- L'éleveur produit de l'herbe qui est soit pâturée soit récoltée. La quantité d'herbe produite dépend des surfaces fourragères disponibles (en hectares) et des pratiques de l'éleveur (utilisation d'intrants, pratiques agronomiques...). Cette production est également dépendante d'aléas naturels (aléas climatiques et ravageurs, principalement) : elle est variable.
- Cette herbe est consommée par le troupeau selon ses besoins (nombre d'UGB).
- Si la production est supérieure aux besoins du troupeau, l'éleveur peut vendre ou stocker (en sortie d'hiver) son excédent de fourrages récoltés. Si la production est inférieure aux besoins, l'éleveur peut acheter des fourrages à un éleveur excédentaire.
- Le troupeau donne des produits animaux dont la quantité dépend du niveau de satisfaction des besoins et des opérations techniques de l'éleveur (selon ses objectifs de production). Ces produits sont ensuite vendus sur les marchés agricoles.

Ainsi, un système fourrager cultive des fourrages pour couvrir les besoins du troupeau, lequel fournit des produits animaux qui sont commercialisés et génèrent le revenu de l'exploitation. La particularité économique des cultures fourragères réside dans leur statut de production intermédiaire, permettant la production du produit animal final. Les fourrages constituent rarement une production commerciale pour les systèmes d'élevage. **L'objectif premier d'un éleveur est donc de répondre aux besoins alimentaires de son troupeau.** Ainsi, Lemaire et Pflimlin (2007) argumentent qu'un objectif de production fourragère moyenne n'a, du fait de la forte variabilité des rendements fourragers, aucun sens : il est plus sécurisant d'anticiper des déficits de production fourragère suffisamment accentués pour augmenter la probabilité d'équilibrer offre et demande en fourrages dans un maximum de situations. C'est une forme de critère de décision « Maxi Min » ou critère de Wald : l'agent est plutôt pessimiste et décide du choix qui assure le plus grand résultat minimum (Cayatte, 2009). Petit (1971) rapportait ainsi les réticences des éleveurs à adopter des techniques intensives de production fourragère : « *à quoi bon produire davantage si l'on risque de perdre la récolte par suite du mauvais temps, à la fenaison.* » Il poursuit : « *L'idée essentielle [...] est qu'un agriculteur ne sera prêt à adopter une innovation impliquant des risques que s'il est convaincu que les avantages escomptés justifient les risques encourus.* »

Un système fourrager est donc régi par un programme et des règles de décision qui permettent de gérer ses différents états-objectifs. L'éleveur-pilote du système fourrager fait face à divers aléas (économiques, sanitaires, climatiques et personnels) qui rendent instables les équilibres du système fourrager. Il doit donc prévoir puis mettre en œuvre des procédures de régulations de ces instabilités : stocks, surfaces tampon, « report sur pied » consistant à différer plus ou moins dans le temps l'utilisation et l'intensité d'utilisation de certaines parcelles, cultures à double fin, variations d'effectifs et allotements, mobilisation des réserves corporelles des animaux, achats de fourrages, compensation d'un manque de fourrage grossier par du concentré...

Ces procédures de régulation ont un coût monétaire, un coût en travail ou en complexité de gestion. L'éleveur prend sa décision en fonction d'indicateurs d'état qui caractérisent le système fourrager à un instant donné (stocks, pluviométrie, température, dynamique des populations de campagnols terrestres...) qui lui permettent de décider des actions à mener pour remplir ses objectifs futurs. Ce processus de décision repose donc non seulement sur un diagnostic (présent) mais aussi et surtout sur un pronostic sur les états de la nature à venir. Un éleveur pilote son système fourrager par anticipation

³⁸ Unité Gros Bétail

des conditions futures, avec toute la marge d'erreur que peut porter un tel pronostic sur des événements stochastiques (climat...). Pour mettre en œuvre ces régulations, le système fourrager doit disposer de capacités d'adaptation suffisantes.

4.1.3. Capacité d'adaptation et résilience d'un système fourrager face aux risques

4.1.3.1. Théorie de l'adaptation

Un système est défini par un ensemble de finalités et par les structures et processus qui permettent de remplir ces finalités. Il possède des invariants, qui constituent son identité (Moulin *et al.*, 2008). La gestion d'un système procède donc d'une tension entre les déformations imposées par l'environnement (ou des changements internes au système) et les invariants du système, associés au projet de production (technique, économique, social), à préserver (Leméry *et al.*, 2008).

Un système est *adapté* s'il peut continuer à exister, malgré les diverses perturbations, sans que ses structures fonctionnelles ne soient remises en cause (Alcaras et Lacroux, 1999). L'« adaptation » indique ici simplement que les caractéristiques du système répondent aux conditions d'existence que lui impose le milieu ; *adaptation* est alors synonyme de *viabilité* ou d'*adéquation*. Sans aucun flux provenant de l'extérieur, un système qui ne serait pas en adéquation avec son environnement disparaîtrait (soit en étant détruit, soit en étant transformé).

L'adaptation, en tant que processus, correspond aux étapes qui permettent à un système qui ne l'était pas de devenir *adapté* aux conditions dans lesquels il doit exister. La capacité d'adaptation désigne les potentialités endogènes qu'un système possède pour s'adapter : elle confère au système une stabilité dans le changement, c'est-à-dire une autonomie. S'adapter, c'est être capable de changer tout en conservant ou améliorant son autonomie. La nature de cette autonomie dépend du type de système (Alcaras et Lacroux, 1999; Blanc *et al.*, 2010) :

- Les systèmes rigides ne s'adaptent pas, au sens où ils ne changent ni leurs structures, ni leurs finalités ; c'est leur résistance qui leur permet de conserver leur viabilité face aux perturbations.
- Les systèmes élastiques s'adaptent en modifiant temporairement leur structure et en revenant ensuite à leur état initial, sans modifier durablement leur structure ni leurs finalités.
- Les systèmes flexibles s'adaptent en évoluant. Ils répondent aux perturbations soit par la déformation de leur structure, afin de maintenir leurs finalités, soit par la déformation de leurs objectifs, en conservant la même structure.
- Les systèmes plastiques s'adaptent en transformant durablement et plus profondément leurs structures et leurs objectifs.

La transformation des systèmes plastiques constitue une forme de rupture, tandis que les trois autres modalités s'inscrivent dans une forme de continuité. Cependant, toute adaptation requiert une certaine forme de permanence (Alcaras et Lacroux, 1999), faute de quoi le système disparaîtrait :

- La permanence structurelle concerne la stabilité des structures du système.
- La permanence téléonomique concerne la stabilité des finalités du système.
- La permanence téléologique permet au système de développer ses propres processus de structuration et de finalisation.

Selon que les structures et/ou les finalités du système restent stables ou changent, il est possible de déterminer quatre grands types de processus adaptatifs (Tableau 20) :

- (1) Dans le cas d'une permanence structurelle et téléonomique, le système ne modifie ni ses structures ni ses finalités. Il se contente de régulations qui lui permettent de revenir à son état

initial (adaptation élastique). La permanence structurelle et téléonomique peut également caractériser l'adaptation d'un système rigide qui augmente sa capacité de résistance aux perturbations sans déformer ses structures et finalités (adaptation rigide).

- (2) Dans le cas d'une permanence téléonomique, le système « fait avec » les conditions environnementales changeantes et met en place des mécanismes d'accommodation, qui lui permettent de modifier ses structures tout en répondant à ses finalités (adaptation flexible défensive).
- (3) Dans le cas d'une permanence structurelle et téléologique, le système intègre les changements de l'environnement (assimilation) et « agit » pour modifier son projet de production (ses finalités) et le mettre en cohérence avec les potentialités de ses structures initiales (adaptation flexible offensive).
- (4) Enfin, dans le cas d'une seule permanence téléologique, le système planifie ses phases d'adaptation successives, en équilibrant accommodation et assimilation, dans l'objectif de se transformer durablement (adaptation plastique).

Tableau 20 : Matrice des quatre grands types de processus adaptatifs et modes de planification associés (Alcaras et Lacroux, 1999)

Relation du système avec :		Ses projets, ses finalités	
		Stable	Changeante
Son environnement	Stable	1. Adaptation élastique ou rigide Permanence structurelle et téléonomique Planification rigide et régulation	3. Adaptation flexible Permanence structurelle et téléologique Planification offensive et assimilation
	Changeante	2. Adaptation flexible Permanence téléonomique Planification défensive et accommodation	4. Adaptation plastique Permanence téléologique Planification adaptative et équilibre

Pour la suite de notre réflexion, nous proposons de retenir une définition simple de la flexibilité : elle est la « capacité à s'adapter, à s'accommoder aux circonstances, et à maintenir une cohérence par rapport à l'environnement que l'entreprise doit affronter » (Reix, 1997). La flexibilité est un moyen de faire face à l'incertitude, la capacité d'un système à répondre à un changement, en utilisant une information nouvelle. Elle correspond à la capacité du système de production à se ré-agencer rapidement après une perturbation *i.e.* à choisir la configuration du système la plus adaptée pour assurer sa pérennité et/ou le maintien de ses objectifs de production (Chia et Marchesnay, 2008).

Le Chêne un jour dit au Roseau :
"Vous avez bien sujet d'accuser la Nature ;
Un Roitelet pour vous est un pesant fardeau.
Le moindre vent, qui d'aventure
Fait rider la face de l'eau,
Vous oblige à baisser la tête :
Cependant que mon front, au Caucase pareil,
Non content d'arrêter les rayons du soleil,
Brave l'effort de la tempête.
Tout vous est Aquilon, tout me semble Zéphyr.
Encor si vous naissiez à l'abri du feuillage
Dont je couvre le voisinage,
Vous n'auriez pas tant à souffrir :
Je vous défendrais de l'orage ;
Mais vous naissez le plus souvent
Sur les humides bords des Royaumes du vent.
La nature envers vous me semble bien injuste.
- Votre compassion, lui répondit l'Arbuste,
Part d'un bon naturel ; mais quittez ce souci.
Les vents me sont moins qu'à vous redoutables.
Je plie, et ne romps pas. Vous avez jusqu'ici
Contre leurs coups épouvantables
Résisté sans courber le dos ;
Mais attendons la fin
[...]

Extrait de Le Chêne et le Roseau, Jean de La Fontaine, Fables, 1668

4.1.3.2. Résilience d'un système socio-écologique

La mise en œuvre d'une stratégie de gestion des risques peut avoir diverses conséquences sur les caractéristiques et le fonctionnement des systèmes socio-écologiques.

La **résistance** d'un système relève de sa capacité à édifier des protections face à l'aléa (Dauphiné et Provitolo, 2007). Augmenter la résistance d'un système revient à augmenter l'intensité de la perturbation au-delà de laquelle le système exposé subira des dommages, sans pour autant modifier ses caractéristiques propres (il s'agit d'une stratégie de régulation). Nous pourrions illustrer cette notion avec l'exemple des filets paragrêles qui, sans modifier le système de culture, permet de résister à la grêle, dans une certaine mesure. Les vignes sont un exemple de système agricole rigide, reposant sur une culture pérenne, qui ne peut pas être déformé en réponse à une perturbation climatique comme la grêle.

La **robustesse** caractérise la capacité d'un système à maintenir le niveau désiré d'*outputs* malgré la survenance de perturbations (Urruty *et al.*, 2016). Augmenter la robustesse du système consiste à réduire l'effet d'une perturbation d'une intensité donnée sur le revenu du système exposé, grâce à une modification de la fonction de production, par exemple, ou encore une diversification des spéculations présentes sur une exploitation agricole. Agir sur la robustesse d'un système revient à déformer ses structures pour conserver ses finalités (adaptation flexible défensive).

La notion de **résilience**³⁹ est héritée des sciences physique et écologique, et s'adapte particulièrement bien à l'étude de systèmes socio-écologiques dynamiques tels que les systèmes agricoles (Thompson *et al.*, 2007). En effet, les systèmes socio-écologiques ne peuvent pas être considérés comme des systèmes stables (Décamps, 2007), ce qui rend, *de facto*, les notions de résistance ou de robustesse, prises isolément, peu convaincantes pour l'analyse. En intégrant la dimension temporelle, le concept de résilience semble plus adapté à l'étude de ces systèmes dynamiques et instables par nature. Elle est la capacité d'un système à absorber des chocs sans que ses structures essentielles, ni les processus à l'origine de ces structures, ne soient altérées (Walker *et al.*, 2002). La résilience concerne également l'aptitude même à l'adaptation et à l'apprentissage face aux aléas (Folke *et al.*, 2002). La résilience dépend donc des capacités d'adaptation du système (Dauphiné et Provitolo, 2007; Dedieu *et al.*, 2008; Urruty *et al.*, 2016).

Un système résilient est donc **un système viable, capable de s'adapter, et en particulier d'opérer des adaptations flexibles de toutes natures ne remettant pas en cause ses structures ni ses finalités de manière durable**. Un système résilient est donc suffisamment robuste pour ne pas disparaître et suffisamment flexible pour ne pas devoir se transformer à chaque perturbation.

4.1.3.3. Capacité d'adaptation d'un système fourrager

Les stratégies d'adaptation des systèmes socio-écologiques face aux diverses perturbations qu'ils peuvent subir sont variées (voir Tableau 20). Quelle stratégie semble la plus pertinente pour un système fourrager ?

A court terme, un système fourrager « *requiert de la flexibilité pour faire face aux variations de l'offre en fourrage du fait de la variabilité interannuelle du climat, ou de l'envahissement par des espèces indésirables ou encore de la demande en relation avec des périodes de mise sur le marché des animaux, ou tout simplement pour des raisons liées à l'organisation du travail* » (Duru *et al.*, 2008). Cette flexibilité correspond aux capacités du système fourrager à mettre en place « *des réponses nombreuses, faciles et rapides [...], face aux perturbations* » (Duru *et al.*, 1988c). En effet, compte-tenu

³⁹ Du latin *resilio*, rebondir

des objectifs de l'éleveur que nous avons présenté en 4.1.2, à savoir « répondre aux besoins alimentaires du troupeau », il nous semble que les finalités du système fourrager peuvent être considérées comme stables à court terme. La particularité des systèmes herbagers en termes de gestion relève de la permanence dans le temps des besoins du troupeau (Lemaire et Pflimlin, 2007), si bien que, contrairement aux systèmes de cultures annuelles, les systèmes fourragers ne peuvent compter sur les « bonnes » années pour compenser les « mauvaises » qu'au prix de coûts d'adaptation bien plus élevés (coûts de stockage, immobilisation de surface tampon et risque de gaspillage de ressources qui constituent des coûts d'opportunité importants, par exemple). Ainsi, à court terme, un système fourrager pourra, selon les déformations structurelles auxquelles il peut consentir, soit adopter une stratégie d'adaptation élastique en régulant sa production et/ou son approvisionnement en fourrages, soit adopter une stratégie d'adaptation flexible défensive, en changeant ses structures pour assurer une disponibilité suffisante de fourrages malgré la/les perturbation(s).

A plus long terme, l'éleveur peut décider d'une modification de sa sole fourragère (asolement, modalité d'utilisation, augmentation des surfaces) ou bien de la composition de son troupeau, ce qui le place dans une stratégie d'adaptation flexible offensive (légères modifications pour intégrer de nouveaux risques dans son schéma de gestion quotidien) ou d'adaptation plastique (transformation du système pour intégrer pleinement le risque dans le schéma de gestion).

En système herbager de moyenne montagne, la ressource alimentaire principale, l'herbe, est peu flexible, et les conditions pédoclimatiques et topographiques souvent peu favorables à la diversification des ressources fourragères. Aubron *et al.* (2010) ont déterminé trois stratégies fourragères générales en système tout herbe : (1) une autonomie limitée (autonomie fourragère à peine atteinte les bonnes années et achat de fourrages les mauvaises années) ; (2) une très forte autonomie par surcapacité (reports de foin d'une année à l'autre) ; (3) une externalisation de la production fourragère (achats réguliers de fourrages de très bonne qualité). La notion de trésorerie fourragère (Duru *et al.*, 1988a) permet de rendre compte de la nécessaire mise en adéquation à un instant t entre les fourrages disponibles et les besoins du troupeau. Elle constitue un indicateur de sécurité du système fourrager : la situation de trésorerie peut être caractérisée par le nombre de jours de consommation d'avance permis par les ressources disponibles (les jours d'avance), que ce soit en pâturage ou en stock. Augmenter le degré de sécurité d'un système fourrager revient à augmenter la probabilité d'assurer, durant une période considérée, la couverture des besoins du troupeau en fourrages grossiers sans la diminuer pour les périodes suivantes. Plusieurs leviers sont classiquement à disposition des éleveurs pour assurer la sécurité de leur système fourrager (Blanc *et al.*, 2008; Dobremez *et al.*, 2008; Duru *et al.*, 2008; Leméry *et al.*, 2008; Moreau *et al.*, 2014; Mosimann *et al.*, 2017; Tichit *et al.*, 2008) :

- Augmenter l'offre en fourrages : augmentation des surfaces, fertilisation, achat de fourrage ou de concentrés à l'extérieur ;
- Prévoir des reports de ressources d'une période à l'autre : constitution de réserves corporelles, constitution de stocks de fourrages sur pied ou récoltés ;
- Ajuster l'utilisation des surfaces au cours d'une campagne : ajustement des surfaces en fauche ou en pâture, dates de mise à l'herbe, hivernage extérieur, cultures à double fin... ;
- Réduire ou étaler dans le temps les besoins du troupeau : vente d'animaux, mise en pension (estive), mobilisation des réserves corporelles, allotement, gestion des mises bas...

Un système fourrager sera d'autant plus flexible qu'il est en capacité de mettre en œuvre de manière complémentaire un nombre important de ces leviers d'action. La flexibilité d'un système fourrager ne peut être envisagé que par une analyse pluriannuelle (Andrieu *et al.*, 2008; Caron, 2008; Dobremez *et al.*, 2008; Leméry *et al.*, 2008). En effet, les composantes animale (Blanc *et al.*, 2008; Tichit *et al.*,

2008) et prairiale (Duru *et al.*, 2008) du système fourrager sont relativement rigides à court terme. Ainsi, **la principale source de flexibilité pour la gestion des ressources fourragères provient de l'organisation du système fourrager**, décidée sous contraintes par l'éleveur : « *la prise en compte de la diversité de végétation ou de caractéristiques topographiques permet de sécuriser le système d'alimentation. Mais cette sécurisation ne provient pas d'une réduction des effets de la variabilité climatique, elle provient de la capacité à créer des reports de stock en réponse à la variabilité du besoin fourrager durant l'hiver, et également à compenser une production insuffisante l'année suivante* » (Andrieu *et al.*, 2008).

4.1.3.4. Marges de manœuvre d'un système fourrager face aux pullulations de campagnols terrestres

A partir d'enquêtes menées en Franche-Comté, Michelin *et al.* (2014) ont classé les systèmes d'élevage selon des caractéristiques technico-économiques qui déterminent à la fois leurs marges de manœuvres dans la lutte contre les campagnols mais également les freins à sa mise en œuvre. Le Tableau 21 présente cette classification en insistant sur les marges de manœuvre (qui caractérisent chaque classe), les facteurs limitants et les outils de lutte les plus pertinents. Les éléments du système de production pris en compte sont l'organisation du parcellaire, l'organisation de l'activité, la souplesse d'utilisation des surfaces fauchées, l'autonomie fourragère, la gestion du pâturage, la période de production et la situation économique de l'exploitation.

Tableau 21 : Classes de fonctionnement des élevages et gestion des pullulations, d'après Michelin *et al.* (2014)

Classes	Marges de manœuvre	Facteurs limitants	Outils les plus adaptés
C1	Faible rapport SAU/UTH, donc capacité de mobilisation d'une main d'œuvre plus importante pour lutter. Forte autonomie fourragère et production par UGB limitée, donc plus faible sensibilité aux dégâts.	Trésorerie ?	Piégeage, PH3, rouleau à plot, alternance fauche-pâturage, pâturage tournant sévère, gestion de la végétation, céréales.
C2	Faibles, abandon d'une part importante des outils de lutte alternatifs (piégeage notamment). Compter sur une bonne autonomie fourragère.	Temps et main d'œuvre.	Céréales, alternance fauche-pâturage, gestion de la fertilisation, gestion de la végétation.
C3	Contrôle de la charge de travail par un compromis pousse de l'herbe-vêlage : souplesse dans la conduite du système de pâturage mais forte sensibilité aux pullulations.	Faible autonomie fourragère. Temps et main d'œuvre.	Pâturage tournant sévère, gestion de la fertilisation, gestion de la végétation.
C4	Rythme de croisière : plus de souplesse dans l'organisation du travail.	Morcellement du parcellaire, faibles possibilités de mécanisation. Trésorerie	Favorisation de la prédation et gestion de la végétation.

Leméry *et al.* (2008) ont mis en évidence que les éleveurs adoptaient divers comportements face au changement et à l'incertitude. Certains éleveurs favorisent l'action face aux causes de perturbations (« agir sur », adaptation flexible offensive), d'autres préfèrent des ajustements pour être capable de supporter ces perturbations (« faire face », adaptation flexible défensive). Il est ainsi pertinent de s'intéresser aux comportements et modes de décision des éleveurs en situation d'aléas multiples pour analyser la sécurisation des systèmes fourragers. C'est ce que propose la section suivante (4.2).

4.2. Comportement d'éleveurs en situation d'aléas multiples

4.2.1. Méthodologie

Nous avons mené une enquête qualitative en mai 2018 auprès de 11 éleveurs du Cantal à l'occasion d'un entretien initial préalable à la mise en place de zones d'expérimentation de la lutte contre les campagnols terrestres. 3 éleveurs sont situés sur la commune de Marcenat (Cézalier), 8 sur la commune de Mauriac (Chataigneraie cantalienne). Tous sont éleveurs bovins, en système herbager (la base de l'alimentation du troupeau repose sur l'herbe pâturée ou récoltée). La deuxième partie de cet entretien initial durait 25-30 min et concernait la gestion des risques sur l'exploitation agricole. Elle abordait plus spécifiquement la gestion de la variabilité des rendements fourragers.

La première sous-partie de l'entretien permet d'échanger sur les risques auxquels l'éleveur fait face sur son exploitation. La méthodologie a été inspirée du travail de mémoire de Lafrance (2015).

- (1) Une première question interroge l'éleveur sur les « difficultés » qu'il rencontre dans l'exercice de son métier, sans prononcer le mot « risque ». Lafrance (2015) nomme les réponses de l'agriculteur « risques évoqués » et les code 1.
- (2) Puis, après avoir défini la notion de « risque » avec les éleveurs, il leur est demandé les sources de risque auxquelles ils sont confrontés : ce sont des « risques réfléchis » et ils sont codés 2.
- (3) Enfin, un jeu de cartes est remis à l'éleveur (Figure 38, Tableau 22) : elles représentent les principaux risques identifiés en agriculture. Il est demandé à l'éleveur de disposer physiquement ces différents risques sur un gradient imprimé (Figure 39), tout en argumentant : risque faible, risque moyen ou risque fort. L'enquêteur doit alors déterminer si l'argument de l'éleveur concerne l'exposition de son système face au risque, la fréquence de la perturbation ou bien l'importance des dommages potentiels. Les risques considérés comme importants et non évoqués auparavant sont des « risques omis » et sont codés 3. Les risques non évoqués précédemment et considérés comme faibles sont des « risques éliminés » et sont codés 4.



Figure 38 : Exemple de cartes utilisées lors de l'entretien sur les risques



Figure 39 : Gradient utilisé pour l'entretien sur les risques

Tableau 22 : Premier jeu de cartes, représentant les risques en agriculture

Types de risque	Risques renseignés sur les cartes
Marché & prix	Accès aux marchés
	Exigences des filières
	Variation des prix de vente de vos produits
	Variation des charges (intrants)
	Instabilité des marchés à l'export
Production	Grêle
	Gel
	Sécheresse
	Pluie / Inondations
	Pollution
	Maladies & ravageurs
	Technologies
Financier	Variation des revenus non-agricoles
	Variation des prix des terrains
	Variation des taux d'intérêt
	Accès au crédit
Institutionnel et juridique	Modifications des politiques ou réglementations locales
	Modifications des politiques ou réglementations régionales, nationales ou européennes PAC
Risque humain	Aléas personnels
	Gestion du personnel
	Voisinage agricole
	Voisinage non agricole

Une deuxième sous-partie resserre la discussion autour des risques affectant spécifiquement le système fourrager. Un second jeu de cartes (Tableau 23) propose à l'éleveur de discuter autour de ses pratiques de gestion de la variabilité des rendements fourragers et de leurs modalités d'application. L'utilisation du jeu de carte permet d'objectiver le regard que porte l'éleveur sur ses pratiques, tout en conservant un aspect ludique qui facilite l'échange. Ce format rend plus facile la collecte d'information en répondant pour chaque carte aux questions : « le faites-vous ? », « pourquoi ? », « si oui, comment ? », par la méthode de reformulation.

Tableau 23 : Deuxième jeu de cartes, représentant les modalités de gestion du système fourrager

Modalités de gestion du système fourrager
Réduction du troupeau
Mobilisation des réserves corporelles des animaux
Acquisition de parcelles * à proximité du siège d'exploitation * à bonne distance du siège
Achats de fourrages
Réalisation de stocks de fourrages
Epargne de précaution (DPA)
Achats de concentrés
Modification de l'assolement (Prairie/culture annuelle) Modification de l'ITK (fauche/pâturage)
Assurance « Prairies »
Autres : (préciser)

4.2.2. Résultats

L'analyse des résultats sera uniquement qualitative du fait du faible nombre d'enquêtes réalisées.

4.2.2.1. Perception des risques par les éleveurs enquêtés

Les résultats du codage des risques, ainsi que les principales explications possibles de cette répartition, sont présentés dans le Tableau 24 (p. 130). Ces résultats permettent de déterminer la perception qu'ont les éleveurs des risques auxquels ils sont ou pensent être exposés, ou non. Nous notons que les risques facilement évoqués (1) ou réfléchis (2) sont des risques techniques, dont la gestion est une priorité pour l'éleveur qui souhaite maintenir sa production. Les risques économiques ont, quant à eux, été plus souvent omis (3).

- L'un des risques le plus facilement et fréquemment **évoqué** (1) par les éleveurs sont les aléas personnels : la crainte d'être indisponible temporairement suite à un accident ou une maladie est prégnante chez les éleveurs, du fait du manque de main d'œuvre sur les exploitations relativement à la quantité de travail à réaliser. Viennent ensuite les aléas touchant la production fourragère : les ravageurs (campagnols terrestres et taupes⁴⁰), le gel et la sécheresse, qui réduisent la sécurité alimentaire de l'exploitation. Enfin, la variation des produits d'exploitation est également un risque évoqué par certains éleveurs.
- Lors de la deuxième phase d'explicitation des risques **réfléchis** (2), les éleveurs qui ne l'avaient pas fait précédemment ont mentionné les aléas impactant la production fourragère : les ravageurs (campagnols terrestres) et la sécheresse, notamment. Le terme de risque est ainsi aisément associé aux aléas affectant le système fourrager, notamment sa composante fourragère, sur laquelle repose tout l'équilibre du système d'élevage.
- Parmi les risques **omis** (3), les principaux risques perçus concernent l'instabilité des marchés à l'export, l'augmentation des charges et l'évolution des exigences des filières auxquelles les éleveurs doivent rapidement s'adapter. Les changements au niveau de la PAC sont également redoutés, du fait du poids important des subventions européennes dans les revenus de ces exploitations. Ce sont des risques exogènes à l'exploitation agricole et qui paraissent hors d'atteinte de la portée d'action des éleveurs. Les risques associés à la vente de la production agricole (accès aux marchés et variation des produits) avaient également été omis. Les risques liés à la production fourragère qui n'avaient pas été mentionnés par certaines éleveurs ont été classés comme « importants ». Enfin, d'autres risques ont été omis lors de la première phase de l'entretien : pollution, technologies, prix du foncier, accès au crédit, relation avec le voisinage agricole et non agricole.
- Les principaux risques **éliminés** (4) par les éleveurs sont : les variations des revenus non-agricoles et la gestion du personnel. Ces risques n'ont en effet pas d'objet pour des systèmes reposant sur une main d'œuvre familiale travaillant exclusivement sur l'exploitation agricole.

4.2.2.2. Classification des risques par les éleveurs

Les résultats de la classification des risques par les éleveurs sont présentés dans le Tableau 25 (p. 131). Ce tableau se présente en deux parties : la première propose les résultats de la classification des risques selon leur importance (fort, moyen ou faible), la seconde selon la caractéristique du risque mis en avant par l'éleveur pour justifier son choix (exposition, fréquence ou intensité des dommages).

⁴⁰ Ceci n'est pas étonnant car les pullulations de campagnols terrestres étaient l'objet annoncé de l'entretien. Il y a donc un biais évident mais peu dérangent à ce stade de l'étude : nous avons l'importance qu'ont les pullulations de campagnols pour le fonctionnement des systèmes d'élevage herbager et les tensions qui existent autour de cette question.

- Les risques de marché sont principalement perçus comme d'importance moyenne ou forte, du fait de l'exposition des systèmes d'élevage face à ces risques (volatilité des prix sur les marchés à l'export – lait, broutards).
- Les risques de production (aléas climatiques, maladies, ravageurs) sont majoritairement considérés comme moyen ou forts. Les dommages causés par ces aléas sont perçus comme intenses, mais leur occurrence serait également plus fréquente. Plus spécifiquement, les éleveurs considèrent les risques liés aux ravageurs (campagnols terrestres) comme moyens ou importants du fait des dommages soudains qu'ils peuvent causer aux rendements fourragers (intensité).
- On retrouve logiquement que les aléas personnels sont des risques importants pour la majorité des éleveurs. D'une part, les dommages peuvent être considérables (indisponibilité durable du chef d'exploitation), et d'autre part l'agriculture est un métier où les travailleurs sont exposés à de nombreux risques d'accident professionnel.
- Enfin, les risques liés aux évolutions de la PAC sont perçus comme importants par les éleveurs, du fait de la dépendance des exploitations aux subventions européennes (exposition) et des importantes conséquences que pourrait entraîner une baisse de ces subventions pour les résultats économiques des exploitations (risque de faillite). Les subventions européennes fonctionnent en effet comme un soutien au revenu des exploitations.

4.2.2.3. Gestion des risques affectant les systèmes fourragers

Le risque principal qui affecte les rendements fourragers est le risque de sécheresse : tous les éleveurs l'ont mentionné comme un risque majeur pour les systèmes fourragers. Viennent ensuite les pullulations de campagnols terrestres. Enfin, pour les systèmes qui ne sont pas autonomes pour l'alimentation des bovins, les variations des prix des concentrés et des fourragers constituent un risque non négligeable. Pour faire face à la variabilité des rendements fourragers, plusieurs pratiques peuvent être mises en œuvre à l'échelle de l'exploitation agricole. Le Tableau 26 (p. 132) présente la part des agriculteurs interrogés mettant en œuvre les différentes méthodes de gestion des variabilités des rendements fourragers. L'analyse de ces résultats permet de mieux comprendre les objectifs des éleveurs mais également leur logique face aux aléas impactant leur système fourrager.

Le premier levier de gestion, le plus commun, est d'agir sur la **quantité de fourrage disponible** pour le troupeau. L'objectif est de maintenir le cheptel en l'état, garantissant ainsi le capital productif de l'exploitation, ainsi que de préserver la production en quantité suffisante (les volumes de production construisant le revenu).

- La quasi-totalité des éleveurs ont recours à des achats de fourrages et/ou de concentrés lorsque leur propre production est insuffisante pour assurer les besoins de leur cheptel. Les éleveurs peuvent bénéficier du soutien financier du FNGRA et des collectivités locales (départements et régions) s'il s'agit de pertes liées à un aléa climatique.
- S'ils ont pu réaliser des stocks en sortie d'hiver l'année précédente, les éleveurs les mobilisent pour nourrir le cheptel.
- Quand cela est possible, certains éleveurs modifient le rapport de leurs surfaces fourragères en fauche ou pâture pour augmenter la quantité de fourrages récoltés.
- Très peu d'éleveurs ont acquis des parcelles spécifiquement pour assurer un niveau de production *suite à un aléa* (capitalisant ainsi une surface fourragère de sécurité). Ceci est dû au fait que d'une part le foncier est difficilement accessible et que, d'autre part, un agrandissement de la surface fourragère est un investissement qui s'accompagne souvent d'une augmentation de la taille du troupeau.

Tableau 24 : Perception des risques par les éleveurs enquêtés

	Evoqués (1)	Réfléchis (2)	Omis (3)	Éliminés (4)	Explication(s) possible(s)
Accès marchés	27%	9%	45%	18%	Commercialisation principalement dans des circuits longs, parfois à l'export.
Exigences filières	9%	0%	73%	18%	Evolution rapide des exigences des consommateurs et des filières.
Variation des produits	36%	18%	45%	0%	Marché instable (export : prix très fluctuants, crises sanitaires...).
Variation des charges	9%	0%	73%	18%	Intrants importants (alimentation du bétail, engrais, carburants, ...).
Instabilité à l'export	0%	9%	91%	0%	Dépendance au marché internationaux (concurrence, fin des quotas laitiers).
Grêle	27%	9%	55%	9%	Aléa affectant les prairies et donc les rendements fourragers.
Gel	45%	9%	36%	9%	Aléa affectant les prairies et donc les rendements fourragers
Sécheresse	36%	27%	36%	0%	Aléa affectant les prairies et donc les rendements fourragers
Pluie	18%	9%	27%	45%	Aléa moins impactant pour les rendements fourragers.
Pollution	9%	0%	45%	45%	Système tout herbe moins polluants, mais conscience du rôle écologique de l'agriculture.
Maladies, ravageurs	45%	36%	18%	0%	Campagnols mentionnés parfois en premier élément (thème de l'entretien).
Technologies	0%	0%	64%	27%	Crainte des conséquences non mesurées de l'arrivée des NTIC et des robots.
Revenus non agri	0%	0%	9%	91%	Principalement aucun revenu extérieur à l'exploitation agricole (temps plein).
Variation prix terrains	0%	0%	55%	45%	Selon les besoins d'agrandissement.
Variation des taux	9%	18%	27%	45%	Selon les besoins d'investissement et l'endettement (âge des éleveurs).
Accès au crédit	0%	0%	45%	55%	Selon les besoin d'investissement et les projets (âge des éleveurs).
Politiques locales	18%	0%	27%	55%	Peu de contraintes règlementaires locales sur l'activité agricole.
PAC	18%	9%	73%	0%	Forte incertitude sur l'évolution des subventions indispensables aux élevages.
Aléas personnels	73%	9%	18%	0%	Manque de main d'œuvre pour le travail sur les exploitations.
Gestion du personnel	0%	0%	9%	91%	Système familial employant très peu de main d'œuvre salariée.
Voisinage agri	0%	0%	36%	64%	Bonne entente globale entre éleveurs.
Voisinage non agri	0%	0%	55%	45%	Crainte des problèmes que pourraient poser les populations néorurales.

Légende




	: entre 0% et 40% des réponses
	: entre 40% et 70% des réponses
	: entre 70% et 100% des réponses

Tableau 25 : Classification des risques selon les éleveurs enquêtés

	Classification selon l'importance du risque			Caractéristique du risque mis en avant par l'éleveur		
	Faible (1)	Moyen (2)	Fort (3)	Exposition	Fréquence	Dommmages
<i>Accès marchés</i>	27%	27%	45%	73%	9%	18%
<i>Exigences filières</i>	18%	45%	27%	45%	27%	27%
<i>Variation des produits</i>	0%	45%	55%	36%	18%	45%
<i>Variation des charges</i>	18%	45%	36%	55%	27%	18%
<i>Instabilité à l'export</i>	0%	45%	55%	73%	9%	18%
<i>Grêle</i>	9%	45%	45%	9%	27%	64%
<i>Gel</i>	27%	45%	27%	36%	27%	36%
<i>Sécheresse</i>	0%	18%	82%	18%	55%	36%
<i>Pluie</i>	55%	36%	9%	55%	9%	36%
<i>Pollution</i>	45%	27%	27%	73%	0%	27%
<i>Maladies, ravageurs</i>	9%	27%	64%	18%	9%	73%
<i>Technologies</i>	27%	36%	18%	55%	0%	27%
<i>Revenus non agri</i>	91%	0%	9%	100%	0%	0%
<i>Variation prix terrains</i>	45%	9%	45%	82%	9%	9%
<i>Variation des taux</i>	55%	36%	9%	91%	0%	9%
<i>Accès au crédit</i>	64%	36%	0%	82%	9%	9%
<i>Politiques locales</i>	55%	18%	27%	55%	18%	18%
<i>PAC</i>	0%	18%	82%	45%	9%	45%
<i>Aléas personnels</i>	9%	18%	73%	45%	9%	45%
<i>Gestion du personnel</i>	91%	9%	0%	100%	0%	0%
<i>Voisinage agri</i>	64%	27%	9%	82%	0%	9%
<i>Voisinage non agri</i>	45%	18%	36%	64%	0%	36%

Légende




	: entre 0% et 40% des réponses
	: entre 40% et 70% des réponses
	: entre 70% et 100% des réponses

Tableau 26 : Leviers de gestion de la variabilité des rendements fourragers par les éleveurs enquêtés

Achat de fourrages	91%
Achats de concentrés	91%
Mobilisation de stocks de fourrages	82%
Modification de l'itinéraire technique (fauche/pâturation)	73%
Mobilisation des réserves corporelles de certains animaux	55%
Modification de l'assolement	55%
Épargne de précaution	45%
Réduction du cheptel (accélération de réformes)	27%
Acquisition de parcelles	9%
Assurance « prairies »	0%

Le second levier de gestion consiste à agir sur les besoins du cheptel et les quantités distribuées, *i.e.* la **consommation du troupeau**. L'objectif est d'économiser du fourrage. Les éleveurs préfèrent toutefois ne pas recourir à ces pratiques.

- La moitié des éleveurs enquêtés peuvent réduire ponctuellement l'alimentation d'une partie de leur troupeau (souvent le troupeau de renouvellement) et compter sur la mobilisation des réserves corporelles des animaux. Cependant, ils ne réduiront l'alimentation du troupeau productif qu'en cas d'extrême nécessité, car cela entraîne une perte de production, un défaut vis-à-vis de leurs clients et *in fine* une perte de revenu qui peut être durable.
- En revanche, la réduction du cheptel n'est pas une option privilégiée par les éleveurs : d'une part, le cheptel est un capital précieux pour l'exploitation qui se construit sur le temps long, d'autre part, ils souhaitent maintenir leur production à un niveau suffisant pour honorer leurs contrats. Seules quelques réformes d'animaux en fin de production pourront être accélérées.

Enfin, le troisième levier de gestion revient à **s'assurer, au sens large du terme**, contre les aléas impactant la production fourragère.

- Un peu moins de la moitié des éleveurs enquêtés ont déjà mis en place une épargne de précaution dans une logique d'auto-assurance (DPE). Cependant, la fragilité des revenus d'exploitation et des trésoreries ne permet souvent pas aux éleveurs de renflouer systématiquement une épargne de précaution.
- Aucun des éleveurs enquêtés n'a souscrit à un contrat d'assurance Prairies. Un écueil de ces contrats d'assurance mentionnés par les éleveurs est qu'ils assurent le manque ou l'excès de température, ainsi que le manque d'eau (sécheresse), mais pas les risques de grêle ni les pullulations de campagnols terrestres. L'usage de données satellite pour déterminer les dommages est également perçue par certains éleveurs comme la source d'un risque de sous-indemnisation (risque de base).

4.2.3. Discussion : des systèmes fourragers vulnérables et peu flexibles

4.2.3.1. Des systèmes fourragers plus vulnérables

Au sortir de la Seconde guerre mondiale a été initiée une « révolution fourragère » dont l'objectif était d'accroître la production herbivore grâce à une augmentation de la production fourragère et de sa valorisation par l'animal (Huyghe, 2009; Perrot *et al.*, 2005). Cette révolution fourragère a été accompagnée d'une forte diminution de l'emploi dans l'élevage et du nombre d'exploitations. A titre d'exemple, le nombre d'exploitations possédant un atelier de production bovine a chuté de 92% entre 1960 et 2007, passant de 2,5 millions à 190 000. Les forts gains de productivité ont permis d'augmenter la production de lait et de viande, notamment en augmentant la taille des troupeaux et en spécialisant

les exploitations d'élevage. A l'échelle nationale, de grandes tendances de la révolution fourragère ont été identifiées dans la littérature (Huyghe, 2009; Lemaire et Pflimlin, 2007) (Figure 40) : la diminution des surfaces en prairies permanentes (−30% entre 1970 et 2000), le développement de certaines cultures fourragères annuelles, en particulier du maïs ensilage (83% des quelques 1,67 millions d'ha de cultures fourragères en 2005), la disparition des racines et tubercules fourragers (betterave fourragère) ainsi que la très forte diminution des légumineuses fourragères pérennes en prairies artificielles (luzerne, trèfle violet, sainfoin).

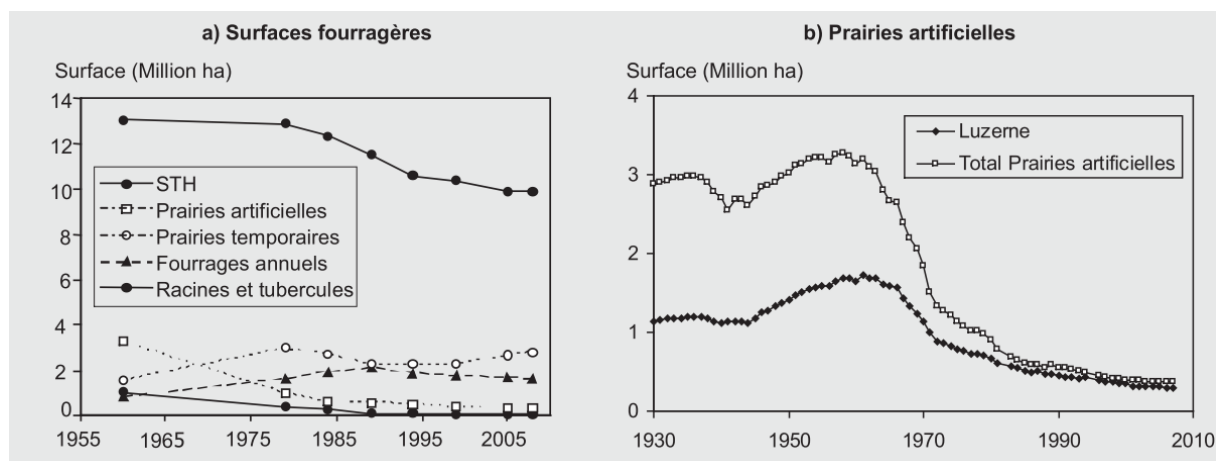


Figure 40 : Evolution des surfaces nationales a) de prairies et cultures fourragères et b) détail pour les prairies artificielles au cours des dernières décennies (Huyghe, 2009)

Ces évolutions des systèmes fourragers correspondent à la logique développée dans l'après-guerre : « l'idée dominante était la composition de stocks fourragers en utilisant les leviers que sont le choix de l'espèce, de la fertilisation, de la variété, pour laquelle le principal critère de sélection devait donc être le rendement » (Huyghe, 2009). D'importants progrès techniques ont été réalisés, que ce soit pour la gestion du pâturage, la récolte (mécanisation permettant par exemple l'accélération de la vitesse de séchage) ou la conservation des fourrages (notamment, le développement de l'ensilage et de l'enrubannage). L'ensilage a permis de s'extraire d'une partie du risque climatique affectant les conditions de séchage du fourrage, mais cette technique se limite à certaines cultures (maïs, ray-grass d'Italie) dont les caractéristiques permettent une baisse rapide du pH (contrairement, par exemple, aux légumineuses comme la luzerne, ce qui peut expliquer la chute de son usage). Aujourd'hui encore des innovations, comme le séchage en grange, se perfectionnent et offrent de nouvelles opportunités pour la sécurisation de la production fourragère face aux aléas climatiques affectant la récolte. Toutefois, tous les types de fourrages, que ce soit par leur composition ou leur mode de conservation, n'ont pas les mêmes qualités alimentaires en termes de teneur en protéine ou en énergie (Huyghe, 2009). Ils ne sont donc pas parfaitement substituables pour la composition des rations alimentaires des animaux. Il est notable que les fourrages pâturés sont plus riches à la fois en énergie et en protéines que les fourrages récoltés et permettent une bonne productivité à l'hectare, ce qui devrait inciter les éleveurs à allonger au maximum la durée de pâturage de leurs troupeaux (Mosimann *et al.*, 2017).

Ces évolutions fourragères ont toutefois été différentes selon les caractéristiques des territoires et les choix productifs locaux (Figure 41). Il est intéressant de noter que la STH (surface toujours en herbe) a fortement diminué dans la moitié nord-ouest du pays, et s'est maintenue voire a augmenté dans les zones de montagne (Massif Central, Jura, Vosges). Les cultures fourragères annuelles (notamment le maïs ensilage) ont fortement augmenté en Bretagne et en périphérie du Bassin parisien mais se sont raréfiées dans les territoires de moyennes montagnes (Jeanneaux *et al.*, 2019). Ces changements dans l'assolement ont accompagné la disparition de la polyculture-élevage, au profit d'élevages plus

spécialisés. Cette spécialisation s'est effectuée selon les caractéristiques des conditions pédoclimatiques à accueillir efficacement les différentes cultures fourragères.

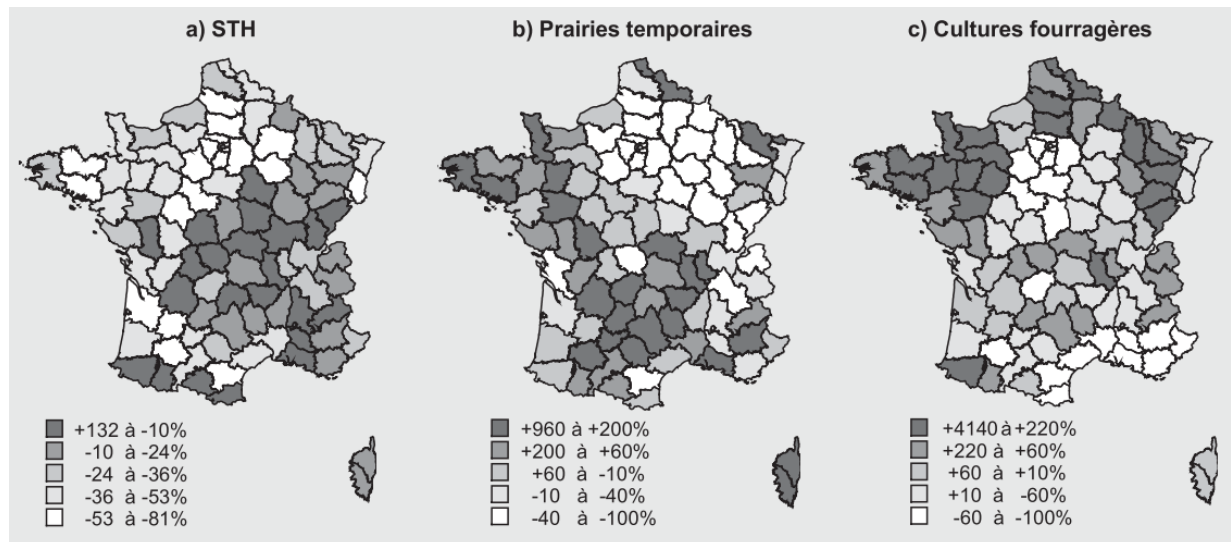


Figure 41 : Evolution des surfaces a) de STH, b) de prairies temporaires, c) de cultures fourragères annuelles entre 1960 et 2005 dans les différents départements français (en % de 1960 ; les départements en gris foncé sont ceux où les surfaces se sont maintenues, voire ont augmenté), d'après Huyghe (2009)

Ces modifications des systèmes fourragers ne sont pas sans conséquences : Lemaire et Pflimlin (2007) constatent que « *l'intensification animale et fourragère, l'accroissement de la taille des troupeaux et leur spécialisation ont rendu les systèmes d'élevage de plus en plus vulnérables.* » Les systèmes herbagers, reposant sur une ressource fourragère principale peu souple et ne disposant que peu de ressources de substitution, sont considérés comme plus sensibles à la sécheresse. En ce sens, la disparition des cultures de céréales, tant à destination humaine qu'animale, de la plupart des régions herbagères a supprimé un élément essentiel de flexibilité des systèmes fourragers et de diversification économiques des territoires : c'est le cas dans le Massif Central (Jeanneaux *et al.*, 2019).

La révolution fourragère aura donc permis d'augmenter la productivité et les rendements des productions animales, notamment grâce à la spécialisation des fermes et des territoires. Mais force est de constater aujourd'hui que ces changements techniques sont également la cause de risques accrus pour les systèmes d'élevage. D'une part, la disparition de cultures fourragères plus résistantes à la sécheresse aura accentué la dépendance des systèmes fourragers à des cultures (maïs, prairie permanente) plus sensibles au climat mais aussi aux importations de matières riches en protéines (soja), rendant ces systèmes fourragers plus vulnérables face aux risques climatiques et aux risques de marché. D'autre part, en spécialisant les territoires, l'augmentation de la part de prairies permanentes en Auvergne a causé l'émergence d'un nouveau risque auquel les systèmes fourragers sont particulièrement sensibles : les pullulations de campagnols terrestres (voir 1.1.3, p. 32).

Lemaire et Pflimlin (2007) ont analysé les sécheresses de 1976 et de 2003 ainsi que les adaptations stratégiques (plan de l'année) et tactiques (changements au cours d'une campagne) que les éleveurs ont opérée pour faire face à ces aléas climatiques forts (Tableau 27).

Tableau 27 : Comparaison des sécheresses de 1976 et de 2003, d'après Lemaire et Pflimlin (2007)

	1976	2003
Déficit fourrager	Perte d'1/3 de la production pour les 2/3 du pays, qui concerne la disponibilité de la ressource au pâturage mais aussi les fourrages conservés (absence de 2 ^e coupe).	Pertes de 20% de la production fourragère selon l'Institut de l'Élevage (10% de baisse de rendement pour le blé et le maïs, 10 à 30% pour les prairies). Rendements de 1 ^e coupe diminués de 50%. 2 ^e coupes rares.
Modalités de gestion de crise	Animaux rentrés et nourris en bâtiments deux mois plus tôt par rapport à une année moyenne. Déficit fourrager couvert par 1/4 de paille, 1/4 par de l'ensilage de céréales, des cultures dérobées ou un pâturage prolongé ; 1/4 par l'achat de céréales et de concentrés supplémentaires ; 1/4 par la décapitalisation, le tarissement précoce des vaches ou une restriction alimentaire plus sévère (génisses notamment).	Recours à l'ensilage de maïs initialement destiné au grain, à l'achat de paille et au stockage de céréales, à l'achat de formes plus concentrées (pulpes, luzerne déshydratée et divers coproduits). Versement d'une aide publique pour compenser le manque à gagner.
Caractéristiques de l'assolement fourrager	18 millions d'hectare de surfaces fourragères : 73% de prairies permanentes, 20% de prairies temporaires et artificielles, 7% de fourrages annuels (betteraves, choux, colza et maïs ensilage).	Surface fourragère de 15 millions d'hectares : 66% de prairies permanentes, 20% de prairies temporaires, 9% de maïs ensilage.

Si, en 1976, l'assolement fournissait une nette diversité de cultures fourragères, dont certaines assez résistantes à la sécheresse comme la luzerne et la betterave, en 2003, la disparition quasi-totale de la luzerne et de la betterave a renforcé la sensibilité des systèmes fourragers à la sécheresse. De plus, les cheptels herbivores ont été modifiés, avec un troupeau laitier plus productif et nettement plus dépendant de l'ensilage de maïs, et un développement du troupeau allaitant. Ces éléments sont des facteurs d'augmentation de la vulnérabilité des systèmes fourragers face aux aléas climatiques.

4.2.3.2. L'indispensable assimilation des risques pour sécuriser les systèmes fourragers

Les résultats de nos entretiens tendent à montrer des perceptions des risques assez homogènes chez les éleveurs enquêtés. Cela n'est pas étonnant puisqu'ils pilotent des systèmes analogues (élevage bovin en système herbager), bien que situés dans des petites régions agricoles différentes : ils sont exposés à des contraintes et à des risques de même nature. Toutefois, nous notons une certaine hétérogénéité dans la classification des risques par les éleveurs, c'est-à-dire lors de l'objectivation de leur prépondérance pour leur système d'élevage. Cette hétérogénéité met en évidence que les systèmes, s'ils sont analogues, ne sont pas pour autant identiques et ne présentent pas les mêmes vulnérabilités face à ces risques.

L'équation posée pour la gestion d'un système fourrager apparaît pourtant simple :

$$\text{production fourragère} = \text{besoins du troupeau}$$

C'est une équation simple, certes, mais dont la résolution est soumise à de nombreuses contraintes ou aléas, et s'inscrit dans un processus dynamique, de sorte que les plans de production initiaux peuvent être remis en cause en cours de campagne. Petit (1971) ainsi que Lemaire et Pflimlin (2007) mettent en évidence deux niveaux dans le processus de décision : les décisions « stratégiques » sont prises en début de campagne et déterminent le plan de production sous les contraintes connues ; les décisions « tactiques » correspondent aux ajustements de ce plan au cours d'une campagne, en fonction de la réalisation d'aléas. Ainsi, les systèmes fourragers, dans leur conception, doivent être suffisamment flexibles et plastiques pour permettre à l'éleveur des adaptations temporaires ou de plus long terme, afin de répondre à ces aléas qui, pour certains, se font de plus en plus fréquents, pour ne pas dire récurrents. De ce fait, l'une des difficultés de cette période de « changement global » (Rigolot *et al.*, 2019) pour les systèmes d'élevage semble être d'intégrer, d'assimiler au sens d'Alcaras et Lacroux (1999), ce qui ne correspond désormais plus à des événements aléatoires mais davantage à des tendances (dérèglement climatique, émergence de risques sanitaires, volatilité accrue des prix).

L'exemple du risque climatique est pertinent pour illustrer cela. Il est le principal risque affectant les systèmes fourragers (Aubron *et al.*, 2010), notamment les sécheresses (déficit hydrique) et le gel. L'eau est un facteur important pour la production de fourrages, que ce soit l'herbe ou le maïs (Lemaire et Pflimlin, 2007). Par exemple, les pertes moyennes en année de sécheresse correspondent à 50% de la production herbagère en quantité (Rugé *et al.*, 2006). Le stress hydrique a également des impacts sur les teneurs en nutriments et la valeur nutritive du fourrage (Mosimann *et al.*, 2017). De plus, les dommages causés aux prairies par les campagnols terrestres sont d'autant plus significatifs que les conditions climatiques sont défavorables aux rendements fourragers (Quéré *et al.*, 1999). Le risque de sécheresse semble s'accroître, devenant de plus en plus fréquent : 2017, 2018 et 2019 ont récemment été des années très sèches, avec des déficits hydriques enregistrés entre 25% et 40% en Auvergne en 2019⁴¹. Cette répétition d'aléas climatiques est fortement redoutée par les éleveurs (Mosimann *et al.*, 2017). Les données de Météo France montrent que les surfaces affectées par la sécheresse en France chaque année ont tendance à augmenter, notamment depuis le début des années 1990 (Figure 42) : la moyenne décennale est systématiquement supérieure à celle enregistrée entre 1961 et 1990, ce qui démontre qu'il s'agit bien d'une tendance et non d'événements climatiques exceptionnels. Des projections ont été réalisées par l'Institut de l'Élevage pour déterminer, à horizon 2050, les effets du dérèglement climatique sur la pousse de l'herbe (Figure 43) : d'une part, la croissance de l'herbe aurait lieu plus tôt dans l'année, à une période où les conditions de récolte (pluviométrie) demeurent incertaines ; d'autre part, les sécheresses estivales accrues réduiront drastiquement la productivité des prairies notamment en deuxième coupe.

Ces tendances climatiques confirment la pertinence d'un changement d'échelle pour l'analyse des risques affectant la production fourragère. Nous proposons une nouvelle équation pour rendre compte des enjeux de gestion qui concernent aujourd'hui les systèmes fourragers que nous étudions :

$$\underbrace{\text{résistance} + \text{flexibilité}}_{\text{court terme}} + \underbrace{\text{plasticité}}_{\text{moyen terme}} = \text{résilience}$$

⁴¹ www.lameteoagricole.net

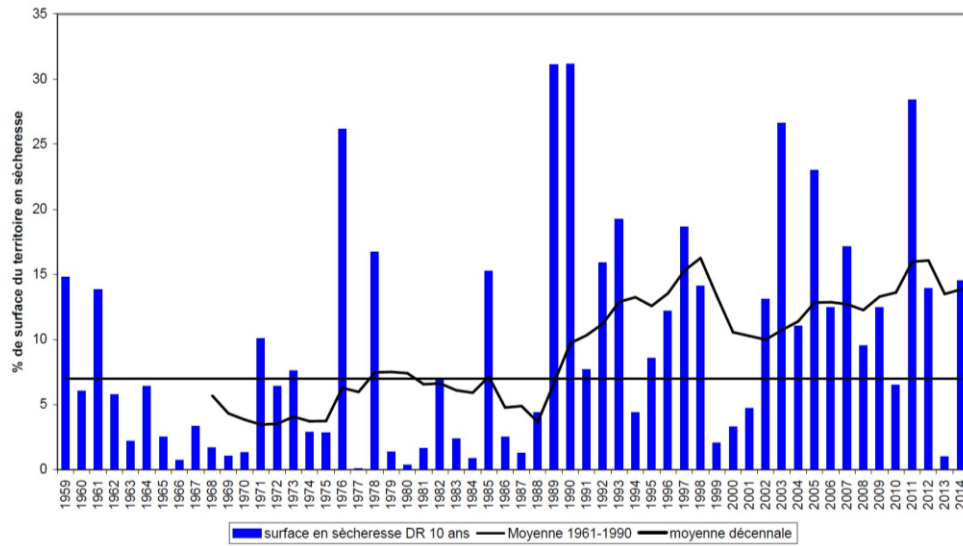


Figure 42 : Surface annuelle de la France touchée par la sécheresse entre 1959 et 2014. Source : Météo France

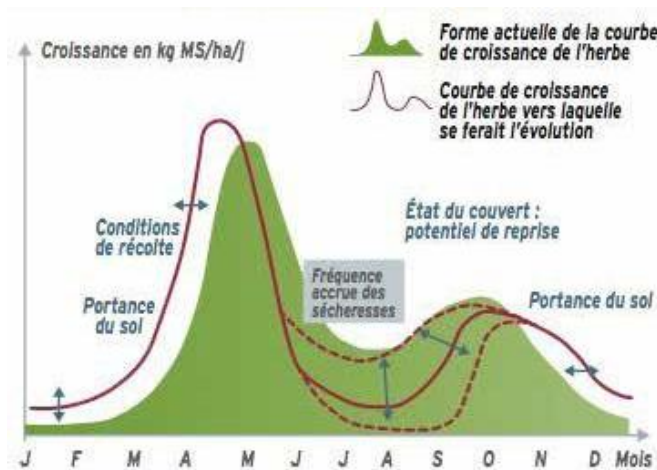


Figure 43 : Effets attendus du dérèglement climatique sur la pousse de l'herbe à horizon 2050 (source : Institut de l'Élevage)

Nos enquêtes montrent que les craintes des éleveurs sont tournées vers des enjeux de court terme. Les éleveurs enquêtés craignent très fortement les aléas personnels qui les empêcheraient de travailler sur l'exploitation : d'une part, dans les systèmes d'élevage herbagers la main d'œuvre est un facteur de production important et d'autre part, le recours au salariat y est moins développé que dans d'autres productions (maraîchage ou grandes cultures). L'ensemble du système repose donc sur la main d'œuvre familiale. De plus, la main d'œuvre sur les exploitations d'élevage tend à se raréfier, et la charge de travail reposant sur le chef d'exploitation est importante. L'indisponibilité soudaine de cette main d'œuvre mettrait le système en danger immédiat, d'autant plus que les revenus de l'exploitant proviennent exclusivement de son activité d'élevage (pas de diversification avec des revenus non-agricoles).

Les risques affectant les rendements fourragers (ravageurs, grêle, gel, sécheresse) sont également redoutés par les éleveurs, car la production fourragère constitue la base de leur système, mais aussi un poste majeur de charges en cas de disponibilités insuffisantes (achats extérieurs). Nourrir le troupeau est un enjeu de court terme auquel l'éleveur ne peut se soustraire. En effet, les besoins des troupeaux sont souvent une donnée stable de l'équation de gestion des systèmes fourragers, au moins à court terme. D'une part, le troupeau correspond à une part importante du capital de l'exploitation que l'éleveur a intérêt à conserver ; d'autre part, le marché incite individuellement les éleveurs à

maintenir voire augmenter leurs volumes de production (voir modèle du *Cobweb*, p. 43). Ainsi, comme le montrent nos enquêtes menées en 2018, les éleveurs sont peu enclins à modifier la composition de leur troupeau productif à court terme. Toutefois, nous avons pu constater lors des sécheresses des étés 2018, 2019 et 2020 que des éleveurs, faute de rendement, de stock et de trésorerie, se sont résolus à vendre une partie de leur cheptel *productif*, quitte à hypothéquer leurs capacités de production pour les années suivantes. La rigidité de la composante animale du système fourrager impose aux éleveurs d'établir une stratégie de gestion à court terme de la composante fourragère : d'une part, disposer de ressources pour être suffisamment résistant (trésorerie, stocks), d'autre part, concevoir un système suffisamment flexible pour s'adapter rapidement (allocation des surfaces).

Moreau *et al.* (2014) ont déterminé l'ensemble des leviers qu'un système fourrager peut mobiliser pour gérer le risque de sécheresse (Figure 44). Ces leviers sont d'ordre agronomique (gestion du pâturage, diversification de l'assolement, réalisation de stocks de sécurité, transition vers la polyculture-élevage...), zootechnique (choix des races, allotement, gestion des réformes...) ou économique (trésorerie, assurance). L'importance et la diversité des leviers ainsi présentés ne doivent cependant pas nous conduire à penser que tous les systèmes fourragers, en toute circonstance, peuvent mobiliser chacun de ces leviers. En effet, d'une part, certains de ces leviers concernent des actions de prévention, et doivent être mis en œuvre avant la survenance des perturbations, et d'autre part, certains d'entre eux ne peuvent être mis en œuvre que sur le moyen terme. Ainsi Moreau *et al.* (2014) classent-ils ces leviers selon les deux axes prévention (*ex-ante*)/compensation (*ex-post*) et court terme/moyen terme. De plus, certains de ces leviers ne pourront être mis en œuvre par des systèmes fourragers soumis à de fortes contraintes de sol, de pente, de climat, ou bien encore des contraintes posées par certaines filières (exemple : production « tout foin »).

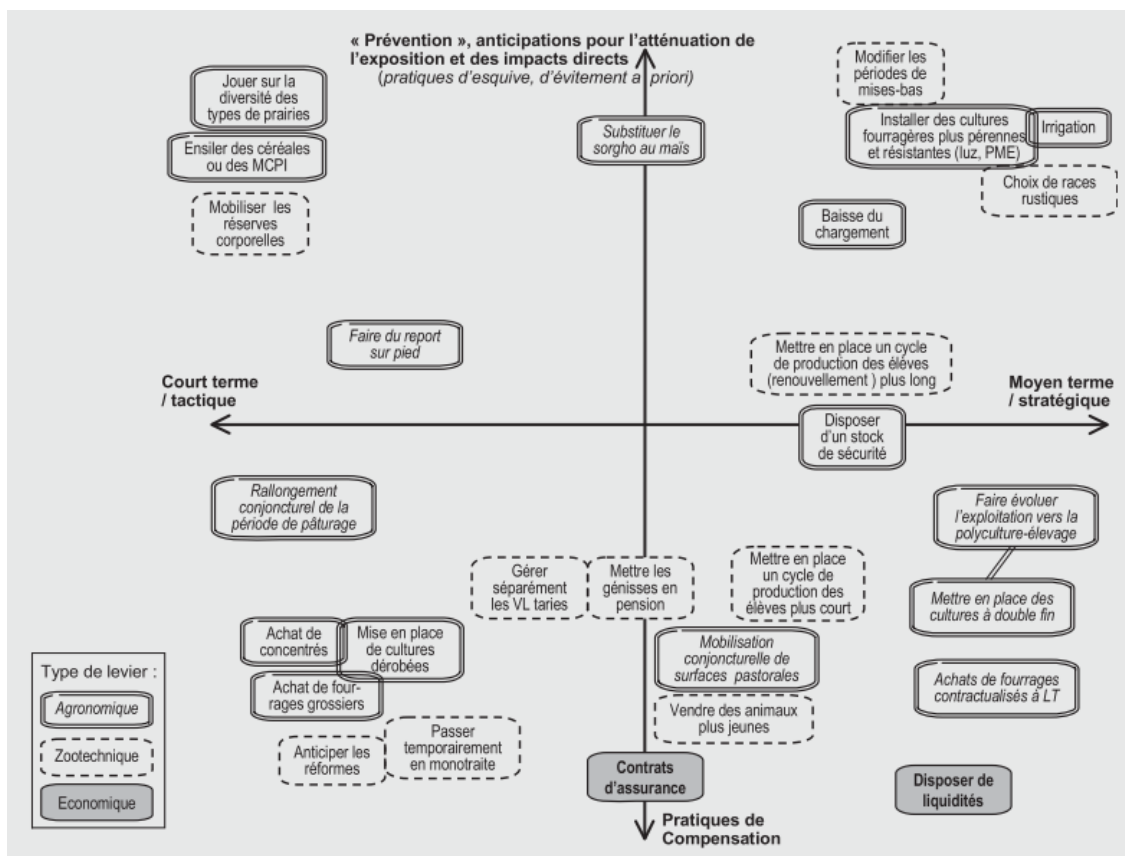


Figure 44 : Schéma de positionnement de différents leviers de sécurisation par rapport à la sécheresse, selon 2 axes : tactique/stratégique, prévention/compensation (Moreau *et al.*, 2014)

Si Lemaire et Pflimlin (2007) envisagent également de nombreux leviers permettant la flexibilité des systèmes fourragers possédant un potentiel de diversification (céréales immatures, légumineuses...), pour les systèmes herbagers, c'est-à-dire ne cultivant quasiment aucune céréale ou légumineuse annuelles, seule une gestion sécuritaire du pâturage et des stocks peut fournir des éléments de flexibilité, et ceci au prix d'un chargement animal plus faible et donc sous-optimal. Faire varier les périodes de pâturage peut apporter plus de sécurité au système fourrager : plus la période de pâturage est longue, moins le besoin en stocks est important. Le pâturage hivernal peut constituer une adaptation intéressante dans certaines régions, dépendamment du climat et de la portance du sol. Le pâturage peut également être allongé en supprimant une fauche tardive en été (repousse de plus de 50 jours). Il n'est cependant pas possible d'envisager de baisser la taille du cheptel en-deçà d'un certain seuil de rentabilité économique permettant de faire face aux charges de structure et de dégager un revenu (voire des capacités d'investissement). Lemaire et Pflimlin (2007) mettent ainsi en évidence la nécessité de « *pratiques de sauvegarde* », comme le recours à des achats de paille, de foin et de concentrées « *dans le cadre de solidarités régionales ou nationales* », si l'exploitation ne dispose pas d'un stock de sécurité de fourrages secs, forme d'auto-assurance individuelle ou collective (solidarité locale).

Dobremez *et al.* (2008) ont mené des enquêtes auprès d'éleveurs en zone de montagne en Auvergne pour connaître les leviers qu'ils mobilisaient afin de gérer leur système fourrager. Il en ressort notamment que l'utilisation de l'espace est fortement déterminée par la distance de la parcelle à la salle de traite et par la proportion de surface fauchable dans la surface fourragère, les parcelles proches de la salle de traite étant majoritairement dédiées au pâturage. Les principales contraintes s'appliquant au système fourrager sont donc la distance à la salle de traite et la fauchabilité des parcelles. Ainsi, la sécurisation du système fourrager passe par l'ajustement du dimensionnement des ateliers de fauche et de pâture ainsi que par l'ordonnement de la succession des parcelles pâturées. La capacité d'ajustement est croissante avec la diversité du parcellaire et de ses caractéristiques. Les leviers mobilisés par l'éleveur pour piloter son système fourrager seront fondamentalement dépendants de cette capacité d'ajustement :

- Si le parcellaire est peu diversifié mais très souple d'utilisation, il est possible de planifier la gestion du système fourrager, d'effectuer des changements d'utilisation des parcelles d'une année sur l'autre mais aussi d'effectuer des ajustements du dimensionnement en cours de campagne. Les leviers de sécurisation sont davantage internes au système fourrager, même si le recours à des leviers externes est possible en cas de forte perturbation.
- De la même manière, si le parcellaire est très diversifié et très souple d'utilisation, il est possible d'élaborer une planification souple du système fourrager, avec des changements d'utilisation des parcelles d'une année sur l'autre et des ajustements possibles en cours de campagne (dimensionnement et ordonnancement). Dans ce cas, les leviers de sécurisation sont internes au système et reposent sur des règles de décision très élaborées.
- Si le parcellaire a une forte diversité mais une faible souplesse d'utilisation, le système est contraint à une planification rigide, c'est-à-dire de conserver une utilisation du parcellaire identique d'une année sur l'autre. La sécurisation du système fourrager n'est possible que par des reports de stock ou le recours à des leviers externes.
- Enfin, si le système est contraint par une faible diversité du parcellaire et une forte rigidité d'utilisation, alors l'utilisation de l'espace est constante d'une année sur l'autre. Les leviers de sécurisation sont principalement des régulations interannuelles (report de stock) ou des leviers externes (achat de fourrages).

Ainsi, de nombreux systèmes fourragers du Massif Central s'avèrent en réalité peu résistants (chargement élevé imposé par les conditions de marché, peu de capacité de stockage, faibles trésoreries, pas d'épargne de précaution) et peu flexibles dans l'utilisation de leurs parcelles (contraintes pédoclimatiques, de pente, de distance aux bâtiments, exigences de certaines filières ou AOP...). A plus long terme, l'enjeu pour ces élevages est de gagner en résistance et en flexibilité. Pour cela, ils doivent mobiliser ou créer de nouvelles capacités d'adaptation plastique afin de transformer leurs finalités et leurs structures : gagner en autonomie fourragère, générer davantage de valeur ajoutée (différenciation des produits), etc. Or, d'une part, il ressort de nos enquêtes que les systèmes fourragers sont soumis à d'importantes contraintes (disponibilité du foncier, trésorerie, travail, débouchés) qui limitent leurs possibilités de planifier complètement l'adaptation plastique aux risques auxquels ils sont exposés. D'autre part, développer une capacité d'adaptation a un coût pour le système fourrager et « *conduit inévitablement à une sous-utilisation des surfaces, c'est-à-dire à une baisse du chargement animal* » (Lemaire et Pflimlin, 2007), ce qui peut être considéré, du point de vue économique, comme une situation sous-optimale d'usage des facteurs de production.

Face aux enjeux croissants d'un pilotage de plus en plus fin et réactif des systèmes agricoles, l'une des pistes actuellement explorée pour sécuriser la production est l'intégration de NTIC, Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication. La section suivante (4.3) propose, d'une part, d'explorer l'intégration de NTIC dans les systèmes agricoles, et d'autre part, d'évaluer la pertinence d'une solution de surveillance des populations de campagnols terrestres incluant un drone.

4.3. Les NTIC au service de la gestion des risques

4.3.1. L'essor des NTIC en agriculture : une tendance lourde ?

4.3.1.1. La modernisation, réponse historique pour relever le défi alimentaire

L'agriculture a cette image persistante d'un monde à part, déconnecté. Pourtant, deux révolutions agricoles ont déjà secoué les pratiques paysannes et accompagné les révolutions industrielles : une première au XVIII^e siècle puis une seconde au XX^e siècle, avec l'avènement de la motorisation et de la chimie de synthèse (Bourgeois et Demotes-Mainard, 2000; Mazoyer et Roudart, 2002; Regnault *et al.*, 2012). Ces changements dans l'organisation de la production agricole répondaient principalement à des enjeux de sécurité alimentaire. Alors que la production alimentaire par habitant n'a jamais été aussi élevée, la sous-nutrition progresse de nouveau depuis 2015 pour retrouver son niveau des années 2010-2011 (Bendjebbar *et al.*, 2019). Cette insécurité alimentaire grandissante trouve son origine dans la multiplication des sécheresses mais aussi dans un inégal accès aux ressources alimentaires du fait de la pauvreté croissante parmi des populations déjà vulnérables (FAO *et al.*, 2019). Les systèmes alimentaires mondiaux sont soumis à des risques croissants qui touchent particulièrement les pays du Sud (Bendjebbar *et al.*, 2019).

Depuis les années 1990, une nouvelle phase de modernisation agricole intégrant les nouvelles technologies (biotechnologies, numérique, robotisation...) a débuté, au point d'envisager une « troisième révolution agricole » sur ces bases (Regnault *et al.*, 2012). Toute innovation diffusée largement a historiquement émergée dans un contexte économique difficile, exogène et source d'incertitudes : innover est un moyen de s'extraire d'une situation de crise et/ou d'incertitude (Petit, 2015). Aujourd'hui, l'essor du numérique concerne pleinement le monde agricole, et les changements sous-jacents sont nombreux et rapides. Les NTIC, Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, se développent fortement en agriculture : entre 2013 et 2015, l'accroissement de l'utilisation des applications professionnelles par les agriculteurs possédant un smartphone a été de 110%. En 2013, 46% des céréaliers avaient déjà équipé leurs tracteurs en GPS. 79% des agriculteurs utilisent internet, notamment pour les démarches PAC (90% des agriculteurs) et pour consulter les prévisions météorologiques (76% des agriculteurs). Enfin, parmi les « agriculteurs connectés », 70%

installent des applications professionnelles sur leur tablette ou smartphone, et 79% reconnaissent l'utilité des nouvelles technologies pour l'agriculture (Bournigal *et al.*, 2015; Isaac et Pouyat, 2015). Ainsi, les agriculteurs sont friands d'innovations technologiques et sont parmi les premiers à adopter de nouvelles technologies pour améliorer leur quotidien sur leur propre exploitation, mais également pour échanger entre eux (essor des forums de discussion agricoles) ou avec la société en partageant leur quotidien (réseaux sociaux). Cette tendance à l'adoption des nouvelles technologies par les agriculteurs se vérifie dans d'autres pays européens, en Allemagne par exemple (Michels *et al.*, 2019). De plus, le nombre de publications scientifiques traitant de l'agriculture de précision a fortement augmenté depuis les années 1960, et en particulier depuis une vingtaine d'année (Figure 45).

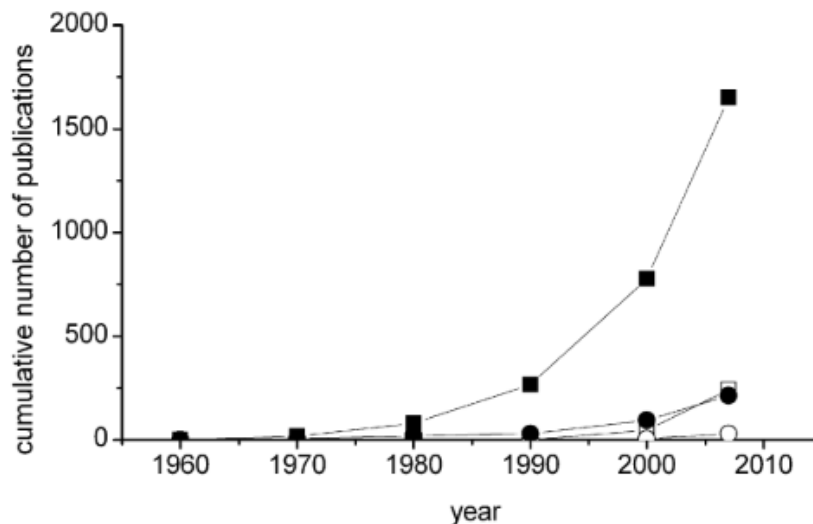


Figure 45 : Nombre cumulé de publications scientifiques concernant l'agriculture de précision entre 1960 et 2006 (Schellberg *et al.*, 2008). Carrés pleins = « precision » et « agriculture », carrés vides = « precision agriculture », ronds pleins = « precision » et « agriculture » et « prairies », ronds vides = « precision agriculture » et « prairies ».

4.3.1.2. Quelles innovations pour l'agriculture ?

Les innovations véhiculées par les NTIC balayent un large spectre et concernent l'acquisition, le stockage, l'échange et le traitement de données nouvelles et nombreuses, obtenues par des équipements embarqués (tracteurs connectés...) ou par des solutions type drone ou satellite (télédétection). Du fait du gain important de précision par rapport aux images satellite, les drones sont de plus en plus utilisés, par exemple, pour acquérir des données sur l'état hydrique ou azoté des cultures. Toutes ces données peuvent être aisément géolocalisées et ce à une précision pouvant être centimétrique. Mais ces innovations peuvent tout aussi bien concerner plus simplement l'amélioration de capteurs météorologiques pour une prévision plus précise des conditions locales et donc une gestion plus fine de l'irrigation ou des dates de semis, de récolte, etc. (proxidtection). Elles peuvent aussi être un simple système d'alerte par SMS.

En élevage, des colliers de détection des chaleurs peuvent être installés sur les animaux et ainsi gérer plus précisément (et depuis son bureau) la mise à la reproduction des femelles. Il en va de même pour l'anticipation des vêlages, grâce au suivi de la température des vaches prêtes à vêler. Les robots de traite sont équipés d'une série de capteurs capables de suivre en temps réel l'état sanitaire de chaque animal, identifié par une boucle électronique, mais aussi d'optimiser la ration selon les besoins et la production de chaque individu. Toutes ces informations sont transmises à l'agriculteur grâce aux applications de son smartphone, sa tablette ou aux logiciels installés sur son ordinateur. C'est un gain de confort indéniable pour des métiers de l'élevage exigeants, qui demandent une forte disponibilité pour surveiller le troupeau et intervenir si besoin.

Ces nouvelles connaissances acquises grâce aux NTIC devraient permettre l'émergence de nouveaux outils d'aide à la décision (OAD) dont l'objectif principal est un gain de temps, de précision et d'efficacité. Pour illustrer la pertinence des NTIC, les enjeux de la triple performance (économique, écologique et sociale) de l'agriculture sont souvent mis en avant : les décisions que doit prendre l'agriculteur sont de plus en plus complexes et intègrent de plus en plus d'éléments internes ou externes au système agricole (Bournigal *et al.*, 2015). Ainsi, les défenseurs de la « révolution numérique » en agriculture y voient un renouveau pour l'attractivité des métiers de l'agriculture (Isaac et Pouyat, 2015).

4.3.1.3. L'innovation au service du progrès ?

Mais l'intégration de NTIC dans les systèmes agricoles n'est pas sans conséquence pour le fonctionnement des systèmes agricoles, et surtout les modes de prise de décision. C'est une réelle transformation du métier d'agriculteur qui se dessine : « *la mise en œuvre des innovations agronomiques est indissociable de phénomènes sociaux, juridiques et politiques et de conséquences, voire de rétroactions, environnementales et paysagères* » (Regnault *et al.*, 2012).

Certains groupes, comme le réseau paysan InPact, alertent quant à la perte de « souveraineté technologique » des paysans pour piloter leur système (InPact, 2017, 2016). En effet, les solutions d'agriculture numérique sont aujourd'hui proposées par les plus grandes multinationales du secteur agricole : Monsanto, Pioneer, John Deere, AGCO (Massey Ferguson), CNH Industrial (New Holland), Google... (Bournigal *et al.*, 2015; Isaac et Pouyat, 2015). Si l'agriculture numérique se développe principalement avec des start-ups, les industries de l'agroalimentaire sont actionnaires (parfois majoritaires) de ces entreprises. La question de la propriété et de l'usage des données se pose de plus en plus fortement, si bien que dans certains pays, comme le Danemark, ce sont les agriculteurs qui gèrent eux-mêmes ces données. La question de la libre décision se pose, comme le montre ce commentaire du président d'Airinov, start-up française leader du marché de drones agricoles, cité par Isaac et Pouyat (2015) : « *La télédétection permet de mieux gérer la fertilisation. Les agriculteurs reçoivent une cartographie des besoins en engrais et, s'ils sont équipés, elle est intégrée directement dans leur tracteur connecté qui apporte tout seul la bonne dose d'engrais* ». Quand bien même la solution technologique sera totalement intégrée à l'exploitation, sans intervention d'un tiers extérieur, la décision est en réalité guidée par l'algorithme qui traite l'information. Il est aisé de voir que, dès lors, l'agriculteur est dépossédé des deux premières étapes du processus de décision tel que conçu par Simon (1960) : l'acquisition et le traitement des données, à savoir la phase d'*Intelligence*. L'agriculteur se contente alors de « choisir » d'appliquer ou non la préconisation produite par la technologie. De même, des éleveurs refusent d'adopter des technologies qui réduiraient le lien qu'ils entretiennent avec leurs animaux ; ceux-ci préfèrent le recourt à des méthodes de détection des problèmes sanitaires, alimentaires, etc., qui reposent sur l'observation du comportement des animaux et constituent un savoir-faire intéressant pour gérer l'alimentation individu par individu (*ObsAlim*).

Selon le réseau InPact, l'application des nouvelles technologies à l'agriculture n'est pas neutre. Ces innovations portent en elles l'orientation vers un modèle agricole nécessitant moins de main d'œuvre et moins « connecté » à l'environnement. En effet, selon Petit (2015), « *L'innovation n'est pas une valeur en soi pour la société et elle doit être regardée à l'aune des processus de développement qu'elle engage* ». Au contraire, les défenseurs de l'introduction du numérique dans l'agriculture argumentent que « *le numérique est un outil et que ceux-ci sont efficaces aussi bien pour les grandes parcelles que pour les petites, pour qui ils présentent des avantages de rendement et d'aide à la décision importants* » (Isaac et Pouyat, 2015). Ainsi, le numérique est une innovation générale qui concerne l'ensemble de l'agriculture et qui ne présagerait pas du modèle agricole sous-jacent.

Il existe donc un « frein » à l'adoption de la technologie, ou tout au moins un faible « consentement à la technologie » dans une frange de la population agricole attachée à des systèmes autonomes et économes en intrants de toute sorte. Ces difficultés à diffuser l'innovation dans le milieu agricole n'est pas nouvelle. Petit (1971) évoquait déjà l'importance de variables sociologiques, dépassant les pures considérations économiques, pour expliquer l'adoption ou non d'une technique ou d'une technologie de production. Tout d'abord, il est évident que, pour être adoptée, une technologie doit être rentable, c'est-à-dire que l'espérance de gain attendu doit être positive. Ensuite, l'adoption de la technologie doit être relativement « simple », au sens où plus une technologie nécessitera une modification profonde du système de production, moins elle aura tendance à être adoptée. De plus, Petit (1971) insiste sur l'attitude des agriculteurs face au risque, et rapporte les réticences des éleveurs à adopter des techniques intensives de production fourragère : « *à quoi bon produire davantage si l'on risque de perdre la récolte par suite du mauvais temps, à la fenaïson.* » Ce comportement face au risque est déterminé par le désir et les possibilités de l'agriculteur de prendre des risques. Un agriculteur sera d'autant plus incité à adopter une nouvelle technologie, ou à modifier ses pratiques, que l'incertitude quant aux résultats de cette adoption seront réduites par des expériences concrètes au sein de son milieu social (voisinage, groupes de travail...).

La tendance actuelle est de considérer que toute innovation technologique sera source de progrès (Petit, 2015), et l'application de nouvelles technologies à l'agriculture est présentée ainsi : limitation des apports d'engrais et des épandages de pesticides par un gain de précision, facilitation du travail de l'agriculteur par l'automatisation et la robotisation... Il existe ainsi une forme d'injonction à l'innovation qui postule que le changement est toujours possible, que le « nouveau » est mieux que « l'ancien » (Petit, 2015). Innovation et progrès sont souvent confondus. Or, une innovation est définie comme un changement social effectué par remplacement dû à l'introduction d'une nouveauté. Le progrès est quant à lui une amélioration, un mouvement en avant permis par la transformation de l'existant. Ainsi, de nombreuses innovations conduisent à un progrès et permettent une réelle amélioration des performances et des conditions de travail en agriculture. Toutefois, comme le souligne Petit (2015), « *toute innovation n'est pas bonne en soi. Elle n'a pas des effets naturels sur le bien-être des populations, ne crée pas forcément des biens collectifs et ne se traduit pas systématiquement dans l'intérêt général* ». Des pratiques qui ont été autrefois perçues comme des innovations n'ont en réalité apporté qu'un progrès relatif qui est aujourd'hui remis en cause. Le débat sur l'usage des pesticides ou des OGM en agriculture en est un exemple. L'innovation change parfois la nature même d'une pratique : le développement de tracteurs plus puissants et de socs de charrues plus performants a permis un labour plus profond à une quarantaine de centimètres, contre une dizaine auparavant ; or, un labour profond n'a pas le même impact sur la structuration du sol, sur l'organisation de ses différentes strates et sur sa vie biologique qu'un travail du sol superficiel. Autre exemple : l'arrachage des haies a été encouragé pour agrandir les parcelles et favoriser la mécanisation. Aujourd'hui, des politiques publiques proposent aux éleveurs et agriculteurs de replanter des haies, notamment pour limiter l'érosion des sols, fragmenter le paysage pour favoriser la biodiversité et lutter contre les campagnols terrestres : « *On a tout arraché pendant des années, et maintenant il faudrait en remettre* », commente un éleveur auvergnat. De la même manière, la spécialisation des exploitations agricoles mais aussi des territoires a été encouragée par les politiques européennes ; aujourd'hui, nous constatons la fragilité de systèmes agricoles peu autonomes et peu diversifiés face aux aléas climatiques et aux aléas de marché.

Ainsi, innovation et progrès n'entretiennent pas une relation évidente, ni une corrélation absolue : une innovation apportera un temps un progrès, puis pourra être remise en question quelques décennies plus tard. Les exemples cités ci-dessus illustrent l'importance d'une réelle démarche prospective à long terme sur l'introduction d'innovations en agriculture, car celles-ci transforment les agrosystèmes et

les écosystèmes sur le long terme : replanter une haie et reconstituer la biodiversité qu'elle génère prend plusieurs années, voire dizaines d'années... Cette « troisième révolution agricole » s'opère donc sous une double contrainte : celle de produire suffisamment pour nourrir l'humanité et celle de préserver les ressources naturelles, la biodiversité, et réduire les pollutions (Regnault *et al.*, 2012).

4.3.1.4. Le frein de l'investissement

Historiquement, la modernisation agricole n'a pu s'opérer que grâce à un investissement public massif (plan Monnet, plan Marshall, Politique Agricole Commune). En effet, les exploitations agricoles n'ont que rarement les ressources internes à l'entreprise suffisantes pour pouvoir investir dans des infrastructures et du matériel agricole coûteux. Le recours à des subventions publiques mais aussi à l'emprunt est donc indispensable. Ceci est également vrai pour le développement des NTIC en agriculture. Par exemple, dans les pays émergents, « *si la diffusion des smartphones est de plus en plus forte, son usage reste encore limité pour les paysans les plus isolés et les plus démunis* ». Il existe également des disparités entre productions : en France, les éleveurs bovins sont équipés à 26% de smartphones et 17% de tablettes, contre respectivement 47% et 32% pour les grandes cultures (Isaac et Pouyat, 2015).

L'acquisition et la modernisation du parc de matériel est souvent la principale cause de l'endettement des exploitations : plus des deux tiers de l'endettement correspond à des dettes à moyen ou long terme finançant les investissements (MAAF, 2012). Par exemple, l'achat d'un tracteur peut représenter un investissement de 30 000 à 250 000 €. Le pack « *Agridrone* » d'Airinov coûte 28 000 €. Il est toutefois probable que l'essor rapide du marché du numérique en agriculture entraîne une baisse des coûts du matériel, des logiciels et des services (- 5% par an). De plus, ces outils ont pour vertu de permettre des économies sur d'autres postes de dépenses (intrants, notamment) : d'après une étude américaine, les économies réalisées sur les intrants rembourseraient en un an le coût des technologies de précision pour les grandes exploitations, en deux à trois ans pour les petites (Isaac et Pouyat, 2015). L'achat en commun, sur le modèle des CUMA⁴² ou des GIEE⁴³, peut également être une solution pour mutualiser les coûts d'acquisition des technologies. Par exemple, le service de diagnostic azoté sur grandes cultures d'Airinov est revendu par les coopératives, chambres d'agriculture ou autres structures pour un tarif de 15€/ha pour 2 vols (Vigneau *et al.*, 2014).

Toutefois, l'endettement croissant de nombreuses exploitations agricoles peut lui-même constituer un frein à de futurs investissements : l'endettement des fermes françaises a quasiment triplé en 30 ans (MAAF, 2012). Il est notable que les fermes d'élevage bovins lait et mixtes sont plus endettées que la moyenne des exploitations françaises. De plus, le poids de l'endettement dans l'excédent brut d'exploitation (EBE) est bien plus important pour ces exploitations d'élevage.

Afin d'éviter des investissements supplémentaires portés uniquement par l'exploitation elle-même, et qui apparaissent comme risqués lorsqu'il s'agit de nouvelles technologies dont on ne connaît pas encore l'efficacité réelle, des prestations extérieures sont proposés aux agriculteurs. D'après une enquête de l'INSEE, « *les grandes exploitations sous-traitent plutôt à des entreprises pour bénéficier des machines les plus performantes sans avoir à les acheter tandis que les petits exploitants préfèrent louer du matériel ou faire appel à d'autres agriculteurs* » (Chevalier, 2007; Isaac et Pouyat, 2015). Ces prestations sont souvent accompagnées d'un conseil voire d'un outil d'aide à la décision (OAD) : l'information seule ne suffit pas (Schellberg *et al.*, 2008; World Bank, 2017). Toutefois, la Banque Mondiale concède que, s'il existe une demande latente pour un conseil complémentaire aux alertes, il

⁴² Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

⁴³ Groupement d'Intérêt Economique et Ecologique

n'est pas certain que les agriculteurs soient prêts à payer pour un tel service utilisant les NTIC ni que les entreprises privées soient en capacité de fournir durablement un tel service (World Bank, 2017).

Un autre frein au développement des NTIC en agriculture est un manque d'infrastructures publiques et une « fracture numérique » entre territoires : en 2014, seulement 56 % des parcelles recevaient la 3G et 12 % n'avaient accès à aucun réseau (Isaac et Pouyat, 2015). Il existe également un frein réglementaire (déclaration de vol de drone) et technique (formation des agriculteurs) à l'essor des NTIC et leur généralisation en agriculture (Collectif, 2016, p. 2; World Bank, 2017).

4.3.1.5. Les NTIC pour mieux gérer les risques ?

Les NTIC sont le support de nouvelles pratiques rassemblées sous le vocable « d'agriculture de précision ». D'après Schellberg *et al.* (2008), « *l'agriculture de précision est une approche innovante, intégrée et internationalement standardisée visant à augmenter l'efficacité de l'usage des ressources et de réduire l'incertitude des décisions nécessaires pour contrôler les changements sur les fermes.* » L'un des objectifs de l'agriculture de précision est de gérer l'hétérogénéité qu'il existe entre les parcelles ou encore au sein d'une même unité (Schellberg *et al.*, 2008). Ceci est particulièrement vrai dans le cas des prairies. Gérer cette hétérogénéité nécessite une précision dans l'acquisition de données sur l'état du sol, par exemple, pour être en capacité de répondre au mieux aux besoins des cultures qui varient dans l'espace et le temps (Schellberg *et al.*, 2008). Il s'agit bien de diminuer les risques liés à la production agricole et les incertitudes de la prise de décision par l'agriculteur (Dobermann *et al.*, 2004). En effet, comme le souligne un rapport de la Banque Mondiale, « *une information acquise au bon moment est essentielle pour gérer le risque. Les technologies de l'information et de la communication ont prouvé leur grande efficacité-coût pour collecter, stocker, traiter et partager l'information à propos du risque* » (World Bank, 2017). « *Alors que l'agriculture continuera à être risquée, de nombreux risques peuvent être gérés par une action effectuée au bon moment et l'application des meilleures pratiques.* »

Pour prendre la bonne décision en situation d'incertitude, les agriculteurs doivent répondre aux questions « quoi ? », « quand ? », « comment ? » et « pourquoi ? ». Pour cela, l'intérêt des TIC est double : (1) donner accès à une information à des agriculteurs qui ont des difficultés à l'obtenir ; (2) réduire les coûts des services de gestion des risques par la réduction des coûts de collecte, de traitement et de diffusion de l'information. La Banque Mondiale distingue ainsi plusieurs usages possibles des NTIC en agriculture. L'un d'eux est l'atténuation des risques par la prévention (World Bank, 2017). Des études montrent par exemple qu'au Sri Lanka, 40% des pertes pourraient être évitées grâce à un système d'information en temps réel qui offrirait aux agriculteurs la possibilité d'un choix optimal. La difficulté de ce type de service est la personnalisation de l'information et du conseil. Un autre usage des NTIC en agriculture correspond au transfert du risque, c'est-à-dire à l'assurance (voir 3.2.2.3, p. 104).

4.3.2. Les NTIC au service des prairies et des systèmes d'élevage

4.3.2.1. Spécificités des prairies et conséquences en termes d'application des NTIC

Les prairies se distinguent des grandes cultures annuelles par différents aspects qui peuvent expliquer pourquoi les NTIC se développent moins rapidement pour les productions herbagères (Schellberg *et al.*, 2008). Tout d'abord, la forte diversité floristique et la dynamique de développement qui caractérisent la végétation (surtout pour les prairies permanentes), mais aussi sa forte variabilité annuelle, sont liés à des mécanismes écologiques complexes reposant sur des interactions entre les espèces végétales d'une part, et entre la végétation et l'environnement (sol, climat, pratiques agricoles) d'autre part. Une prairie est le plus souvent composée d'une couverture totale de son sol par une végétation plutôt dense, ce qui rend difficile la discrimination entre végétaux, contrairement aux parcelles de cultures annuelles où le sol est à nu sous le couvert régulièrement semé. Cela suppose

d'appliquer à l'analyse d'images spatiales de prairies de multiples critères qui dépassent les signatures spectrales des objets observés (forme, texture...). Enfin, contrairement aux interventions de récolte, le pâturage par des animaux modifie encore davantage l'hétérogénéité spatiale de la biomasse prairiale (Figure 47).

4.3.2.2. Application des NTIC au suivi des prairies

La gestion des prairies est un élément important de la réussite de la conduite d'un système d'élevage d'herbivores (voir 4.1). Les aléas climatiques et les pullulations de campagnols terrestres rendent incertains les rendements fourragers, et les difficultés pour nourrir les troupeaux peuvent être sérieuses. Il existe donc des enjeux importants pour produire, grâce aux nouvelles technologies, des outils d'aide à la décision pour gérer les prairies et la production fourragère. Si les nouvelles technologies ont d'abord été appliquées aux grandes cultures et à l'horticulture (Figure 45), elles tendent désormais à se développer pour la gestion des prairies et des systèmes d'élevage, qui constituent un enjeu important en termes de surfaces et de revenus (Schellberg *et al.*, 2008; Trotter, 2010). Cependant, en comparaison avec les grandes cultures, la faible valeur économique des produits issus des prairies, dans des conditions pédoclimatiques souvent défavorables, limite l'application de technologies coûteuses. En effet, si l'amélioration des technologies est indéniable (quantité et résolution des données), le coût pour une couverture efficace des parcelles demeure élevé (Schellberg *et al.*, 2008).

Les NTIC peuvent permettre de mesurer précisément les rendements d'une prairie. Par exemple, des équipements embarqués dans les machines peuvent mesurer directement les rendements lors de la récolte des cultures (Schellberg *et al.*, 2008). Il est alors nécessaire de mesurer le volume, la masse, la densité, l'humidité du fourrage récolté, etc., afin de calculer à la fois la biomasse et la matière sèche récoltées. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet la mesure du rendement réel et récolté ; l'inconvénient est qu'elle nécessite une intervention physique directe sur la culture. Les données collectées sont immédiatement géolocalisées et stockées par la machine. La marge d'erreur est alors inférieure à 2%. Il est également possible de mesurer la qualité des fourrages (protéines, énergie, fibres) par spectroscopie proche-infrarouge. Toutefois, ces techniques de mesure nécessitent un fort travail de calibrage lié à la diversité des combinaisons végétales des prairies. De plus, des outils de proxidtection permettent, à l'échelle de la parcelle, de déterminer la hauteur d'herbe, la pousse de l'herbe ou encore le rendement espéré, mais également la composition du couvert végétal et donc la qualité alimentaire de la prairie (Pottier *et al.*, 2017; Schellberg *et al.*, 2008).

La télédétection peut permettre l'acquisition de données relatives à la biomasse végétale et à l'état sanitaire des espèces prairiales (stress hydrique, stress azoté...), tout au long du cycle de production, ou encore l'identification et la distribution spatiale de la végétation prairiale. Ces services ne sont pas récents, car dès 2003, en Australie, un service appelé « *Pastures From Space* »⁴⁴ était proposé (Schellberg *et al.*, 2008; Trotter, 2010). L'un des atouts de l'agriculture de précision reste alors la définition de « zones de gestion » *i.e.* d'unités relativement homogènes nécessitant les mêmes interventions. La télédétection permet, grâce à des capteurs embarqués par drone ou satellite, de mesurer la réflectance, c'est-à-dire l'énergie réémise par les surfaces observées (Pottier *et al.*, 2017). La qualité d'un suivi par télédétection repose sur trois paramètres :

- (1) La résolution spatiale de l'image, *ie* la taille des pixels ;
- (2) La résolution temporelle, *ie* le pas de temps entre deux observations ;
- (3) La résolution spectrale, *ie* la précision avec laquelle le capteur distingue deux longueurs d'ondes.

⁴⁴ <http://www.pasturesfromspace.csiro.au>

Pour le suivi d'une prairie, ce sont les bandes spectrales issues du rouge et du proche infrarouge qui permettent de caractériser la végétation (activités photosynthétiques et chlorophylliennes, densité et rendement) (Figure 46). Une prairie aura une faible réflectance dans le rouge (activité chlorophyllienne) et une très forte réflectance dans le proche infrarouge (faible teneur en lignine). Les indices de suivi de végétation reposent souvent sur la mesure de la réflectance, qui permet le calcul du NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index* :

$$NDVI = \frac{\text{proche infrarouge} - \text{rouge}}{\text{proche infrarouge} + \text{rouge}}$$

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et 1 . Si l'activité chlorophyllienne augmente, ie la productivité de la prairie augmente, la réflectance dans le rouge diminue et la réflectance dans le proche infrarouge augmente : le NDVI augmente. Après étalonnage, il est ainsi possible d'estimer la biomasse d'une prairie. Cependant, le NDVI sature dès lors que le taux de couverture du sol est supérieur à 60%. Ainsi, pour des végétations denses, d'autres indices de suivi, basés sur la propagation électromagnétique à travers la matière et relatifs au couvert, sont utilisés : l'estimation de la biomasse avec le LAI (*Leaf Area Index*), fAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetic Active Radiation*), le taux de chlorophylle (Cab), la fraction de couvert végétal (fCover)... (Pottier *et al.*, 2017; Vigneau *et al.*, 2014). Les applications sont alors diverses : le LAI, par exemple, peut permettre de discriminer les prairies selon leur itinéraire technique (pâture ou fauche) et donc de suivre les pratiques de gestion des prairies (Figure 47). De la même manière, il est possible de différencier prairies et céréales avec une discrimination de 100% (Nicolas et Dusseux, 2016).

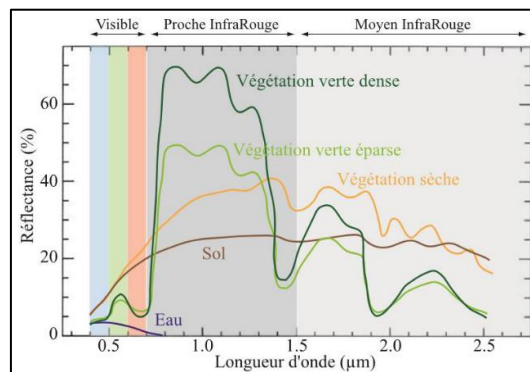


Figure 46 : Réflectance et densité de végétation (Nicolas et Dusseux, 2016)

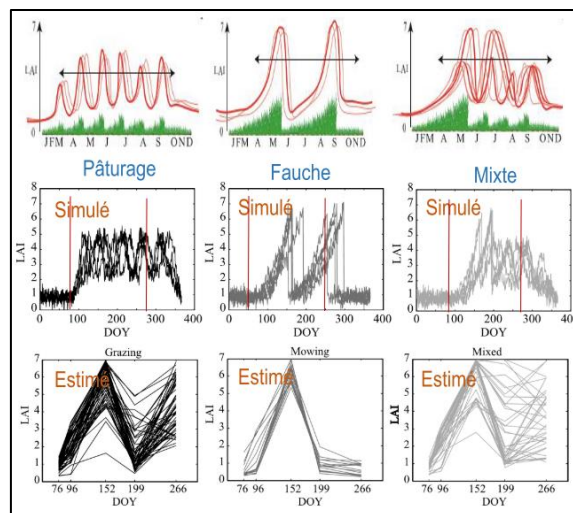


Figure 47 : Discriminer les pratiques agricoles avec l'évolution temporelle du LAI (Nicolas et Dusseux, 2016)

4.3.3. Un drone pour mieux anticiper les pullulations

4.3.3.1. Vers une lutte 2.0 contre les campagnols terrestres ?

Face aux pullulations de campagnols terrestres, les solutions techniques proposées aux éleveurs leur apparaissent comme « archaïques », désuètes, et donc inefficaces. Dans ce domaine aussi, l'injonction à l'innovation est réelle, et les attentes de la profession importantes. Le projet DDRAUN⁴⁵ dans lequel s'inscrit notre thèse vise à évaluer la pertinence et l'efficacité d'une solution « drone » pour lutter contre les pullulations de campagnols terrestres, notamment en proposant aux techniciens et aux éleveurs de nouvelles données spatiales permettant un suivi des populations à l'échelle de la parcelle voire du territoire. Nous interrogeons également la possibilité de développer des solutions assurantielles intégrant de telles données spatiales. Les travaux en géomatiques ont été conduits par la plateforme *IntelEspace* de la Maison des Sciences de l'Homme de Clermont-Ferrand.

Notre approche a été guidée par deux constats sur l'état actuel du développement agricole. Le premier est la baisse tendancielle de la main d'œuvre agricole et la modernisation croissante des exploitations d'élevage, qui repose aujourd'hui sur l'introduction rapide de NTIC. Le second est le désengagement de l'Etat en matière de gestion des risques agricoles au profit du secteur privé. L'assurance indicielle se développe fortement et fait appel aux progrès technologiques concernant le suivi de la production.

Notre hypothèse de travail est que le drone, en permettant un gain de temps et de précision dans la surveillance, permet d'augmenter l'efficacité de la lutte. En effet, la détection précoce des démarrages de pullulation est l'une des conditions majeures de la réussite d'une stratégie de maîtrise des populations de campagnols terrestres. Pour cela, la surveillance des parcelles est indispensable mais très chronophage lorsqu'elle est effectuée au sol.

Une surveillance aérienne aurait l'avantage de s'affranchir en partie de cette contrainte et de réduire le temps de prospection, à condition de disposer d'un outil fiable de détection des indices. Les travaux en géomatique (Goulamoussène *et al.*, 2018) ont montré qu'en utilisant un drone et une caméra multi-spectrale, il était possible de détecter les indices de taupes et de campagnols terrestres présents dans une parcelle avec un niveau de précision supérieur à 96 % (Figure 48).

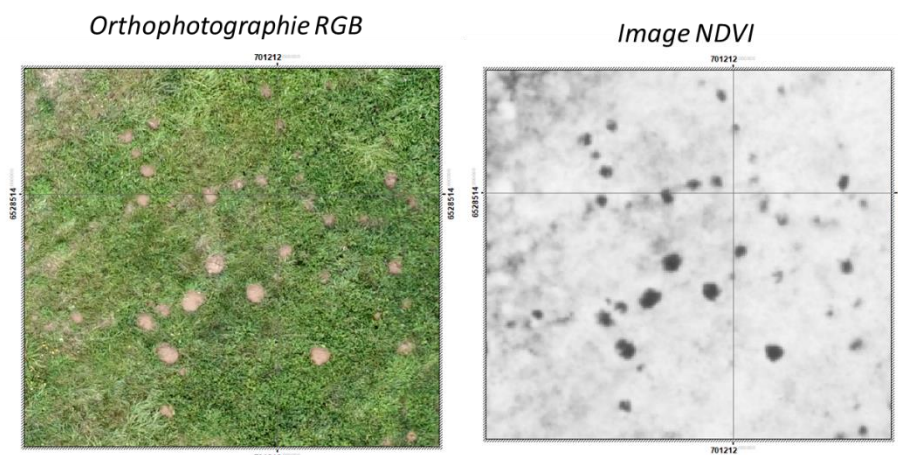


Figure 48 : Détection des tumuli grâce aux données produites par drone (Vautier, F., Goulamoussène, Y., 2017 ; plateforme *IntelEspace*, MSH Clermont-Fd)

⁴⁵ Données, Drone, Risque, Agriculture, Numérique

Si la technologie est efficace dans l'absolu, il reste d'une part à évaluer sa pertinence par rapport aux méthodes classiques de prospection au sol et d'autre part à discuter les conditions, notamment économiques, de mise en œuvre d'un tel dispositif de surveillance.

4.3.3.2. Méthode d'évaluation de la surveillance par drone

Goulamoussène *et al.* (2020) ont proposé une évaluation de la performance de la méthode de surveillance par drone. Deux phases successives ont permis cette évaluation :

1. Une première phase (phase 1) sur une parcelle expérimentale de 1,5 ha. Les données produites par le drone ont été traitées par un algorithme de classification permettant de repérer les *tumuli* en surface (classification supervisée). Elles sont comparées avec les données produites sur le terrain et géolocalisées grâce à la méthode de la diagonale indiciaire⁴⁶ (Giraudoux *et al.*, 1995). Une photo-interprétation par un expert des images drone a également permis de fournir un troisième jeu de données. Le taux de correspondance entre les données terrain et la photo-interprétation est de 100% : pour la phase 2, visant à tester la méthode drone sur un plus vaste territoire, la photo-interprétation servira de référence.
2. Une seconde phase (phase 2) sur 22 parcelles, pour un total de 78 ha. Les données produites par drone et traitées par classification supervisée sont comparées avec les données issues de la photo-interprétation.

Les données produites sont traitées grâce à une matrice de confusion (Provost et Fawcett, 1998) qui permet de mesurer la concordance entre un ensemble d'éléments prédits et un ensemble d'éléments de référence (Tableau 28). Dans notre cas, les éléments prédits correspondent aux quadras contenant des pixels de la classe « indice » issus de la classification supervisée ; les éléments de référence correspondent aux indices relevés par GPS contenus dans chaque quadra (pour la phase 1) ou par photo-interprétation (pour la phase 2), le long de la diagonale (Tableau 29).

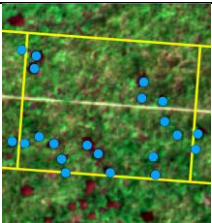
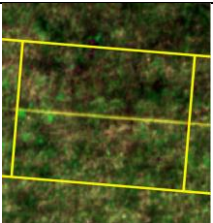

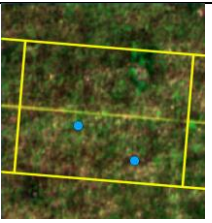
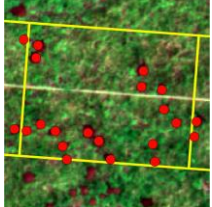


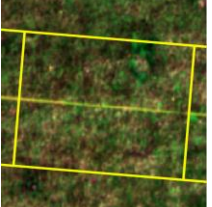
- VP (vrais positifs) représente le nombre de quadras infestés identifiés par le modèle et présents sur le terrain (phase 1) ou l'orthophotographie (phase 2),
- FP (faux positifs) représente le nombre de quadras infestés identifiés par le modèle et absents sur le terrain (phase 1) ou l'orthophotographie (phase 2),
- FN (faux négatif) représente le nombre total d'indices non détectés par le modèle et présents sur le terrain (phase 1) ou l'orthophotographie (phase 2),
- VN (vrais négatifs) représente le nombre total d'indices non détectés par le modèle et absents sur le terrain (phase 1) ou l'orthophotographie (phase 2).

Tableau 28 : Matrice de confusion utilisée pour calculer les indicateurs de performance issus de l'intersection entre les quadras (colonnes) et l'image classifiée (lignes)

		Données de références	
		Présence d'indices	Absence d'indices
Données prédites	Présence d'indices	VP	FP
	Absence d'indices	FN	VN

⁴⁶ La méthode de la diagonale indiciaire consiste à tracer la plus longue des diagonales traversant la parcelle, puis à découper ce tracé en quadras de 5m par 5m. Une note de 1 et 0 est respectivement attribuée aux quadras présentant ou non des *tumuli* de terre.

Tableau 29 : Illustration des différents cas issus de la matrice de confusion sur des quadras (Goulamoussène et al., 2020)

	VP	FP	VN	FN
Données de référence				
Données prédites				

Cinq indicateurs sont utilisés pour évaluer la méthode de surveillance par drone :

- L'*Accuracy*, ou justesse, correspond au nombre de prédictions correctes (VP + VN) divisé par le nombre total de prédictions : $Accuracy = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$;
- Le coefficient de corrélation de Matthews (MCC) évalue la corrélation entre la classification des quadras et leur appartenance réelle. Cet indice est normalisé et prend des valeurs entre +1 (classification parfaite) et -1 (classification totalement erronée) :

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

- La sensibilité représente la probabilité que les indices soient détectés par l'algorithme s'ils sont effectivement présents : $Sensibilité = \frac{VP}{P} = \frac{VP}{VP + FN}$;
- La spécificité permet de mesurer la probabilité que l'algorithme ne détecte rien s'il n'y a effectivement pas d'indices : $Spécificité = \frac{VN}{N} = \frac{VN}{VN + FP}$;
- L'indice d'infestation (IndInf), contrairement aux précédents, n'a pas vocation à évaluer la qualité de la détection, mais permet d'interpréter les écarts de performance observés en fonction de l'état d'infestation de la parcelle. Plus la parcelle est infestée, plus l'indice d'infestation est élevé, sa valeur allant de 0 à 1 :

$$IndInf = \frac{P}{(P + N)} = \frac{FN + VP}{FN + VN + VP + FP} ;$$

L'*Accuracy* et le coefficient de corrélation de Matthews permettent d'évaluer globalement la qualité de la détection, mais ils ne permettent pas d'expliquer les erreurs, qu'il s'agisse de sur-détection ou au contraire de sous-détection. La sensibilité et la spécificité permettent d'interpréter les erreurs de détection : une sensibilité élevée et une spécificité faible caractérisent une tendance à la sur-détection, alors qu'une spécificité élevée associée à une sensibilité faible illustre une tendance à sous-détecter les indices présents.

4.3.3.3. Résultats de l'évaluation

Le traitement des données issues de la phase 1 a été réalisé sur les 37 quadras de la diagonale indiciaire en comparant les observations de terrain, la photo-interprétation et la classification semi-automatique des images multi-spectrales. Les résultats montrent que la qualité globale de la méthode de détection est bonne, avec une *Accuracy* de 85% et un *MCC* de 65%. La *Sensibilité* de 100% confirme ce résultat et montre que la méthode est capable d'identifier la totalité des indices dans chaque quadra

de la diagonale indiciaire. La *Spécificité* de 50% tend à montrer une tendance à la sur-détection, sans pour autant que ce pourcentage ne soit significatif en raison du faible nombre d'échantillons. Enfin, l'indice d'infestation obtenue par la méthode de détection est identique à celui déterminé par photo-interprétation.

L'analyse des données issues de la phase 2 montre que la précision (*Accuracy*) globale de la méthode est de 69%, signifiant que la détection est moins bonne que pour le cas de la parcelle expérimentale (phase 1) mais reste performante. Une Analyse en Composantes Principales (ACP) montre que l'*Accuracy* est décorrélée de l'indice d'infestation, ce qui illustre l'insensibilité du taux de succès de la méthode par rapport à l'état des parcelles. Plus précisément, la *Spécificité* est anticorrélée à l'indice d'infestation : plus le taux de contamination augmente, plus la capacité de l'algorithme à détecter les Vrais Négatifs diminue. Cet effet est toutefois contrebalancé par une corrélation positive entre l'indice d'infestation et la *Sensibilité* : la méthode détecte d'autant mieux les indices que leur densité dans la parcelle augmente. La méthode de détection est globalement plus précise dans les zones les moins infestées. Lorsque le taux d'infestation augmente, la méthode a tendance à surestimer le nombre de tumuli (augmentation du nombre de faux négatifs).

Les premiers résultats montrent l'aptitude de cette méthode à fournir des informations fiables sur l'état des parcelles. Les conditions de mise en œuvre d'un tel suivi par drone doivent toutefois être interrogées.

4.3.3.4. Discussion

Intérêt et limites de la surveillance par drone

Si la fiabilité de la méthode de détection des indices de surface (*tumuli*) et de calcul d'un taux d'infestation est validée par l'expérience, plusieurs limites qui peuvent largement freiner sa mise en œuvre sur le terrain sont à souligner.

Les conditions météorologiques influent grandement la possibilité de déployer cette méthode (Goulamoussène *et al.*, 2020). D'une part, elles doivent être suffisamment clémentes (pluie, vents) pour permettre techniquement le vol du drone. D'autre part, la luminosité influe grandement la qualité des données produites par le capteur multi-spectral. Le fenêtrage de tir pour la phase d'acquisition de données sera donc dépendante des conditions environnementales, ce qui limitera de fait les surfaces qu'un appareil pourra parcourir.

La pertinence de la méthode de détection est variable selon la densité d'indices de micromammifères dans les parcelles. L'algorithme semble avoir une tendance à la sur-détection lorsque les populations sont en haute densité. L'expertise d'un technicien connaissant le territoire permet de minimiser cette sur-détection. La fiabilité de l'algorithme est meilleure dans les zones où il y a une maîtrise des taupes et où les populations de campagnols terrestres sont en basse densité (Goulamoussène *et al.*, 2020). Le drone fournit donc une méthode plus favorable à une surveillance précoce des populations de campagnols terrestres. Toutefois, il semble que les niveaux d'infestation issus de la diagonale indiciaire ne soient pas toujours corrélés aux densités de campagnols terrestres piégés dans les galeries souterraines (Ramadier *et al.*, 2019).

Enfin, à ce stade du développement de la méthode, le drone n'est pas capable de dissocier les indices des micromammifères, taupes ou campagnols terrestres, et ne distingue par non plus les *tumuli* d'autres artefacts tels que les passages de tracteurs, etc., car ces objets renvoient la même signature spectrale en termes de texture (Goulamoussène *et al.*, 2020). Or, les préconisations techniques ne seront pas les mêmes selon qu'il s'agit de lutter contre des taupes ou des campagnols terrestres.

Ainsi, le drone couplé à l’algorithme semi-automatique est capable de réaliser un diagnostic sur de grandes surfaces et de définir des indicateurs de compréhension globale (précision, infestation). Cependant, en raison des confusions entre les deux espèces (taupes et campagnols), l’interprétation finale des images nécessite l’avis de l’expert. Le drone est donc un outil indissociable de l’avis d’un expert de terrain, qui pourra ensuite conseiller les agriculteurs sur les méthodes de lutte à mettre en œuvre. Le drone est à la fois un outil d’acquisition d’information (observation de l’agrosystème) mais aussi un outil d’échange d’information (transmission aux éleveurs, suite à l’analyse experte), qui ne peut remplacer ni le technicien de terrain, ni les observations faites par les agriculteurs, mais au contraire les inciter à détecter au plus tôt l’apparition des indices.

Coûts et bénéfices d’une solution drone

La question des coûts et des bénéfices d’une telle solution drone est probablement un frein au développement de la méthode plus significatif que les limites technologiques que nous venons d’évoquer, ces dernières pouvant être réduites par des travaux complémentaires (détection de formes, etc.).

Les investissements initiaux relatifs au déploiement d’une surveillance par drone sont importants, de l’ordre de 20 000 € pour un drone équipé d’une caméra hyper-spectrale. Il est également nécessaire de former les techniciens pour acquérir les compétences très pointues relatives à l’utilisation du capteur et au traitement des images (Goulamoussène *et al.*, 2020). Toutefois, comme nous l’avons vu précédemment (4.3.1 et 4.3.2), l’essor des NTIC en agriculture et désormais pour la gestion des prairies est réel. Ce service de surveillance des micromammifères que fourniraient un tel drone ne serait certainement pas exclusif, et il est envisageable qu’il appartienne à un « paquet » comprenant plusieurs services autour de la gestion des prairies, ce qui permettrait de rendre ce système plus rentable pour l’opérateur. La littérature affiche des coûts pour l’agriculteur de l’ordre de 50€/ha pour un drone et de 10€/ha pour un satellite, avec un conseil potentiel (Pottier *et al.*, 2017). Il nous semble que ces tarifs restent encore trop prohibitifs. Toutefois, le développement de ces produits et la mutualisation des services devrait permettre de faire diminuer fortement les coûts.

Enfin, une telle méthode de surveillance par drone ne se développerait que si elle apportait un réel bénéfice par rapport aux méthodes classiques de surveillance pédestre. Goulamoussène *et al.* (2020) ont évalué le temps nécessaire pour couvrir une surface de 100 ha avec chacune des deux méthodes (Tableau 30).

Tableau 30 : Comparatif du temps nécessaire pour la surveillance par la méthode pédestre et l’utilisation d’un drone pour un territoire de 100 hectares sur l’Impluvium de Volvic (Goulamoussène *et al.*, 2020)

	Surveillance pédestre	Surveillance drone
Préparation des données et matériels	30’	1h00 (10’/vol)
Surveillance effective	2h00	2h00 (20’/vol)
Post-traitement des données	30’	3h00 (30’/vol)
Analyse « experte »	30’	1h20 (20’/vol)
Total	3h30	7h20

*6 vols de drone sont nécessaires pour couvrir 100 hectares

Si pour un diagnostic à un instant t, la surveillance par drone demande le double temps par rapport à la prospection pédestre, en grande partie à cause de la phase de post-traitement et d’analyse des images qui est très chronophage, il permet de couvrir de manière exhaustive l’espace à analyser alors que la diagonale ne permet de diagnostiquer qu’une petite partie de celui-ci (largeur de la diagonale). De plus, la nature des données produites par le drone et par une prospection pédestre est différente : les images peuvent être archivées et ré-exploitées ultérieurement pour réaliser des analyses spatiales

et temporelles. Les bénéfices d'un suivi par drone doivent donc être abordés dans une perspective de long terme, d'autant plus que des avancées technologiques permettront certainement de réduire le temps de post-traitement des images et des données.

Un important potentiel pour l'intégration des NTIC dans la lutte contre les pullulations

La gestion des agrosystèmes est complexe. L'acquisition d'une information précise au « bon moment » est une donnée importante d'un pilotage réussi. Les NTIC permettent indéniablement d'augmenter la précision des données collectées et parfois l'efficacité de cette collecte, comparativement à des méthodes plus manuelles. Les travaux du projet DDRAUN (Goulamoussène *et al.*, 2020; Goulamoussène *et al.*, 2018) ont montré, dans le cas de la gestion des populations de campagnols terrestres, les intérêts et les limites actuelles de l'utilisation d'un drone. Le potentiel pour l'intégration de NTIC dans la lutte contre les pullulations, et plus globalement la gestion des prairies, semble important, sans pour autant présager d'une substitution avec le technicien (l'œil-expert et la connaissance fine des processus et du contexte) et l'agriculteur (présence quotidienne). En effet, l'utilisation d'une solution drone ouvre de nouvelles perspectives pour faciliter la surveillance des parcelles et l'implication des agriculteurs dans la lutte : même si l'utilisation d'un drone reste plus chronophage que la surveillance pédestre, elle tend à augmenter la précision des informations collectées avec une localisation fine des zones d'activité de micromammifères sur l'intégralité d'un territoire donné.

De plus, les images collectées par le drone pourraient avoir d'autres applications pour les exploitations agricoles (mesure de productivité, gestion de la fertilisation, réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires...) afin de renforcer globalement leur durabilité. Les Organismes à Vocation Sanitaires (OVS) chargés de l'animation de la lutte contre les campagnols (FDGDON) ou encore les chambres d'agriculture pourraient à terme proposer ce genre de service aux éleveurs des systèmes herbagers. L'intégration des NTIC pourrait changer le visage du système de lutte contre les campagnols terrestres, créant la possibilité de nouveaux flux d'information d'une part, et la nécessité de nouveaux flux financiers d'autre part (Figure 49).

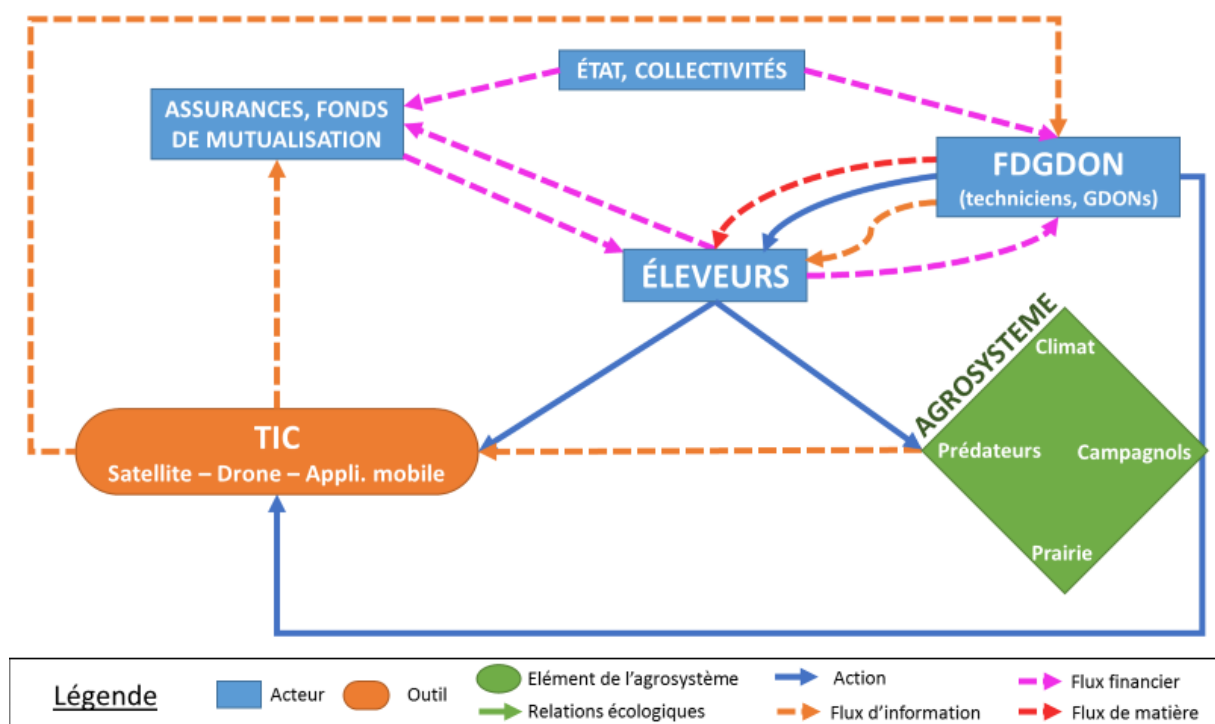


Figure 49 : Système de lutte "2.0" contre les campagnols terrestres intégrant les NTIC

Conclusion sur l'approche par le système fourrager

Depuis la révolution fourragère initiée dans les années 1950, les systèmes fourragers du Massif Central se sont progressivement spécialisés vers la production herbagère. L'herbe constitue une ressource stratégique pour les territoires de moyenne montagne. L'herbe est toutefois une ressource fragile dont la variabilité face aux aléas climatiques est forte mais non exceptionnelle. Le dérèglement climatique impacte d'ores et déjà les systèmes herbagers : les sécheresses (déficit hydrique) ne sont plus des événements exceptionnels ; la baisse de la production herbagère semble être une tendance de long terme qui remet en question l'organisation des systèmes fourragers. Cette spécialisation des systèmes fourragers et des territoires de moyenne montagne ont également augmenté l'exposition des élevages aux pullulations de campagnols terrestres, devenues plus fréquentes et intenses depuis les années 1970.

Face aux multiples aléas auxquels les systèmes fourragers du Massif Central font face, la diversification des systèmes fourragers d'une part, et un pilotage plus fin des prairies et de la production herbagère d'autre part, constituent des leviers intéressants pour gérer les risques.

- (1) La vulnérabilité des systèmes fourragers face aux sécheresses et face aux pullulations de campagnols terrestres semblent provenir de la même origine : le manque de diversité de l'assolement fourrager. En système tout herbe, il est difficile pour l'éleveur d'assimiler le risque : seules des pratiques de sauvegarde (solidarité professionnelle, solidarité nationale) et d'achat de fourrages sur l'extérieur sont actuellement à même de maintenir la viabilité des exploitations, condamnées à une utilisation sous-optimale de leur parcellaire. La diversification des systèmes fourragers en moyenne montagne serait bénéfique à la fois pour réduire le risque de pullulation (en agissant à l'échelle du paysage) mais également réduire la dépendance du système fourrager à l'herbe, ressource particulièrement fragile. Le développement de cultures annuelles en moyenne montagne se heurte toutefois d'une part au niveau des investissements pour acquérir le matériel nécessaire et d'autre part à une moindre rentabilité comparativement aux productions de plaine. Des incitations publiques pourraient corriger ce différentiel de rentabilité et favoriser le retour des cultures annuelles en moyenne montagne, comme la PHAE⁴⁷ avait pour objectif, avant sa suppression en 2014, de soutenir le maintien des prairies permanentes.
- (2) La vulnérabilité des systèmes fourragers provient également de la difficulté rencontrée par les éleveurs à piloter finement la gestion de la production herbagère : fertilisation, gestion du pâturage, surveillance des populations de taupes et de campagnols terrestres. Les NTIC se développent de plus en plus dans le secteur agricole et proposent aux agriculteurs des services de plus en plus abordables pour acquérir une information et un conseil adapté à la gestion de leurs parcelles. Dans le cas de la surveillance des populations de campagnols, nous avons vu que l'usage d'un drone s'avère complémentaire de la prospection experte sur le terrain mais qu'il ne peut pas remplacer le technicien.

Malgré cette forte vulnérabilité de leurs systèmes fourragers aux sécheresses et aux pullulations de campagnols terrestres, les éleveurs semblent conserver une conception fixiste de la gestion de la production fourragère. Les besoins alimentaires du troupeau constituent l'invariant principal des systèmes fourragers : le volume de production est la composante majeure de la construction des revenus, les prix étant souvent exogènes. La rigidité de la composante prairiale et de la composante animale des systèmes fourragers rend d'autant plus difficile la mise en place d'adaptations flexibles à court terme. Notamment, en Auvergne, les contraintes pédologiques, topographiques et

⁴⁷ Prime herbagère agro-environnementale

géographiques expliquent largement l'organisation du parcellaire et son utilisation. Moins l'utilisation du parcellaire d'une exploitation est souple (alternance fauche/pâture, potentiel agronomique), moins le système fourrager sera flexible. A plus long terme, les contraintes économiques, financières et foncières constituent des freins à la mise en œuvre d'une adaptation plastique des systèmes fourragers.

Ainsi, la diversification des systèmes fourragers ne constitue pas une solution universelle pour lutter contre les pullulations de campagnols terrestres. Ceci est d'autant plus vrai dès lors que l'on considère que la gestion des ravageurs revêt un caractère de bien collectif. Nous proposons donc d'étudier, dans la suite de notre thèse, la dimension collective de la gestion des campagnols terrestres. Il est en effet nécessaire d'articuler les actions des éleveurs d'un même territoire pour construire la stratégie la plus optimale possible compte-tenu des réalités locales. Il est peu probable qu'en l'absence de coordination, les gestions isolées des systèmes fourragers aboutissent à un optimum à l'échelle du territoire du fait de l'existence d'externalités spatiales (cf. 2.3.2, p. 84). Les éleveurs doivent construire une vision partagée du risque auquel ils sont *collectivement* confrontés, le décrire et le situer sur leur territoire, avant de pouvoir définir ensemble la gestion qui leur semble optimale. L'existence d'une vision partagée est un pilier important d'une coordination efficace (voir Chapitre 6, p. 172). Ainsi, le Chapitre 5 propose d'utiliser un jeu sérieux pour modéliser le fonctionnement de systèmes fourragers soumis à des aléas multiples (aléas climatiques, pullulations de campagnols, aléas divers) et observer la manière dont les éleveurs se comportent pour construire une stratégie collective de gestion d'un ravageur.

Chapitre 5. *CampaRISK*, un jeu sérieux pour accompagner l'action collective face aux pullulations de campagnols terrestres

CampaRISK a été construit par Nina Combet, Audrey Levert et Floriane Perron dans le cadre d'un Projet Collectif Ingénieur à VetAgro Sup, campus agronomique de Clermont-Ferrand, commandité et encadré par l'auteur. Nous les remercions pour la grande qualité de leur travail.

Les particularités du risque de pullulation de campagnols terrestres tendent à montrer que sa gestion revêt les caractéristiques d'un bien collectif. Si l'approche par le système fourrager met en évidence l'importance de diversifier l'assolement des exploitations et de penser davantage leur flexibilité et leur plasticité en situation d'aléa multiples, la gestion des pullulations doit considérer la dimension territoriale et collective. La littérature met en avant à la fois la nécessité d'agir précocement mais également de manière coordonnée à l'échelle d'un territoire (Couval et Truchetet, 2014; Giraudoux et al., 2017).

La mise en œuvre d'une action collective repose d'abord sur l'émergence d'une vision commune et partagée du phénomène de pullulation. En effet, d'une part tous les systèmes fourragers n'ont pas la même vulnérabilité face aux pullulations et donc le même intérêt à l'action (Chapitre 4, p. 116); d'autre part, la perception des risques est un facteur déterminant du comportement des agents (1.3.3, p. 47). Destrez et al. (2014) ont mis en évidence que les éleveurs ne partageaient pas une perception homogène du campagnol terrestre (Figure 50) : certains le considèrent avant tout comme un nuisible (un risque exogène), d'autres comme un élément de l'agrosystème (un risque endogène). Ces perceptions différentes ne sont pas « vraies » ou « fausses », et ne sont pas *a priori* opposées, car les conséquences des pullulations dépendent des caractéristiques du territoire et du système fourrager concernés. Des perceptions différentes peuvent traduire des réalités différentes : Michelin et al. (2014); Morlans et Michelin (2014); Peyre et al. (2009) ont montré que le comportement des agriculteurs face au risque de pullulation ne pouvait être expliqué sans croiser les dimensions agronomiques et sociologiques du phénomène.

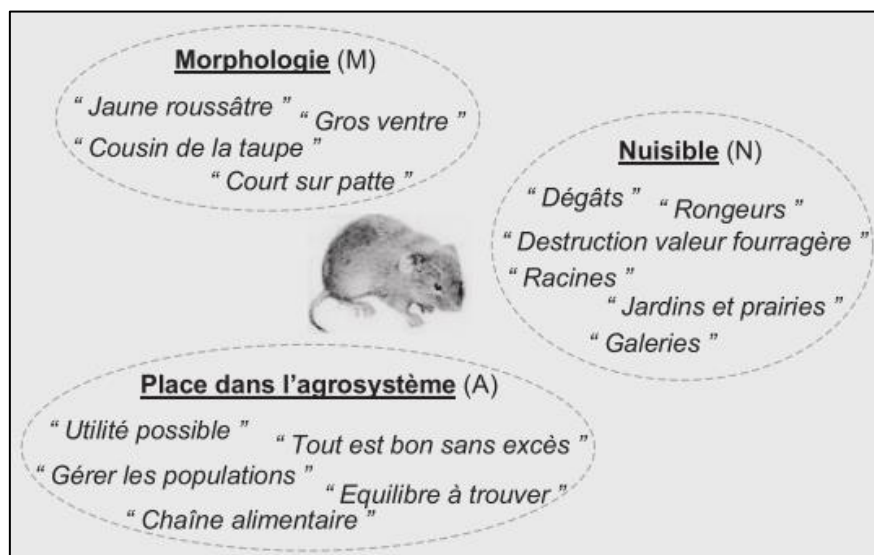


Figure 50 : Citations utilisées par des éleveurs pour définir le campagnol terrestre (Destrez et al., 2014)

Pour faciliter la discussion et l'échange entre éleveurs, y compris sur des aspects techniques de cette problématique, nous supposons qu'un jeu sérieux constituerait un outil pertinent tant sur la forme (mettre des éleveurs autour de la table et appuyer les réunions de formation et d'animation) que sur

le fond (modélisation des processus agroécologiques et sociaux impliqués), dans une logique d'approche expérimentale. Un jeu sérieux combine des aspects sérieux (enseignement, apprentissage, communication, information) avec des ressorts ludiques (Schmoll, 2011). Un jeu de plateau a été conçu pour modéliser le fonctionnement complexe des systèmes d'élevage (temps de travail, trésorerie, autonomie fourragère, aléas climatiques et divers...), avec pour objectif de pouvoir accompagner la conception d'une stratégie coordonnée de gestion du risque. Nous nous situons donc entre le jeu « à message » (qui a pour objectif la transmission d'un contenu) et le jeu de « simulation » (qui place le joueur en situation) (Schmoll, 2011).

Nous abordons également la conception de ce jeu comme un outil scientifique au service de l'étude des processus de décision et de coordination entre éleveurs. Le jeu s'accompagne de documents de suivi, permettant de relever les décisions des joueurs, ainsi que des indicateurs économiques (notamment la trésorerie). Les données ainsi produites pourront être analysées selon les choix individuels et collectifs des joueurs, et comparer selon les situations en faisant tourner plusieurs fois le jeu. Ce jeu sérieux a donc également pour objectif de comprendre comment les agriculteurs décident d'allouer du temps et/ou de l'argent à la réalisation de différentes tâches, dont la lutte contre le campagnol terrestre, mais aussi comment ils interagissent entre eux. L'acquisition de telles données sur le comportement des éleveurs est utile pour mieux organiser l'animation de la lutte mais aussi pour calibrer des modèles tels que le modèle multiagent que nous proposerons dans le Chapitre 7.

L'objectif du Chapitre 5 est de modéliser le fonctionnement d'un système fourrager tel qu'analysé par le Chapitre 4 et d'intégrer la dimension collective et territoriale de la lutte contre les campagnols terrestres. Pour cela, nous mobilisons le format original du jeu sérieux.

Le jeu n'en est qu'à sa version expérimentale, et peu de tests ont été produits jusqu'à présent⁴⁸. Il constitue une ouverture concrète à nos travaux de recherche : la modélisation est au service de l'action. La section 5.1 présente le modèle bioéconomique utilisé pour concevoir le jeu. La section 5.2 décrit la transcription de ce modèle en règles de jeu. Enfin, la section 5.3 présente les premiers retours des tests du jeu, le type de données qu'il permet de produire et leur pertinence.

5.1. Présentation du modèle bioéconomique

5.1.1. Production fourragère en situation de risques

Le territoire considéré, assimilable à une commune auvergnate, est exposé à un risque de pullulation de campagnols terrestres, c'est-à-dire que lorsque les conditions sont réunies, une pullulation peut survenir et toucher l'ensemble des exploitations agricoles de ce territoire. Toutefois, en cas de survenance d'une pullulation, toutes les exploitations ne sont pas affectées de la même manière : leur vulnérabilité est différente et dépendante des caractéristiques des systèmes fourragers.

La production fourragère est dépendante de nombreux facteurs internes à l'exploitation agricole (sol, surfaces, fertilisation, gestion fauche-pâturage, gestion des campagnols terrestres...) ou externes (météorologie, paysage, gestion des campagnols terrestres par les autres éleveurs...). Dans un souci de simplification et de jouabilité, des hypothèses permettent d'alléger le modèle :

- L'herbe de prairies permanentes est la seule ressource fourragère disponible. Nous choisissons de mesurer la production et la consommation fourragère en « unités fourragères » (UF) et non en masse de matière sèche. Cela permet d'utiliser un système de mesure en base 100

⁴⁸ Malheureusement, le contexte sanitaire de l'année 2020 a compromis la phase de déploiement du jeu sur le terrain avec des éleveurs comme nous l'avions initialement prévu. Quelques tests ont été réalisés avec des étudiants de VetAgro Sup, campus agronomique de Clermont-Ferrand.

(correspondant à la production d'une année à la météorologie « normale » et sans pullulation de campagnols).

- La consommation du troupeau sera fixe et considérée comme suffisante pour maintenir le niveau de production et l'EBE⁴⁹ : il est donc « obligatoire » pour l'éleveur de posséder, chaque année, suffisamment de fourrages pour nourrir ses bêtes⁵⁰.
- Les surfaces sont fixes, leur productivité également, c'est-à-dire que la base fourragère n'est pas modifiée par des pratiques culturales ou de gestion du troupeau et dépend uniquement de la météorologie⁵¹.
- Les conditions météorologiques sont les mêmes pour toutes les exploitations du territoire (homogénéité des petites régions fourragères) et fournissent la même base de calcul pour la production fourragère pour tous les joueurs.
- Le niveau de pullulation qui affecte l'ensemble des exploitations (aspect collectif du risque) à l'année n est déterminé par (1) le démarrage ou non d'une pullulation en n et (2) le nombre d'éleveurs ayant lutté et le nombre total d'actions de lutte menées en $n - 1$ (aspect préventif et précoce d'une lutte efficace). Il est soit « nul » (pas de démarrage de pullulation), soit « faible » (f ; démarrage de pullulation maîtrisée), soit « fort » (F ; démarrage de pullulation non maîtrisée).
- En cas de démarrage en année n , le niveau de perte (en UF) liée à la pullulation est déterminé individuellement et dépend de plusieurs facteurs. D'abord l'intensité de la pullulation affectant le territoire en n (f ou F), puis l'effort individuel cumulé de lutte préventive (en année $n - 1$) et curative (en année n) mesuré par la somme des actions de lutte entreprises par l'éleveur (aspect individuel de la gestion du risque). Enfin, le paysage local, propre à la localisation géographique de l'exploitation et de son parcellaire, affecte un coefficient de sensibilité aux pullulations (coefficient multiplicateur) qui va, selon sa valeur (0,7 ; 0,8 ; 1 ; 1,2), augmenter (paysage peu fragmenté, favorable aux campagnols) ou diminuer (paysage hétérogène, fragmenté, défavorable aux campagnols) la perte subie. Ce micro-paysage est considéré comme fixe, même si, en réalité, les éleveurs peuvent le modifier à moyen terme (réseau de haies, etc.).

Ainsi, la mise en équation de ce modèle est la suivante :

$$P_{i,j,n} = P_{M,n} - d_n \cdot s_j \cdot X_n(\beta_{n-1}; \alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n})$$

avec $P_{i,j,n}$: production fourragère de l'éleveur i , pour un paysage local j , en année n

$P_{M,n}$: base de production fourragère selon les conditions météorologiques en année n

s_j : coefficient de sensibilité aux pullulations du paysage local j

d_n : démarrage ($d = 1$) ou non ($d = 0$) d'une pullulation sur le territoire l'année n

X_n : perte liée aux campagnols terrestres l'année n

β_{n-1} : intensité de la pullulation affectant le territoire (f , faible ou F , forte)

$\alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n}$: cumul de l'effort de lutte de l'éleveur i en année $n - 1$ et en année n

⁴⁹ Excédent Brut d'Exploitation

⁵⁰ Ce choix est motivé par les résultats présentés en 4.2 (p. 103).

⁵¹ Hypothèse de rigidité des systèmes fourragers à court terme (cf. 4.1.3, p. 99).

Le calibrage de la production fourragère a été effectué à l'aide de données présentées dans le Tableau 31 (Quéré *et al.*, 1999). Ces données sont présentées en base 100 (année à météorologie normale sans campagnols).

Tableau 31 : Estimation des quantités récoltées selon l'année et le niveau de pullulation des campagnols (Quéré *et al.*, 1999)

Climat \ Campagnols	Sans Campagnols	Pullulation d'automne (« faible »)	Pullulation d'automne et de printemps (« forte »)
Année favorable	124	115	90
Année normale	100 (indice)	90	65
Année défavorable	68	63	39

Les pullulations de campagnols terrestres n'affectent pas uniquement la production fourragère en quantité : elles en diminuent également la qualité nutritionnelle (ce qui a un effet négatif sur la qualité de la production, notamment en système laitier). De plus, la terre des tumuli présents en surface provoque une usure accélérée du matériel (notamment des couteaux des faucheuses) et se retrouve dans les fourrages ainsi récoltés : la poussière présente dans le foin est source de problèmes sanitaires tant pour le troupeau (*listeria*) que pour l'éleveur (maladie du poumon fermier).

Pour limiter les dommages causés par les pullulations, les éleveurs peuvent décider d'actions de lutte ayant un coût en temps (application par l'éleveur) ou en argent (externalisation) : lutte chimique d'automne, lutte chimique de printemps, piégeage et lutte mécanique (décompactage). Ces efforts de lutte sont cumulés pour déterminer l'effet collectif (à l'échelle du territoire : $\beta_{n-1} = \sum_{i=1}^4 \alpha_{i,n-1}$) mais aussi l'effet individuel (à l'échelle de l'exploitation agricole : $\alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n}$).

Enfin, la réalité de la gestion d'un système d'élevage ne s'arrête pas à la production fourragère et la gestion des aléas climatiques et ravageurs. Le quotidien d'un éleveur rencontre divers impondérables et aléas, qui peuvent se cumuler : problèmes sanitaires sur le troupeau, panne ou casse de matériel, clôtures à réparer ou refaire, accidents du travail... Cette addition d'aléas correspond à une combinaison d'incertitudes, que l'éleveur ne peut pas toujours facilement anticiper. Ces aléas, ainsi que d'autres actions de gestion possibles, dépendants des saisons, ont des implications variables en termes de dépenses de temps et d'argent et sont présentés dans le Tableau 32 (p. 162).

5.1.2. Représentation du modèle bioéconomique

Classiquement, un modèle bioéconomique comprend un module biologique et un module économique (Frésard, 2008). Dans notre cas, le lien entre ces deux modules est effectué au niveau de la production fourragère. Le modèle économique est un modèle de décision (*decision theory model*) qui croise, comme en théorie des jeux, un état de la nature avec une décision pour en connaître le revenu produit, l'état de la nature (ex : niveau d'attaque du nuisible) étant incertain et inconnu au moment de la décision (Mumford et Norton, 1984). Il s'agit de faire coïncider la production fourragère aléatoire (météorologie, dommages causés par les campagnols) et les besoins du troupeau fixes. Pour cela, en plus de gérer ses stocks et achats de fourrages, l'éleveur doit décider de l'allocation de sa trésorerie et de son temps disponible pour répondre aux différents aléas, et notamment lutter contre les pullulations (Figure 51). Les différents éléments constitutifs du modèle entretiennent soit des relations positives (✓) soit des relations négatives (✗).

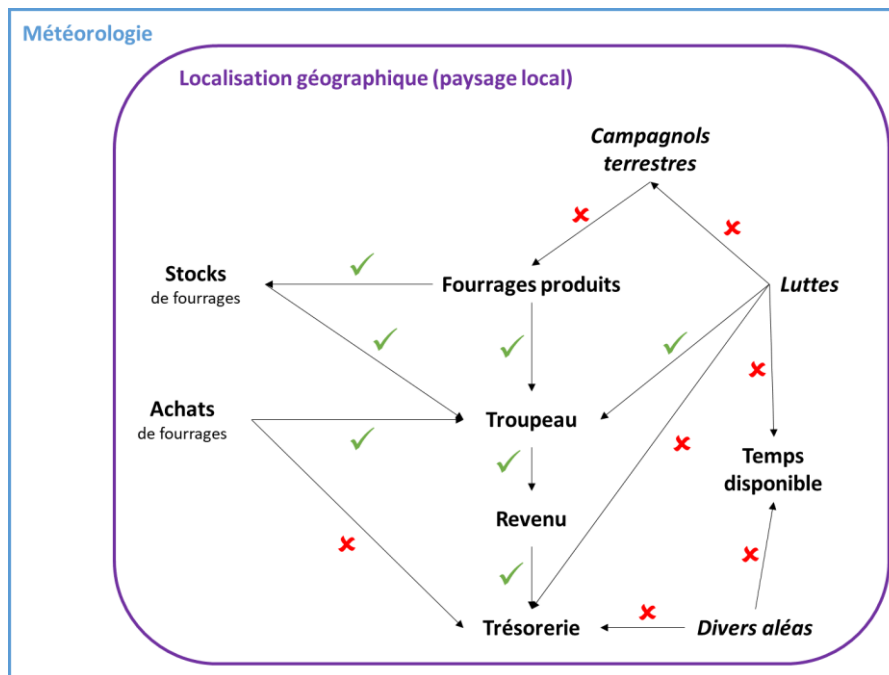


Figure 51 : Modèle bioéconomique du jeu

5.2. Transcription en règles de jeu

Si la simplification du modèle bioéconomique complexe a permis de mettre en évidence les aspects principaux de ce problème de gestion du risque, la transcription en règles de jeu suppose de nouvelles hypothèses simplificatrices et nécessite le calibrage de certaines variables. L'enjeu est de transcrire des mécanismes agroécologiques et économiques qui suivent des fonctionnements différents : phénomènes aléatoires ou cycliques, causes internes ou externes au système agroécologique, implications individuelles ou collectives... Plusieurs outils seront nécessaires pour effectuer ces distinctions.

5.2.1. Présentation générale du jeu

Le jeu se présente sous forme d'un jeu de plateau comportant 20 cases (Figure 52), élaboré pour quatre joueurs incarnant chacun un éleveur et pilotant une exploitation agricole d'élevage « tout herbe » dont les caractéristiques et la localisation géographique sont tirées au sort séparément en début de partie.

Le but du jeu est d'arriver à piloter son système tout au long de la partie en ayant toujours de quoi nourrir ses animaux (besoins fixes, exprimés en unités fourragères et dépendants du nombre d'UGB et du type d'animaux) et en ayant des ressources financières suffisantes pour éviter la faillite (bilan financier à la fin de la partie)⁵². Les caractéristiques des exploitations agricoles ont été définies selon les cas-types de l'Institut de l'Élevage (IDELE, 2018a, 2018b, 2018c). L'idée est de donner à voir la diversité des systèmes d'élevage et donc la diversité des marges de manœuvre pour gérer les risques. Deux exploitations sont en système bovin lait (AOP et lait de consommation), une exploitation est en système bovin viande et la dernière est en système ovin viande. Chaque exploitation a des caractéristiques différentes, notamment en termes de richesse produite et de disponibilité en facteurs de production : revenu et trésorerie (en euros), surface fourragère (en ha), besoins du troupeau (en

⁵² Volontairement, l'objectif du jeu annoncé se place à l'échelle du système fourrager, et non à l'échelle collective du territoire : dans les faits, un éleveur pilote avant tout son exploitation, et ne pense pas *a priori* les conséquences de ses pratiques sous l'angle de la production d'un bien (ou d'un mal) collectif.

unités fourragères), main d'œuvre disponible (nombre de semaines). Un tour de plateau correspond à une année (une campagne agricole, commençant à l'automne et terminant en été).

Une partie dure 6 ou 7 tours, afin de pouvoir étudier les décisions de gestion du risque sur deux cycles de pullulation. En début de partie, chaque joueur reçoit une trésorerie égale à la moitié de son EBE, un capital de temps disponible (qui dépend du type de système – laitier ou allaitant, nombre d'UMO), 100 unités fourragères correspondant à une production sans aléa climatique ni pullulation de campagnols et démarre sur la case « départ » (début d'automne). Le joueur avance son pion sur le plateau en lançant un dé à 3 faces.

Chaque case correspond à une tâche ou un aléa dont la réalisation coûte du temps et/ou de l'argent à l'éleveur, mais qui peuvent aussi parfois rapporter du temps. Trois cases ne nécessitant aucune action, appelées « tout va bien », ont été ajoutées au plateau. Un tour s'achève lorsqu'un des joueurs termine un tour de plateau : tous les pions sont alors replacés sur la case « départ » et un nouveau tour commence. Ce mode de jeu permet de réduire le temps nécessaire pour terminer un tour et une partie. Au début de chaque tour, le joueur reçoit un revenu disponible égal à un quart de son EBE et réinitialise son capital temps disponible. Si un joueur a été déficitaire en temps pendant un tour, il doit « racheter » ses semaines en payant 500€ par semaine manquante.

A la fin de la partie, les joueurs font le bilan pluriannuel de leur gestion individuelle (trésorerie disponible ? coût de la lutte mise en place ? achats totaux de fourrages ?) et collective (ont-ils réussi à endiguer les pullulations ? pour quel coût de lutte total ?).

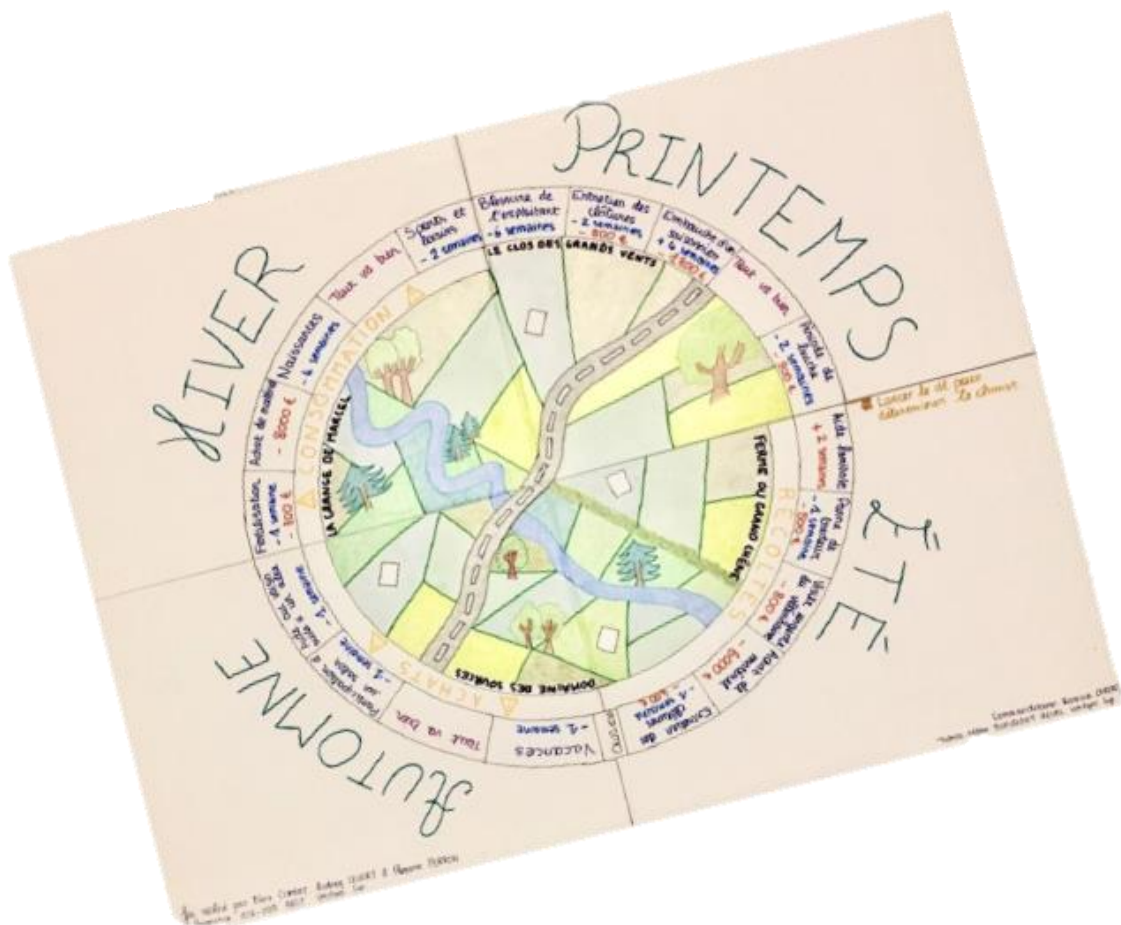


Figure 52 : Plateau du jeu CampaRISK

5.2.2. Transcription des processus agroécologiques

5.2.2.1. Prise en compte d'éléments constants

Dans un souci de simplification, plusieurs éléments agroécologiques ont été considérés comme fixes.

Besoins du troupeau et production

La SAU et le nombre d'UGB sont mentionnés à titre indicatif et sont fixes au cours de la partie. Le rapport UGB/SAU a été utilisé pour approcher l'autonomie fourragère de l'exploitation agricole. Les besoins du troupeau sont fixes et connus (fiche « exploitation »). Si les besoins du troupeau sont supérieurs à 100 UF, le système doit acheter du fourrage même en année « normale », s'ils sont inférieurs à 100 UF, le système est excédentaire et peut réaliser du stock en année « normale », s'ils sont égaux à 100 UF, le système est tout juste autonome en année « normale » (Aubron *et al.*, 2010).

Paysage et assolement

Si des spécificités paysagères locales ont été considérées, il est défini que les éleveurs ne transforment pas ce paysage, et ses caractéristiques restent constantes au cours de la partie. De plus, les systèmes considérés ne produisent qu'une seule ressource fourragère, l'herbe de prairie permanente. Cet assolement est considéré comme fixe, aucun fourrage annuel n'étant cultivé.

5.2.2.2. Prise en compte des processus cycliques

Saisonnalité

Les cases du plateau sont disposées de manière circulaire et sont équitablement réparties selon les quatre saisons. Ainsi, l'avancée des joueurs sur le plateau se traduit également par l'avancée du temps, de saison en saison. La prise en compte de la saisonnalité (cycle annuel) est utile pour permettre de séquencer l'année selon trois grandes périodes : la récolte (printemps, été), l'achat (automne) et la consommation (hiver) des fourrages. Ces opérations sont signifiées sur le plateau de jeu. Cela permet également de différencier les périodes de lutte contre les campagnols terrestres : automne (lutte chimique, piégeage), printemps (lutte chimique, mécanique) ou hiver (piégeage). Enfin, les différentes tâches et aléas que le joueur peut rencontrer sont réparties selon les saisons (Tableau 32).

Tableau 32 : Tâches et aléas du plateau du jeu selon les saisons

SAISON	TÂCHE/ALEA	DESCRIPTION	TEMPS	€
Automne	Vacances	Vous partez profiter des dernières journées de soleil. Le service de remplacement est gratuit.	- 1 semaine	/
	Tout va bien			
	Participation à un salon	Vous participez au salon de l'agriculture organisé près de chez vous afin de présenter vos animaux.	- 1 semaine	/
	Aide au voisin suite à un aléa	Un de vos voisins a besoin d'aide, vous décidez de l'aider. Cédez « 1 semaine » au joueur de votre choix.	- 1 semaine	/
HIVER	Fertilisation	Les travaux de fertilisation vous prennent plus de temps que prévu.	- 1 semaine	800
	Achat de matériel	Vous devez renouveler une partie de votre matériel. Lancez le dé à 6 faces : le montant à payer est égal à la valeur du dé * 1000.	/	Dé * 1000

	Naissances	Vous devez gérer une période de naissances et une surcharge de travail.	- 4 semaines	/
	Tout va bien			
	Sports et loisirs	Vous décidez de vous mettre au sport ou à une autre activité pour vous changer les idées.	- 2 semaines	/
PRINTEMPS	Blessure de l'exploitant	Vous êtes victime d'un accident du travail et êtes arrêtés pour une durée déterminée par le lancer du dé à 6 faces.	Résultat du dé à 6 faces (en semaines)	/
	Entretien des clôtures	Début du printemps : vous faites le tour de vos parcelles pour vérifier l'état de vos clôtures et réparer celles qui sont abimées.	- 2 semaines	800
	Embauche d'un saisonnier	Pour alléger vos travaux d'été, vous embauchez des saisonniers (rapporte du temps, coûte de l'argent).	+ 4 semaines	1800
	Tout va bien			
	Période de fauche	La fauche vous prend plus de temps que prévu.	- 2 semaines	900
ÉTÉ	Aide familiale	L'un de vos enfants revient à la ferme pour les vacances et vous accorde un peu de temps.	+ 2 semaines	/
	Panne de tracteur	Votre tracteur tombe en panne, vous décidez de le réparer vous-même (temps) ou de le faire réparer chez un mécanicien (€).	- 1 semaine	500
	Visite urgente du vétérinaire	L'un de vos animaux est malade, vous faites appel au vétérinaire.	/	500
	Achat de matériel	Vous devez renouveler une partie de votre matériel. Lancez le dé à 6 faces : le montant à payer est égal à la valeur du dé * 1000.	/	Dé * 1000
	Entretien des clôtures	Fin de l'été : vous faites le tour de vos parcelles pour vérifier l'état de vos clôtures et réparer celles qui sont abimées.	- 1 semaine	400

Pullulations de campagnols terrestres

Il a été démontré que les cycles de pullulation étaient de différentes natures selon les territoires concernés (Note, 2001). Les pullulations sont plus ou moins fréquentes, intenses ou longues selon les caractéristiques du paysage. Les démarrages de pullulations, réguliers, sont cependant peu expliqués, tout comme les déclin. Ainsi, pour rendre compte de ce caractère cyclique de la pullulation, les dynamiques de population à l'échelle du territoire suivent les variations présentées par la Figure 53.

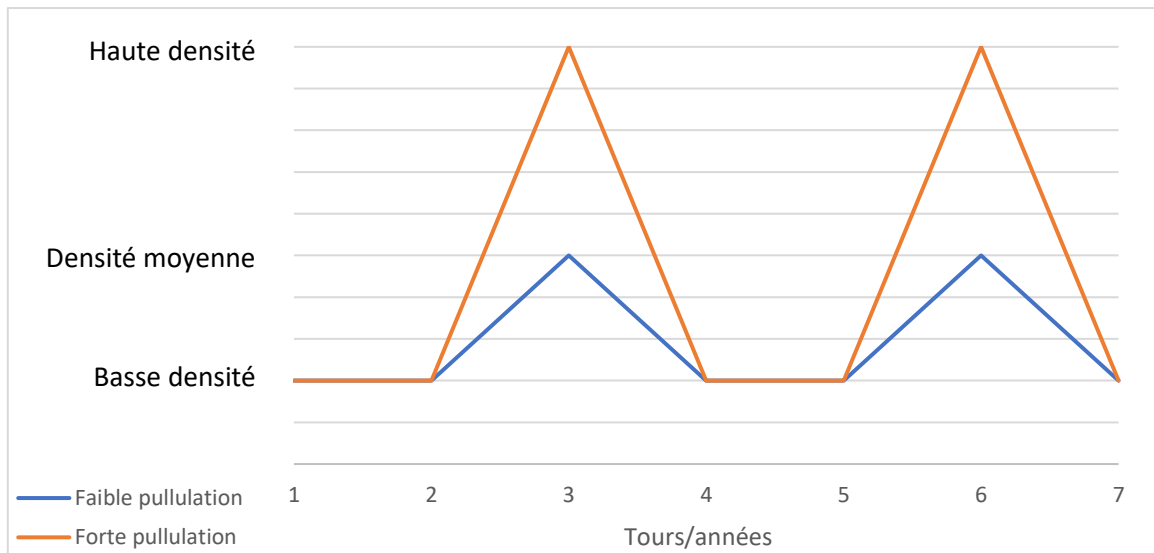


Figure 53 : Dynamique des populations de campagnols terrestres à l'échelle du territoire

Ces variations cycliques sont contenues dans un « carnet d'histoire » dont le rôle est d'accompagner les joueurs tour par tour. Ce carnet doit également permettre au jeu de fonctionner sans « animateur ». Lorsque le carnet d'histoire mentionne un démarrage de pullulation en année n (tours 3 et 6), le Tableau 33 présente l'intensité de la pullulation (F, forte ou f, faible) en fonction de la lutte collective menée sur le territoire en année $n - 1$ (β_{n-1}).

Tableau 33 : Détermination de l'intensité (F = Forte, f = faible) de la pullulation en année n sur le territoire en fonction de la lutte collective menée en $n - 1$ (β_{n-1})

β_{n-1}		Nombre total d'actions de lutte mises en œuvre en $n - 1$											
		0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10	11-12	13-14	15	16-17	18-19	20
Nombre de joueurs ayant lutté en $n - 1$	1	F	F	F									
	2	F	F	F	F	F	F						
	3	F	F	F	F	F	f	f	f	f			
	4	F	F	F	f	f	f	f	f	f	f	f	f

En cas de démarrage d'une pullulation en année n , le calcul des pertes fourragères pour l'éleveur i dont l'exploitation est située sur la zone (paysage) j , appelées $s_j \cdot X_{M,n}(\beta_{n-1}; \alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n})$, prend en considération quatre facteurs :

- (1) L'intensité de la pullulation à l'échelle du territoire en fonction de la lutte collective menée en $n - 1$ (β_{n-1} ; Tableau 33).
- (2) Les conditions météorologiques M de l'année n (les pertes relatives aux campagnols terrestres varient en fonction des conditions météorologiques ; Tableau 37).
- (3) Les efforts cumulés de lutte de l'éleveur i en année $n - 1$ ($\alpha_{i,n-1}$; préventif) et n ($\alpha_{i,n}$; curatif).
- (4) Le coefficient de sensibilité (paysage ; s_j) de la zone concernée.

Ces calculs donnent lieu à deux tableaux, créés d'après les données de Quéré *et al.* (1999) (Tableau 31) et présentés par la fiche de situation géographique et paysagère de l'exploitation agricole. L'un des tableaux renseigne les pertes en année météorologique bonne ou normale, l'autre en mauvaise année. Du Tableau 31 nous pouvons isoler, pour chaque condition météorologique, les pertes liées aux

pullulations de campagnols terrestres (Tableau 34). Enfin, l'effort de lutte cumulé de l'éleveur permet d'éviter une partie des pertes ; les pertes totales liées aux campagnols terrestres sont alors déterminées par un tableau (voir Tableau 35 pour le cas d'une année météorologique « normale »).

Tableau 34 : Pertes liées aux campagnols terrestres en fonction des conditions climatiques

Campagnols Météorologie	Sans Campagnols	Pullulation d'automne (« faible »)	Pullulation d'automne et de printemps (« forte »)
Année favorable	124	-9	-34
Année normale	100	-10	-35
Année défavorable	68	-5	-29

Tableau 35 : Pertes liées aux campagnols terrestres en année météorologique normale ou bonne pour un éleveur donné selon l'effort de lutte cumulé

β_{n-1} ► Cumul des actions de lutte menées en $n - 1$ et n par l'éleveur ▼	Pas de pullulation	Faible pullulation	Forte pullulation
0 action de lutte	0	-10	-35
1 à 5 actions de lutte	0	-5	-25
5 à 10 actions de lutte	0	-3	-15

Ce type de représentation et de calcul des pertes prend à la fois en compte la lutte collective (colonnes) et la lutte individuelle (lignes). De plus, la temporalité de la lutte est respectée avec la considération de la lutte préventive ($n - 1$) et curative (n) cumulées.

Enfin, en appliquant le coefficient de sensibilité (paysage, s_j), on obtient un troisième et dernier tableau (par exemple, le Tableau 36 pour une année normale ou bonne, et un paysage favorable aux pullulations, $s_j = 1,2$). Ce type de tableau permet au joueur de déterminer facilement la variable $s_j \cdot X(\beta_{n-1}; \alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n})$ du modèle mathématique.

Tableau 36 : Pertes liées aux campagnols terrestres en année météorologique normale ou bonne, avec un paysage favorable aux pullulation ($s_j = 1,2$), pour un éleveur donné selon l'effort de lutte cumulé

β_{n-1} ► Cumul des actions de lutte menées en $n - 1$ et n par l'éleveur ▼	Pas de pullulation	Faible pullulation	Forte pullulation
0 action de lutte	0	-12	-42
1 à 5 actions de lutte	0	-6	-30
5 à 10 actions de lutte	0	-4	-18

5.2.2.3. Prise en compte des processus aléatoires

Météorologie et production fourragère

La météorologie de l'année s'applique à tous les joueurs (pas de microclimat) ; elle est déterminée aléatoirement par un lancer de dé à six faces, en début d'été (pour rendre compte de l'incertitude qui implique des anticipations sur la réalisation des « états de la Nature »), sauf pour le premier tour, où l'année est considérée comme « normale ». La répartition des probabilités choisie est la suivante (Tableau 37), mais une hypothèse plus pessimiste peut choisir d'augmenter la fréquence des

« mauvaises » années, par exemple. Ce tableau permet au joueur de déterminer sa production de référence selon la météorologie de l'année ($P_{M,n}$).

Tableau 37 : Tirage aléatoire de la météorologie et production fourragère

Météorologie année n	Production $P_{M,n}$	Fréquence	Résultats du lancer de dé
Bonne année	124	1/3	1 ; 2
Année normale	100	1/2	3 ; 4 ; 5
Mauvaise année	68	1/6	6

Enfin, le prix des fourrages est également aléatoire et dépend de la météorologie de l'année en cours. De plus, l'unité fourragère (UF) est une grandeur relative qui dépend du type d'animaux présents sur l'exploitation : une UF pour un bovin lait est différente d'une UF pour un bovin viande, et ces UF sont différentes de celles pour un ovin. Ainsi, chaque exploitation agricole aura, sur sa fiche « exploitation », un tableau présentant, pour chaque condition météorologique, le prix d'achat d'une UF (exemple du Tableau 38 pour l'exploitation AOP Saint-Nectaire).

Tableau 38 : Prix des fourrages selon la météorologie pour l'exploitation bovin lait AOP Saint-Nectaire

Météorologie	Production $P_{M,n}$	Prix d'une unité fourragère (€)
Bonne année	124	200
Année normale	100	250
Mauvaise année	68	300

Divers aléas

Les cases du plateau correspondent à des aléas, au sens large (voir Tableau 32, p. 162). Leur occurrence dépend du lancer du dé à 3 face et est donc aléatoire. Certains aléas sont plus fréquents que d'autres (ce qui se traduit par un nombre de cases dédiées plus élevé), et leur intensité peut être variable et aléatoire (lancer du dé à 6 faces).

5.2.3. Transcription des processus socio-économiques

5.2.3.1. Objectif des joueurs-éleveurs

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 4.1 (p. 117), l'hypothèse classique d'une maximisation du profit n'a pas été retenue comme objectif du jeu. L'objectif du joueur-éleveur est de nourrir son troupeau pour assurer un niveau de production et de revenu fixé.

5.2.3.2. Temporalité, décisions et conséquences

Le pilotage d'un système agricole est complexe et intègre de nombreuses dimensions techniques, sociales ou économiques. Les processus à l'œuvre s'étendent souvent sur des périodes de temps long, et les décisions et conséquences doivent donc être observées sur plusieurs années. C'est dans l'objectif de pouvoir étudier les décisions des joueurs sur le long terme et leur adaptation au contexte (météorologie, campagnols) qu'une partie dure plusieurs années et couvre deux démarrages de pullulation.

Le joueur doit effectuer plusieurs types de décisions :

- Après son lancer de dé, le joueur peut décider de lutter contre le campagnol, selon la saison à laquelle il se trouve. Il existe 3 types de lutte différents (piégeage, chimique et mécanique). Toutes les méthodes de lutte ne sont pas applicables à toutes les saisons. Chaque méthode possède un coût en temps (réalisation par l'éleveur) ou en argent (externalisation). Le joueur ne peut appliquer qu'une seule fois chaque type de lutte par campagne. En cas de forte

pullulation (F), la lutte chimique est interdite (réglementation dont l'objectif est d'éviter les impacts sur la faune non cible). Les coûts de la lutte sont individualisés et dépendants de la taille de l'exploitation mais aussi du niveau de pullulation.

- La majorité des cases « aléas » offre la possibilité de choisir de « payer » en temps ou en argent.
- Enfin, les prix des fourrages étant variables, et selon l'autonomie fourragère permise par son système, l'éleveur peut choisir des anticipations (par exemple, profiter d'une bonne année pour acheter du fourrage à moindre prix, en prévision d'années futures moins favorables).

5.2.3.3. Flexibilité du mode de jeu

Le mode de jeu proposé est très flexible : les joueurs sont libres de se parler, d'échanger ou non, de se coordonner ou non. De la même manière, aucune règle n'empêche les joueurs d'effectuer des transferts de temps (entraide), de fourrages (solidarité) ou encore d'argent (échanges commerciaux). Cette flexibilité traduit assez bien les possibilités qui existent dans les faits pour que les éleveurs d'un territoire se coordonnent face à un risque collectif.

Le Tableau 39 présente un récapitulatif des éléments et processus principaux, des variables du modèle et leur transcription en outils de jeu.

Tableau 39 : Récapitulatif des éléments et processus principaux, des variables du modèle et leur transcription en outils de jeu

		Éléments, processus	Modèle	Jeu
Processus agroécologiques	Éléments fixes	Système d'élevage (temps, trésorerie, besoins en fourrages)	-	Fiche « exploitation » ; « semaines », « € » et « UF »
		Paysage	s_j	Fiche « géographie », plateau de jeu
	Éléments cycliques	Saisonnalité	-	Plateau
		Démarrage de la pullulation	d	Carnet d'histoire
		Intensité de la pullulation	β_{n-1}	Cartes « lutte » Carnet d'histoire
		Pertes individuelles	$s_j \cdot X(\beta_{n-1}; \alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n})$	Fiche « géographie »
	Éléments aléatoires	Météorologie	$P_{M,n}$	Lancer de dé à 6 faces Fiche « exploitation »
		Divers aléas	-	Plateau
Processus socio-économiques	Décision	Lutte contre les campagnols	$\alpha_{i,n-1} + \alpha_{i,n}$	Cartes « lutte » individualisées
		Achat de fourrages	-	Fiche « exploitation »
		Echanges (coordination, transferts)	-	Liberté des joueurs

5.3. Types de données produites par le jeu et pertinence

5.3.1. Suivi du jeu, acquisition et traitement de données

Si le jeu peut potentiellement fonctionner seul, la complexité des règles – qui traduit, malgré les simplifications, la complexité du réel – rend utile la présence d'un animateur de jeu, principalement pour le premier tour. L'animateur permet d'alléger la prise en main du jeu et l'acquisition d'automatismes (récolter, acheter et consommer les fourrages...). L'animateur peut également assurer le rôle de « banque » et distribuer argent et fourrages aux joueurs.

Avant le démarrage de la partie, un questionnaire initial est rempli par les joueurs. Ce questionnaire demande : des informations sur le système d'élevage (le cas échant), quelques questions et mises en situation au sujet de la gestion des pullulations de campagnols terrestres (il est notamment demandé aux joueurs de se positionner sur des affirmations tirées d'articles de presse) et enfin un ensemble de question (loterie) permettant de déterminer l'aversion au risque du joueur. A la fin de la partie, un questionnaire final est également rempli : il reprend les questions au sujet de la gestion des pullulations de campagnols et demande un retour des joueurs sur le jeu lui-même (notamment sur ce qu'ils pensent avoir appris grâce au jeu).

Enfin, le jeu peut être utilisé pour acquérir des données à la fois quantitatives (trésorerie, coûts des aléas, choix d'allocation des facteurs temps et monétaires) mais aussi qualitatives (échanges entre joueurs, modalités de prise de décision...). Pour relever facilement ces données au cours d'une partie, une grille a été élaborée (un tableau par tour) : un observateur entoure ou note les décisions des joueurs dans cette grille. Il est ensuite possible de produire des graphiques pour suivre l'évolution d'indicateurs ou bien d'analyser, par exemple, le rôle de certains joueurs pour la dynamique de groupe.

5.3.2. Etude des variations de trésorerie

Par exemple, la Figure 54 présente l'évolution de la trésorerie, du coût des divers aléas (hors météorologie et pullulations) et le coût de la pullulation (3^e année/tour). Lors de cette partie, les 3 premières années ont offert des conditions météorologiques « normales » et la pullulation démarrant au 3^e tour a été maîtrisée, si bien que les éleveurs n'ont perdu que quelques unités fourragères de production. Nous observons toutefois des variations importantes des trésoreries, qui ne peuvent être ni imputables aux aléas climatiques, ni aux pullulations. De plus, les variations sont différentes d'un joueur à l'autre. Deux facteurs peuvent expliquer ces variations et différences : (1) les choix d'allocation des facteurs temps et argent ; (2) la fréquence et l'intensité des divers aléas rencontrés.

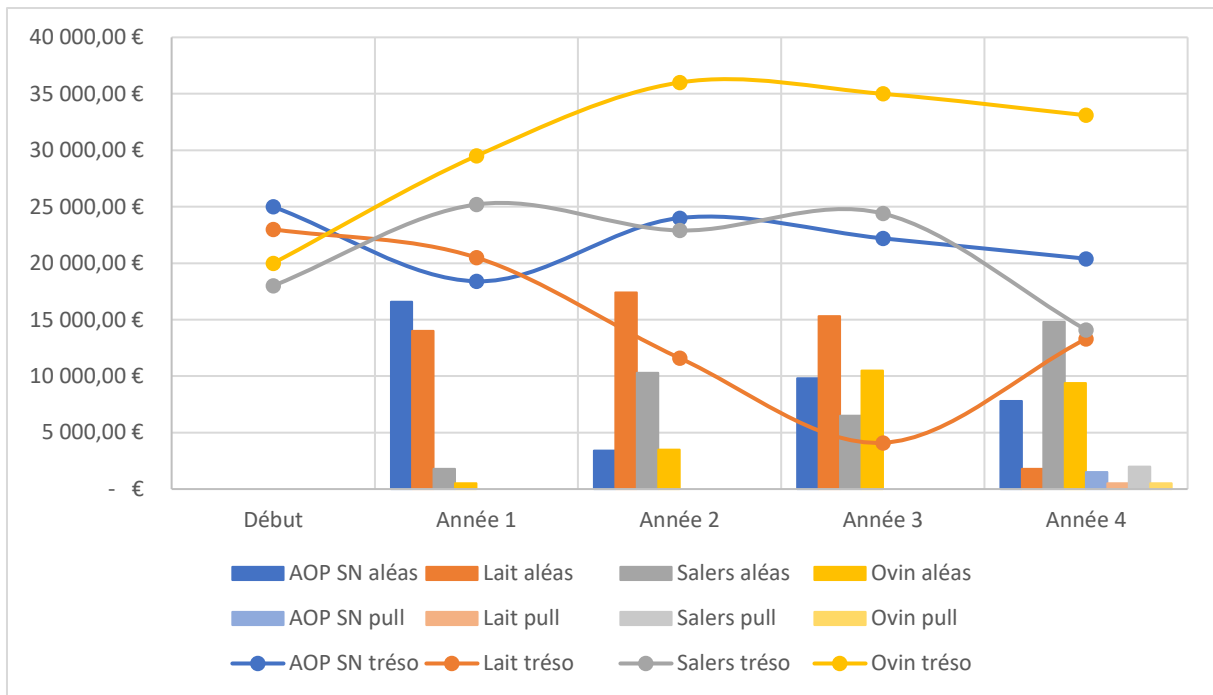


Figure 54 : Suivi de la trésorerie (courbes), des coûts des aléas divers (histogramme) et d'une pullulation (histogramme estompé) (données issues d'un test du jeu sur 4 années)

5.3.3. Etude des stratégies de gestion individuelles

La Figure 55 présente l'évolution du nombre d'actions de lutte menées par chaque joueur au cours de la partie. Trois stratégies peuvent être mises en évidence : la première (joueur AOP Saint-Nectaire, en bleu) consiste à apporter le même effort de lutte d'année en année ; la seconde (joueur lait, en orange) consiste à lutter modérément en prévision d'une pullulation, à accentuer l'effort pendant le pic de population puis à revenir à un effort de lutte modéré ; la troisième (joueurs Salers et ovin) consiste à trouver un effort de lutte moyen et à s'y maintenir. Il est notable que le joueur qui mène une lutte active et volontaire est celui dont l'autonomie fourragère est la plus faible mais aussi dont la trésorerie est la plus solide. Au contraire, les joueurs pouvant stocker du fourrage (lait et ovin) modèrent plus leurs efforts de lutte.

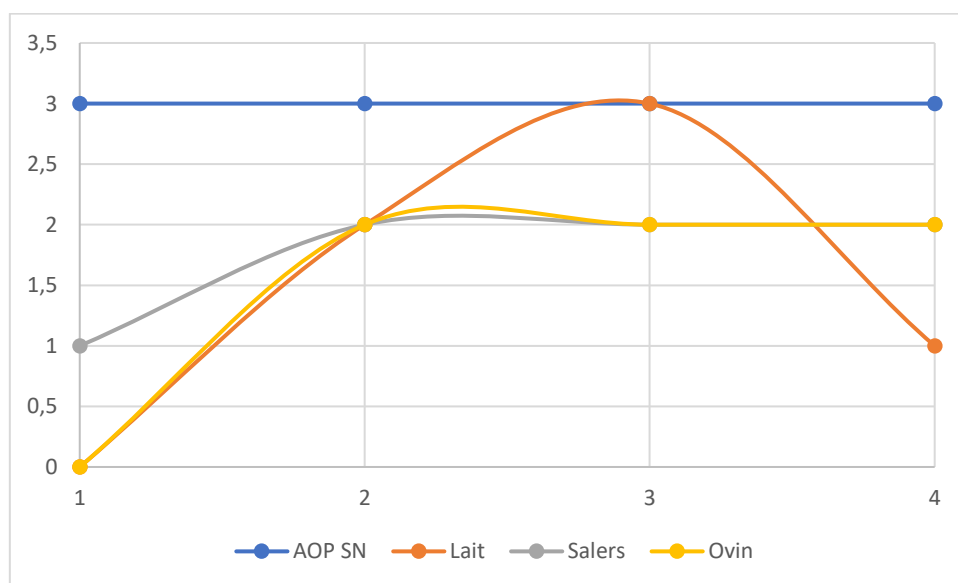


Figure 55 : Nombre d'actions de lutte menées par les joueurs (partie sur 4 années)

Ces données, graphiques et analyses n'ont pas vocation à être une généralisation. Ils démontrent toutefois la pertinence de l'outil « jeu » pour produire de telles données et permettre d'analyser des comportements de gestion impliquant à la fois des enjeux individuels et collectifs.

5.3.4. Intérêts du jeu

Ce jeu a été conçu pour répondre à un enjeu : la mobilisation collective des éleveurs face aux pullulations de campagnols terrestres. Seules les échelles du micro-territoire et de l'exploitation agricole sont modélisées, l'échelle de la parcelle étant mise de côté. Ce choix se justifie car l'objet du jeu n'est pas d'évaluer les compétences agronomiques de chaque joueur, mais leur capacité à construire une stratégie collective de lutte contre les pullulations sur un territoire dépassant l'échelle de l'exploitation agricole. Pour juger de l'efficacité de cet outil, des essais devront être menés sur plusieurs terrains, avec des agriculteurs concernés et des techniciens. Les premiers retours des tests que nous avons réalisés sont encourageants. Notamment, le jeu semble avoir de réelles vertus pédagogiques, en permettant aux joueurs de mieux comprendre les mécanismes agroécologiques et socioéconomiques sous-jacents à cette situation de gestion du risque. De la même manière, l'intérêt scientifique du jeu (collecte de données) devra être plus amplement étudié en constituant et analysant un jeu de données plus conséquent.

Afin de limiter les possibilités de stratégies individuelles, de nombreux éléments des systèmes sont fixes au cours de la partie. Notamment, il est considéré que les exploitations agricoles sont figées dans leur configuration de départ : taille du troupeau, surfaces, paysage local. Cela a pour conséquence de rendre impossible certains choix de gestion qui peuvent impacter l'autonomie fourragère et/ou le revenu : réduire la taille du troupeau (augmentation de l'autonomie fourragère, baisse des revenus) ou augmenter la surface disponible (augmentation de l'autonomie fourragère mais aussi du temps de travail nécessaire), etc. Cela permet de limiter les choix *individuels* de gestion du risque pour se concentrer sur les solutions *collectives*, qui sont l'objet de notre étude. La possibilité de produire des fourrages annuels pour diversifier l'alimentation du troupeau (augmentation de la production) et gérer les risques (aléas climatiques et pullulations) est difficile à intégrer au jeu, car cela suppose de considérer non plus l'échelle générale de l'exploitation agricole, mais celle de la parcelle. En effet, en début de campagne de production, le joueur devrait choisir son assolement, ce qui modifie à la fois la production de fourrages herbagers, la production de fourrages annuels, la productivité du troupeau, mais aussi la sensibilité aux pullulations de l'exploitation et du territoire. Cela nécessiterait des jeux de carte supplémentaires, avec le risque d'alourdir le fonctionnement du jeu.

Conclusion sur le jeu sérieux

Au-delà de la conception du jeu, la nécessité de déterminer et simplifier un modèle bioéconomique relatif à la production fourragère et à sa variabilité (sécheresses, pullulations de campagnols) a permis une mise en équation simple expliquant ces phénomènes ainsi que la mise en évidence des paramètres agroécologiques fondamentaux. Ce modèle bioéconomique pourrait être aisément repris et adapté pour d'autres travaux de modélisation informatique souhaitant étudier l'effet de stratégies de gestion des systèmes fourragers intégrant à la fois le risque de sécheresse et le risque de pullulation de campagnols terrestres.

La transcription de ce modèle bioéconomique en règle du jeu a permis de reproduire assez fidèlement les processus sous-jacents. Si le jeu assume son caractère simplifié et virtuel, les premiers tests semblent montrer que le passage du virtuel au réel était rapide à opérer. Le jeu fonctionne globalement bien ; le « moteur » du jeu fonctionne parfaitement et traduit convenablement les

mécanismes agroécologiques et socioéconomiques⁵³. De plus, la grande flexibilité du mode de jeu permet d'envisager aisément de nombreuses adaptations ou précisions, mais permet aussi et surtout aux joueurs de définir eux-mêmes les modes de décision, en jouant individuellement ou plus collectivement : aucun comportement n'est imposé par les règles du jeu. Enfin, la double perspective visée par la conception du jeu semble respectée (acquisition de données scientifiques et animation d'un collectif de lutte). Toutefois, cette flexibilité est aussi la cause de l'écueil majeur de la version actuelle du jeu est le temps nécessaire pour compléter une partie entière (7 tours), estimé entre 2h et 2h30. Ce temps de jeu est d'autant plus long que les joueurs échangent et se coordonnent.

Au-delà des améliorations nécessaires pour accélérer la vitesse du jeu, il sera nécessaire de mener plusieurs tests supplémentaires. Ces tests doivent avoir pour double objectif, avec le concours de techniciens, de permettre à des éleveurs d'échanger concrètement sur la stratégie de gestion pertinente pour leur territoire et aussi de générer de nouvelles données pour aider les chercheurs à comprendre les logiques des éleveurs pour la gestion de leurs systèmes fourragers. De plus, les simulations informatiques rendues possibles par nos travaux de modélisation spatiale multiagent (Chapitre 7, p. 188) pourraient fournir des données pour permettre l'amélioration du jeu.

⁵³ Deux agriculteurs avec qui nous avons pu tester le jeu se sont reconnus dans les situations décrites par le jeu et n'ont pas relevé d'incohérences dans le modèle proposé.

Chapitre 6. Défaillance de l'action collective face aux pullulations de campagnols

A ce jour, les cycles de pullulations n'ont pas été endigués et les dommages économiques associés affectent toujours significativement les trésoreries des exploitations d'élevage, déjà fragilisées par un contexte économique défavorable. Les retours d'expérience et la littérature tendent à montrer qu'il existe un manque d'implication des éleveurs face aux pullulations de campagnols terrestres (Michelin *et al.*, 2014), alors même que des suivis de long terme sur le terrain vont dans le sens d'une action menée collectivement et précocement (Giraudoux *et al.*, 2017). Les enjeux relatifs à la gestion du risque de pullulation sont toujours d'actualité et importants ; ils recouvrent de nombreux aspects techniques, écologiques, règlementaires et institutionnels.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre, au-delà de l'efficacité technique des moyens d'action proposés, les difficultés rencontrées pour faire face aux pullulations de campagnols terrestres. La principale difficulté semble résider dans la dimension spatiale du phénomène : comme le modélise le jeu sérieux présenté au Chapitre 5, les agriculteurs partagent un espace productif commun affecté par les pullulations d'un ravageur dont les dommages constituent une externalité spatiale importante (Smith *et al.*, 2009), transférable d'une parcelle à l'autre. Or, l'existence de structures de propriété au sens de Coase (1960) fragmente la gestion d'un espace qui relève pourtant d'une forte homogénéité agroécologique. Une partie du problème de gestion des pullulations est que les éleveurs prennent des décisions en considérant uniquement les bénéfices et les coûts potentiels qui concernent leurs propres parcelles (Epanchin-Niell et Wilen, 2015) ou plus largement leur propre système fourrager. Les droits de propriété fournissent des incitations insuffisantes pour gérer les processus spatiaux au niveau social optimal (Hansen et Libecap, 2004), et globalement, chaque agent est incité à sous-contrôler le phénomène à l'échelle du paysage/territoire (Epanchin-Niell et Wilen, 2015; Fenichel *et al.*, 2014), considérant que les populations de ravageurs constituent une variable exogène, dépendante de facteurs environnementaux et sociaux extérieurs au système de production (Feder et Regev, 1975).

L'hypothèse d'une sous-implication dans la production d'un bien collectif (la maîtrise des populations de campagnols) nous semble être la plus pertinente à traiter à ce stade de nos travaux (Cornes, 1993; Hirshleifer, 1983). La littérature définit plusieurs types de biens collectifs :

- La vision orthodoxe du bien collectif décrit que chaque individu peut consommer une quantité de ce bien égale à la somme de toutes les contributions individuelles à sa production.
- Hirshleifer (1985, 1983) propose une autre définition, celle du *weakest-link collective good* : la quantité totale du bien collectif disponible pour chaque agent est égale à la plus petite contribution individuelle.
- La description d'un *weaker-link collective good* propose que la sous-implication d'un agent réduit mais n'annule pas les efforts des autres agents impliqués dans la production du bien collectif.
- Enfin, il est possible d'envisager un *best-shot collective good* si la quantité totale de bien collectif disponible est égale à la plus grande contribution individuelle.

Dans le cas des pullulations de campagnols terrestres, l'hypothèse la plus probable serait celle d'un *weaker-link collective good* : « On peut raisonnablement suggérer que certains phénomènes biologiques ou agricoles sont assez bien captés par une formulation weaker-link. Un arboriculteur qui échoue à contrôler un ravageur ou une maladie peut imposer des coûts signifiants à ses voisins, réduisant ainsi les bénéfices d'un programme de contrôle des ravageurs plus intensif par les autres agents, sans pour autant les rendre nuls comme dans le cas d'un weakest-link » (Cornes, 1993, p.261). Nous proposerons de vérifier cette hypothèse à l'aide d'un modèle multi-agent spatialisé dans le Chapitre 7.

Le Chapitre 6 se propose d'expliquer la défaillance de l'action collective constatée par les techniciens, les chercheurs et certains éleveurs.

Cette situation peut, à première vue, nous interpeller : le phénomène que nous étudions semble créer un intérêt commun à l'action collective. Pourtant, malgré les modalités d'action proposées, nous observons que les éleveurs ne mettent pas « naturellement » en place une telle action collective : il s'agit là de l'interrogation fondamentale d'Olson (1965). Nous proposons donc de repartir du cadre théorique proposé par Olson pour comprendre le faible engagement des éleveurs dans l'action collective. L'originalité de notre travail est de compléter ce cadre théorique en y intégrant des éléments d'économie néo-institutionnelle, notamment l'étude de quatre composantes des mécanismes de coordination issues des travaux de Brousseau (1995) et Brousseau et Glachant (2000), à savoir les institutions, les contrats, l'information et la confiance, mais aussi en considérant les travaux de North (1990) et Menard (2003) sur l'application et le suivi des contrats par les micro-institutions. Enfin, nous convoquons quelques dimensions de la théorie du capital social (Burt, 1995, 1992; Coleman, 1988; Granovetter, 1983; Lin *et al.*, 2001; Putnam, 2001) pour renforcer l'analyse du rôle de la confiance dans la coordination.

Après avoir détaillé le cadre d'analyse, notre hypothèse et la méthodologie employée (6.1), nous présenterons les principaux résultats de l'étude (6.2) puis discuterons les résultats (6.3).

6.1. Cadre d'analyse : renouveler l'analyse de l'action collective par une approche néo-institutionnelle

Nous proposons une approche fondée, d'une part, sur une analyse empirique d'un cas d'étude précis, avec une volonté opérationnelle, et d'autre part, sur une analyse théorique en concevant un cadre d'analyse général de l'action collective, repartant du paradigme d'Olson mais cherchant à le dépasser en intégrant des éléments de l'économie néo-institutionnelle.

6.1.1. Aborder différemment les risques ravageurs

L'économie du risque propose diverses approches pour analyser et gérer les événements affectant négativement les systèmes économiques. Si les risques climatiques (dont la survenance est aléatoire et indépendante des pratiques humaines individuelles) sont assurables, ce n'est pas le cas des risques sanitaires (dont la survenance est fortement affectée par les pratiques individuelles ; voir 2.3.2, p. 84). Les pullulations de campagnols terrestres constituent un risque dont la fréquence et l'intensité, ainsi que le caractère systémique (les exploitations agricoles exposées étant touchées en même temps), diminuent fortement l'assurabilité (voir Chapitre 3, p. 94). Nous proposons de chercher une solution pour la gestion de ce risque non pas dans la compensation *ex-post* des dommages mais dans la prévention *ex-ante*, notamment pour en limiter la survenance. Il s'agit d'une approche économique classique de la gestion des maladies ou ravageurs (Epanchin-Niell et Wilen, 2015; Fenichel *et al.*, 2014; Krebs, 2016; Smith *et al.*, 2009).

Comme nous l'avons vu, les caractéristiques spatiales et temporelles du risque de pullulation nécessitent la mise en œuvre d'une gestion collective, ce qui constitue un lien fort entre les agriculteurs d'une même zone vulnérable et les rassemble autour d'un intérêt commun : la gestion des pullulations et la protection des systèmes fourragers. Le manque d'action collective apparaît donc comme contre-intuitif. Les coûts de la lutte contre les ravageurs sont souvent avancés pour expliquer un sous-engagement des agents. Il s'agit indéniablement d'un facteur important (Cabon-Dhersin et Ramani, 2007), mais nous entendons montrer qu'il n'est pas le seul que nous devrions prendre en considération dans la conception d'une politique publique efficace pour augmenter la participation des éleveurs à la lutte.

Nous formulons l'hypothèse que *des différences d'analyse du risque et un manque d'incitations sélectives sont la cause d'un défaut de coordination entre les acteurs.*

6.1.2. Cadre d'analyse de la coordination face aux risques

Olson (1965), en traitant le paradoxe qu'il observe, met en évidence plusieurs facteurs explicatifs : le coût initial élevé de l'action collective, la persistance d'un état de « groupe latent » où l'action individuelle est découragée, le faible pouvoir mobilisateur des incitations sélectives « positives » (par opposition aux contraintes réglementaires, par exemple) ainsi que la taille du groupe, qui doit être suffisamment grand pour être efficace et suffisamment petit pour réduire les coûts de transaction et les asymétries d'information. Nous souhaitons compléter ce cadre d'analyse en proposant une lecture plus fine de la défaillance de coordination observée dans notre cas d'étude. En effet, il existe différents modes de coordination des échanges entre agents économiques : le marché, les contrats, les entreprises, les conventions et les institutions. Nous nous concentrerons sur l'étude de quatre composantes de la coordination pour comprendre les facteurs limitants de l'action collective (Brousseau, 1995) : les institutions, les contrats, l'information et la confiance (Figure 56). Ces quatre composantes nous serviront de grille de lecture des enquêtes réalisées.

Nous appelons institution un ensemble de règles, encadrées dans des dispositifs qui mettent en place puis mettent en œuvre des modes d'organisation des transactions (Menard, 2003). Ces institutions peuvent être formelles (contrats, décrets, règlements, cahiers des charges...) ou informelles (capital social). Pour North (1990), les institutions sont le moyen de stabiliser l'environnement économique et de rendre un comportement souhaité plus probable. En effet, les politiques publiques ont pour objectif d'encadrer les actions des agents économiques afin d'encourager les comportements considérés comme positifs, et de décourager ceux considérés comme négatifs. Les institutions ont un effet direct sur les dynamiques transactionnelles qu'il convient d'interroger : les coûts de transaction expliquent une partie des arrangements institutionnels (Coase, 1937, 1960). Les dispositifs en charge d'implémenter les règles sont souvent pensés à l'échelle nationale mais mis en œuvre plus localement par des micro-institutions, au sens de la théorie des institutions-relais développée par Menard (2003). Le mandat de gestion est alors délégué aux parties prenantes locales, et ces micro-institutions, en réduisant les frictions et donc les coûts de transaction supportés directement par les agents, ont pour objectif de favoriser l'articulation des décisions prises par les acteurs locaux, en accord avec le cadre réglementaire. Les institutions, et en particulier les micro-institutions, sont des acteurs majeurs de la coordination.

Les contrats sont souvent utilisés comme outils de coordination. Classiquement, un contrat est défini comme un « *dispositif bilatéral de coordination* » (Brousseau et Glachant, 2000). Les contrats s'insèrent dans un cadre plus large de coordination par le marché ou les institutions, qui jouent alors le rôle d'arrangements collectifs pour articuler ces accords bilatéraux. L'étude des contrats pose de nombreuses questions, et en particulier celles de leur mise en place et du suivi de leur mise en œuvre. Pour cela, North (1990) propose d'interroger, d'une part, l'*enforceability* des contrats et, d'autre part, leur *enforcement*. L'*enforceability* correspond à la capacité de mettre en place *ex-ante* des règles et procédures prévues. La théorie néo-institutionnelle, se plaçant dans une hypothèse d'incertitude radicale et de rationalité limitée (cf. 1.4.3, p. 49), considère que les contrats sont incomplets (Brousseau et Glachant, 2000; Kirat, 2003). Ceci est le fait d'asymétries d'information entre agents, de la difficulté d'envisager l'ensemble des états de la Nature possibles mais aussi du compromis à trouver entre la précision des contrats et le coût de négociation associé (théorie des coûts de transaction). Le rôle des micro-institutions est alors d'adapter l'application des règles pour augmenter le niveau de coordination. Pour cela, elles peuvent jouer sur l'*enforcement* des contrats, c'est-à-dire leur propre capacité à rendre les contrats opérationnels *ex-post*, afin notamment de sécuriser la transaction entre

agents en repérant et sanctionnant les comportements opportunistes (aléa moral, passager clandestin au sens d'Olson). Cette capacité de contrôle dépend des coûts associés à l'observation des variables mais aussi de l'acceptabilité des sanctions par les agents. En cela, les institutions sont souvent défailtantes et ne sont pas en capacité de vérifier les variables nécessaires au suivi du contrat.

La théorie des contrats (voir 1.4.3, p. 49) insiste par ailleurs sur la nécessité mais également la difficulté de travailler à la réduction des asymétries d'information entre agents : l'information est la troisième composante de la coordination que nous analysons. Lorsque le comportement des agents n'est pas directement observable par l'ensemble des parties prenantes d'un contrat, alors la mise en place et la mise en œuvre d'un tel contrat souffre de son incomplétude. Dans le cas où les *outputs* qui font l'objet de la contractualisation dépendent d'un effort collectif, ces asymétries d'information peuvent être la cause d'un sous-engagement de certains agents adoptant un comportement de passager clandestin (Holmstrom, 1982). Plus généralement, une telle situation peut conduire à un sous-engagement de l'ensemble des agents. L'acquisition d'une information sur le comportement mais aussi la situation individuelle de chaque agent peut s'avérer coûteuse pour le Principal. Par ailleurs, au-delà de la question de l'aléa moral, la création et le partage des connaissances et de l'information est un enjeu important de la gestion des risques (voir 1.5, p. 53 et 2.1, p. 60). L'enjeu de l'information concerne donc à la fois le contexte qui s'impose aux agents mais également leur comportement individuel et collectif.

Enfin, la dernière composante de la coordination étudiée est la confiance entre les agents : « *les garanties informelles et non-écrites sont des préconditions au commerce et à la production* » (Akerlof, 1970). La confiance peut être définie comme un mécanisme de coordination informel et volontaire facilitant les relations collaboratives (Bornarel, 2007; Hosmer, 1995). La confiance repose sur un jugement moral des comportements des partenaires (intégrité, honnêteté ou au contraire opportunisme). Un agent accepte de « faire confiance » en laissant un autre agent réaliser une tâche sans pour autant pouvoir contrôler précisément le comportement de ce dernier (information imparfaite). Si la confiance est le seul mécanisme de coordination, la vulnérabilité de l'agent qui « concède » sa confiance est plus grande qu'en présence d'autres mécanismes plus formels. Dans un contexte où l'évolution des *inputs* ou des *outputs* n'est pas ou peu contrôlable et où il existe un fort degré d'interdépendance entre agents, un haut niveau de confiance est nécessaire pour qu'émerge une action collective. La confiance est notamment nécessaire parce qu'il est difficile d'inclure, dans un contrat ou autre dispositif règlementaire, un partage complet des responsabilités. Notamment, lorsqu'un risque ne peut être géré que par l'action collective, cela le place dans le régime de la responsabilité limitée : « *la règle de responsabilité limitée prévaut lorsque le dommage n'est pas imputable au comportement d'un acteur économique donné, mais à un risque social de nature systémique* » (Kirat et Marty, 2007). La manière dont les institutions et les contrats répartissent la responsabilité entre les agents peut augmenter, ou au contraire diminuer, la confiance réciproque entre eux. Enfin, la confiance repose sur le partage d'information entre les agents. En cela, la confiance est une forme de capital social comme décrit, par exemple, par Coleman (1988), c'est-à-dire un ensemble de normes de coopération, de principes de comportements, fonctionnant comme autant de contraintes informelles sur les décisions des agents (Girard, 2012). Cette forme de capital social est productive, au sens où la confiance est facilitatrice de l'action collective. La « certitude », au sein d'un groupe constitué, que les autres agents vont se comporter comme attendu est un avantage informationnel permettant de réduire les coûts de coordination (Burt, 1995, 1992). Cet avantage informationnel sera d'autant plus utile pour la coordination que les agents seront en capacité de mobiliser des ressources variées pour l'acquérir (Granovetter, 1983; Lin *et al.*, 2001).

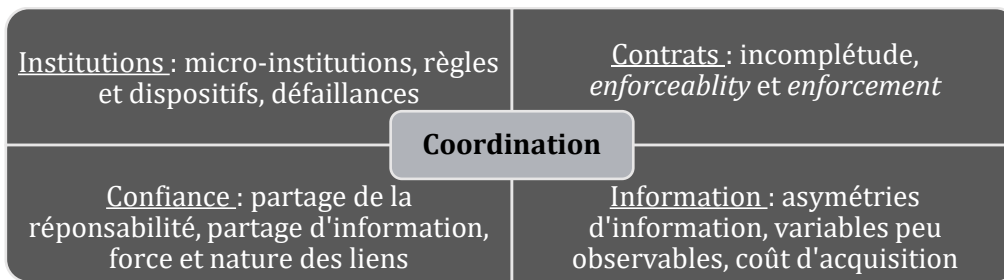


Figure 56 : Cadre d'analyse de la coordination proposé (auteur)

6.1.3. Le recueil sur l'action collective et les comportements individuels

Pour tester l'hypothèse que nous avons formulé, à savoir que des différences d'analyse du risque et un manque d'incitations sélectives sont la cause d'un défaut de coordination entre les acteurs, nous avons mené deux séries d'enquêtes qualitatives.

L'objectif de ces enquêtes est d'obtenir une vision générale du fonctionnement du système institutionnel impliqué dans la gestion du risque de pullulation de campagnols terrestres. Nous avons également analysé les textes règlementaires (règlement européen, Code Rural, arrêtés et décrets), les contrats de lutte proposés aux éleveurs ainsi que les bulletins d'information qui sont régulièrement produits par diverses institutions.

- (1) La première série d'enquêtes rassemble des entretiens semi-directifs menés auprès d'une douzaine d'acteurs institutionnels impliqués dans le processus de gestion des pullulations de campagnols terrestres en Auvergne (techniciens d'OVS⁵⁴, de chambres d'agriculture, services déconcentrés de l'Etat, élus, représentants de la profession agricole, fonds de mutualisation, chercheurs). Chaque acteur a été interrogé sur la manière dont il aborde la gestion du risque de pullulation et le regard critique qu'il porte sur le système de gestion actuel. Le traitement général de ces données a été réalisé sous forme de d'acteurs, présentés dans nos résultats.
- (2) Une seconde série d'enquêtes a été réalisée auprès d'éleveurs auvergnats sous la forme d'un questionnaire auquel ils ont répondu en ligne ou en entretien. Ce sont 16 exploitations d'élevage situées dans le Cantal (15) et le Puy-de-Dôme (63) qui ont été enquêtées. Parmi ces élevages, 10 sont en système laitier, 5 en système allaitant et 1 en système mixte. La SAU moyenne de ces exploitations est de 108 ha, le nombre moyen d'UGB⁵⁵ est de 121. Les questions fermées ont permis d'obtenir des résultats homogènes sur la perception du phénomène, les pratiques individuelles de gestion du risque, l'avis critique de l'éleveur sur les dispositifs de lutte, etc.

Notre objectif est de comparer le système actuel de lutte avec les enseignements de la théorie économique. Pour cela, le traitement de ces données a été réalisé en deux temps. Nous avons d'abord identifié les dispositifs formels ou informels mis en jeu dans le système de lutte contre les pullulations. Une première grille d'analyse de ces dispositifs, comprenant plusieurs items, a été construite : les acteurs impliqués dans le dispositif, sa temporalité, le type de stratégie privilégiée (action *ex-ante*, compensation *ex-post*...), les actions/outils concrets mobilisés, les critères et modalités d'entrée dans le dispositif, son efficacité perçue par les acteurs enquêtés, ses lacunes et améliorations possibles, son coût et mode de financement, et enfin son lien avec les autres dispositifs identifiés. Ce premier traitement a permis la caractérisation des dispositifs constituant le système de lutte, pour d'une part,

⁵⁴ Organismes à Vocation Sanitaire

⁵⁵ Unité Gros Bétail

organiser les données collectées et, d'autre part, les croiser et mettre en évidence les convergences ou différences d'analyse et de perception entre les acteurs enquêtés. Nous avons déduit de cette analyse que les défaillances observées de l'action collective ne provenaient pas d'un manque *a priori* de dispositifs institutionnels, mais plutôt d'un défaut de coordination. Ainsi, dans un second temps, ces résultats ont été retraités selon le prisme des quatre composantes de la coordination présentées précédemment : les institutions, l'information, les contrats, la confiance (Figure 56), dans une perspective plus analytique. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

6.2. Résultats : comment expliquer le manque d'action collective face à un risque majeur ?

6.2.1. Un système institutionnel complet mais en manque de moyens

Avant 2019, le cadre réglementaire encadrant la gestion des risques sanitaires prenait place au niveau national. Plus particulièrement, les campagnols terrestres étaient considérés comme des organismes nuisibles sous mesure d'action obligatoire sur une zone définie par l'Arrêté ministériel du 31 juillet 2000⁵⁶, puis classés comme « dangers sanitaires de catégorie 2 » par le Décret n°2012-245 du 30 juin 2012⁵⁷. Cela avait pour conséquence d'attribuer la responsabilité *collective* de leur gestion aux agriculteurs. La catégorie 1 rassemblait les dangers sanitaires majeurs, considérés comme très contagieux et soumis à des mesures exceptionnelles pilotées par les services de l'Etat (exemple : FCO) ; la catégorie 3 rassemblait les dangers sanitaires peu contagieux et dont la gestion était laissée à la discrétion de l'action individuelle.

Depuis 2019, le règlement européen 2016/2031⁵⁸ a remplacé l'ancien cadre réglementaire national. Il crée six catégories réglementaires, retranscrites dans le droit français à l'article L251-3 du Code Rural. Aucun organisme nuisible vertébré n'est considéré par la catégorisation européenne. Les Etats membres peuvent toutefois inscrire dans la 6^e catégorie les « *autres organismes nuisibles [...] pour lesquels il peut être nécessaire, dans un but d'intérêt collectif, de mettre en œuvre des mesures de prévention, de surveillance ou de lutte* »⁵⁹. En France, le campagnol terrestre figure à l'annexe A de l'arrêté du 16 avril 2020⁶⁰, ce qui le classe dans cette 6^e catégorie.

Le cadre réglementaire spécifique à l'action contre les campagnols terrestres⁶¹ n'a pas été modifié par ce changement réglementaire et repose sur deux principes majeurs permettant la mise en œuvre d'un levier technique de gestion : (1) la surveillance des populations de campagnols et (2) l'action précoce et collective contre les pullulations. Il est demandé aux Organismes à Vocation Sanitaire (OVS) de suivre et d'animer les actions de lutte contre les pullulations ainsi que de construire un plan d'action régional. Ces organismes professionnels ont notamment pour mission de coordonner l'action collective entre les agriculteurs (accompagnement technique, formation, achat en commun de matériel et de

⁵⁶ Arrêté ministériel du 31 juillet 2000 établissant la liste des organismes nuisibles aux végétaux, produits végétaux et autres objets soumis à des mesures de lutte obligatoire

⁵⁷ Décret n° 2012-845 du 30 juin 2012 relatif aux dispositions générales organisant la prévention, la surveillance et la lutte contre les dangers sanitaires de première et deuxième catégorie

⁵⁸ Règlement (UE) 2016/2031 du Parlement Européen et du Conseil du 26 octobre 2016 relatif aux mesures de protection contre les organismes nuisibles aux végétaux

⁵⁹ Article L251-3 du Code Rural

⁶⁰ Arrêté du 16 avril 2020 portant établissement des listes d'organismes nuisibles au titre du 6° de l'article L. 2513 du code rural et de la pêche maritime

⁶¹ Arrêté du 14 mai 2014 relatif au contrôle des populations de campagnols nuisibles aux cultures ainsi qu'aux conditions d'emploi des produits phytopharmaceutiques contenant de la bromadiolone

produits...). Des groupes locaux (GDON⁶²) sont animés par les agriculteurs et soutenus par les techniciens de la structure départementale (FDGDON⁶³) ou régionale (FREDON⁶⁴).

De plus, depuis 2016, le FMSE, Fonds national agricole de Mutualisation du risque Sanitaire et Environnemental, a mis en place des mesures pour « soutenir les actions contre les pullulations de campagnols terrestres » (Lidsky *et al.*, 2017). Le FMSE verse des subventions aux éleveurs signataires d'un contrat de lutte contre les pullulations de campagnols pour compenser les investissements de lutte ; aucun dispositif *permanent* pour compenser les dommages n'est actuellement en place. L'intérêt de ce dispositif est de mobiliser un levier incitatif pour réduire le coût de la lutte supporté par les éleveurs et augmenter la mise en œuvre du levier technique.

Enfin, la grande diversité d'acteurs impliqués (Etat, OVS, chercheurs, éleveurs...) appelle à une coordination verticale entre eux (*cf.* Figure 25, p. 80). Un espace de coordination, animé par un préfet et les services déconcentrés de l'Etat (DRAAF⁶⁵, DDT⁶⁶), se réunit environ deux fois par an, à l'échelle du Massif Central et des départements. Le SIDAM⁶⁷ est l'instance professionnelle en charge du suivi des dossiers (recherche, cadre réglementaire, financements, etc.).

Ainsi, face au risque de pullulation de campagnols terrestres, un cadre réglementaire national et une organisation de l'action à l'échelle locale ont été mis en place. De nombreux et divers institutions et acteurs sont impliqués, à différentes échelles (Figure 25, p. 80). La réglementation est plutôt claire et devrait amener les agriculteurs à se rassembler et planifier l'action collective (arrêtés préfectoraux de « lutte obligatoire » à l'échelle départementale). Aucun contrôle ni aucune sanction ne sont cependant prévus pour les éleveurs qui ne s'impliqueraient pas dans l'action collective. Ce cadre réglementaire est aujourd'hui remis en question : la gestion du risque de pullulation est-elle uniquement imputable aux agriculteurs ? Répondre à cette question revient à confirmer ou infirmer les choix de politiques publiques qui ont été faits depuis plusieurs années, notamment le choix de développer des contrats de lutte. Un changement de la réglementation concernant la gestion du risque de pullulation (modification de l'arrêté de mai 2014) pourrait ouvrir la possibilité d'une indemnisation systématique des pertes par le FMSE. Cela constituerait un budget très conséquent pour le Fonds : lors de la pullulation de 2016, les dommages ont été estimés à 20 millions d'euros par le FMSE, qui a débloqué une enveloppe de 6,1 millions d'euros, cofinancés avec des fonds européens. Pour donner un ordre de grandeur, le budget annuel de la section commune du FMSE est de 10 millions d'euros, destinés à l'ensemble des productions agricoles.

Les FDGDON et GDON ont la responsabilité de la relation sur le terrain avec les éleveurs et de l'animation concrète de la lutte. Ces structures sont les micro-institutions chargées de mettre en œuvre les règles décidées nationalement et d'organiser la coordination horizontale entre éleveurs d'un même territoire, rendue nécessaire par la complexité agroécologique du phénomène. Toutefois, les techniciens soulignent que le manque de moyens humains et financiers ne permet qu'une coordination « *plutôt informelle* » et ponctuelle. En effet, « *les GDON n'ont personne pour le faire sur le terrain* ». Ce manque de moyens est lié au statut réglementaire du campagnol terrestre, qui délègue à la profession la gestion de ce risque. Si la responsabilité face aux pullulations était élargie à une cogestion Etat/profession, cela permettrait également de débloquer des moyens financiers

⁶² Groupement de Défense contre les Organismes Nuisibles

⁶³ Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles

⁶⁴ Fédération Régionale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles

⁶⁵ Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

⁶⁶ Direction Départementale des Territoires

⁶⁷ Service Inter-Départemental pour l'Animation du Massif central (réseau des chambres d'agriculture)

supplémentaires de la part de l'Etat pour soutenir la lutte (qui deviendrait alors du ressort de la DRAAF). Pour la profession, « *la solidarité nationale doit jouer en dernier recours* », car les problèmes liés aux pullulations de campagnols dépassent le milieu agricole (qualité de l'eau, problèmes pour la santé humaine).

Ce débat sur le statut du risque de pullulation démontre l'existence de diverses analyses et perceptions du phénomène : est-ce un risque endogène aux systèmes d'élevage ou exogène ? qui est responsable de sa gestion ? Ce manque de vision partagée du risque ainsi que le manque de moyens consacrés au fonctionnement des micro-institutions est un frein à l'efficacité de ce système de lutte, principalement au niveau local pour la mise en œuvre concrète et coordonnée des actions par le biais des contrats de lutte.

6.2.2. Des contrats de lutte incomplets et peu incitatifs

Les pouvoirs publics comme les instituts techniques ou de recherche ont remarqué qu'un très faible nombre d'éleveurs était impliqué dans l'action collective (Michelin *et al.*, 2014). Les éleveurs enquêtés reconnaissent un manque de concertation et d'action en commun. Le FMSE a pourtant mis en place une mesure pour soutenir l'action contre les pullulations de campagnols terrestres et inciter les éleveurs à utiliser les différents moyens d'action proposés. Un contrat de lutte est signé entre l'éleveur, le FMSE et l'OVS. L'éleveur s'engage à utiliser au moins deux moyens d'action (phosphore de zinc, gaz PH₃, piégeage...) ; le FMSE subventionnera à 75% les investissements dans ces moyens de lutte si les dépenses totales sur l'exploitation dépassent 300 €. En 2016, le FMSE a reversé 998 835 € aux 1194 exploitations concernées au titre du subventionnement de la lutte (FMSE, 2018). Les OVS sont en charge du suivi de ces contrats et fournissent un soutien technique aux éleveurs signataires, à l'échelle départementale.

Malgré cela, les techniciens remarquent toujours un manque d'implication de la plupart des éleveurs. A titre d'exemple, sur 4000 exploitations agricoles du Cantal (15), 864 avaient signé un contrat de lutte annuel en 2016. Ce chiffre, plus élevé que les années passées, semble lié à la promesse d'une indemnisation partielle des pertes liées à la pullulation de l'année 2016 pour les signataires d'un contrat. Ce sont 6,1 millions d'euros qui ont été distribués à 447 exploitations agricoles, dont 3,5 millions d'euros financés par les cotisations professionnelles de la section commune du FMSE, le reste étant financé par des fonds européens. Cependant, ce mécanisme du FMSE est annoncé comme exceptionnel car ses fonds ne sont pas supposés compenser systématiquement ces dommages, mais subventionner les actions de gestion préventive, en accord avec le cadre réglementaire national. Ainsi, le nombre de contrats signés demeure faible, et au-delà, l'implication effective des éleveurs dans la lutte reste difficile à évaluer par les techniciens, car seul un justificatif d'achat est demandé pour débloquer la subvention. Dans l'idée d'un mécanisme d'indemnisation permanent, le risque moral – d'une sous-implication ou de déclarations frauduleuses – est très prégnant. Nous identifions ainsi une réelle problématique autour de l'*enforceability* des contrats, notamment la capacité de déterminer des indicateurs de suivi, mais aussi de leur *enforcement*, du fait de l'absence de « sanctions », au sens de North (1990).

La majorité des éleveurs enquêtés considère que les contrats de lutte sont des dispositifs peu ou pas efficaces, notamment du fait de leur caractère non contraignant, de leur lourdeur administrative (dossiers supplémentaires à remplir), de leur coût et des délais d'indemnisation. Ces contrats ouvrant droit à une indemnisation sont pourtant indispensables aujourd'hui, d'après la profession : « *les systèmes économiques de lutte contre le campagnol ne fonctionnent pas seuls sans subventions publiques* ». Toutefois, le rôle des contrats est à revoir selon les chercheurs : ils devraient avoir pour objectif de structurer de petits groupes d'éleveurs qui pourront échanger et agir collectivement.

6.2.3. Une information coûteuse et peu accessible

Il ressort de nos enquêtes que l'accès à une information précise apportée aux éleveurs au bon moment conduirait à une meilleure coordination. En effet, les techniciens insistent sur l'importance d'une lutte précoce et collective (Couval et Truchetet, 2014). La difficulté est de repérer les populations de campagnols parfois cachées dans les galeries de taupes, les symptômes visibles en surface étant ainsi déconnectés de la dynamique de population réelle et souterraine des campagnols (Ramadier *et al.*, 2019). Pour un éleveur, il s'agit d'éviter le démarrage des pullulations sur ses propres parcelles avant qu'il ne soit trop tard, mais également de travailler collectivement avec les autres éleveurs du territoire pour limiter la dispersion des populations de campagnols d'une parcelle à l'autre.

Pour anticiper, l'éleveur a besoin d'une information concernant l'état des populations de campagnols terrestres sur ses parcelles mais aussi sur un territoire plus large. Aujourd'hui, des bulletins d'information sont régulièrement produits par les OSV (*Bulletin de Santé du Végétal – BSV Prairies*), par les Chambres d'Agriculture (*Info Prairies*) ou encore le SIDAM (*Newletter Campagnols*). Ces documents présentent les résultats de la surveillance des populations de campagnols terrestres en Auvergne mais aussi les avancées sur les techniques de lutte. Ces bulletins apportent des informations aux éleveurs à propos de la dynamique des campagnols terrestres, mais avec une faible précision : cette information n'est pas collectée individuellement ni distribuée à l'ensemble des éleveurs. Elle est basée sur une évaluation approximative des populations de campagnols à partir des observations des techniciens (*cf.* Figure 18, p. 70), et seules quelques communes sont complètement surveillées. L'un des écueils de ces documents mis en évidence par notre étude est une trop faible diffusion dans le monde agricole : le BSV n'est que très peu lu par les éleveurs. De plus, ce genre d'information peut être suffisant pour obtenir une vision large de la situation (et des risques de diffusion d'un territoire à l'autre) mais n'est pas suffisamment précise pour que les éleveurs soient alertés ni conseillés individuellement. L'enjeu semble donc être, à partir d'un système d'observation impliquant à la fois techniciens et agriculteurs, de créer un système d'alerte à destination du plus grand nombre d'éleveurs, qui leur permette d'accéder à la bonne information, au bon conseil, au bon moment. Pour gérer cette temporalité délicate, un système d'alerte performant pourrait reposer sur l'application mobile de surveillance des territoires utilisée par les OVS, ou encore sur des alertes par SMS, qui fonctionnent bien auprès des éleveurs. Cependant, les OVS manquent aujourd'hui de moyens humains et financiers pour remplir leurs missions de surveillance et de conseil : « *Il y aurait beaucoup de choses à faire mais malheureusement vu le peu de financement qu'on a, on fait le minimum* » (FREDON). Le nombre de jours dédiés par la FDGDON 63 à la surveillance du territoire a été divisé par deux entre 2018 et 2019, passant de 24 à 12 jours. Or, d'après les chercheurs, une surveillance efficace nécessiterait au moins deux passages par an sur les territoires les plus exposés.

Avoir accès à une information plus précise concernant l'état du développement des campagnols sur chaque parcelle est coûteux pour les éleveurs, qu'ils l'acquière en surveillant et traitant leurs parcelles eux-mêmes (coût en temps et main d'œuvre) ou en payant des techniciens/piégeurs pour cela (coût monétaire). La gestion du risque de pullulation devient ainsi « *un atelier supplémentaire pour l'exploitation* » (DRAAF), qui nécessite qu'on lui consacre du temps et des investissements. Les éleveurs doivent aussi être formés pour mieux comprendre la nature du risque et être en capacité de le gérer finement. Ils ont besoin de connaissances pour distinguer les taupinières des *tumuli* de campagnols, les indices frais des indices anciens, ainsi que pour approximer le niveau des populations, information nécessaire pour ajuster les actions de gestion. Or, certains éleveurs enquêtés reconnaissent manquer parfois d'information à ce sujet, malgré les formations proposées par les OVS : « *on ne connaît probablement pas assez le campagnol, [...] on ne comprend toujours pas pourquoi les populations déclinent en peu de temps* ». Le lien entre les éleveurs et la recherche est également difficile à gérer, et la diffusion de la science dans le milieu agricole demande du temps : « *pour les*

professionnels, la recherche ne va pas assez vite. La recherche fondamentale prend du temps. Il faut que les deux mondes arrivent à communiquer » (SIDAM).

6.2.4. Un manque de confiance qui décourage l'action collective

Toutefois, comme nous le déduisons de l'analyse de la diffusion spatiale du risque, obtenir une connaissance précise de son propre cas n'est pas suffisant : les éleveurs doivent également connaître le comportement des éleveurs voisins. Or, aucun document officiel ne peut fournir une telle information aux éleveurs. La communication entre eux semble aujourd'hui peu efficace, même pour les communes disposant de GDON locaux : « *on essaie de regarder quand les autres passent le gaz* » (éleveur). Très peu d'actions communes et coordonnées sont réellement menées. Il existe donc un problème d'accès et de partage de l'information et des signaux entre éleveurs : ces asymétries d'information défavorisent la coordination.

Cette incertitude et ces asymétries d'information affaiblissent notamment la nécessaire confiance entre les acteurs. Il existe en premier lieu un manque de confiance dans l'efficacité et l'applicabilité des moyens techniques proposés aux éleveurs pour faire face aux pullulations. Une partie de la profession et des éleveurs considère ces outils comme insuffisants face à l'ampleur du phénomène, et regrette l'interdiction de certaines molécules : « *on nous supprime les produits qui vont bien* » (éleveurs). De plus, le caractère chronophage du piégeage est souvent énoncé comme un facteur limitant : « *ce ne sont pas des outils adaptés aux exploitations auvergnates* », qui manquent souvent de main d'œuvre (FREDON, SIDAM). Parmi les éleveurs enquêtés, les méthodes de lutte sont perçues comme efficaces ou assez efficaces, même si une majorité d'entre eux reste sceptique sur leur capacité à maîtriser ce risque. Or, « *la lutte coûte du temps et de l'argent, et ne sera donc menée par les agriculteurs que s'ils sont convaincus de l'efficacité des méthodes proposées.* » Le bilan de certains techniciens des OVS est plus nuancé : « *Les méthodes proposées peuvent être efficaces si les agriculteurs les mettent en place de manière précoce et collective. Le panel de méthode actuel se suffit à lui-même* » (FREDON). Les chercheurs notent que, face à un mécanisme agroécologique complexe et pluriannuel, « *administrer la preuve de l'efficacité est difficile* ». La principale difficulté est d'inciter les éleveurs à agir *avant* que les campagnols ne soient déjà installés et nombreux. Le plus souvent, les actions ne sont envisagées qu'en situation de crise : « *il est difficile de proposer des solutions d'adaptation des systèmes (excédents de fourrages et stock, modification des structures paysagères, 10-15% de SAU en culture) à des éleveurs qui font face à une crise* ».

Il existe également un grand manque de confiance entre les éleveurs, qui ne sont eux-mêmes ni certains ni convaincus que leurs voisins agissent effectivement contre les pullulations de campagnols : « *il y a un manque de volonté de la part des agriculteurs, ils ne font rien* » (éleveur). La mise en place des actions de lutte n'est pas contrôlée, et les contrats ne sont pas obligatoires. Il existe donc un phénomène d'aléa moral : même si un agriculteur signe un contrat, il n'y a aucun moyen pour les OVS de vérifier l'usage effectif ou correct des moyens d'actions. Il ressort de nos enquêtes que les éleveurs qui avaient des doutes à propos du comportement des autres éleveurs du territoire étaient plutôt découragés de s'engager, et même s'ils essaient de gérer les pullulations sur leurs propres terrains, ils ne s'impliquaient pas dans des groupes locaux. Nous pensons que ce découragement conduit également l'éleveur à mener des actions sous-optimales sur ses propres parcelles.

6.3. Discussion : analyse des défaillances institutionnelles et perspectives

Nos enquêtes nous ont permis de détecter un certain nombre de défauts de coordination face au risque de pullulation (Figure 57). Grâce au paradigme d'Olson (1965), en se basant sur les travaux de Balme (1990) et Oliver (1993), nous pouvons donner quelques facteurs explicatifs du manque d'action collective, particulièrement le faible nombre de contrats de lutte signés.

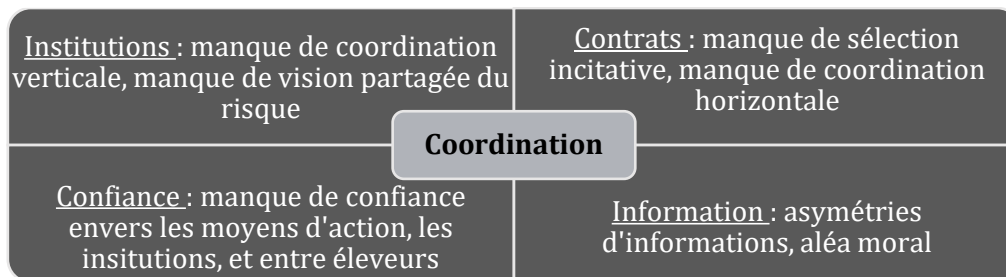


Figure 57 : Facteurs limitants de la coordination des actions de gestion des pullulations (auteur)

6.3.1. De faibles avantages individuels attendus pour des coûts élevés

La première catégorie de facteurs explicatifs concerne la nature du risque, l'analyse qu'en font les éleveurs, ainsi que la difficulté de déterminer l'avantage individuel de la lutte. Si nous considérons cet avantage individuel (A_i) comme la différence entre les gains individuels (V_i) et les coûts (C), c'est-à-dire $A_i = V_i - C$, nous pouvons comprendre pourquoi il est considéré comme faible (Balme, 1990). En effet, les dommages causés par les pullulations sont très importants et fréquents : les éleveurs peuvent difficilement imaginer comment ils pourraient gérer ce risque par eux-mêmes, notamment du fait des mécanismes de dispersion présentés précédemment. Par conséquent, V_i est considéré comme faible. De plus, la gestion des pullulations demande du temps pour la surveillance et la lutte : la disponibilité en temps et en main d'œuvre semble être davantage limitant que les coûts monétaires (matériel, produits...). Nous notons également que lorsqu'une action collective et suivie démarre, le « nettoyage » des parcelles peut prendre un temps relativement long, ce qui signifie que le coût initial (en travail), comme Olson (1965) l'explique, est important et restreint la mise en place initiale de l'action collective. Cependant, nous savons d'après l'expérience passée, principalement en Franche-Comté (Giraudoux *et al.*, 2017), que ce temps nécessaire pour l'action diminue, c'est-à-dire que les coûts de gestion sont décroissants. Enfin, il existe probablement un fort coût d'opportunité perçu par les éleveurs : une modification plus en profondeur du système fourrager apparaît parfois nécessaire pour réduire le nombre de bêtes à nourrir, augmenter les capacités de stockage de fourrage et libérer du temps pour la lutte contre les pullulations. Cela s'inscrit en contre du développement agricole depuis plusieurs décennies, qui a consisté à augmenter la taille des troupeaux et des surfaces, mais aussi à « rationaliser » l'espace productif (en arrachant arbres et haies), pour sécuriser les revenus (gains de productivité, baisse des coûts de production). De telles adaptations conduisent à une utilisation sous-optimale des surfaces fourragères (augmentation du coût d'opportunité).

Ainsi, il semblerait que les éleveurs, considérant des coûts de gestion élevés et des gains espérés faibles, ne sont pas encouragés à s'impliquer dans l'action collective, comme le paradigme d'Olson le propose. En effet, les structures de coûts et de gains espérés sont des déterminants majeurs pour l'initiation d'un accord de coopération entre agents (Cabon-Dhersin et Ramani, 2007). En se focalisant sur l'aléa, c'est-à-dire les conséquences du processus, il est compréhensible de conclure que le risque n'est pas maîtrisable par les éleveurs, et que les pouvoirs publics doivent leur apporter une compensation financière en cas de dommages. Cependant, ce point de vue repose sur une analyse incomplète du risque, omettant de considérer les facteurs de vulnérabilité du système fourrager. Nous avons explicité le lien significatif entre l'occurrence des pullulations et des pratiques humaines qui affectent le paysage et la part de prairies permanentes dans l'assolement (*cf.* 2.2.1, p. 66). Cette omission dans l'analyse du risque affecte la manière dont les éleveurs considèrent les coûts et les bénéfices de l'action contre les pullulations. Les techniciens et les chercheurs rencontrent alors des difficultés pour diffuser l'information et la connaissance aux agriculteurs. Ceci crée une forme de « vulnérabilité sociale » (Veyret et Reghezza, 2016) qui réduit les capacités et la volonté des éleveurs à agir pour gérer les pullulations (Michelin *et al.*, 2014; Peyre *et al.*, 2009).

6.3.2. Un problème de sous-incitation à la production d'un bien collectif

Un second élément d'analyse qui interroge la théorie économique est l'étendue spatiale du risque, qui touche des territoires entiers d'élevage herbager : il apparaît difficile pour un éleveur s'extraire individuellement de cet aléa. Ce constat pourrait être fait pour chaque exploitation d'élevage située sur un territoire exposé. Il existe donc, *a priori*, un intérêt commun des éleveurs à l'action collective pour éviter d'être touchés par une pullulation. La lutte collective génèrerait alors un bien collectif : tous bénéficieraient des effets de la lutte (Giraudoux *et al.*, 2017). Pourtant, une faible implication dans la lutte collective est observée : nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un problème de sous-incitation à la production d'un bien collectif.

Au premier regard, nous sommes donc surpris que la coordination n'apparaisse pas « naturellement » entre agriculteurs, étant donné l'importance du risque considéré. Le paradigme d'Olson (1965) nous permet d'analyser cet état comme celui d'un « groupe latent ». Tout d'abord, personne n'aurait intérêt à agir seul, car si les agriculteurs voisins n'agissent pas également, l'éleveur sera affecté par la dispersion des campagnols des parcelles voisines, réduisant ses efforts de lutte. Ensuite, tous les éleveurs n'ont pas les mêmes incitations spontanées à agir : en effet, tous les systèmes fourragers ne sont pas exposés au risque de la même manière, selon diverses caractéristiques : caractéristiques des prairies et du sol, morcellement du parcellaire, capacités de stockage de fourrages... Cette hétérogénéité des situations des agents (intérêts et ressources différents) est l'une des explications du besoin de coordination (Oliver, 1993). Enfin, les contributions individuelles sont à la fois difficiles à déterminer et difficiles à prévoir : nous ne connaissons pas la productivité marginale des contributions à la gestion des pullulations.

Nous analysons que le statut persistant de ces groupes latents est principalement dû aux asymétries d'informations entre agriculteurs. En effet, comme nous l'avons déterminé par l'analyse spatiale du phénomène, l'action contre les pullulations ne serait efficace que si le nombre d'agriculteurs impliqués sur un territoire donné était suffisant. Certains éleveurs ne s'engageront pas dans la lutte collective car ils sont convaincus qu'ils seront les seuls à agir, et que cela ne permettra pas d'éviter les pullulations. Ils considèrent alors l'action comme une perte de temps et d'argent et entretiennent le sentiment qu'ils travaillent pour les éleveurs qui n'interviennent pas sur leurs propres parcelles. L'action collective ne dépend donc pas uniquement de l'intérêt qui lie les agents, mais aussi et surtout des processus sociaux et organisationnels qui font par exemple circuler l'information (Oliver, 1993) et génèrent de la confiance. Or, la plupart des liens que nous avons mis en évidence semblent être des *liens faibles* (Granovetter, 1983), importants pour augmenter la quantité et la diversité de l'information disponible, mais peu efficaces pour renforcer la confiance entre les agents.

Le manque d'information, que nous pouvons analyser comme une incertitude au sens de Williamson (2000, 1979), est un facteur limitant important pour le développement des contrats de lutte. Il est classique, dans le cas de la gestion des risques sanitaires et des ravageurs, de considérer l'existence de telles externalités spatiales (Epanchin-Niell et Wilen, 2015) : il est probable qu'un agent sera incité à sous-contrôler un tel phénomène à l'échelle du paysage/territoire, les seules incitations d'un agent à agir face à une invasion biologique concernant son propre risque de dommage. Le principal facteur induisant un manque de contrôle à l'échelle du territoire est un manque de coordination.

6.3.3. Des contrats peu incitatifs et ne formalisant aucun lien entre les éleveurs

Les contrats de lutte actuels peinent à mobiliser les éleveurs. Malgré l'incitation économique proposée, ils sont l'objet de plusieurs écueils. Tout d'abord, d'un point de vue organisationnel, la nature des contrats elle-même est un facteur limitant : ils sont conçus pour lier l'éleveur signataire à l'OVS et au FMSE, mais les éleveurs, qui sont censés coopérer pour gérer les pullulations, ne sont pas directement liés par ces contrats. Ainsi, ces contrats individuels échouent à réduire les asymétries

d'information et le manque de confiance entre éleveurs. Or, le minimum requis pour l'émergence d'une action coordonnée est l'existence soit d'une confiance organisationnelle (vis-à-vis des institutions relais), soit d'une confiance interpersonnelle (entre agents) (Bornarel, 2007). Un minimum de capital social est ainsi nécessaire pour permettre l'augmentation des rendements des autres types de capitaux, humain ou économique (Bourdieu, 1980; Coleman, 1988) : ces liens informels sont fondamentaux pour consolider un socle commun sur lequel des structures plus formelles pourront s'appuyer (Friedberg, 1992).

De plus, les incitations sélectives sous forme de subventions sont pensées pour être « positives » : Olson (1965) soutient que ce type d'incitations ne peut mobiliser que de petits groupes, ce qui est bien observé avec les contrats actuels. Ces incitations peuvent être utiles pour soutenir l'action collective lorsqu'elle est déjà en place, mais pas pour l'initier. En effet, en plus des investissements en équipement (coût monétaire) et de l'action (coût en temps et main d'œuvre), il existe un coût d'organisation de l'action collective relativement important. Par conséquent, il semble souhaitable de repenser cette logique incitative pour rendre les contrats plus attractifs pour les éleveurs : les contrats devraient avoir pour objectif d'augmenter les liens entre les éleveurs, et non uniquement de les inscrire dans un processus purement organisationnel. Enfin, Olson analyse un comportement de passager clandestin quand un agent économique peut profiter d'un bien collectif produit par d'autres agents sans avoir à s'engager dans le processus de production. Cet aléa moral est fortement perçu par les éleveurs. Toutefois, le niveau d'action collective n'est actuellement pas suffisant pour que quiconque puisse en bénéficier sans y participer et le comportement de passager clandestin ne semble pas être une explication plausible du sous-engagement des éleveurs.

Les micro-institutions ne parviennent pas, après signature des contrats individuels, à articuler l'ensemble de ces accords bilatéraux, et aucun lien d'intérêt n'est donc formalisé entre éleveurs d'un territoire. Un changement de logique de ces contrats pourrait comprendre davantage de conditions posées à l'éleveur signataire, et augmenter ainsi leur *enforceability* (North, 1990). Par exemple, le FMSE pourrait choisir de conditionner les subventions à une implication dans le réseau de surveillance ou encore affirmer le caractère collectif des contrats avec des mécanismes de co-construction de stratégies communes, réduisant ainsi les asymétries d'information, et ouvrant la voie à une mutualisation plus évidente. Enfin, un seuil minimum de participation des éleveurs d'un territoire donné pourrait être une condition pour débloquer les subventions et ainsi inciter chaque éleveur à mobiliser ses voisins. Il se pose alors la question de l'échelle spatiale optimale pour la lutte collective et de la taille du groupe efficace pour la coordination.

6.3.4. Taille du groupe et échelle spatiale optimale

Olson a déterminé que la taille du groupe était un facteur important de l'action collective. Il a établi qu'une taille de groupe trop importante pourrait défavoriser la coordination et ajouter des problèmes d'asymétries d'information. De plus, notre étude suggère que la taille souhaitable du groupe doit également être mise en regard avec l'échelle géographique pertinente pour la gestion du risque. L'échelle géographique est un critère important pour l'analyse et la gestion des risques en agriculture (Eldin, 1989). Dans le cas des pullulations de campagnols, les facteurs de risque agroécologiques dépendent d'un emboîtement spatial multi-scalaire régional-sectoriel-local (Couval *et al.*, 2014) et leur gestion nécessite donc une coordination verticale. Des facteurs de risque socio-économiques existent également à l'échelle locale, et appellent une coordination horizontale entre éleveurs. 75% des facteurs de risque et 90% des moyens d'action peuvent être gérés à l'échelle communale. La commune peut donc être une échelle intéressante pour coordonner les actions de gestion aux échelles sectorielle et locale.

Ainsi, la taille du groupe choisie pour la coordination doit être suffisamment importante pour rendre l'action collective efficace et perceptible : il existe probablement un effet positif d'une taille de groupe croissante, grâce à une meilleure répartition des efforts nécessaires (Oliver, 1993). De plus, nous pouvons penser qu'il existe un seuil de taille de groupe en dessous duquel l'action individuelle ne sera que peu bénéfique. Nous déduisons également de cette étude que des perceptions pessimistes du risque peuvent décourager l'entrée des agents dans l'action collective. Olson propose également qu'un groupe efficace pour une bonne coordination doit être suffisamment petit pour réduire les asymétries d'information et les coûts d'organisation. Il existe donc une taille de groupe équilibrée qui permet une action efficace et une coordination facile : nous formulons l'hypothèse qu'un tel groupe pourrait se former à l'échelle communale.

Conclusion sur les défaillances de la coordination

« *Puisqu'il est un bien [collectif], si [le contrôle des ravageurs] est laissé aux efforts individuels sans coordination, cela sera insuffisant pour protéger les intérêts publics* » (Perrings et al., 2002).

Si l'hypothèse que nous formulons est vérifiée, à savoir que la lutte contre les pullulations de campagnols terrestres revêt bien le caractère de la production d'un bien collectif, alors la coordination est indispensable pour transcender les efforts individuels et proposer une stratégie de lutte optimale. En effet, l'hétérogénéité des systèmes fourragers et des perceptions du risque génèrent des intérêts et des volontés différentes à l'action (cf. Chapitre 4).

La théorie proposée par Olson (1965) explique plutôt bien les raisons du sous-engagement des éleveurs dans la lutte contre les pullulations de campagnols terrestres :

- Les coûts initiaux de la lutte et les coûts d'opportunité d'une transformation plus profonde du système fourrager (cf. Chapitre 4, p. 116) sont élevés. De plus, le manque de confiance dans les outils de lutte mais aussi dans l'action des autres éleveurs ne laisse espérer que des bénéfices faibles et incertains. Cette incertitude au sens de Williamson (2000, 1979) génère une forme de vulnérabilité sociale (Veyret et Reghezza, 2016) qui diminue la capacité des éleveurs à gérer le risque de pullulation.
- Pourtant, l'intérêt collectif à l'action est bien présent, comme l'a démontré l'analyse du risque que nous avons proposée (Chapitre 2, Chapitre 4 et Chapitre 5) : la maîtrise des populations de rongeur générerait un bien collectif dont l'ensemble des éleveurs pourraient bénéficier. Cet intérêt collectif demeure sous la forme de groupes latents : peu d'éleveurs sont prêts à agir seul, car une action isolée, sans pour autant être inutile et inefficace, ne peut toutefois pas espérer bénéficier de la mutualisation des efforts pour produire ce bien collectif. Cet état de groupe latent s'auto-entretient du fait du manque de communication entre les éleveurs qui ne partagent finalement que des liens faibles (Granovetter, 1983).
- Les micro-institutions actuelles échouent à réduire les asymétries d'information entre éleveurs et les coûts de coordination. Les contrats de lutte ne permettent pas de formaliser les liens d'intérêts qu'il existe entre éleveurs d'un même territoire, puisqu'ils ne lient pas les éleveurs entre eux, mais un éleveur au FMSE et à l'OVS. L'*enforcement* (mise en œuvre) de ces contrats sur le terrain, au sens de North (1990), est d'autant plus difficile que les OVS ne disposent pas des ressources suffisantes pour le faire. L'échec des contrats de lutte montre qu'il est vain de construire une structure formelle, administrative, qui ne reposerait sur aucune structure informelle solide (capital social). Comme Olson (1965) le proposait, des incitations sélectives positives (subventions) ne permettent pas de générer une action collective, mais permettent d'entretenir une coopération déjà existant et fondée sur un capital social solide.

Les principales limites de cette étude résident dans son approche qualitative qui ne permet pas de généraliser ces résultats à l'échelle individuelle de l'éleveur. Ces résultats qualitatifs nous semblent pourtant indispensables pour comprendre l'échec de la maîtrise des pullulations et formuler des hypothèses de travail plus précises. Il reste à démontrer les conditions dans lesquelles l'engagement des éleveurs dans la lutte contre les pullulations serait optimal. Pour cela, nous devons tester plusieurs scénarios : lutte curative ou lutte précoce ? somme d'actions individuelles ou coordination ? laissez-faire ou intervention d'un planificateur social à même de subventionner les actions de lutte ?

Pour répondre à ces questions, le Chapitre 7 propose de construire un modèle bioéconomique multiagent, outil classique pour travailler notamment sur les incitations à l'action collective (Epanchin-Niell et Wilen, 2015, 2012; Krebs, 2016).

Chapitre 7. Quelle stratégie et quelles incitations pour maîtriser les pullulations de campagnols terrestres ? *Approche par un modèle bioéconomique spatialisé*

L'analyse de la défaillance de l'action collective, notamment fondée sur le paradigme d'Olson (1965), a permis de déterminer l'importance de la coordination pour la gestion du risque de pullulation, mais aussi de comprendre pourquoi, face à un problème qui devrait largement mobiliser les éleveurs, l'engagement dans la lutte était faible (Chapitre 6). Tout d'abord, la question des coûts apparaît centrale pour expliquer l'engagement des éleveurs dans la lutte : les coûts initiaux sont élevés et la lutte a un coût d'opportunité pour l'éleveur. La dimension collective du risque place sa gestion dans le régime de la production d'un bien collectif, défavorisée par des intérêts différents à l'action (systèmes fourragers et préférences des agents hétérogènes) mais aussi par l'existence d'un risque moral fortement perçu (passagers clandestins). Enfin, les subventions versées par le FMSE ne semblent pas efficaces pour initier l'action collective dans les territoires où elle n'est pas historiquement mise en place (préexistence d'un capital social suffisant). Tous ces facteurs ne sont pas de la même nature et ne sont certainement pas de la même importance pour expliquer le manque d'engagement des éleveurs dans la lutte.

Dans ce chapitre, nous souhaitons évaluer différentes stratégies de lutte et différentes options de subventionnement afin de déterminer les conditions fournissant aux éleveurs les plus grandes incitations à la lutte.

Nous formulons l'hypothèse que *les possibilités d'une gestion efficace des pullulations de campagnols terrestres reposent avant tout sur la volonté individuelle des éleveurs à s'engager dans la maîtrise des populations de rongeurs.*

Nous choisissons de construire un modèle bioéconomique multiagent informatisé pour répondre à cet objectif et tester notre hypothèse. En effet, la complexité des mécanismes biologiques, temporels et spatiaux, rend difficile la création d'un unique système d'équation dont la résolution permettrait de déterminer un optimum économique. De plus, la dimension temporelle du phénomène étudié (cycles de plusieurs années) rend difficile un suivi expérimental de long terme sur le terrain. Un modèle informatique permet la simulation du phénomène biologique et de sa gestion sur le temps long, mais aussi de faire varier certains paramètres biologiques, techniques ou économiques pour en déterminer les effets propres. Evidemment, en contrepartie de cette souplesse méthodologique, le domaine de validité de nos résultats devra être soigneusement mis en regard de nos hypothèses simplificatrices.

Nous modélisons le fonctionnement biologique d'un espace agricole composé d'un openfield de prairies tel que nous pourrions le rencontrer dans le Cézallier et dont la production herbagère est la principale fonction. Ce territoire rassemblant 921 hectares de prairies permanentes est exploité par 8 éleveurs dont l'objectif est de produire un capital fourrager. Les prairies du modèle servent de support au développement des campagnols terrestres qui, lorsque leurs populations dépassent une certaine densité, sont la cause d'une perte de capital fourrager. Le modèle biologique combine donc le potentiel de production des prairies et les densités de populations de campagnols terrestres pour définir le capital fourrager effectivement produit. Le calibrage du modèle biologique s'appuie sur les travaux de Marilleau *et al.* (2018) ainsi que sur des travaux actuellement en cours en écologie des population à VetAgro Sup (Adrien Pinot ; Lempdes, 63 ; non publié). A ce modèle biologique est adjoint un modèle économique du comportement des éleveurs du territoire. Les éleveurs ont pour objectif d'éviter les pertes potentielles que peuvent causer les campagnols. Pour y parvenir, le seul levier de gestion à leur disposition est la mise en œuvre d'actions de piégeage sur leurs parcelles : la prise de décision repose sur la comparaison entre les coûts de la lutte (surveillance, piégeage) et les gains espérés (perte qu'ils peuvent éviter). Le calibrage du modèle économique a été basé sur les données produites sur la zone

expérimentale de Volvic, où des opérations de piégeage sont suivies dans le cadre d'un projet de recherche porté par VetAgro Sup (Elodie Perrot ; Lempdes, 63).

Les stratégies de lutte envisagées sont la gestion unilatérale et individuelle⁶⁸ (simulations 1-a, 1-b, 1-c), la gestion coopérative⁶⁹ (simulations 2-a, 2-b) et la planification sociale avec subventions⁷⁰ (simulations 3-a, 3-b, 3-c). Le cas de l'aléa moral est étudié par les simulations 4-a et 4-b.

Après avoir décrit le modèle bioéconomique spatialisé que nous avons construit (7.1), nous présenterons les principaux résultats des simulations (7.2) avant de discuter ces résultats et leur domaine de validité (7.3).

7.1. Description du modèle

La description du modèle multiagent s'inspire du protocole ODD (Overview, Design concepts, Détails), établi par Grimm *et al.* (2006). Nous utilisons le logiciel de modélisation *NetLogo 6.0.4*.

7.1.1. Objectif et méthode proposée

L'objectif général du modèle est de travailler sur les conditions dans lesquelles peut prendre place une action collective face aux pullulations de campagnols terrestres.

Nous proposons de procéder progressivement, en répondant à plusieurs questions dans un enchaînement logique (Tableau 40). La simulation 0 servira de base comparative pour évaluer l'efficacité des stratégies de lutte : elle correspond au cas où aucune action de contrôle n'est menée. Les simulations 1-a, 1-b et 1-c correspondent au cas où les éleveurs gèrent leurs parcelles indépendamment des autres éleveurs (aucun échange d'information entre eux). Les simulations 2-a et 2-b proposent d'étudier l'efficacité d'un transfert d'information sur l'état des parcelles voisines, y compris entre éleveurs. Les simulations 3-a, 3-b et 3-c proposent d'évaluer l'efficacité d'une subvention versée par un planificateur social. Enfin, les simulations 4-a et 4-b étudient l'effet de l'aléa moral sur l'efficacité de la lutte.

Tableau 40 : Questions auxquelles les différentes simulations visent à répondre

Simulation		Question posée	Conditions testées
Simulation 0 Absence de contrôle		<i>Quels sont les dommages effectifs subis par le territoire et par chaque exploitation en l'absence d'action de contrôle ?</i>	Aucune action de piégeage, aucune subvention.
Simulation 1 Gestion unilatérale ou « laissez-faire »	1-a	<i>L'efficacité technique des moyens de lutte est-elle le seuil frein au contrôle des populations de campagnols terrestres ?</i>	Lutte hypothétique efficace à 100%, sans surveillance précoce (seuil de dommages).
	1-b	<i>Est-il possible de contrôler les populations de campagnols terrestres en considérant uniquement le seuil de dommage avec une efficacité de piégeage plus faible ?</i>	Piégeage efficace à 30%, sans surveillance précoce (seuil de dommages).

⁶⁸ Action individuelle, tardive ou précoce, sans concertation ni coordination

⁶⁹ Action précoce coordonnée grâce à un échange d'information entre éleveurs

⁷⁰ Intervention d'un agent extérieur distribuant des subventions lorsque des actions sont menées

	1-c	<i>Une surveillance régulière des parcelles est-elle à même d'augmenter l'efficacité de la lutte ?</i>	Piégeage efficace à 30%, avec surveillance tous les 15 jours.
Simulation 2 Gestion coopérative	2-a	<i>Un transfert d'information entre les éleveurs du territoire permet-il de réduire les coûts de contrôle des pullulations ?</i>	Piégeage efficace à 30%, avec coordination volontaire (surveillance par voisinage, transmission d'information à l'apparition des premiers dommages).
	2-b	<i>Le transfert d'information entre éleveurs est-il significatif pour augmenter l'efficacité de la lutte ?</i>	Piégeage efficace à 30%, surveillance par voisinage sans échange entre éleveurs
Simulation 3 Intervention d'un planificateur social (subventionnement)	3-a	<i>L'échec du contrôle des pullulations est-il uniquement imputable aux coûts des actions de lutte ? Quel est l'effet du taux de subvention sur le contrôle des pullulations ?</i>	Piégeage efficace à 30%, sans surveillance précoce, subvention à 75%.
	3-b	<i>La subvention est-elle efficace lorsqu'une surveillance individuelle est menée régulièrement ?</i>	Piégeage efficace à 30%, avec surveillance tous les 15 jours, subvention à 50%.
	3-c	<i>La subvention est-elle efficace dans le cas d'une action collective volontaire ?</i>	Piégeage efficace à 30%, avec coordination volontaire, subvention à 50%.
Simulation 4 Situation d'aléa moral	4-a	<i>Que se passe-t-il s'il existe des passagers clandestins sur le territoire qui ne piègent jamais ?</i>	Piégeage efficace à 30%, avec coordination volontaire pour une partie des éleveurs seulement (de 0 à 8).
	4-b	<i>Quel est l'effet d'un engagement aléatoire des éleveurs sur la maîtrise des pullulations de campagnols ?</i>	Piégeage efficace à 30%, coordination volontaire, engagement individuel aléatoire (probabilisé)

Pour traiter nos résultats, nous comparerons les simulations 0 à 3 (qui correspondent à un engagement parfait de l'ensemble des éleveurs du territoire) afin de déterminer les conditions les plus favorables à une gestion optimale des populations de campagnols (7.2.3.2, p. 211). Puis, nous traiterons les simulations 4-a et 4-b afin de discuter de l'aléa moral sous-jacent et ses conséquences (7.2.3.3, p. 214).

7.1.2. Sous-modèles

Notre modèle comprend trois sous-modèles (production fourragère, cycle des campagnols, actions de piégeage), eux-mêmes composés de plusieurs fonctions (Figure 58).

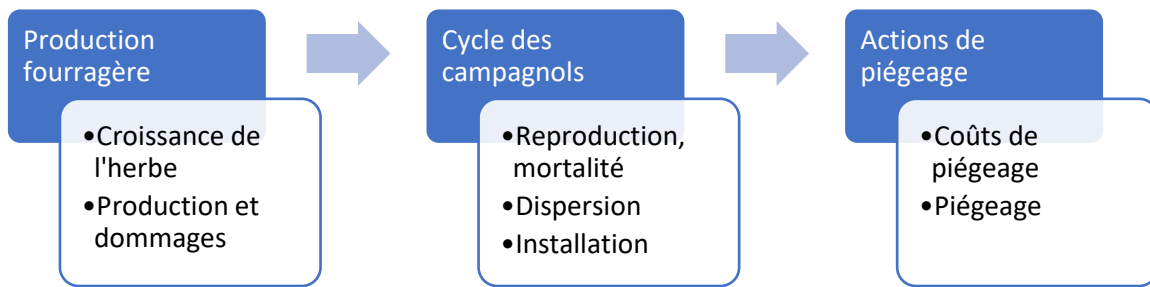


Figure 58 : Sous-modèles et fonctions principales

Le modèle proposé est un modèle logistique, stable (sans mécanisme adaptatif) pour les simulations 0 à 3, et adaptatif pour la simulation 4. Les principales interactions sont définies par la capacité de charge du milieu et les actions de contrôle des populations de campagnols. L'ensemble du modèle est déterministe (saisonnalité, cyclicité), sauf la dispersion des campagnols qui comprend une part aléatoire liée à la localisation géographique d'arrivée et sauf l'action de lutte dans la simulation 4. Les processus sont relativement simultanés, bien que les besoins du modèle nous imposent d'en définir l'ordre (Figure 58). Notamment, l'herbe étant la ressource utilisée par les campagnols pour se développer, la croissance de l'herbe précède le développement des populations de rongeurs.

7.1.3. Eléments de base du modèle

Le modèle est constitué par trois éléments de base (Figure 59) :

- Le terrain modélisé est une grille composée d'agents de type *cell*, les *patches*, carrés de 100 m de côté, représentant chacun 1 hectare de prairie permanente.
- Les éleveurs sont des agents de type *turtle* et représentés par le siège d'exploitation.
- Les campagnols terrestres se déplaçant sur le territoire sont des *turtles*.

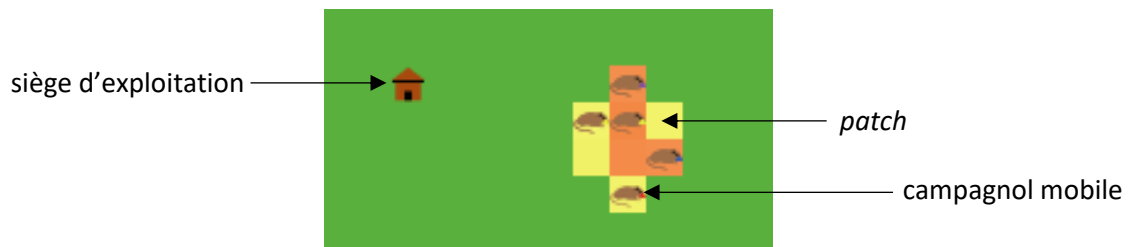


Figure 59 : Eléments de base du modèle et représentation

Le terrain que nous utiliserons pour les simulations comprend 921 *patches* représentant 921 hectares de prairies permanentes répartis sur 8 exploitations d'élevage. Ce territoire a été inspiré du parcellaire d'une zone de lutte expérimentale à Mauriac (15), complétée pour les besoins du modèle afin d'obtenir un territoire homogène composé uniquement de prairies (voir 7.1.5.1, p. 195). Le pas de temps du modèle est le jour (chaque *tick* correspond à un jour).

7.1.4. Caractéristiques des agents

7.1.4.1. Caractéristiques des patches

Le support de notre modèle multiagent est un territoire composé de prairies permanentes et découpé en *patches* (*cell agents*) qui constituent l'échelle spatiale de base du modèle. Les *patches* sont considérés comme identiques, c'est-à-dire que les prairies sont homogènes par leur composition floristique, leur productivité et leur capacité de charge (population maximale de campagnols qu'un *patch* peut supporter). Le Tableau 41 présente les caractéristiques des patches dont les valeurs et leurs variations sont propres à chacun d'entre eux.

Tableau 41 : Caractéristiques des cell agent (patches) du modèle

Variable	Nom sous NetLogo	Signification et intérêt
Exploitant	<i>eleveur</i>	Nom de l'éleveur qui exploite le <i>patch</i> (identique au nom de l'exploitation agricole correspondante).
Production espérée	<i>prodesp</i>	Capital fourrager espéré (production en l'absence de pertes).
Capital fourrager	<i>capital</i>	Capital fourrager correspondant à la production fourragère effective du <i>patch</i> (production espérée déduction faite des dommages causés par les campagnols).
Population initiale	<i>popini</i>	Population initiale de campagnols terrestres.
Population totale	<i>poptotal</i>	Population totale de campagnols terrestres.
Population en début d'hiver	<i>pophiver</i>	Population de campagnols terrestres du <i>patch</i> en début d'hiver ($temps \text{ mod } 365 = 51$)
Compteur de retour du potentiel de pullulation	<i>retour</i>	Ce compteur se déclenche lorsque le <i>patch</i> a subi une pullulation (population en début d'hiver supérieure ou égale à 50% de la capacité de charge du <i>patch</i>) et définit le retour du <i>patch</i> dans les conditions permettant une nouvelle pullulation (reconstitution d'une flore favorable aux campagnols).
Taux de reproduction	<i>repro</i>	Taux de reproduction des campagnols terrestres du <i>patch</i> .
Part fixe du coût du piégeage	<i>coutpiegfixe</i>	Le coût du piégeage par <i>patch</i> comprend une part fixe qui correspond au coût minimum de l'opération sur un hectare.
Part variable du coût du piégeage	<i>coutpiegvar</i>	Le coût du piégeage par <i>patch</i> comprend une part variable (multiple du nombre de <i>patch</i> voisins qui dispersent des campagnols) et qui traduit la difficulté de faire face aux « vagues voyageuses » de campagnols terrestres provenant de territoires incontrôlés.
Coût du piégeage	<i>coutpieg</i>	Coût du piégeage (somme de la part fixe et de la part variable).
Cumul des coûts de piégeage	<i>cumulpieg</i>	Coûts cumulés du piégeage effectué dans le temps.
Coût de déplacement	<i>coutdepl</i>	Coût de déplacement (entre le siège d'exploitation et le <i>patch</i>).
Cumul des coûts de déplacement	<i>cumuldepl</i>	Cumul des coûts des déplacements effectués dans le cadre du piégeage.
Cumul des coûts de surveillance	<i>cumulsurv</i>	Cumul des coûts des déplacements effectués dans le cadre de la surveillance des parcelles.
Cumul des coûts de la lutte	<i>cumulcout</i>	Cumul des coûts de piégeage, de déplacement et de surveillance.
Total des subventions	<i>cumulsubv</i>	Cumul des subventions touchées sur le <i>patch</i> .
Résultat de la surveillance	<i>survmax</i>	Résultat des actions de surveillance (population de campagnols détectée).

Information sur le voisinage	<i>voisin</i>	Information concernant le démarrage d'une pullulation fournie par les <i>patches</i> voisins.
------------------------------	---------------	---

Dans le modèle, les *patches* ne diffèrent que par trois caractéristiques de base :

- (i) Leur localisation et leur voisinage (*patches* voisins).
- (ii) Leur exploitant (éleveur)⁷¹.
- (iii) Leur statut de foyer de pullulation ou non (qui détermine la population de campagnols terrestres initialement présente sur le *patch*).

7.1.4.2. Caractéristiques des *turtles*

Deux types de *turtles* sont modélisés : les exploitations d'élevage (appelés simplement « éleveurs » ci-après) et les campagnols « mobiles » (les individus se déplaçant sur le terrain).

Les éleveurs ont les attributs suivants (Tableau 42) :

Tableau 42 : Caractéristiques des éleveurs (*turtle agents*) du modèle

Variable	Nom sous NetLogo	Signification et intérêt
Nom	<i>nom</i>	Nom de l'exploitation agricole (correspond aux exploitants renseignés dans les attributs des <i>patches</i>).
SAU	<i>sau</i>	Surface agricole utile (prairies) de l'exploitation agricole (nombre de <i>patches</i>).
Production fourragère de l'exploitation	<i>prodea</i>	Capital fourrager produit par l'ensemble des <i>patches</i> de l'exploitation.
Coût de lutte sur l'exploitation	<i>coutea</i>	Coût total de la lutte menée sur l'ensemble des <i>patches</i> de l'exploitation.
Total des subventions touchées par l'exploitation	<i>subvea</i>	Total des subventions touchées par l'exploitation.
Production espérée de l'exploitation	<i>prodespea</i>	Production fourragère espérée totale de l'exploitation.

Les *turtles* représentant les campagnols terrestres (*campa* et *crazycampa*) n'ont pas d'attributs particuliers, leur unique rôle est de permettre la dispersion aléatoire des populations.

7.1.4.3. Variables globales biologiques et économiques

Du fait de l'homogénéité du paysage considéré et des *patches* eux-mêmes, mais aussi de l'homogénéité du comportement des agents, beaucoup de variables biologiques et économiques sont des variables globales, s'appliquant de manière identique à tous les agents du modèle (Tableau 43).

⁷¹ La littérature présentée précédemment montre l'importance des régimes de propriété pour la gestion collective d'un risque à l'échelle d'un paysage/territoire.

Tableau 43 : Caractéristiques des variables globales du modèle

Variable	Nom sous <i>NetLogo</i>	Signification et intérêt
Variables biologiques		
Temps	<i>temps</i>	Cette variable permet de modéliser la dimension temporelle des phénomènes biologiques et écologiques étudiés.
Surface	<i>surface</i>	Surface productive totale du terrain modélisé.
Croissance de l'herbe	<i>croissance</i>	Croissance journalière de l'herbe, variable au cours de l'année (saisonnalité du processus biologique).
Capital maximal	<i>capitalmax</i>	Capital fourrager maximal qu'un <i>patch</i> peut produire chaque année.
Délai de retour pullulation	<i>tretour</i>	Cette variable permet de définir la durée d'un cycle de pullulation. Fixe dans notre modèle, elle dépend très probablement du temps nécessaire aux prairies pour régénérer une flore très propice au développement des campagnols (pissenlits...).
Population maximale	<i>popmax</i>	Capacité de charge des <i>patches</i> , c'est-à-dire la population maximale de campagnols qu'un <i>patch</i> peut contenir.
Population initiale des <i>patches</i> non-foyers	<i>popinitial</i>	Population initiale des <i>patches</i> non-foyers de pullulation.
Population initiale des foyers	<i>popinitialfoyer</i>	Population initiale des <i>patches</i> foyer de pullulation.
Taux de mortalité	<i>morta</i>	Taux de mortalité journalier des campagnols terrestres.
Taux de reproduction hors pullulation	<i>repro1</i>	Taux de reproduction journalier en phase de basse densité.
Taux de reproduction en pullulation	<i>repro2</i>	Taux de reproduction journalier en phase de pullulation.
Seuil de dispersion	<i>seuildisp</i>	Seuil au-delà duquel les populations de campagnols du <i>patch</i> se dispersent vers d'autres <i>patches</i> pouvant les accueillir. Correspond à un pourcentage de la capacité de charge.
Seuil de saturation	<i>seuilsaturation</i>	Seuil au-delà duquel le <i>patch</i> ne peut plus accueillir des campagnols mobiles. Correspond à un pourcentage de la capacité de charge.
Dispersion à courte distance	<i>dispCD</i>	Part de la population de campagnols terrestres d'un <i>patch</i> se dispersant à courte distance (vers l'un des 4 <i>patches</i> voisins).
Dispersion à longue distance	<i>dispLD</i>	Part de la population de campagnols terrestres d'un <i>patch</i> se dispersant à longue distance (vers un <i>patch</i> plus éloigné).
Mortalité en déplacement	<i>mortadepacement</i>	Part des campagnols terrestres se dispersant d'un <i>patch</i> à l'autre qui meurt avant de s'installer.

Seuil de dommage	<i>seuildommage</i>	Seuil au-delà duquel les campagnols causent des dommages aux prairies (perte de production fourragère). Correspond à un pourcentage de la capacité de charge.
Seuil de détection	<i>seuildetection</i>	Seuil au-delà duquel l'éleveur qui surveille ses parcelles est capable de détecter les populations de campagnols et de les dénombrer. Correspond à un pourcentage de la capacité de charge.
Variables économiques		
Fréquence de surveillance	<i>Freqsurv</i>	Fréquence à laquelle les éleveurs mènent des observations de surveillance sur leurs <i>patches</i> (fréquence d'acquisition d'une information sur les populations de campagnols).
Efficacité du piégeage	<i>effpieg</i>	Part des populations de campagnols d'un <i>patch</i> éliminée par une opération de piégeage.
Coût unitaire de déplacement	<i>coutdeplacement</i>	Coût unitaire du déplacement jusqu'à un <i>patch</i> .
Coût de la surveillance	<i>coutsurv</i>	Coût unitaire des opérations de surveillance par <i>patch</i> .
Taux de subvention	<i>subvention</i>	Part du coût du piégeage subventionnée par le planificateur social.
Production totale du territoire	<i>prodterritoire</i>	Cette variable sert à stocker la production fourragère totale du territoire modélisé (somme des variables <i>capital</i> de l'ensemble des <i>patches</i>).
Coût total de la lutte à l'échelle du territoire	<i>coutterritoire</i>	Cette variable sert à stocker le coût total de la lutte menée sur le territoire modélisé (somme des <i>cumulcout</i> de l'ensemble des <i>patches</i>).
Subvention totale à l'échelle du territoire	<i>subvterritoire</i>	Cette variable sert à stocker la subvention totale distribuée sur le territoire modélisé (somme des <i>cumulsubv</i> de l'ensemble des <i>patches</i>).
Population totale de campagnols à l'échelle du territoire	<i>popterritoire</i>	Cette variable sert à déterminer la population totale de campagnols sur le territoire modélisé (somme des <i>poptotal</i> de l'ensemble des <i>patches</i>).
Production espérée à l'échelle du territoire	<i>prodespterritoire</i>	Cette variable sert à stocker le coût total de la lutte menée sur le territoire modélisé (somme des <i>prodesp</i> de l'ensemble des <i>patches</i>).

7.1.5. Processus et programmation

7.1.5.1. Initialisation

L'une des premières étapes est de créer le terrain support de notre modèle, notamment la répartition des structures de propriété entre les différentes exploitations d'élevage. Cette répartition a été inspirée du parcellaire d'une zone de lutte expérimentale de Mauriac (15), complétée pour les besoins du modèle afin d'obtenir un territoire homogène composé uniquement de prairies. Le terrain ainsi obtenu est une grille de 1302 *patches* de dimensions 42x31 (Figure 60), dont 921 sont des prairies exploitées par un éleveur (selon la couleur du *patch*), et 381 sont « vides » (cellules noires). Ces cellules vides ne font pas partie du territoire modélisé et n'ont aucun statut dans les simulations. Elles

constituent, comme les bordures de la grille, les limites du terrain modélisé. Le repère est ordonné à partir de l'origine située au coin inférieur gauche. Le terrain modélisé fonctionne en « vase clos », c'est-à-dire qu'aucun campagnol ne provient de parcelles extérieures à ce terrain, et qu'aucun campagnol n'en sort.

Chaque *patch* possède une couleur parmi 8, correspondant chacune à un éleveur (de EA0 à EA7). Les caractéristiques des exploitations agricoles sont présentées dans le Tableau 44 : leur surface (correspondant au nombre de *patches*), la localisation de leur siège d'exploitation (coordonnées des *patches*, symbolisés en rouge sur la Figure 60), leur morcellement (correspondant à la distance moyenne entre les *patches* d'une exploitation et son siège, calculée en nombre de *patches*). De plus, le parcellaire de chaque exploitation comprend deux *patches* correspondant à des foyers de pullulation ; ils sont symbolisés en jaune. La distance entre le siège d'exploitation et les foyers est également une donnée caractéristique de l'exploitation agricole.

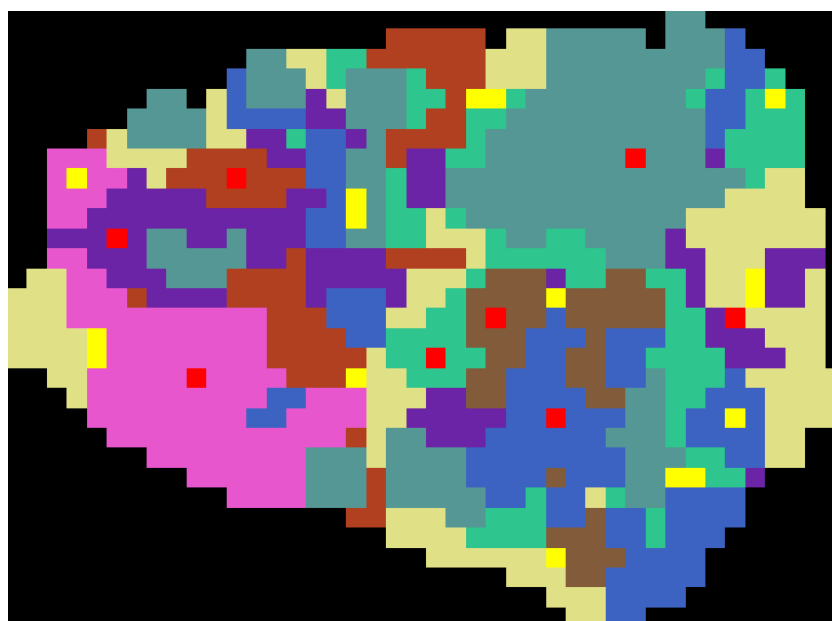


Figure 60 : Terrain modélisé

Tableau 44 : Caractéristiques des exploitations modélisées

	EA0	EA1	EA2	EA3	EA4	EA5	EA6	EA7	Vide
Code couleur	46.9	126.8	105.3	23.4	114.2	83.8	75.8	34.1	0
Nb patches	143	110	137	74	100	206	100	51	381
Loc. SE	36 15	9 12	27 10	11 22	5 19	31 23	21 13	24 15	-
Loc. foyers	4 14 24 26	3 22 4 13	17 20 36 10	17 12 23 26	37 17 37 16	33 7 17 21	38 26 34 7	27 3 27 16	-
Dist. SE moyenne	15.61	5.10	8.90	8.47	14.29	10.50	11.23	5.69	-
Dist. SE-foyers	32.02 16.28	11.66 5.1	14.14 9	11.66 12.65	32.06 32.14	16.12 14.14	14.76 14.31	12.37 3.16	-
Dist SE-foyer moy	24.15	8.38	11.57	12.16	32.10	15.13	14.54	7.77	-
Taille	Grande	Moy.	Grande	Petite	Moy.	Grande	Moy.	Petite	-
Morcel.	Fort	Faible	Fort	Moy.	Fort	Fort	Fort	Faible	-

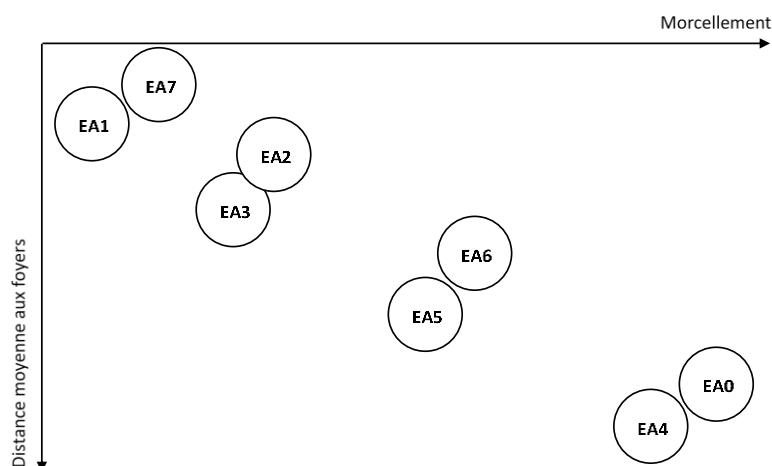


Figure 61 : Morcellement des exploitations et distance moyenne aux foyers

La Figure 61 peut donner un aperçu du coût de déplacement moyen nécessaire pour mener des actions de contrôle des campagnols terrestres. Plus le morcellement (mesuré ici basiquement comme la distance moyenne entre les *patches* d'une exploitation et son siège) est important, plus les coûts de déplacement pour mener des actions de piégeage ou de surveillance seront importants. Il est donc possible que les exploitations les plus morcelées mènent moins d'actions de contrôle des populations étant donné les coûts plus élevés qu'elles représentent.

La simulation commence en début d'hiver, le 01/11 (Tableau 45). Les valeurs de certains paramètres sont variables et présentées au début des simulations. Toutefois, les valeurs des paramètres du modèle écologique seront identiques pour l'ensemble des scénarios simulés, et la simulation 0 (simulation écologique, sans intervention humaine de contrôle des populations) fournira la base de comparaison de l'efficacité des scénarios de contrôle testés.

7.1.5.2. Simulation des phénomènes biologiques

Pousse de l'herbe et capital fourrager

La pousse de l'herbe est un phénomène complexe qui dépend de nombreux facteurs, notamment les conditions climatiques (Baumont *et al.*, 2012). Ainsi, la croissance des plantes herbacées a-t-elle principalement lieu d'avril à juillet, et dans une moindre mesure d'août à octobre (Figure 36, p. 117). Pour simplifier notre modèle, nous ne considérons pas la survenance d'aléa climatiques. Nous supposons que 70% de la pousse de l'herbe a lieu entre avril et juillet, et 30% entre août et octobre, de manière homogène sur chacune de ces deux périodes (croissance journalière constante). Entre octobre et avril, la croissance de l'herbe est considérée comme nulle (saison morte). Chaque *patch* démarre donc la simulation avec un « capital fourrager » nul. La production fourragère totale d'une campagne est le cumul de la pousse de l'herbe effective sur l'ensemble de la période d'avril à octobre.

Notre objectif étant d'analyser le comportement économique des éleveurs, nous choisissons de monétiser nos variables (unité de compte homogène). Ainsi, nous considérons que le capital fourrager produit par un hectare de prairie permanente (i.e. un *patch* du modèle) correspond au barème « coup dur » des assurances prairies, à savoir 900€/ha, qui peut correspondre à une production de 4,5 tMS de fourrage au prix de 200€/tMS. 70% de ce capital (environ 630€) est donc produit entre avril et juillet (122 jours), avec un taux de croissance de 5,17€/jour ; les 30% restant (environ 270€) sont produits entre août et octobre (92 jours), avec un taux de croissance de 2,93€/jour (voir Tableau 45). Ainsi, dans des conditions climatiques et sanitaires idéales, un capital fourrager de 900€/patch

(900,3€ exactement) est produit chaque année entre avril et octobre. Dans la suite, on notera k_j la croissance journalière du capital fourrager au jour j .

Reproduction des campagnols

Les dynamiques de population de campagnols terrestres suivent un cycle pluriannuel comprenant des phases de basse densité (faible taux de reproduction) et des phases de forte croissance et de haute densité (fort taux de reproduction) (Figure 62). La période de reproduction des campagnols a lieu entre avril et octobre, au taux de reproduction r . La reproduction est nulle de novembre à mars ($r = 0$).

Dans le modèle de Marilleau *et al.* (2018), l'âge des campagnols est considéré et les populations vieillissent à chaque pas de temps : jeunes (incapables de se reproduire ni de se déplacer) entre 0 et 18 jours, juvéniles (capables de se déplacer et de se reproduire) entre 18 et 56 jours, adultes (capables de se reproduire mais ne se déplaçant pas) au-delà de 56 jours. Dans un souci de simplification, et de recentrage autour de notre objet d'étude – le comportement des éleveurs – nous ne considérons pas de processus de vieillissement dans notre modèle (les classes d'âge ne sont pas prises en compte). Nous ne considérons que la population totale de campagnols terrestres, composée à 50% de mâles et 50% de femelles, tout nouveau campagnol étant immédiatement en capacité de se disperser et de se reproduire. Seule la moitié de la population, les femelles, se reproduit (*sexratio* de 1/1).

Le modèle d'équation logistique utilisé par Marilleau *et al.* (2018) est le suivant :

$$\frac{dy}{dt} = r \left(1 - \frac{(y + j + a)}{\gamma_{max}} \right) (j + a)$$

Avec :

- y la population de jeunes campagnols ; j la population de juvéniles ; a la population d'adultes
- r le taux de reproduction
- γ_{max} la population maximale (capacité de charge) d'un *patch*
- t le temps (*ticks* du modèle)

Le modèle de Krebs (2016) propose une approche très similaire dans le cas de l'étude d'une maladie :

$$\gamma_t = \gamma_{t-1} + r \cdot \gamma_{t-1} \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_{max}} \right)$$

Avec :

- γ_t la sévérité de la maladie à l'instant t ; γ_{t-1} la sévérité de la maladie à l'instant $t - 1$;
- r le taux de développement de la maladie
- γ_{max} la sévérité maximale de la maladie
- t le temps (*ticks* du modèle)

La principale difficulté relative à la modélisation de la dynamique temporelle des populations de campagnols terrestres est son caractère cyclique. A intervalle de temps régulier, les populations de campagnols terrestres augmentent fortement et atteignent progressivement leur maximum, déterminé par la capacité de charge de la parcelle (γ_{max}), avant de décroître. A ce jour, cette forte diminution des populations de campagnols terrestres n'est pas totalement expliquée. Le modèle de Marilleau *et al.* (2018) n'intègre d'ailleurs pas les mécanismes biologiques et écologiques responsables de la dynamique cyclique des pullulations, notamment le mécanisme de déclin et de stagnation en basse densité des populations. Nous souhaitons toutefois intégrer à notre modèle la possibilité de

simuler plusieurs cycles de pullulation. Pour cela, nous faisons varier le taux de reproduction des campagnols, r (Figure 62, Tableau 45).

- Au début de la simulation, nous considérons que les populations en début d’hiver sont faibles et que la flore des prairies est suffisamment favorable pour que le taux de reproduction augmente et atteigne sa valeur maximale, r_2 . Tant que la pullulation n’a pas eu lieu (*i.e.* tant que les populations de campagnols en début d’hiver restent inférieures à un seuil fixé à 50% de la capacité de charge, appelé $\gamma_{déclin}$), le potentiel de reproduction des populations est maintenu à ce niveau (r_2).
- Si ce seuil, $\gamma_{déclin}$, est franchi, alors le potentiel de reproduction des campagnols diminue au niveau r_1 et le compteur de retour du potentiel reproductif est lancé : le délai de retour t_{retour} est décompté à partir de la fin de l’hiver. Passé ce délai (5 ans sans intervention humaine), le potentiel reproductif des campagnols atteint de nouveau son maximum au début du printemps suivant (r_2).

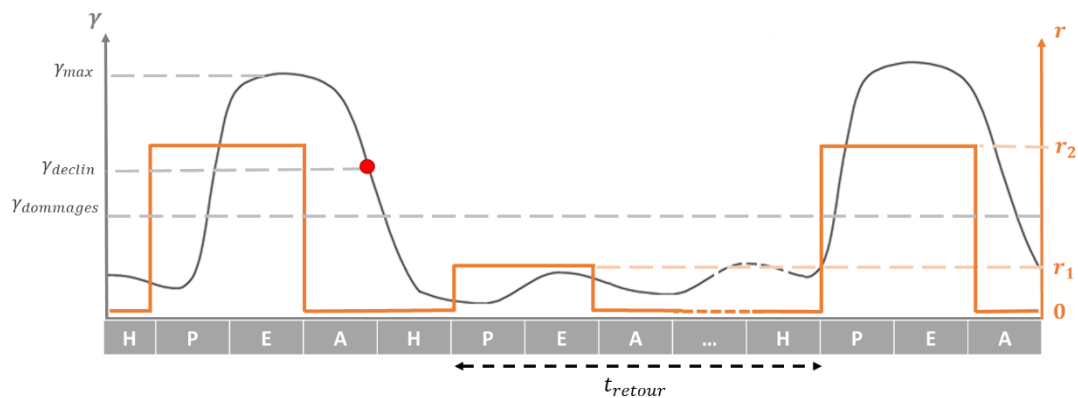


Figure 62 : Modélisation des variations cycliques du potentiel reproductif et des populations de campagnols terrestres

Tableau 45 : Calendrier de simulation des phénomènes biologiques

Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	
30 j	31 j	31 j	28 j	31 j	30 j	31 j	30 j	31 j	31 j	30 j	31 j	
151 jours					122 jours				92 jours			
					214 jours							
Pas de reproduction des campagnols $r = 0$					Reproduction des campagnols à taux r $r = r_1$ ou $r = r_2$							
Pas de pousse de l’herbe					Croissance du capital fourrager de 5,17€/j				Croissance du capital fourrager de 2,93€/j			

Ainsi, la dynamique de reproduction des campagnols terrestres d’un *patch* à chaque pas de temps est déterminée par le système d’équations suivant :

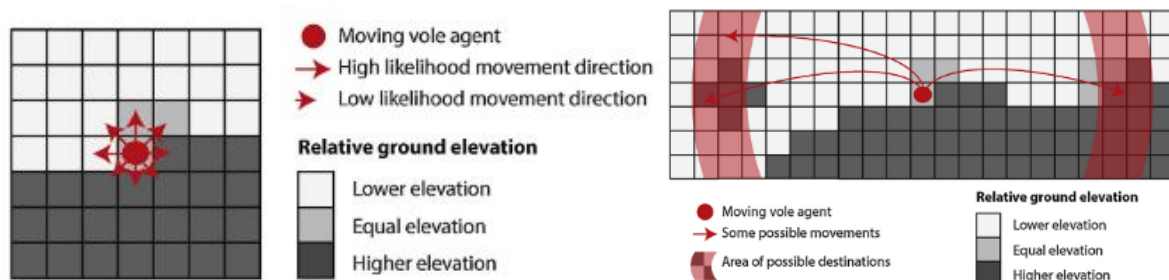
$$\begin{cases} \gamma_t = \gamma_{t-1} \times (1 - morta) & \text{si } temps \leq 151 \\ \gamma_t = \gamma_{t-1} \left(1 + r \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_{max}} \right) - morta \right) & \text{si } 151 < temps \leq 365 \end{cases}$$

Enfin, il est considéré, à l’échelle de chaque *patch*, que si les populations de campagnols sont inférieures à 2, elles disparaissent du *patch* car en l’absence d’au moins un couple de campagnols leur reproduction n’est plus possible.

Dispersion des campagnols

Il s'agit de modéliser un espace discret, reposant sur la considération de sous-populations liées par des corridors (Smith *et al.*, 2009). Plusieurs *patches* ont initialement un statut particulier : ces sont les foyers de démarrage des pullulations. Ces prairies sont les plus favorables aux campagnols terrestres, et auront une densité initiale de campagnols $\gamma_0 = \text{popinitialfoyer}$ (20 campagnols par défaut). Les autres *patches* ne sont pas des foyers, mais des récepteurs-émetteurs de campagnols, tels que $\gamma_0 = \text{popinitial} < \text{popinitialfoyer}$ (5 campagnols par défaut).

Pour élaborer le modèle de dispersion, nous devons prendre en compte la densité des populations de campagnols, car la diffusion des populations est densité-dépendante (Berthier *et al.*, 2014a; Berthier *et al.*, 2014b; Foltête *et al.*, 2005; Giraudoux *et al.*, 2002). Lorsque la population totale d'un *patch* atteint un certain seuil, appelé seuil de dispersion et correspondant à une part de la population maximale supportée par le *patch* (capacité de charge), ce *patch* voit une partie de sa population se disperser à courte ou longue distance (Figure 63). La part de la population qui se disperse est calculée à partir d'un coefficient (*dispCD* ou *dispLD*) et correspond à la part de la population totale qui migre d'un *patch* à l'autre. Sur la population qui se disperse, une proportion choisie (par défaut, 50%) meurt avant d'atteindre une nouvelle parcelle où s'installer, du fait de la pression de prédation plus forte lorsque les campagnols se déplacent en surface⁷². Les campagnols restant atteignent une parcelle dont la population est inférieure à la capacité de charge (*population totale < population maximale*) et s'y installent. La dispersion est aléatoire : chaque *patch* « émet » des *agents* « campagnols » qui se déplacent à courte distance aléatoirement sur l'un des quatre *patches* directement voisins et à longue distance sur un *patch* situé entre 300 m et 3 km du *patch* d'origine. Une fois arrivés, les campagnols *agents* « s'installent » et sont intégrés à la *population totale* du *patch* d'arrivée.



Dans notre modèle, il existe un seuil, que nous appelons « seuil de saturation », au-delà duquel les populations doivent arrêter de diffuser aux parcelles voisines si l'on souhaite que les populations locales augmentent jusqu'à la population maximale (capacité de charge). Ce seuil, fixé par défaut à 15% de la population maximale, pourrait correspondre à la population des parcelles telle qu'elles ne sont plus « attrayantes » pour les campagnols, qui ne s'y installent donc pas. Ce seuil de saturation doit être inférieur au seuil de dispersion. Ainsi, si un *patch* a une population totale de campagnols terrestres supérieures au seuil de dispersion et qu'au moins un de ses voisins a une population inférieure au seuil de saturation, alors ce *patch* émet une proportion donnée de campagnols terrestres qui vont se déplacer et s'installer sur un autre *patch* dont la population totale est inférieure à sa capacité de charge.

⁷² Pour nos simulations, ce taux de prédation sera considéré comme constant, même s'il peut varier dans les faits en fonction de la gestion des infrastructures agroécologiques (haies...) par les éleveurs, ou encore en fonction des pratiques de chasse impactant les renards ou autres prédateurs naturels du campagnol.

Choix des valeurs des paramètres biologiques

Nos paramètres de reproduction, de mortalité et de dispersion sont calibrés d'après des données proposées par Marilleau *et al.* (2018) adaptées à l'objectif de notre étude. Les valeurs « par défaut » et fixes de ces paramètres biologiques sont présentées dans le Tableau 46 et le Tableau 43 (p. 194).

Tableau 46 : Valeur par défaut des paramètres biologiques du modèle

Nom de la variable	Nom sous Netlogo	Valeur par défaut
Croissance de l'herbe (capital fourrager)	<i>croissance</i>	0€/ha de novembre à mars ($0 < tick \text{ mod } 365 \leq 151$) 5.17€/ha d'avril à juillet ($151 < tick \text{ mod } 365 \leq 273$) 2.93€/ha d'août à octobre ($273 < tick \text{ mod } 365 \leq 365$)
Capital fourrager maximum	<i>capitalmax</i>	900€/ha
Délais de retour du potentiel de pullulation	<i>tretour</i>	1005 jours (ticks)
Capacité de charge	<i>popmax</i>	500 individus/ha
Population initiale	<i>popinitial</i>	5 individus/ha
Population initiale des foyers	<i>popinitialfoyer</i>	20 individus/ha
Reproduction hors pullulation	<i>repro1</i>	0.0010
Reproduction en pullulation	<i>repro2</i>	0.030
Taux de mortalité	<i>morta</i>	0.0040
Seuil de dispersion	<i>seuildisp</i>	0.2 soit 100 campagnols/ha
Seuil de saturation	<i>seuilsaturation</i>	0.15 soit 75 campagnols/ha
Taux de dispersion à courte distance	<i>dispCD</i>	0.10
Taux de dispersion à longue distance	<i>dispLD</i>	0.001
Taux de mortalité en déplacement	<i>mortadeplacement</i>	0.5
Seuil de dommage	<i>seuildommage</i>	200 individus/ha
Seuil de détection	<i>seuildetection</i>	50 individus/ha

7.1.5.3. Simulation du phénomène économique

Représentation des préférences des éleveurs

En situation d'incertitude ou de risque, l'espérance de gain n'est pas le meilleur critère pour définir les préférences des agents et donc leur comportement économique (Cayatte, 2009). De plus, les agents ne sont souvent pas en possession de l'ensemble des informations leur permettant une analyse exacte des différents coûts et gains qu'impliquent leurs décisions (information imparfaite et rationalité limitée).

Ainsi, une approche par fonction d'utilité, telle que décrite par exemple dans les modèles Principal-Agent d'Holmstrom (1979, 1982), serait pertinente dans notre cas d'étude. En effet, une application directe du modèle d'Holmstrom (1979, 1982) définit que l'utilité de l'agent i dépend de sa production fourragère w_i et de son effort individuel a_i de contrôle des campagnols terrestres : $H_i(w_i, a_i) = U(w_i) - V(a_i)$, U et V étant des fonctions croissantes. $U(\cdot)$ représente l'utilité de la production fourragère, et $V(\cdot)$ la désutilité des actions de contrôle des campagnols. Une telle approche nécessite l'hypothèse d'homogénéité des fonctions d'utilité des éleveurs. L'utilité procurée par la production fourragère dépend notamment du degré d'autonomie fourragère de l'exploitation : si l'exploitation

est largement excédentaire, la perte d'une unité de fourrage n'occasionnera qu'une faible perte d'utilité pour l'éleveur. L'inverse est vrai : en cas de faible autonomie fourragère, la perte d'une unité de fourrage peut occasionner une baisse significative du bien-être de l'éleveur. Intégrer ces considérations, qui reposent sur une approche « système fourrager » dans notre modèle spatial, complexifierait trop cette étude de l'action collective. Enfin, les fonctions $U(.)$ et $V(.)$ ne sont pas connues.

Nous préférons, à ce stade, ne pas rajouter d'hypothèses sur les préférences des agents et la relation entre les caractéristiques du système fourrager et le consentement à payer des éleveurs pour lutter contre les pullulations. Ainsi, pour cette étude, une approche par les coûts et gains, telle que proposée par Krebs (2016), sera privilégiée. De plus, il est choisi d'externaliser les actions du principal (planificateur social) afin de ne pas complexifier le modèle avec des flux d'information supplémentaires (des éleveurs vers le planificateur).

Dommmages causés aux prairies

Des dommages sur la production des prairies sont enregistrés dès une densité de 100 à 200 individus par hectare (Giraudoux *et al.*, 1995). Il n'a pas été mis en évidence de relation explicite entre la densité de population de campagnols terrestres et les dommages subis par les prairies, même si ces deux variables sont évidemment corrélées (Quéré *et al.*, 1999). Ainsi, la fonction de dommage d , liant les densités de campagnols aux pertes fourragères, n'est pas connue, ce qui rend nécessaire certaines approximations.

Une approche par les coûts et bénéfices nécessite de déterminer le niveau de production fourragère p en fonction des dommages causés par les populations de campagnols terrestres. Dans ce cas, les dommages sont décomptés parcelle par parcelle (Epanchin-Niell et Wilen, 2015), chacune subissant un dommage $d(\gamma_{x,y})$ à partir d'une production espérée \bar{P} . La production fourragère de la parcelle $(x ; y)$ est alors donnée par une équation du type : $\tilde{p} = \bar{P} - d(\gamma_{x,y})$. De leur côté, Fenichel *et al.* (2014) expriment un « capital productif » qui dépend du temps et noté $k(t)$, et dont le gain net de revenus est une fonction $f(k(t))$. Le modèle de Krebs (2016) propose de calculer les dommages, c'est-à-dire la part du revenu de référence R_{ref} perdue, proportionnellement à la « sévérité » de la maladie (notée γ) : $\gamma \cdot R_{ref}$.

Dans notre cas d'étude, une approximation possible est l'hypothèse de proportionnalité entre les populations de campagnols terrestres et les dommages. Dans un souci de simplification du modèle, nous considérerons :

- Un seuil de dommage correspondant à une population de 200 individus/hectare ;
- Une perte journalière calculée proportionnellement au rapport $\frac{\gamma}{\gamma_{max}}$.

Ainsi, quand $\gamma_j > 200$, les dommages sont : $\frac{\gamma_j}{\gamma_{max}} \cdot k_j$, avec j le jour, γ_j la population de campagnols terrestres en j , γ_{max} la capacité de charge du *patch* et k_j la croissance en capital fourrager en j .

Lutte mise en œuvre par les éleveurs

Règle de décision

Le modèle économique le plus simple attribue à chaque *patch* un propriétaire différent, décisionnaire des choix de contrôle, et considère que tous les *patches* et les propriétaires sont homogènes (Krebs, 2016). Cette hypothèse simplifie fortement le modèle mais ne permet pas de prendre en compte l'un des facteurs que la littérature met en avant pour expliquer les difficultés d'engagement dans le contrôle collectif des populations de campagnols terrestres, à savoir les disparités de marges de

manœuvre entre systèmes d'élevage pour mettre en œuvre les différentes méthodes de contrôle (Michelin *et al.*, 2014; Peyre *et al.*, 2009). Ces facteurs concernent notamment la main d'œuvre disponible et le morcellement du parcellaire. De plus, la dimension spatiale du phénomène de dispersion des populations de campagnols est importante et a des conséquences en termes de gestion du fait de l'existence de structures de propriétés privées (Coase, 1960; Fenichel *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2009). Nous souhaitons particulièrement prendre en compte la distance au siège d'exploitation pour calculer les coûts de la lutte liés au déplacement. Les exploitations agricoles du territoire modélisé sont donc de taille (nombre de *patches* associés) et de disposition spatiale (distance des *patches* au siège d'exploitation) différentes (voir Tableau 44 et Figure 60).

La modélisation de la prise de décision doit être discutée :

- Dans les faits, un éleveur décide de la gestion de ses prairies en considérant l'échelle spatiale de la parcelle (souvent de plusieurs hectares) ou de l'îlot (ensemble de parcelles regroupées). L'échelle spatiale considérée pour la prise de décision sera la *patch*, unité spatiale de base du modèle. Nous pourrions intégrer, dans une phase ultérieure de développement de notre modèle, d'autres critères de décision, prenant place à l'échelle du système fourrager.
- La question de l'échelle temporelle de la prise de décision est plus complexe. En effet, le pas de temps du modèle biologique est le jour. Or, la prise de décision est un processus complexe qui intègre différentes temporalités, notamment du fait du temps long relatif au processus de production agricole. Certaines décisions se prennent à l'échelle de la rotation culturale (sur plusieurs années), d'autres à l'échelle de l'année (la « campagne » de production) ou de la saison, d'autres à l'échelle du mois ou de la journée (pâturage tournant...). Par soucis de simplicité, nous pouvons formuler l'hypothèse que la prise de décision par l'éleveur a lieu à chaque pas de temps (*tick*), c'est-à-dire chaque jour. Concrètement, à chaque *tick*, l'éleveur prend une décision binaire de lutter (piéger) ou non, sur chacun des *patches* lui appartenant. Or, en réalité, la décision de lutte n'est prise que lorsqu'une information sur les populations de campagnols terrestres est acquise. Dans la majorité des cas, cette information n'est pas acquise quotidiennement : nous proposons d'intégrer une variable de fréquence de la surveillance des parcelles (*freqsurv*) pour rendre compte de ce phénomène.

Nous caractérisons une règle de décision à l'aide de trois critères : le signal observé, le seuil d'intervention et les coûts associés.

Signal observé et coût d'acquisition de l'information

Nous utilisons un modèle de seuil selon la classification de Mumford et Norton (1984) : le seuil économique est défini comme « *la densité d'une population de nuisible qui justifiera une intervention.* »

Tout signal observé sera corrélé aux populations de campagnols terrestres sur un *patch* donné. Le signal le plus évident pour un éleveur est la perte de capital fourrager occasionnée par les populations de campagnols, autrement dit les dommages. Ainsi, un éleveur mènera des actions de piégeage sur les *patches* qui subissent des dommages (c'est-à-dire dont les populations de campagnols dépassent le seuil de dommage). Cette hypothèse est réaliste compte-tenu du comportement observé. Or, il apparaît, avec les paramètres choisis, que la reproduction et la dispersion des populations s'opère avant que les premiers dommages ne soient causés, c'est-à-dire avant le début des opérations de piégeage si les éleveurs n'observent que les dommages. Les dommages ne constituent qu'un signal *indirect* sur les populations de campagnols terrestres du *patch*. Des opérations de surveillance peuvent permettre d'observer plus directement et plus précocement les populations de campagnols, en repérant le moment où les populations dépassent un certain seuil, appelé *seuil de détection* (compris

entre 1 individu/ha et le seuil de dommages, 50 *ind/ha* par défaut). La surveillance permet l'acquisition d'un signal plus *direct* sur les populations de campagnols terrestres.

Selon le signal qui est observé, direct (surveillance) ou indirect (dommages), le seuil d'intervention sera différent :

- Dans le cas d'une surveillance régulière (à la fréquence *freqsurv*) des parcelles, l'éleveur conduira des actions de piégeage dès lors que les populations de campagnols terrestres dépassent le seuil de détection.
- Dans le cas de la seule observation des dommages, l'éleveur conduira des actions de piégeage dès lors que des dommages sont observés.

Le seuil d'intervention dépend donc de l'information captée par l'éleveur. Cette dernière permet à l'éleveur de connaître l'état des populations à un instant t et donc d'anticiper les futurs dommages. La fréquence d'acquisition de cette information (par la surveillance) est déterminée par la variable globale *freqsurv*. Il est considéré que la surveillance des prairies n'est effectuée qu'entre avril et octobre, période de pousse de l'herbe et de reproduction potentielle des campagnols terrestres.

Cette information a un coût d'acquisition. Nous considérons dans notre modèle que l'éleveur l'acquiert par lui-même, au coût suivant pour chaque *patch* : $dist \times d + s$, avec *dist* la distance entre le *patch* et le siège d'exploitation, *d* le coût de déplacement et *s* le coût de surveillance du *patch*. Le coût unitaire de déplacement est estimé à $d = 0,10\text{€}/100\text{m}$ (approximation sous forme d'indemnité kilométrique) et le coût de la surveillance à $s = 0,50\text{€}/\text{ha}$ (approximation d'après des dires d'acteurs ; zone expérimentale de Volvic ; cf. Tableau 30, p. 152).

Coût de la lutte (par piégeage)

Plusieurs méthodes sont à disposition des éleveurs pour maîtriser les populations de campagnols terrestres : piégeage, phosphore de zinc, lutte biologique, lutte mécanique... Chaque méthode a un coût et une efficacité différents. De plus, selon l'expérience et la connaissance acquise par l'éleveur (par exemple, sa capacité à localiser les foyers de pullulation), le coût en temps des actions de lutte peut être diminué.

Pour simplifier ce processus, nous considérerons que les éleveurs ne mettent en œuvre qu'une seule méthode de lutte, le piégeage, qui est la plus coûteuse (temps nécessaire). Dans le modèle d'Epanchin-Niell et Wilen (2015), le niveau d'effort de contrôle nécessaire pour éviter l'invasion d'une parcelle donnée dépend de la pression de dispersion des parcelles voisines.

Pour un *patch* donné, le coût de l'opération de piégeage comprend plusieurs termes :

- Un coût fixe qui correspond à l'opération de piégeage elle-même, b ;
- Un coût variable qui dépend du nombre de parcelles voisines qui « dispersent » des campagnols (*i.e.* dont les populations sont supérieures au seuil de dispersion), *inv_neigh*, et d'un coût unitaire de piégeage, c .
- Un coût lié au déplacement de l'éleveur jusqu'au *patch*, qui dépend de la distance entre le *patch* et le siège d'exploitation, *dist*, et du coût unitaire de déplacement, $d = 0,10\text{€}/100\text{m}$.

Les coûts totaux de l'effort de lutte pour une parcelle sont donc : $b + inv_neigh \times c + dist \times d$.

Dans les modèles de Fenichel *et al.* (2014) et Krebs (2016), l'efficacité de l'action de contrôle est prise en compte, et une partie seulement du stock de ravageur est éliminée (non éradication). Dans le cas du piégeage des campagnols terrestres, nous testerons plusieurs niveaux d'efficacité du piégeage pour déterminer la sensibilité de notre modèle économique à la réussite de l'action. Nous considérons que

la valeur « par défaut » de l'efficacité du piégeage est $\varphi = 30\%$ (retours d'experts et du terrain). Le temps de piégeage nécessaire pour parvenir à ce résultat dépend de la densité de population de campagnols terrestres (Tableau 47).

Tableau 47 : Coût du piégeage (d'après les retours d'expert, Volvic, 63)

Densité de campagnols (ind/ha)	Basse densité ($\gamma_j \leq 50$)	Moyenne densité ($50 < \gamma_j \leq 200$)	Haute densité ($\gamma_j > 200$)
Référence temps de piégeage (h/ha)	3h/ha	6h/ha	10h/ha
Monétisation SMIC horaire (10,15€/h) (€/ha)	30€	60€	100€
Coût fixe (€), $b(\gamma_j)$	7€	15€	25€
Coût variable (€), $c(\gamma_j)$	5€	11€	18€

Formalisation de la règle de décision

La règle de décision choisie pour notre modèle considère le **bénéfice marginal** de la lutte, c'est-à-dire la différence entre les gains marginaux et les coûts marginaux de la lutte menée au jour j :

$$B_j = G_j - C_j$$

Les coûts marginaux d'une action menée au jour j sont définis comme présentés précédemment :

$$C_j = b(\gamma_j) + inv_{neigh} \times c(\gamma_j) + dist \times d$$

Les gains marginaux sont définis comme étant le capital fourrager « sauvé » grâce à l'action de piégeage (c'est-à-dire la perte potentielle évitée qui aurait été causée par les populations piégées) :

$$G_j = \varphi \cdot \frac{\gamma_j}{\gamma_{max}} \cdot \left(K_{max} - \sum_{i=1}^j k_j \right)$$

$K_{max} - \sum_{i=1}^j k_j$ représente le capital fourrager qu'il reste à produire au jour j et qui risque d'être perdu si la pullulation n'est pas maîtrisée. Ce terme représente « l'enjeu de gestion ».

L'éleveur n'agira que si le bénéfice marginal de la lutte menée en j est positif :

$$B_j > 0$$

$$G_j - C_j > 0$$

$$\varphi \cdot \frac{\gamma_j}{\gamma_{max}} \cdot \left(K_{max} - \sum_{i=1}^j k_j \right) - b(\gamma_j) + inv_{neigh} \times c(\gamma_j) + dist \times d > 0$$

$$\text{soit : } \varphi \cdot \frac{\gamma_j}{\gamma_{max}} \cdot (K_{max} - \sum_{i=1}^j k_j) > b(\gamma_j) + inv_{neigh} \times c(\gamma_j) + dist \times d$$

La condition d'intervention devient :

$$\frac{\gamma_j}{\gamma_{max}} > \frac{b(\gamma_j) + inv_{neigh} \times c(\gamma_j) + dist \times d}{\varphi \cdot (K_{max} - \sum_{i=1}^j k_j)}$$

avec $\gamma_j >$ seuil de détection ou $\gamma_j >$ seuil de dommage selon qu'une surveillance est menée ou non.

Si elle est menée, la surveillance est en revanche un coût « fixe », à fréquence régulière (*freqsurv*). Ces coûts de surveillance, tout comme les coûts de piégeage, s'accumulent et doivent donc être plafonnés, car le capital fourrager produit par une parcelle est limité ($K_{max} = 900\text{€}$).

Ainsi, l'intervention repose sur une double condition :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma_j}{\gamma_{max}} > \frac{b(\gamma_j) + inv_{neigh} \times c(\gamma_j) + dist \times d}{\varphi \cdot (K_{max} - \sum_{i=1}^j k_j)} \\ \sum_{i=1}^j (b(\gamma_j) + inv_{neigh} \times c(\gamma_j) + dist \times d + s) < K_{max} \end{array} \right.$$

Il serait extrêmement pertinent de prendre en compte des contraintes de temps et de liquidités qui limiteraient l'action potentielle des éleveurs. Notamment, si l'éleveur effectue lui-même les actions de piégeage, il est fortement limité par une contrainte de temps. La monétisation de l'ensemble des coûts permettrait de prendre aisément en compte de telles contraintes. Toutefois, et dans cette version du modèle, nous choisissons de ne pas intégrer de contrainte sur le temps et les capacités de financement disponibles, et ceci afin de capter l'effet du niveau et de la structure des coûts eux-mêmes.

7.2. Simulations et résultats

7.2.1. Plan de simulation

Nous avons conçu ce modèle dans le but de déterminer la ou les stratégie(s) de gestion des pullulations de campagnols terrestres la ou les plus efficace(s). Pour cela, plusieurs simulations sont effectuées dans la succession logique présentée précédemment (voir Tableau 40, p. 189). Ces simulations font notamment intervenir plusieurs régimes de prise de décision privée (Epanchin-Niell et Wilen, 2015) et de planification sociale (Epanchin-Niell et Wilen, 2012; Krebs, 2016).

La simulation 0 fournit la base comparative pour évaluer l'efficacité des modes de gestion testés dans les simulations suivantes. Elle permet de déterminer les conséquences des pullulations lorsqu'aucune action de contrôle, individuelle ou collective, n'est menée.

La série de simulations 1 (1-a, 1-b, 1-c) correspond au cas où aucune coopération (notamment, aucun échange d'information) explicite n'existe entre les éleveurs et où aucune planification sociale n'est mise en place (aucune subvention) : il s'agit d'un scénario de **gestion unilatérale** ou « laissez-faire ». Les simulations 1-a et 1-b correspondent à une action curative, mise en œuvre lorsque des dommages sont enregistrés. La simulation 1-a teste l'hypothèse d'une méthode de lutte efficace à 100% (à l'échelle technique de sa mise en œuvre, c'est-à-dire l'hectare). La simulation 1-b propose le cas d'un piégeage efficace à 30% (estimation de l'efficacité actuelle). La simulation 1-c propose d'étudier une approche préventive, les éleveurs menant des actions de piégeage lorsqu'ils détectent des populations supérieures à un seuil de détection.

La série de simulations 2 (2-a et 2-b) traitent le cas où les éleveurs mettent en place une gestion préventive et coordonnée : dès lors que des dommages sur un patch sont détectés, les propriétaires des *patches* voisins sont informés du risque de pullulation et mènent des actions de piégeage dès lors que le seuil de détection sur ces *patches* voisins est franchi. Ce scénario est celui d'une **gestion coopérative locale** ou coordination volontaire : les agents forment des zones de contrôle coopératif qui rassemblent des contributions volontaires selon la perception d'une menace directe (*patch* par *patch*). Dans le cas de la simulation 2-a, les éleveurs échangent cette information entre eux et se préviennent dès lors que la population d'un *patch* dépasse le seuil de dommages. La simulation 2-b

permet d'isoler l'effet d'auto-information d'un éleveur sur ses propres parcelles afin de définir l'effet propre de la coopération testée en 2-a.

La série de simulations 3 (3-a, 3-b, 3-c) propose d'étudier l'effet d'une subvention versée aux éleveurs pour prendre en charge une partie des coûts de piégeage. Ce scénario suppose l'intervention d'un planificateur social (le Principal de notre modèle au sens d'Holmstrom) dont le rôle est d'augmenter l'incitation des éleveurs à mener des actions de piégeage optimales. Il s'agit d'un scénario de **planification sociale** sous la forme de subventions. La simulation 3-a considère le subventionnement d'une action type curative (sans détection précoce ; cf. simulation 1-b). La simulation 3-b considère le subventionnement d'une action préventive (avec surveillance précoce ; cf. simulation 1-c). La simulation 3-c considère le cas d'une coordination volontaire (avec surveillance par voisinage et transfert d'information ; cf. simulation 2-a).

La série de simulations 4 (4-a, 4-b) considère le cas où le manque d'information conduit à un **aléa moral**. La simulation 4-a traite le cas où un ou plusieurs éleveurs adoptent un comportement de passager clandestin et ne participent pas à l'action collective contre les pullulations. La simulation 4-b traite le cas où l'engagement dans la lutte des éleveurs est variable d'une année sur l'autre et aléatoire (choix d'allocation des ressources dépendant de la survenance d'aléas) ; la probabilité qu'un éleveur engage des actions de piégeage dépendra de l'intérêt qu'il a à la lutte (approximé grâce au ratio de rentabilité de la lutte ; cf. Tableau 49, p. 208) et du nombre d'autres éleveurs impliqués dans la lutte l'année précédente.

7.2.2. Données produites par les simulations

Les simulations effectuées à partir du modèle peuvent produire de nombreuses observations à partir des différentes variables que nous avons créées ou que nous pourrions créer. Nous observons principalement l'évolution de la production fourragère, des populations de campagnols terrestres, des coûts de la lutte et des subventions. Ces *outputs* sont générés à l'échelle de chaque exploitation ou bien du territoire, et sont présentées sous forme de moyennes par *patch* (par hectare). Les indicateurs de suivi sont générés directement par la simulation et stockés dans un tableur (Tableau 48).

Tableau 48 : Indicateur de suivi des simulations

Temps ↓	Exploitations agricoles								Territoire		
	Indicateur 1			Indicateur 2			...	...	Indicateur	...	Indicateur
1	Ea0	...	Ea7	...	...	Ea7	...	...	...	...	...
...
9126	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Nous pensons important d'étudier le niveau mais également la structures des coûts lors de nos différentes simulations (Figure 64). Les indicateurs de suivi sont, à l'échelle des exploitations :

- La production fourragère moyenne, en €/patch ;
- Le coût net de la lutte (piégeage + déplacements + surveillance – subvention), en €/patch ;
- Le coût du piégeage *strico sensu*, considéré comme l'effort de lutte, en €/patch ;
- Les subventions, en €/patch ;

De même, à l'échelle du territoire, les indicateurs de suivi sont :

- La production fourragère totale, en € ;
- La production fourragère moyenne, en €/patch ;
- Le coût de la lutte total, en € ;
- Le coût de la lutte moyen, en €/patch ;

- L'effort de lutte total, en € ;
- L'effort de lutte moyen, en €/patch ;
- La subvention totale, en € ;
- La subvention moyenne, en €/patch ;
- La population totale de campagnols, en individus ;
- La population moyenne de campagnols, en individus/patch.

Coût total de la lutte		
Coût du piégeage <i>stricto sensu</i>	Coût des déplacements	Coût de la surveillance
Subvention	Coût net de la lutte pour l'éleveur	

Figure 64 : Structure des coûts de la lutte

Les indicateurs de synthèse sont calculés *ex-post* à partir des données générées par les simulations (Tableau 49). Ils permettent, à l'échelle du territoire ou de chaque exploitation, d'effectuer une synthèse sur le temps long (25 années). Ces indicateurs sont des moyennes annuelles par hectare.

Tableau 49 : Indicateurs de synthèse

Indicateur de synthèse	Intérêt pour l'analyse
Production moyenne, en €/patch	Ces deux indicateurs permettent de définir la production moyenne attendue dans le cadre de chaque scénario modélisé. Cette donnée peut servir de nouvelle référence aux éleveurs pour piloter leur système fourrager.
Perte moyenne, en €/patch	
Effort de lutte, en €/patch	Cet indicateur permet de définir l'effort de piégeage <i>stricto sensu</i> nécessaire pour obtenir les résultats productifs précédents.
Coût total de la lutte, en €/patch	Cet indicateur correspond au coût total de la lutte (piégeage, déplacement, surveillance).
Subventions, en €/patch	Le cas échéant, cet indicateur correspond au montant moyen de la subvention versée aux éleveurs pour soutenir leurs actions de lutte.
Ratio de rentabilité (coût / perte évitée)	Le ratio coût / pertes évitées, appelé ratio de rentabilité, détermine l'efficacité moyenne des opérations de piégeage et fournit un <i>proxi</i> de la probabilité que les éleveurs se comportent dans la réalité comme le modèle le prédit.
Ratio d'efficacité des subventions (subvention / perte <i>supplémentaire</i> évitée)	Ce ratio permet d'évaluer l'efficacité de la subvention en comparant le montant versée aux pertes supplémentaires qu'elle permet d'éviter.

7.2.3. Synthèse des résultats

7.2.3.1. Phénomène écologique

Dans la simulation 0, aucune intervention de contrôle n'est menée, aucune planification sociale n'est mise en œuvre et aucun échange d'information n'a lieu entre éleveurs. La simulation 0 permet de déterminer les dynamiques de population des campagnols terrestres et les dommages associés dans le cas où elles sont totalement incontrôlées (seules les dynamiques écologiques sont observées). La simulation 0 sera la simulation de référence qui permettra d'analyser l'efficacité des différents scénarios d'action proposés dans les simulations suivantes.

A l'échelle du territoire

Dans le cadre du modèle et de son calibrage présenté précédemment, en l'absence d'actions de contrôle, les populations de campagnols terrestres croissent et se dispersent progressivement sur l'ensemble du territoire (Figure 65). Le territoire est affecté de façon homogène, conséquence directe de nos choix de calibrage (*patches* homogènes, openfield de prairies) ; les prairies subissent la part significative des dommages sur une année : l'année suivant le début de l'augmentation du taux de reproduction. Lors d'une pullulation, les populations de campagnols s'approchent de la capacité de charge du milieu sans toutefois l'atteindre. A l'échelle du territoire, la perte moyenne s'élève à 57% de la production fourragère espérée. Ce chiffre est plus élevé que celui avancé par Quéré *et al.* (1999), tout en demeurant dans le même ordre de grandeur. Ce résultat est acceptable car notre modèle ne prend pas en compte les structures paysagères susceptibles de modifier les dynamiques des campagnols terrestres. Il s'agit d'une perte de capital fourrager estimée à 513€/ha tous les 5 ans.

La dynamique de reproduction des campagnols terrestres peut être décrite comme suit :

- A $t = 0$, la population de campagnols terrestres à l'entrée de l'hiver $n - 1$ est suffisamment faible (inférieure à 50% de la capacité de charge du *patch*) pour que leur taux de reproduction soit élevé au printemps suivant ($r = r_2 = 0,030$).
- Ainsi, au début de la période de reproduction de l'année n ($t = 151$), les populations augmentent fortement, deviennent détectables sur l'ensemble du territoire environ 17 semaines ($t = 269$) après le début de la pullulation et causent de faibles dommages (de l'ordre de 4 à 6%)⁷³.
- Entre $t = 365$ et $t = 475$, la reproduction est à l'arrêt (hiver de l'année n) mais les populations conservent leur potentiel de pullulation (seuil de 50% de la capacité de charge non franchi).
- A $t = 476$, la reproduction redémarre et cause d'importants dommages (54%) sur l'ensemble du territoire environ 11 semaines après le redémarrage de la reproduction (à partir de $t = 552$).
- A la fin de la période de reproduction ($t = 690$), la pullulation s'arrête et le taux de reproduction reprend une valeur faible ($r = r_1 = 0,0010$) pour une durée de 3 ans, au bout de laquelle le modèle revient à la situation reproductive initiale, et le cycle recommence.

Les populations de tous les *patches* restent supérieures à 2 (seuil en-dessous duquel les campagnols ne peuvent plus se reproduire et disparaissent), ce qui signifie que l'ensemble des *patches* du territoire conservent un stock reproductif de campagnols terrestres.

⁷³ En présence de taupes, le démarrage des pullulations passe inaperçu, car les campagnols profitent des galeries creusées par les taupes et ne trahissent pas leur présence souterraine par des indices de surface.

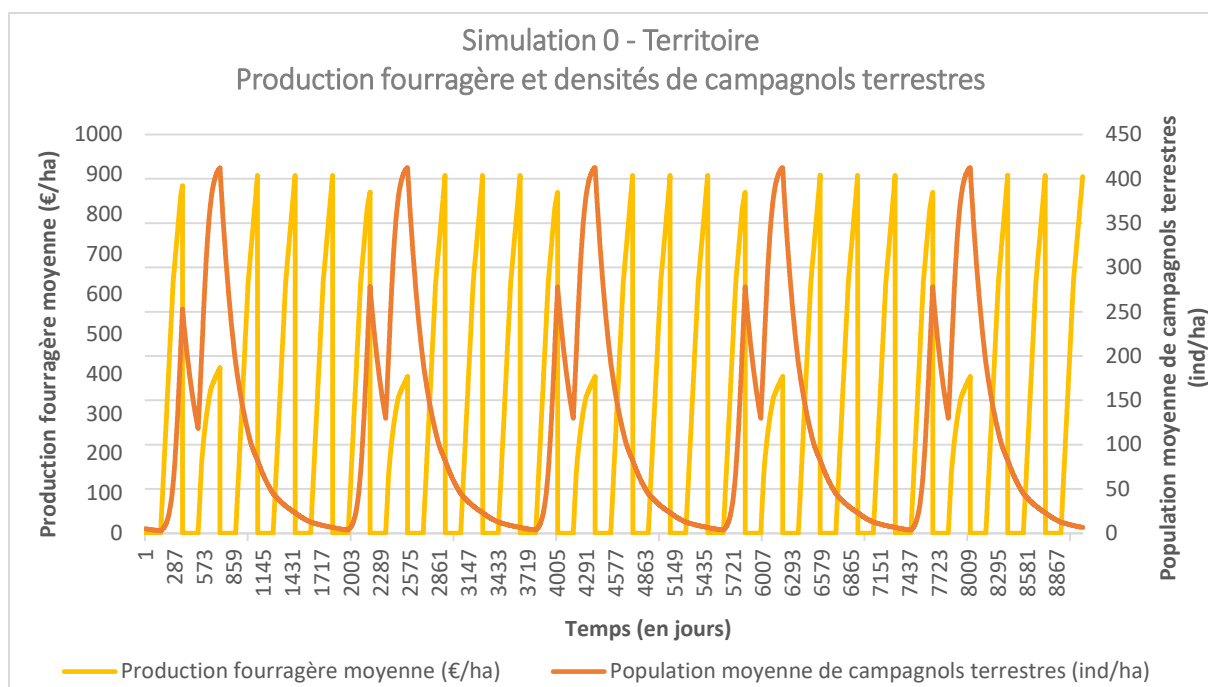


Figure 65 : Simulation 0 – Production fourragère et densités de campagnols terrestres sur le territoire (moyenne/ha)

A l'échelle des exploitations agricoles

Le Tableau 50 montre que les exploitations agricoles sont toutes affectées par le même niveau de dommages. Le territoire étant homogène, il est affecté de la même manière en tout point malgré la présence de foyers initiaux, et les structures spatiales des exploitations (morcellement) n'ont pas d'incidence dans le cas d'un paysage totalement ouvert. Sur l'ensemble de la période modélisée (5 cycles de pullulations sur 25 ans), les pertes moyennes (ramenées à l'année) enregistrées par les exploitations sont identiques. Subir de telles pullulations dont le délai de retour est de 5 ans revient à perdre l'équivalent de 107€/ha de production fourragère chaque année, soit 8,4% de la production annuelle espérée⁷⁴.

Dans les faits, les paysages seraient évidemment fortement hétérogènes, avec des corridors écologiques très favorables à la dispersion des campagnols ou au contraire des barrières, naturelles ou artificielles, à leur déplacement. Cela aurait pour effet de placer les exploitations dans des situations d'exposition et de vulnérabilité différentes face aux pullulations, et le morcellement de leurs parcelles respectifs serait une donnée importante. De la même manière, les prairies du territoire ne seraient pas homogènes quant à leur productivité et leur capacité de charge. La prise en compte de cette complexité nous éloignerait de notre objet d'étude et relève davantage de travaux menés en écologie et agroécologie.

Toutefois, il est évident que si les dommages moyens subis par les exploitations sont identiques en proportion de la production espérée, ils sont différents en valeur absolue du fait des surfaces différentes. L'hypothèse d'un comportement homogène des agents « éleveurs » de notre modèle suppose qu'ils ont les mêmes contraintes concernant les besoins de leurs troupeaux respectifs, c'est-à-dire que leur chargement (*UGB/SAU*) est identique. La simulation 0 met ainsi en évidence les conséquences de nos hypothèses de simplification, que nous discuterons plus tard (7.3, p. 217).

⁷⁴ Nous retrouvons ici le taux de perte annuel que nous avons proposé au Chapitre 3 lors de notre étude de l'assurance (p. 94).

Tableau 50 : Pertes fourragères moyennes par exploitation (en % de la production espérée)

	ea0	ea1	ea2	ea3	ea4	ea5	ea6	ea7	Territoire
Pull° 1	54%	54%	54%	54%	54%	54%	54%	54%	54%
Pull° 2	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%
Pull° 3	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%
Pull° 4	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%
Pull° 5	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%	57%

Nous déduisons de la simulation 0 que :

- En l'absence de contrôle, toutes les exploitations et toutes les prairies du modèle sont affectées de la même manière puisque l'ensemble du territoire connaît les mêmes dynamiques de reproduction des campagnols et de pousse de l'herbe : elles ont toutes la même **exposition au risque**.
- En valeur relative, toutes perdent la même part de leur production fourragère espérée, ce qui place les exploitations face à un **aléa** de même nature : même fréquence, même intensité.
- Toutefois, en valeur absolue, plus la surface de l'exploitation est importante, plus les pertes sont importantes. Dans les faits, nous savons que tous les systèmes fourragers n'ont pas la même **vulnérabilité** face au risque de perte fourragère, c'est-à-dire que les pertes fourragères ne correspondent pas à la même part des besoins du troupeau et donc à la même part du revenu d'exploitation.
- A ce stade, notre modèle n'intégrant pas la vulnérabilité des systèmes fourragers, nous pouvons considérer que l'ensemble des exploitations est affecté par un **risque identique** dès lors que le territoire est colonisé par les campagnols terrestres. Ce risque identique crée *a priori* un intérêt commun à l'action collective.

7.2.3.2. Situation d'engagement parfait

Ce paragraphe présente les résultats des simulations 0 à 3, dans la situation où l'ensemble des éleveurs est impliqué dans des actions de lutte (Figure 66, Tableau 52). La simulation 0 sert d'étalon pour l'analyse des résultats : en l'absence d'action de contrôle, la perte moyenne annuelle causée par les pullulations est de 107,9€/patch/an.

Simulations 1 (a, b et c)

L'hypothèse d'une méthode de lutte efficace à 100% à coût constant, mise en œuvre de manière curative à l'apparition des premiers dommages (simulation 1-a), fournit des résultats intéressants, puisque pour 0,557€ investis dans la lutte, 1€ de perte serait évité (ratio de rentabilité⁷⁵ de 0,557). Cette simulation permet de démontrer que l'efficacité (relativement au coût de mise en œuvre) des méthodes de lutte proposées est un enjeu important pour la gestion des pullulations de campagnols terrestres. Toutefois, l'efficacité de la méthode employée n'est pas le seul facteur à considérer, puisque même une action curative efficace à 100% ne parvient pas à éradiquer les populations de campagnols.

Si les éleveurs mettent en œuvre un piégeage dont l'efficacité est de 30% lorsqu'un *patch* commence à connaître des dommages (simulation 1-b), ils ne parviennent pas à empêcher l'occurrence d'un pic de pullulation et subissent des pertes moyennes de 98,211€/patch/an. L'effort de lutte s'élève à 12,908€/patch/an et demeure faible, découragé par la forte reproduction des campagnols. De plus,

⁷⁵ Le ratio coût / pertes évitées, appelé ratio de rentabilité, détermine l'efficacité moyenne des opérations de piégeage et fournit un *proxi* de la probabilité que les éleveurs se comportent dans la réalité comme le modèle le prédit.

le ratio de rentabilité est défavorable à ce scénario de gestion (1,341), ce qui réduit d'autant plus la probabilité qu'il se réalise dans les faits : pour éviter 1€ de pertes, il faut investir 1,341€.

Dans le cas où les éleveurs mènent une surveillance tous les 15 jours sur leurs parcelles et qu'ils sont en capacité de détecter précocement la phase de croissance des populations (simulation 1-c), alors les actions de piégeage sont bien plus suivies et permettent de réduire d'environ 80% les pertes subies. Pour cela, les coûts consentis par les éleveurs sont très importants (coût moyen de 114,551€/patch/an). Si ce scénario est efficace pour maîtriser les pullulations et réduire les pertes, il est très coûteux, si bien que le ratio de rentabilité est défavorable (1,332). Dans les faits, seuls les éleveurs très avertis au risque seraient prêt à un tel investissement pour réduire les dommages causés par les campagnols terrestres : il faut investir 1,332€ pour éviter 1€ de pertes.

Simulations 2 (a et b)

Lorsque les éleveurs du territoire se coordonnent volontairement et échangent des informations sur l'état des *patches* qui commencent à subir des dommages (simulation 2-a), les pertes sont réduites de plus de 75%, pour un ratio de rentabilité qui se rapproche de 1 (1,077) et devient donc plus favorable à la lutte. Nous remarquons, lorsque nous générons les données à l'échelle de chaque exploitation agricole, que le ratio de rentabilité est variable selon l'exploitation considérée (Tableau 51), du fait de leur surface (SAU) mais aussi du morcellement et de l'agencement de leur parcellaire. Ces ratios de rentabilité différents démontrent des intérêts différents à l'action contre les pullulations qu'il convient de prendre en compte lors de la conception d'une stratégie de lutte collective à l'échelle d'un territoire.

Tableau 51 : Ratio de rentabilité de la lutte par exploitation agricole (simulation 2-a)

ea0	ea1	ea2	ea3	ea4	ea5	ea6	ea7
0,960	0,989	1,04	1,157	1,174	1,084	1,099	1,379

La règle de décision de la simulation 2-a génère en réalité deux flux d'information : (1) une auto-transmission de l'information entre parcelles d'un même éleveur, l'invitant à agir plus précocement sur les *patches* voisins lorsqu'un *patch* lui appartenant commence à connaître des dommages ; (2) un flux d'information vers les autres éleveurs. La simulation 2-b isole l'effet d'auto-transmission de cette information et démontre qu'il s'agit en réalité de l'effet dominant : les échanges supplémentaires entre éleveurs (simulation 2-a) permettent seulement de sauver 6,4% supplémentaires de la production espérée par rapport à la seule auto-transmission (simulation 2-b). Ce gain supplémentaire provient d'une action plus précoce sur certaines parcelles en frontière de propriété et donc d'un effort de lutte plus important. Ainsi, il semble que le facteur le plus important soit la capacité de l'éleveur à acquérir une information sur ses propres parcelles.

Simulations 3 (a, b et c)

Enfin, nous avons mis en évidence que le niveau des subventions nécessaires pour optimiser la lutte dépend du comportement adopté par les éleveurs (action curative, surveillance précoce ou coordination volontaire). Le niveau des subventions nécessaires semble être dans tous les cas d'environ 80€/ha.

- Dans le cas d'une action curative à l'apparition des dommages (simulation 3-a), la subvention optimale devrait couvrir 75% du coût du piégeage, avec pour effet de ramener le ratio de rentabilité à un niveau très favorable pour l'éleveur (0,315) et de réduire les dommages de 76% (contre 9% en l'absence de subventions). Cette subvention est relativement efficace comparativement aux pertes supplémentaires qu'elle permet d'éviter en augmentant l'effort de lutte (ratio d'efficacité de 1,029) La mise en place d'une telle subvention a permis de multiplier l'effort de lutte par 7,6 par rapport à la simulation 1-b. Ainsi, le principal frein à la

mise en œuvre d'une action curative semble être son coût pour l'éleveur : lorsque les populations ont déjà atteint un seuil important, les opérations de piégeage sont bien plus coûteuses pour ramener les populations en basse densité.

- Dans le cas d'une surveillance précoce (simulation 3-b), la subvention optimale semble devoir couvrir 50% du coût du piégeage. L'effort de lutte est alors multiplié par 1,8 par rapport à la simulation 1-c, et les pertes deviennent extrêmement marginales (95% sont évitées). Le ratio de rentabilité est légèrement diminué et devient plus favorable qu'en l'absence de subvention sans pour autant être fortement changé (1,021). Cela signifie que les subventions n'augmentent que peu l'intérêt des éleveurs à la lutte dans le cas d'une surveillance précoce. L'efficacité des subventions semble par ailleurs très faible, puisque le ratio de 4,830 indique que pour 1€ de pertes supplémentaires évitées (par rapport à la simulation 1-c sans subvention), le planificateur social aura déboursé 4,8€.
- Dans le cas d'une coordination volontaire (simulation 3-c), une subvention optimale peut être fixée à 50%. L'effort de lutte est multiplié par 2 par rapport à la simulation 2-a, ce qui permet d'éviter près de 95% des pertes. Le ratio de rentabilité diminue par rapport à la simulation 2 et devient inférieur à 1 (0,911), c'est-à-dire plus favorable pour les éleveurs. Dans le cas d'une coordination volontaire, la subvention peut donc augmenter l'intérêt des éleveurs à la lutte. Toutefois, le ratio d'efficacité des subventions (4,065) montre qu'elles constituent un outil coûteux pour le planificateur social : 1€ de pertes supplémentaires évitées par rapport à la simulation 2-a coûte environ 4,1€ au planificateur social.

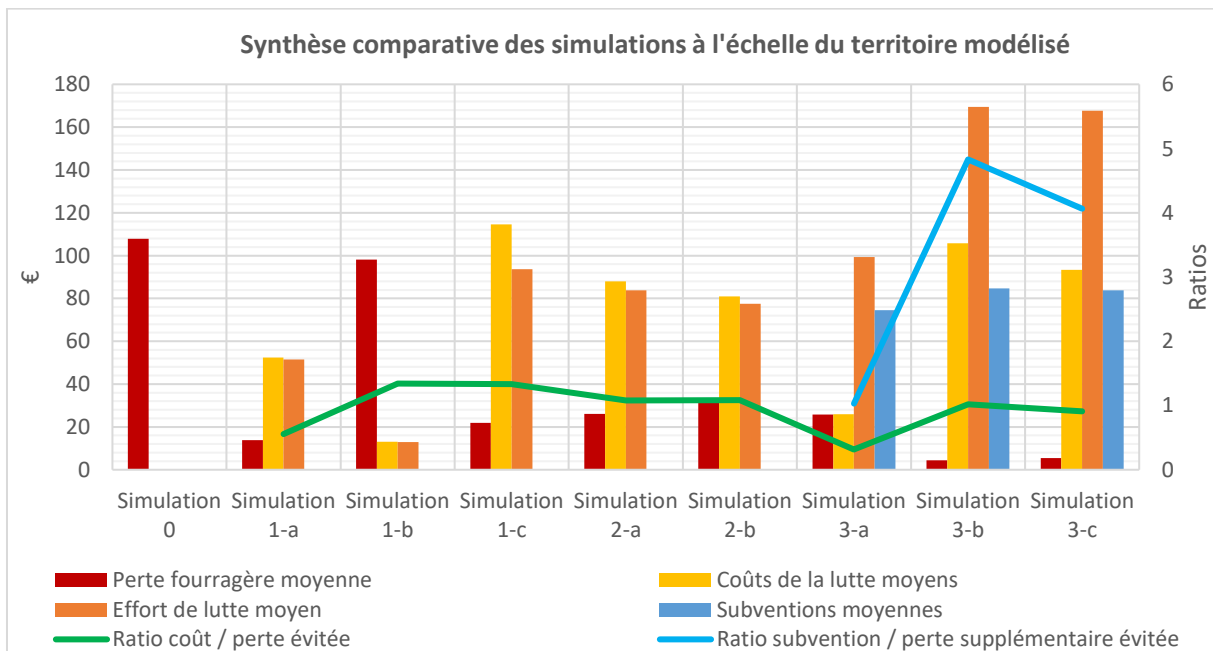


Figure 66 : Synthèse des résultats des simulations 0 à 3 (moyennes sur le territoire modélisé)

Tableau 52 : Résultats des simulations 0 à 3 (moyennes sur le territoire modélisé)

	Simul 0	Simul 1-a	Simul 1-b	Simul 1-c	Simul 2-a	Simul 2-b	Simul 3-a	Simul 3-b	Simul 3-c
Production fourragère moyenne (€/patch)	789	884	799	875	871	864	872	893	892
Perte fourragère moyenne (€/patch)	107,9	13,9	98,2	21,9	26,1	33,0	25,8	4,3	5,5
% de pertes évitées	-	87%	9%	80%	76%	69%	76%	96%	95%
Coûts de la lutte moyens (€/patch)	0	52,4	13,0	114,6	88,1	81,0	25,9	105,7	93,3
Effort de lutte moyen (€/patch)	0	51,6	12,9	93,6	83,8	77,5	99,4	169,5	167,6
Subventions moyennes	0	0	0	0	0	0	74,5	84,7	83,8
Ratio de rentabilité (coût / perte évitée)	-	0,557	1,341	1,332	1,077	1,082	0,315	1,021	0,911
Ratio subvention / perte supplémentaire évitée	-	-	-	-	-	-	1,029	4,830	4,065

7.2.3.3. Situation d'aléa moral

Les résultats présentés précédemment ne sont valables que si l'ensemble des huit éleveurs du territoire se comportent de manière homogène et s'ils mènent des actions de lutte dès lors qu'elles leur apparaissent rentables d'après un calcul objectif, c'est-à-dire s'ils se comportent comme des agents parfaitement rationnels et informés. C'est, bien évidemment, rarement ce que nous observons sur le terrain (voir Chapitre 6, p. 172).

Simulation 4-a

Dans la simulation 4-a, nous étudions le cas où tous les éleveurs du territoire ne sont pas engagés dans des actions de lutte en faisant varier de 0 à 8 le nombre de participants à la lutte. Les éleveurs impliqués le sont sous un régime de coordination volontaire et d'auto-information (simulation 2-a). Les exploitations sont ajoutées à l'effort de lutte dans l'ordre numérique (de ea0 à ea7) ; par exemple, lorsque trois éleveurs sont engagés, il s'agit de ea0, ea1 et ea2. La combinaison des éleveurs impliqués ne semble pas affecter les résultats : nous avons testé plusieurs configurations différentes sans que cela ne change les comportements observés.

A l'échelle du territoire (Figure 67), plus le nombre d'éleveurs impliqués dans la lutte est important, plus la perte fourragère moyenne par *patch* est faible, selon une tendance linéaire ; cela est dû à un effort de lutte croissant. Au-delà de 6 éleveurs impliqués sur 8, les efforts de lutte moyens sont toujours croissants mais les pertes fourragères moyennes n'en ressortent pas pour autant réduites. Ce phénomène est lié au fait que les éleveurs qui ne luttent pas profitent des efforts de lutte consentis par ceux qui s'impliquent dans des actions de piégeage : la Figure 68 montre que l'ensemble des exploitations agricoles du territoire peut profiter d'une baisse des dommages qu'elles subissent dès lors qu'au moins trois éleveurs mènent des actions intensives de piégeage. A titre d'exemple, l'exploitation 7 peut espérer des bénéfices intéressants de l'action des autres exploitations (Tableau 53) : si les 7 autres exploitations du territoire s'engagent dans un piégeage intensif, alors l'exploitation 7 peut espérer éviter 60% des pertes qu'elle subirait sans aucune action de contrôle. Si elle s'implique elle-aussi dans la lutte, elle peut sauver 72% de sa production espérée. Le gain marginal de l'action de piégeage semble ainsi très faible, et la tentation pourrait être grande de profiter des efforts de lutte des autres éleveurs sans participer activement à cet effort collectif. **C'est une situation classique qui correspond bien à la production d'un bien collectif avec passager clandestin.** Enfin, la Figure 69 montre que, compte-tenu de la règle de décision, le comportement des éleveurs décidés à lutter n'est pas conditionné par l'inaction des éleveurs non engagés : l'effort de lutte des éleveurs impliqués ne varie que très peu en fonction du nombre de participants à la lutte sur le territoire. Cela laisse à penser

que le mécanisme de découragement à l'action que nous avons identifié précédemment (6.3, p. 181) ne relève pas d'une modification majeure des coûts de la lutte objectivement captée par les éleveurs, mais davantage d'un *a priori* sur une action perdue d'avance.

Tableau 53 : Pertes fourragères de l'exploitation 7 en fonction du nombre d'éleveurs qui luttent

Nombre d'EA qui luttent	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Pertes fourragères de ea7 (€/patch)	107,9	95,8	99,3	55,9	58,0	60,4	55,2	43,6	30,6
% pertes évitées de ea7	0	11%	8%	48%	46%	44%	49%	60%	72%
Coût de la lutte pour ea7 (€/patch)	0	0	0	0	0	0	0	0	111

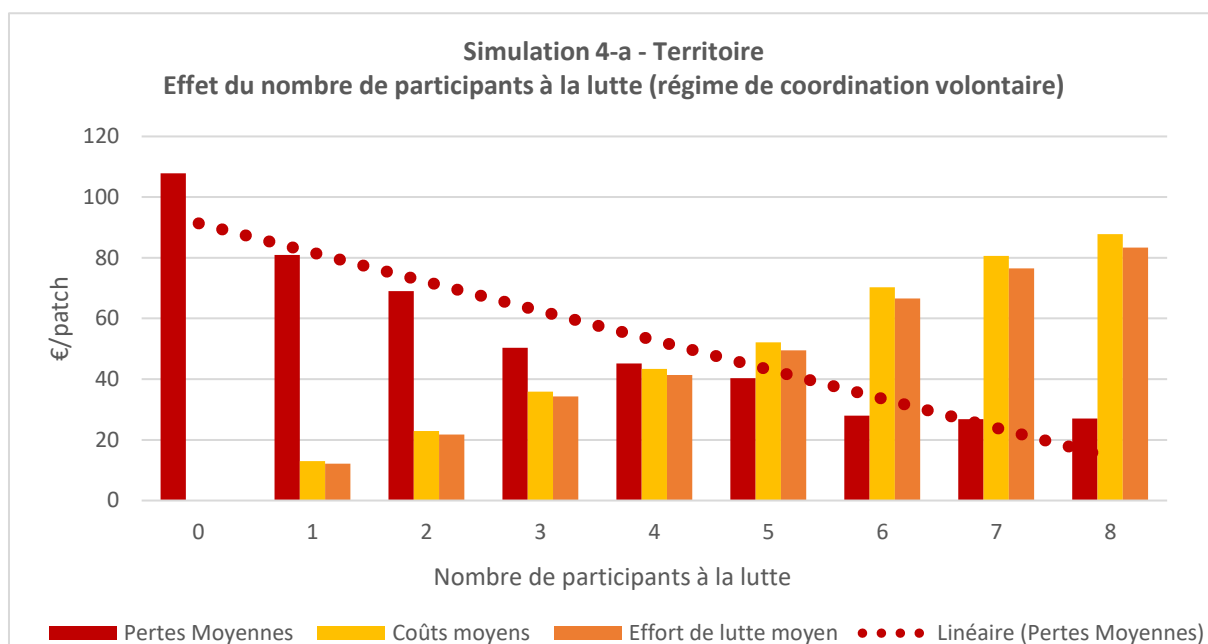


Figure 67 : Effet de l'aléa moral sur la lutte et son efficacité (simulation 4-a)

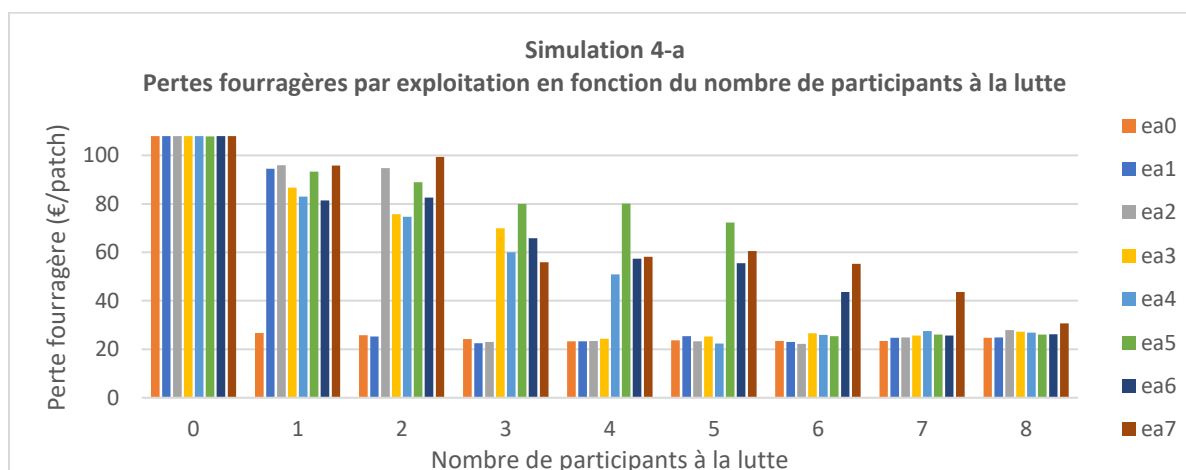


Figure 68 : Pertes fourragères par exploitation en fonction du nombre de participants à la lutte (simulation 4-a)

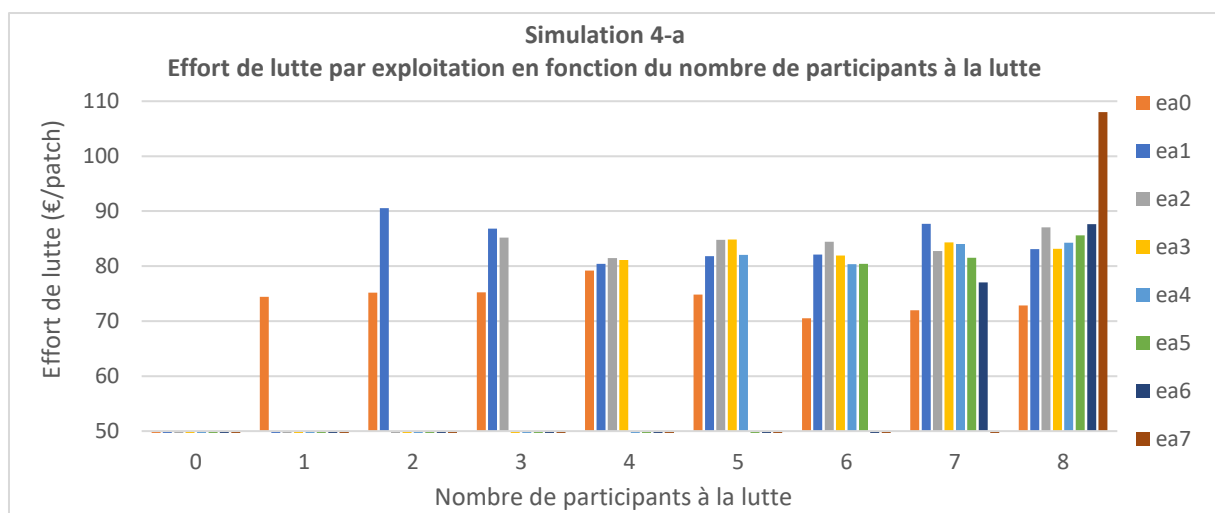


Figure 69 : Effort de lutte par exploitation en fonction du nombre de participants à la lutte (simulation 4-a)

Simulation 4-b

Dans les faits, les éleveurs ne sont pas parfaitement rationnels et informés. L'accès à l'information est d'ailleurs un élément très important pour la réussite d'une lutte précoce (voir 4.3.3, p. 148). Ainsi, la participation d'un éleveur à la lutte contre les pullulations n'est pas déterministe : elle n'est pas uniquement fondée sur sa seule bonne volonté et un calcul rationnel des bénéfices de l'action. L'engagement d'un éleveur dans la lutte dépendra notamment de la possibilité qu'il a de mettre en œuvre des actions rentables : cet intérêt à la lutte est variable selon les éleveurs et déterminé, dans notre modèle, par le ratio de rentabilité de la lutte. L'engagement dépendra également de facteurs sociologiques, que nous pouvons rassembler sous le vocable de capital social (Michelin *et al.*, 2014; Morlans et Michelin, 2014; Peyre *et al.*, 2009). Enfin, l'engagement d'un éleveur dans la lutte peut dépendre aussi des conditions générales dans lesquels il évolue, et notamment des aléas nombreux et divers auxquels il fait face quotidiennement (*cf.* 4.2, p. 126 et Chapitre 5, p. 156).

Ainsi, nous considérons désormais que l'engagement d'un éleveur du modèle dans la lutte, pour une année n donnée, est aléatoire et probabilisé en fonction :

- De l'intérêt qu'il a « naturellement » à agir, selon le ratio de rentabilité identifié précédemment (Tableau 51, p. 212). A partir d'une probabilité générale P_G , fixée par l'opérateur entre 0 et 100, chaque exploitation se voit attribuer une probabilité de base P_B selon son ratio de rentabilité : $P_B = P_G$ pour les exploitations ea0 et ea1, qui ont un intérêt naturel à agir, et $P_B = P_G/2$ pour les autres exploitations dont l'action est moins rentable (Tableau 51, p. 212).
- Du nombre d'agriculteurs du territoire qui étaient impliqués dans la lutte l'année précédente ($n - 1$). Si deux éleveurs ou moins étaient engagés en $n - 1$, l'engagement de l'éleveur en année n est donné par sa probabilité de base P_B . Si entre trois et cinq éleveurs étaient engagés en $n - 1$, la probabilité que l'éleveur s'engage en n est donnée par $1,25 * P_B$. Si plus de cinq éleveurs étaient engagés en $n - 1$, la probabilité que l'éleveur s'engage en n est $1,5 * P_B$ ⁷⁶.

Nous avons réalisé plusieurs fois la simulation, pour des valeurs différentes de la probabilité générale P_G (Figure 70). Concrètement, une probabilité générale d'engagement plus importante peut signifier la présence d'un animateur motivant la lutte sur le territoire. Dans tous les cas, il est considéré

⁷⁶ A ce stade, cette approche est uniquement théorique et les coefficients proposés ne le sont qu'à titre d'exemple.

qu'initialement, en $t = 0$, lors de la première année, aucun agriculteur n'est impliqué dans la lutte. Evidemment, le caractère aléatoire de l'engagement des éleveurs dans cette simulation ne permet pas d'atteindre une gestion optimale des pullulations et de ramener les pertes à un niveau très marginal. Toutefois, dès lors qu'en moyenne, chaque année, au moins 4 des 8 éleveurs du territoire modélisé sont engagés, ce qui arrive pour une probabilité générale d'au moins 60%, alors les dommages à l'échelle du territoire sont significativement réduits.

Cette simulation 4-b tend à démontrer que les conséquences d'un tel aléa moral (entendu comme l'incertitude relative à l'implication des éleveurs dans la lutte) est un facteur secondaire dès lors qu'une part suffisante des agents est, en moyenne, engagé dans des actions de lutte. Tout l'enjeu pour l'animateur du territoire, ou bien pour les éleveurs moteurs de ce territoire, est d'augmenter la probabilité générale qu'un éleveur qui dispose de suffisamment de ressources pour lutter s'engage effectivement dans des actions de maîtrise des populations.

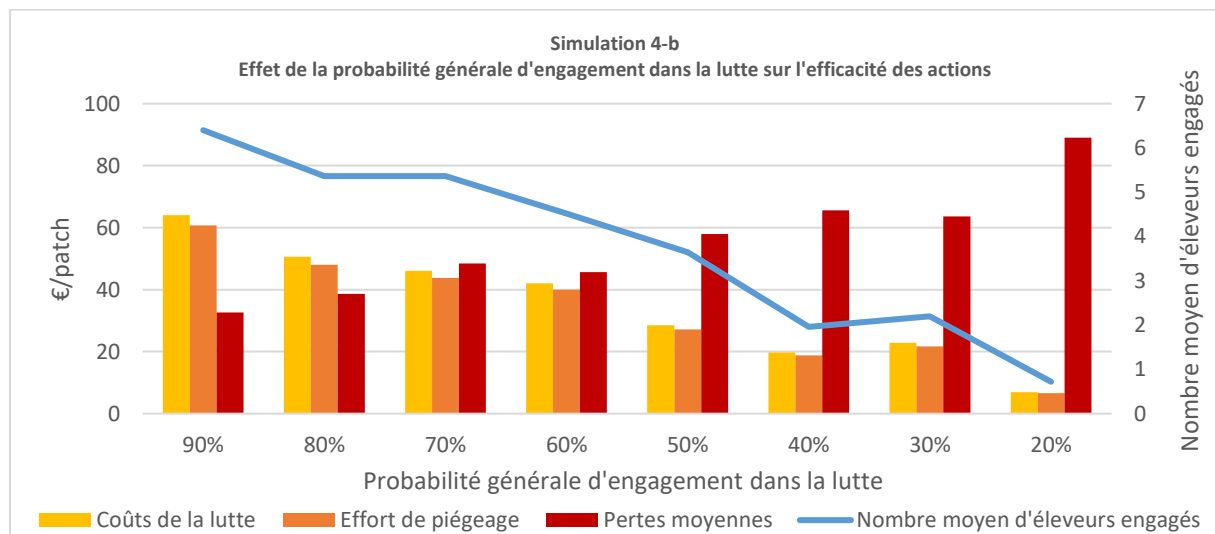


Figure 70 : Effet de la probabilité générale d'engagement dans la lutte sur l'efficacité des actions (simulation 4-b)

7.3. Discussion, limites et perspectives

7.3.1. Validité du modèle et de nos résultats

Tout d'abord, notre modèle valide un certain nombre de caractéristiques de la lutte contre les campagnols terrestres mis en évidence par les travaux de recherche depuis plus de 20 ans. Cette correspondance entre les résultats générés par le modèle et les retours issus de travaux empiriques est un facteur de robustesse de notre démarche de modélisation et de simulation, et qui valide une part de sa capacité prédictive.

D'une part, une lutte menée isolément et très localement (*patch par patch*), lorsque des dommages se produisent (simulation 1-b) ne s'avère pas pertinente pour enrayer les pullulations. En revanche, dès lors que les actions sont menées précocement grâce à une surveillance et/ou un système d'information pertinent (simulation 1-c, simulation 2-b), alors il est possible d'éviter, par des opérations de piégeage intensif, que les populations de rongeurs ne s'emballent.

D'autre part, notre modèle confirme qu'il existe un effet collectif de la lutte (7.2.3.3) : les actions de lutte des uns profitent également aux autres, ce qui place la lutte contre les campagnols terrestres sous le régime de la production d'un bien collectif. En revanche, lorsque la volonté d'action et les ressources des éleveurs sont suffisantes, nous n'observons pas que l'inaction de leurs voisins est la cause d'une moindre efficacité de leur action de lutte, comme nous l'avions suggéré avec l'hypothèse d'un *weaker-link collective good* (Chapitre 6, p. 172) et comme le disent les éleveurs sur le terrain, mais

que les efforts semblent davantage s'additionner. Toutefois, la complexité du phénomène écologique est encore peu connue, et il est plus que probable que le modèle écologique que nous avons construit soit incomplet.

Enfin, notre modèle prédit des coûts d'action décroissants, pour l'ensemble des exploitations du territoire modélisé, en particulier dans le cas d'une action coordonnée (simulation 2-a, Figure 71). Ce résultat est cohérent avec les expériences d'action collective suivies sur le terrain (Giraudoux *et al.*, 2017).

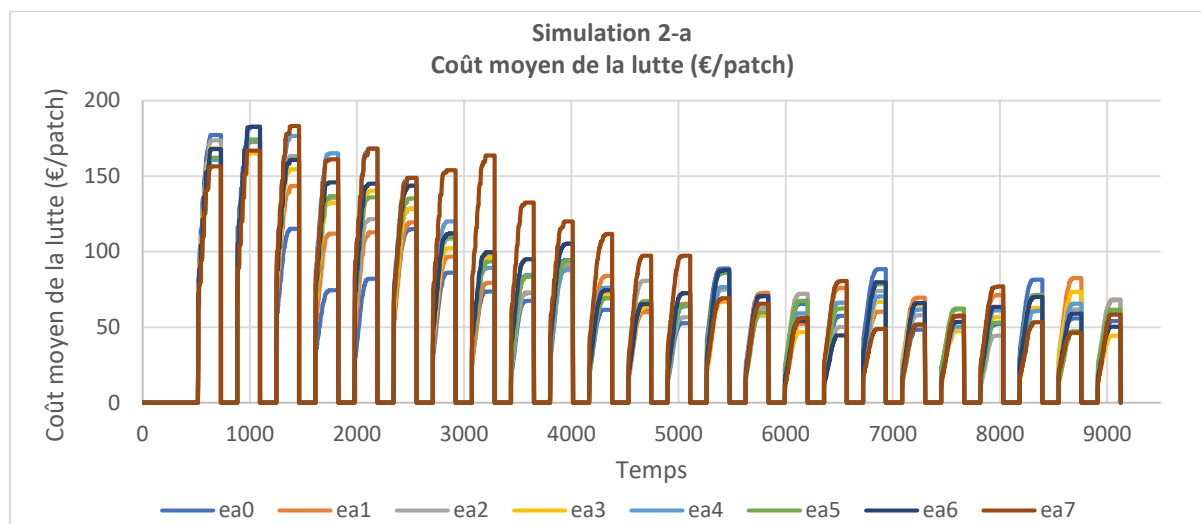


Figure 71 : Coût moyen de la lutte en €/patch (simulation 2-a)

7.3.2. Quel scénario de gestion est le plus probable ?

Le passage du modèle à la réalité n'est pas aisé ; il ne s'agit pas de déterminer un scénario idéal mais plutôt de définir celui qui serait le plus probable et souhaitable. Pour cela, il convient notamment de comparer les ratios de rentabilité. En l'absence de subventions, les scénarios qui génèrent la meilleure rentabilité sont celui, hypothétique mais très demandé sur le terrain, d'un moyen de lutte efficace à 100% et peu coûteux (simulation 1-a), et celui d'une coordination volontaire entre les éleveurs du territoire (simulation 2-a). En présence de subvention, le scénario d'action curative (efficacité de 30%) subventionnée à 75% (simulation 3-a) et le scénario de coordination volontaire subventionnée à 50% sont les plus rentables. Le montant de la subvention à l'hectare est approximativement de 80€ dans les deux cas, même si l'efficacité relative de la subvention est moindre dans le cas de la coordination volontaire.

Le scénario optimal serait davantage celui d'une action précoce, coordonnée et subventionnée que celui d'une action curative et subventionnée. En effet, le risque est grand, dans le cas d'une lutte curative, que l'éleveur soit rapidement dépassé par l'intensité du piégeage à mener (car le coût du piégeage augmente avec la densité de population) et renonce à agir suffisamment, comme c'est le cas lors d'une action curative non subventionnée (simulation 1-b). C'est ce qui est observé dans les territoires où les taupes ne sont pas contrôlées et où les premiers indices de campagnols terrestres en surface n'apparaissent qu'à des niveaux de populations déjà supérieurs à 200 individus/hectare. Dans le cas d'une lutte curative subventionnée, la subvention est un facteur déterminant de la rentabilité de la lutte mais aussi du niveau d'effort consenti par l'agent : sans subvention, l'éleveur n'est pas prêt à mener des actions de lutte optimales. Cette dépendance aux subventions serait d'autant plus problématique si l'on considère le risque moral tel que mis en évidence en 7.2.3.3 (p. 214), à savoir la possibilité pour un agent de se comporter comme un passager clandestin. Dans le cas d'une action coordonnée, la subvention n'est pas un déterminant de l'efficacité de la lutte, mais plutôt une

incitation servant à renforcer sa rentabilité pour l'éleveur. Nous retrouvons les conclusions d'Olson (1965) que nous avons présentées et discutées dans le Chapitre 6 (p. 172) au sujet des incitations sélectives « positives » : elles ne sont utiles que pour maintenir une action collective en place et non pour initier une telle action collective. Enfin, nous identifions que les coûts de la lutte initiaux sont importants (Figure 71) : l'initiation d'une action collective apparaît comme coûteuse, ce qui est mis en évidence comme un facteur défavorisant sa mise en place d'après Olson (1965).

Dans le cas où les éleveurs ne sont pas tous engagés dans la lutte et où cet engagement revêt un caractère aléatoire (simulation 4-b), la présence d'un animateur de territoire doit avoir pour objectif d'augmenter la probabilité que les éleveurs s'engagent, sans nécessairement chercher à ce que tous les éleveurs, en tout temps, mènent des actions de lutte optimales.

RESUME DES CONCLUSIONS ISSUES DE NOS SIMULATIONS

- C1** : Une lutte menée isolément, localement (*patch par patch*) et tardivement (à l'apparition des premiers dommages) ne permet pas d'enrayer les pullulations.
- C2** : Des actions de piégeage appliquées et suivies, menées précocement (par la surveillance régulière les parcelles), permettent d'éviter l'emballement des pullulations.
- C3** : Il existe un effet collectif de la lutte, ce qui place la maîtrise des populations de campagnols terrestres sous le régime de la production d'un bien collectif : les éleveurs qui n'interviennent pas sur leurs propres parcelles peuvent bénéficier de l'action des autres agents, lorsqu'un nombre minimum d'éleveurs agit.
- C4** : L'hypothèse d'un *weaker-link collective good* n'est pas validée par le modèle : nous n'avons pas observé que l'inaction des uns était la cause d'une moindre efficacité et d'une moindre rentabilité de la lutte pour ceux qui interviennent sur leurs parcelles.
- C5** : Quelle que soit la stratégie adoptée par les éleveurs (action curative, action préventive, coordination préventive), le montant optimal de la subvention semble être de 80€/ha/an pour renforcer les incitations au piégeage. Ce montant pourrait être divisé par 2 dans le cas d'une coordination préventive, mais avec le risque de diminuer la probabilité d'un engagement effectif des éleveurs dans la lutte (le ratio d'efficacité devient alors supérieur à 1).
- C6** : Le scénario optimal du point de vue de l'éleveur est celui d'une action préventive et coordonnée (avec échange d'information) : le ratio de rentabilité est inférieur à 1.
- C7** : La subvention n'est utile que pour maintenir l'incitation pour une action déjà volontairement mise en place, et non pour initier l'action collective. Elle n'est cependant pas économiquement efficace dans le cas d'agents rationnels et coordonnés.

7.3.3.Limites du modèle et perspectives

7.3.3.1. Sensibilité du modèle à l'efficacité du piégeage

Si nous avons volontairement décidé de ne pas traiter la question de l'efficacité de la lutte, nous ne pouvons négliger la question de la sensibilité de nos résultats à l'efficacité du piégeage (Figure 72). Nous identifions sans surprise qu'il existe un seuil d'efficacité minimum (entre 25% et 20%) en-dessous duquel la lutte n'est plus suffisamment efficace ou bien n'apparaît plus suffisamment efficace à l'agent calculateur (forte diminution de l'effort de lutte consenti). Il semble par ailleurs qu'une efficacité modérée mais supérieure à 30% ne soit pas plus rentable qu'une pression de piégeage à 30% : il s'agit en réalité de gérer le potentiel de reproduction des campagnols terrestres pour éviter l'explosion des populations. Puis, au-delà de 40% d'efficacité, les coûts de la lutte diminuent et les dommages résiduels deviennent de plus en plus marginaux. Les projets de recherche actuellement en cours devraient permettre une augmentation de l'efficacité du piégeage (utilisation de phéromones...).

La réussite d'une stratégie de lutte repose donc sur l'efficacité de l'action technique menée pour maîtriser les populations de ravageur. Dans le cas du piégeage, cela nécessite que l'opérateur acquiert, par la formation et l'expérience, des connaissances et compétences afin d'être capable de mener ces actions correctement (c'est une forme de capital social sur lequel repose l'action de lutte).

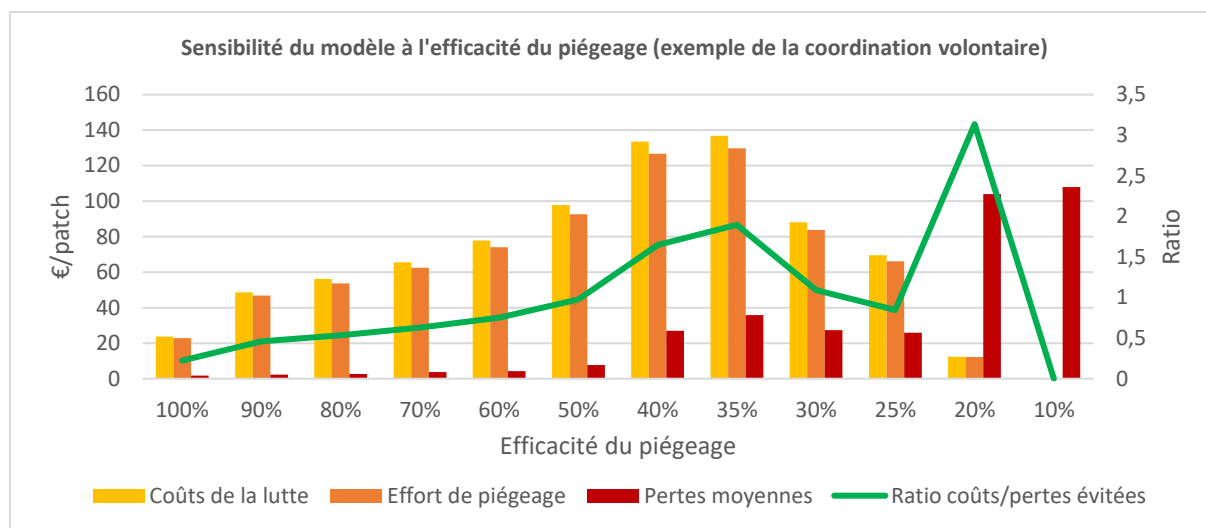


Figure 72 : Sensibilité du modèle à l'efficacité du piégeage (exemple de la coordination volontaire)

7.3.3.2. Limites de la règle de décision

Notre modèle semble relativement pertinent pour décrire les effets d'une lutte suivie et appliquée par un agent parfaitement rationnel et informé, ses coûts et ses gains, même si les modes de prise de décision sont très certainement faussés par la focale réductionniste que nous avons volontairement utilisée. A ce sujet, nous souscrivons aux critiques formulées par Komarek *et al.* (2020) sur l'approche réductionniste de la gestion des risques et des modes de décision des agriculteurs face à la complexité des perturbations auxquels ils font face.

Notre règle de décision a tendance à générer une lutte sur-optimale dès lors que les éleveurs s'engagent dans le contrôle précoce des pullulations. Les agents mènent un piégeage intensif quelles que soient les conditions de sous-implication collective dans lesquels ils sont placés. Cette lutte sur-optimale est due à plusieurs approximations que nous avons utilisées pour simplifier notre modèle :

- La coordination entre les agents reste imparfaite : chaque éleveur se comporte *comme si* les autres ne devaient pas mener d'action de piégeage, ce qui conduit à une action sur-optimale, du fait de l'absence de répartition des efforts selon les zones.
- Aucune contrainte de temps ni aucune contrainte financière qui limiteraient les possibilités de la lutte n'ont été considérées dans notre modèle.
- Le modèle ne prend pas en considération les coûts d'opportunité relatifs au temps que l'éleveur consacrerait à la lutte, et qui ne serait donc pas disponible pour autre chose. Or, l'éleveur ne peut renoncer à un certain nombre d'activités stratégiques et le temps disponible pour la lutte peut s'en retrouver diminué.
- L'information dont peuvent disposer les agents sur l'état des populations à chaque pas de temps est parfaite (sans ambiguïté) et leur permet de calculer les coûts et gains réels de la lutte afin de prendre leur décision.
- Les actions de lutte sont menées simultanément et très régulièrement (pas de temps journalier), ce qui facilite la gestion des populations à l'échelle du territoire.

- Enfin, le calibrage du modèle peut être discuté, car certaines données sont manquantes ou bien issues d'estimations dont les hypothèses sous-jacentes peuvent être modifiées (exemple : efficacité du piégeage, taux de prédation...).

7.3.3.3. Perspectives pour l'avenir du modèle

Nous estimons que la conception de notre modèle est un élément méthodologique intéressant de nos travaux. Ce modèle pourra aisément être amélioré grâce à des données plus précises mais également être complété dans sa dimension économique.

Nous pourrions à l'avenir intégrer plus finement les processus productifs liés à l'herbe et à sa consommation, au pâturage et en fauche : au lieu de considérer que l'herbe qui a été produite (déduction faite des dommages quotidiens des campagnols) est immédiatement consommée et acquise (sous forme de capital fourrager), nous pourrions considérer des périodes d'accumulation d'un stock fourrager qui ne sera capitalisé qu'après un certain délai, et qui serait donc bien plus exposé aux pullulations de campagnols terrestres. En effet, les besoins du troupeau connaissent des variations saisonnières (selon le statut de lactation, de gestation, etc.) et une dégradation des fourragers en qualité et en quantité n'a pas le même impact sur les revenus de l'exploitation selon le statut productif du troupeau, variable dans le temps.

De plus, il semble judicieux d'élargir la prise de décision face aux pullulations à l'ensemble du système fourrager, c'est-à-dire ne plus considérer uniquement les dommages à l'échelle d'un *patch*, mais peut-être un seuil de dommage global à dépasser avant que l'éleveur n'ait véritablement intérêt à lutter (Michelin *et al.*, 2014) : ce seuil peut-être dépendant d'un excédent systématique de fourrager (sous-chargement), d'un stock disponible, etc. Intégrer la dimension du système fourrager augmenterait toutefois de l'hétérogénéité parmi les agents, ce qui rendrait d'autant plus difficile l'analyse des résultats produits. L'approche par le système fourrager permettrait également de tester l'hypothèse qu'une diversification des systèmes fourragers (avancée en conclusion du Chapitre 4, p. 154) en subventionnant l'intégration de cultures fourragères annuelles.

Enfin, il sera indispensable de considérer les contraintes sociales (temps disponible, mécanismes de découragement, nombre de passage par *patch* consenti...) et financières des systèmes fourragers dans la suite de nos travaux et de les intégrer à notre modèle pour augmenter son potentiel prédictif, comme nous avons commencé à le faire avec la simulation 4-b.

Conclusion sur les incitations à la lutte

Quelles que soient les améliorations que nous pourrions apporter à ce modèle, il n'en restera pas moins une traduction imparfaite de la réalité, capable de générer et prédire des tendances, mais certainement pas pertinent pour être utilisé comme un calque afin de déterminer une stratégie d'action sur un territoire donné. Cela nécessite une connaissance fine du territoire et la prise en compte d'un certain nombre de variables sociologiques déterminant l'engagement collectif sont indispensables. La prise en compte de ces processus sociaux rajoute une puissante dimension stochastique à un modèle prédictif, qu'il ne serait à notre sens pas pertinent de gérer à l'aide d'un codage informatique froid. L'enjeu de l'accompagnement collectif de la lutte, tel qu'abordé dans le Chapitre 5 (p. 156), est complémentaire de l'approche par la modélisation informatique.

Notre modèle met en évidence qu'une lutte appliquée et suivie, menée par un agent rationnel et suffisamment informé, est à même de contenir les pullulations et d'éviter la majeure partie des dommages, et ceci dans des conditions agroécologiques défavorables (openfield de prairies, aucune infrastructure agroécologique). Toutefois, le succès des actions de lutte dépend de l'efficacité de la technique employée, et leurs coûts importants et réguliers nécessitent de penser des incitations pour

que leur rentabilité soit assurée pour les éleveurs. Ces incitations reposent d'abord sur la possibilité pour les éleveurs de disposer d'une information précoce sur les dynamiques de populations de campagnols terrestres à l'échelle de leur parcelle, et ceci afin d'agir avant que les populations n'aient déjà atteint un niveau important qu'il serait plus difficile de contenir. Nous avons mis en évidence que des subventions peuvent être nécessaires pour augmenter la rentabilité de la lutte et donc augmenter la probabilité que les éleveurs agissent tel que le modèle le prédit.

Quelle que soit la stratégie adoptée par les éleveurs (action curative, action préventive, coordination préventive), le montant optimal de la subvention semble être de 80€/ha/an pour renforcer les incitations au piégeage⁷⁷. C'est une somme conséquente pour le planificateur social qu'est le FMSE, dans notre cas d'étude. Si les 51 010 hectares de prairies qui ont été intégrés au programme d'indemnisation du FMSE (2017) avaient été ainsi subventionnés, le coût annuel du programme de soutien à la lutte serait de plus de 4 millions d'euros par an (contre 1 million d'euros pour le programme 2016). Ramenés sur un cycle d'une durée de 5 ans, le budget de soutien à la lutte serait de 20 millions d'euros, soit l'équivalent des dommages éligibles à la compensation estimés suite à la pullulation de 2016. Dans le cas d'une coordination volontaire et préventive, la subvention pourrait être divisée de moitié (taux de 25%, pour un montant de 41€/ha/an) sans que l'effort de lutte des éleveurs n'en soit diminué. Toutefois, le ratio d'efficacité de la lutte devient supérieur à 1, ce qui traduit le risque d'un sous-engagement effectif des éleveurs dans la lutte.

La distribution de telles subventions pose le problème de l'observation des comportements et des efforts de lutte effectivement consentis par les agents (Holmstrom, 1979, 1982). Il est difficile, dans les faits, d'observer directement l'effort de lutte d'un éleveur lorsqu'il s'agit de techniques comme le piégeage, l'empoisonnement, etc. Seules les pratiques plus globales modifiant l'assolement (diversification des cultures fourragères) ou les infrastructures agroécologiques (mise en place de haies, de bosquets, etc.) sont observables par le Principal. Ainsi, afin de réduire l'aléa moral qui causerait une utilisation sous-optimale de la subvention versée aux éleveurs, le Principal (planificateur social) devra définir des observables utilisés comme des *proxi* de l'effort de lutte des éleveurs : assolement, infrastructures agroécologiques, participation aux réunions des groupes de lutte locaux (GDON), participation aux formations dispensées par les OVS, participation au réseau d'alerte et de surveillance du territoire (application mobile...).

⁷⁷ Le montant des subventions nécessaires pour soutenir une lutte chimique serait inférieur à celui nécessaire pour soutenir le piégeage, plus chronophage et coûteux.

Discussion générale

Le syndrome du campagnol : la vulnérabilité des systèmes fourragers

Les pullulations de campagnols terrestres sont de ces objets de recherche difficiles à magner, source de tensions et de passions. Les pullulations de campagnols terrestres sont le syndrome des limites et des vulnérabilités du développement agricole de l'après-guerre. Elles sont le symbole de systèmes agricoles qui, au lieu de parvenir à rationaliser les espaces agricoles pour en optimiser la productivité (de la terre comme du travail), sont devenues plus exposés et plus vulnérables à des risques endogènes à ces choix productifs. L'objectivation et la proposition de perspectives d'action se heurtent aux crises du court terme. La pression est grande pour la recherche et les pouvoirs publics de proposer des solutions à même de répondre aux demandes légitimes des éleveurs : éviter les dommages ou les compenser.

Il a longtemps été demandé de produire une molécule rodenticide capable d'éradiquer au maximum les populations de campagnols et d'éliminer le problème. Cette position est entendable : l'herbe est une ressource importante pour les territoires de moyenne montagne (2.2.4, p. 71), et les systèmes fourragers ne peuvent supporter des dommages aussi intenses et aussi fréquents (4.2.3, p. 132). Cependant, à cette heure, le dilemme entre l'efficacité d'une telle molécule et son effet sur la faune non-cible n'a pas été résolu. Récemment, la bromadiolone (anticoagulant rodenticide) a été retirée du marché du fait de ses impacts environnementaux décriés depuis les années 1990 (Coourdassier *et al.*, 2014; Morlans et Michelin, 2014; Pascal, 1998). L'hypothèse d'une nouvelle molécule (ou d'une autre méthode de lutte) plus efficace et peu coûteuse est une piste pour l'avenir de la lutte contre les pullulations. La disparition de la main d'œuvre dans les exploitations d'élevage (Bourgeois et Demotes-Mainard, 2000; Note et Michelin, 2014) impose la mise en œuvre de méthodes adaptées à ces nouvelles conditions économiques. Toutefois, comme l'a montré notre modèle spatial (Chapitre 7, 7.2.3.2, p. 211) disposer d'une molécule peu coûteuse et efficace à 100% n'est pas suffisant pour enrayer le phénomène : l'effort de lutte doit être précoce et suivi sur le long terme, l'éradication des agents biologiques étant rarement possible (Frésard, 2011). De plus, nous avons montré dans les Chapitre 6 (p. 172) et Chapitre 7 (p. 188) que si la lutte s'avérait efficace pour contenir les pullulations de campagnols et rentable pour un agent parfaitement rationnel et informé, le coût initial de mise en œuvre était très important. L'externalisation de la lutte directe contre les campagnols est une piste intéressante, mais qui nécessiterait toutefois d'importantes subventions publiques. De plus, la compensation des dommages, que ce soit par l'assurance ou la mutualisation professionnelle, se heurte aux particularités du risque de pullulation, notamment sa forte fréquence et son caractère systémique. Seul un mécanisme de solidarité professionnelle et nationale semble, à cette heure, plausible pour augmenter la mutualisation du risque (en diversifiant les financements au-delà des exploitations exposées) et permettre la compensation d'une partie des dommages.

Toutefois, il nous semble que ces deux approches, la lutte directe et la compensation des dommages, reposent sur une analyse partielle des caractéristiques du risque de pullulation, si bien que l'une et l'autre sont aujourd'hui compromises. Cause de dommages trop intenses pour être absorbés en l'état, phénomène trop fréquent et systémique pour être aisément mutualisable, la gestion des pullulations n'est pas une question simple à résoudre avec les outils classiques de gestion des ravageurs (pesticides) ou de l'économie du risque (assurance). La littérature générale sur la gestion des ravageurs (Barzman *et al.*, 2015; Ehle, 2006; Stenberg, 2017) comme celle plus spécifique sur la gestion des campagnols terrestres (Couval *et al.*, 2014; Couval et Truchetet, 2014; Giraudoux *et al.*, 2017) insiste sur l'importance d'intervenir non pas uniquement sur l'agent biologique lui-même, mais sur les causes de son développement (concept de lutte intégrée). Dans le cas des pullulations de campagnols terrestres, l'origine du phénomène est bien renseignée et décrite par la littérature : les pullulations sont la

conséquence de la spécialisation massive de certains territoires de moyenne montagne vers la production herbagère (Couval *et al.*, 2014; Fichet-Calvet *et al.*, 2000; Note et Michelin, 2014) et de la simplification des infrastructures agroécologiques et des paysages (Berthier *et al.*, 2014a; Foltête *et al.*, 2005).

L'honnêteté commanderait ainsi d'insister en premier lieu sur la mobilisation des leviers de gestion qui permettrait de réduire la fréquence et l'intensité des pullulations : cela passe d'abord par la diversification des assolements, en réintroduisant des cultures annuelles et des prairies temporaires dans les territoires aujourd'hui dominés par les prairies permanentes, puis par la mise en place et l'entretien d'infrastructures agroécologiques (haies, bosquets...). Ce message est difficile à faire passer : « *pendant des décennies, il nous a été demandé d'arracher les haies, et maintenant il faudrait en replanter* » nous a rétorqué un éleveur au cours d'un entretien. La spécialisation des territoires aujourd'hui affectés par les pullulations de campagnols terrestres est en effet le fruit des politiques agricoles menées dans le Massif Central depuis la deuxième moitié du XXe siècle (Jeanneaux *et al.*, 2019). La révolution fourragère a eu pour conséquence la disparition des cultures annuelles, fourragères ou commerciales, de la plupart des territoires de moyenne montagne et l'augmentation très significative de la part du territoire en prairies permanentes (4.2.3.1, p. 132 ; 1.1.3, p. 32). Si la modernisation des pratiques agricoles, la simplification des systèmes de production et la spécialisation des territoires a permis, un temps, de bénéficier d'une hausse des rendements et d'une plus faible variabilité de la production, la crise écologique (dérèglement climatique, perte de biodiversité, chute de la fertilité des sols) conduit désormais les systèmes agricoles à repenser leur organisation et leur fonctionnement. Les pullulations de campagnols terrestres sont l'un des symptômes de cette crise écologique et des agrosystèmes déséquilibrés que la rationalisation de l'espace productif a fabriqués. « *La production sociale de richesses est systématiquement corrélée à la production sociale de risques* », comme le décrit Beck (1992) : la spécialisation herbagère des systèmes d'élevage du Massif Central a eu pour double conséquence d'augmenter la vulnérabilité des systèmes fourragers à la sécheresse et d'augmenter leur exposition et leur vulnérabilité à des pullulations de campagnols devenues plus intenses et fréquentes. Idéalisés par un imaginaire bucolique, les systèmes herbagers, dépendants d'une ressource exclusive et fragile, l'herbe, sont particulièrement vulnérables. Ainsi, le risque de pullulation de campagnols terrestres peut-il être considéré comme un « *effet secondaire latent* » (Beck, 1992) de la spécialisation herbagère en moyenne montagne.

Pour réduire le risque de pullulation, mais également réduire la vulnérabilité face aux épisodes de sécheresse, les systèmes fourragers doivent transformer leurs structures voire leurs finalités (4.1, p. 117). Cela suppose que les systèmes fourragers s'engagent dans un processus d'adaptation plastique qui implique une modification de l'assolement et du chargement (UGB/ha). La capacité d'adaptation plastique de nombreux systèmes fourragers est contrainte par les conditions pédologiques, topographiques, climatiques, foncières et économiques. De ce fait, l'intégration dans le paysage d'une mosaïque d'assolement et d'infrastructure écologiques est un enjeu collectif, et la participation de chaque exploitation agricole à ce processus dépendra des contraintes que lui imposent les caractéristiques de son parcellaire, sa diversité et sa souplesse d'utilisation (Dobremez *et al.*, 2008). Judicieusement mené, ce processus d'adaptation plastique des systèmes fourragers modifiera positivement l'ensemble du territoire en réduisant la surface en prairies permanentes. Cette transformation des systèmes fourragers doit également permettre de repenser leur flexibilité face à des risques qui tendent à devenir courants et endogènes (tels que les épisodes de sécheresse). Cette assimilation des risques par les systèmes productifs suppose toutefois qu'en retour le marché soit lui-même capable de prendre en compte les coûts de productions associés dans la construction des prix. Le modèle du Cobweb montre que cela n'est pas possible si aucun mécanisme de stabilisation des prix

ou des revenus n'est en place (assurance revenu, marché à terme, mécanismes publics contractuels, prix minimum...) (Boussard, 1988, 2010, 1994).

La diversification des systèmes fourragers et de l'assolement à l'échelle d'un territoire devrait donc permettre de réduire l'exposition et la vulnérabilité des systèmes fourragers, mais également l'aléa lui-même, en ramenant les pullulations à une intensité et/ou une fréquence qu'il soit possible de gérer à l'aide d'un outil classique (Figure 12, p. 57), tels que la compensation *ex-post* des dommages, si leur intensité reste importante mais leur fréquence exceptionnelle, ou la lutte intégrée *ex-ante* pour maîtriser les populations et les maintenir en dessous du seuil de dommage.

La place de l'assurance pour la gestion des risques agricoles

Intérêt et limites de l'assurance agricole

La gestion des risques en agriculture est en passe de devenir l'un des grands enjeux du 21^e siècle. Les pratiques des agriculteurs, les soutiens publics ou encore les programmes de compensation publics ou privés sont réinterrogés. En effet, le changement climatique représente une forte ambiguïté quant à ses conséquences globales et complexes (Gemene, 2013), ce qui contraint les pouvoirs publics et les agriculteurs à réfléchir à des mécanismes de compensation (Marzen et Ballard, 2016). L'assurance privée se développe dans cet objectif, mais ne couvre actuellement pas l'ensemble des cultures ni des risques. L'assurance montre en effet d'importantes limites qui sont bien renseignées dans la littérature (Blanc, 2003; Carlson, 1979; Levin et Reinhard, 2007; Mahul, 1998; Smith *et al.*, 2017) : la sélection adverse, les incitations à augmenter la prise de risque et l'aléa moral sous-jacent, un faible consentement à payer, le besoin en subventions publiques, le manque d'efficacité du transfert de ces subventions, le risque de litiges entre l'assureur et l'assuré... Nos travaux présentés dans le Chapitre 3 (p. 94) ont conclu non seulement à l'inadaptation d'une solution assurantielle classique pour gérer les dommages causés par les pullulations, mais également aux limites générales de l'assurance agricole. L'assurance, qui tend à prendre une place croissante dans les politiques publiques, ne semble toutefois pas être un outil universel de gestion des risques en agriculture.

L'appétit des agriculteurs pour des mécanismes publics de soutien en cas de crise est grand. Cependant, une critique souvent adressée aux fonds d'indemnisation publics est leur faible fiabilité, car le niveau des indemnités dépendra des liquidités disponibles. C'est ce qu'il s'est produit en 2016 avec les indemnités versées par le FMSE : sur un budget initial annoncé de 10 millions d'euros, 6,1 millions d'euros ont été versés, pour des dommages compensables estimés à 20 millions d'euros. L'un des intérêts majeurs de l'assurance pour les agriculteurs serait de leur garantir une indemnité effective lorsque des dommages se produisent. Cela est d'autant plus important que le FMSE n'est pas supposé, dans ses missions, compenser les dommages causés par les campagnols. De plus, les contrats d'assurance sont personnalisés, et les agriculteurs peuvent espérer recevoir une compensation adaptée à leur situation spécifique. Ces garanties ont toutefois un coût pour l'assuré : les coûts d'administration de 30%. La seule raison pour laquelle un agriculteur payerait une prime d'assurance supérieure aux dommages attendus est l'aversion au risque. Dans le cas du modèle présenté au Chapitre 3 (3.2.1, p. 100), les coûts d'administration s'élèvent à 11,2€ par hectare, ce qui signifie qu'une telle assurance ne serait envisageable uniquement si l'agriculteur a un consentement à payer de 11,2€ pour se débarrasser du risque de pullulation. Dans le cas contraire, une subvention publique sera nécessaire pour que cette assurance puisse exister (voir 3.2.4.1, p. 110). Des études

supplémentaires pourraient explorer cette question en évaluant le consentement à payer des agriculteurs pour une assurance qui les couvrirait contre le risque de pullulation⁷⁸.

Dépendance aux subventions publiques : le marché de l'assurance défaillant

Un autre point doit attirer notre attention : y compris pour des assurances couvrant des risques considérés comme assurables, tels que les risques climatiques, d'importantes subventions publiques sont nécessaires (Just et Pope, 2003, p. 1251; Smith *et al.*, 2017). Ce besoin général de subventions publiques pour l'assurance agricole tend à montrer une très faible aversion au risque, *i.e.* un faible consentement à payer pour l'assurance récolte, mais aussi que la sélection adverse conduit à une prime d'assurance surestimée. Dans le cas des pullulations de campagnols terrestres, les asymétries d'information génèrent à la fois des problèmes d'aléa moral (lien entre les pratiques agricoles et la survenance des dommages) et de sélection d'averse (grande diversité des risques et difficulté de l'évaluation individuelle), qui sont deux limites importantes de l'assurance (Blanc, 2003; Mahul, 1998). Aux Etats-Unis, l'expérience récente a montré que la participation des agriculteurs au programme d'assurance fédéral était faible lorsque les subventions étaient faibles, du fait d'une importante sélection adverse : « *les agents les moins exposés auront une réponse plus élastique aux variations des niveaux de prime* » (Smith *et al.*, 2017). Il ne fait aucun doute que si le FMSE devait proposer un mécanisme de compensation des dommages causés par les campagnols, il se retrouverait face à la même problématique.

Partout dans le monde, les subventions publiques s'avèrent être une aide nécessaire au développement de l'assurance agricole : les gouvernements dépensent chaque année 20 milliards de dollars en subventions (Hazell *et al.*, 2017). Malgré ces importants budgets publics, l'assurance couvre à peine 0,9% du PIB agricole. Les subventions publiques permettent de porter le *Producer Claim Ratio* (PCR) au-dessus de 1, ce qui signifie que la plupart des agriculteurs peuvent espérer toucher des indemnités supérieures aux primes qu'ils payent (Hazell *et al.*, 2017). En moyenne, les agriculteurs paient 70% de la prime d'assurance actuariellement juste (Smith *et al.*, 2017). En quelque sorte, les subventions publiques à l'assurance fonctionnent comme une aide de crise et sont une solution pour diminuer le coût de l'assurance supporté par les agriculteurs. Cependant, l'efficacité des subventions publiques est fortement remise en cause : aux Etats-Unis, transférer \$1 à un agriculteur par le biais d'une assurance subventionnée coûte entre \$0.63 et \$0.95 aux pouvoirs publics (Hazell *et al.*, 2017). Aux Etats-Unis toujours, les subventions publiques à l'assurance ont représenté 8 milliards de dollars par an sur 10 ans, dont 5,5 milliards ont été reversés aux agriculteurs et 2,5 milliards ont été conservés par les assureurs (soit 31% du montant total) (Smith *et al.*, 2017) : « *pour chaque dollar de subvention payé aux agriculteurs ces dix dernières années, les compagnies d'assurance ont reçu 47 cents* ».

Dans notre cas d'étude (3.2, p. 100), si des subventions publiques couvrant uniquement les coûts d'administration (soit 11,2€/ha) avaient dû être versées aux exploitations qui ont subi des dommages supérieurs à 30% de la production espérée lors des pullulations de 2016, alors le coût total du programme aurait été de 571 313€ (Tableau 54). A titre de comparaison, en simulant le cas où le risque de pullulation avait été couvert par une assurance, l'indemnité moyenne projetée d'après le modèle proposé précédemment (3.2, p. 100), avec une franchise de 25%, aurait été de 21 857 € par exploitation (contre 13 770€ versés par le programme du FMSE). Ainsi, l'assurance peut permettre

⁷⁸ Nous avons construit, d'après l'exemple des assurances Prairies, un tableur pour mener de telles enquêtes auprès d'éleveurs : au cours de l'entretien, après avoir évalué son aversion au risque, l'éleveur est conduit à décrire le risque auquel il est exposé, ce qui permet d'utiliser le tableur pour construire une proposition d'assurance adaptée à son risque et à ses besoins. Nous n'avons malheureusement pas pu déployer cet outil sur le terrain.

une meilleure indemnisation de l'agriculteur en cas de dommages, à condition d'en payer le prix (la prime d'assurance actuariellement juste).

Tableau 54 : Subventions totales dans le cas des pullulations de campagnols terrestres (pour les exploitations éligibles ayant subi plus de 30% de dommages)

Taux de subvention	0%	22.86%	38.57%	50%
Subvention totale dans le cas des campagnols terrestres	0€	571 313 €	964 091 €	1 249 747 €
Subvention moyenne par exploitation	0€	1 290€	2 176€	2 821€

Concrètement, nous pouvons comparer les deux dispositifs (FMSE réel ou assurance subventionnée hypothétique) dans le cas de l'exploitation agricole moyenne concernée par le dispositif FMSE en 2016 (115 ha, perte de 46%). Pour le calcul de la contribution de l'exploitation au FMSE, nous considérons un chargement d'1 UGB/ha, soit 115 UGB, et la présence de 2 UTH. Une exploitation cotise 20€/actif ainsi que 0,10€/bovin au FMSE (cotisation totale au FMSE de 55€/an). La fréquence des pullulations considérée est de 5 ans. Le Tableau 55 présente la répartition des coûts et des gains dans le cadre d'un dispositif FMSE, le Tableau 56 dans le cadre d'une assurance subventionnée à 23%.

Tableau 55 : Répartition des coûts et des gains dans le cadre d'un dispositif FMSE

Dispositif FMSE ⁷⁹			
Acteur	Fonds publics ⁸⁰	Fonds professionnels ⁸¹	Exploitation
Coûts	8950,50€	4819,65€	55€ × 5 = 275€
Gains	0€	55€ × 5 = 275€	13 770€
Bilan	- 8950,50 €	- 4 544,65 €	+ 13 495€

Tableau 56 : Répartition des coûts et des gains dans le cadre d'une assurance subventionnée à 23%

Assurance subventionnée			
Acteur	Fonds publics	Assureur	Exploitation
Coûts	1 288 € × 5 = 6 440 €	21 857€	4 347 € × 5 = 21 735 €
Gains	0€	21 735 € + 6440€ = 28 175 €	21 857€
Bilan	- 6 440 €	+ 6 318 €	+ 122 €

Dans le cas du FMSE, la double solidarité professionnelle et nationale, ainsi que les faibles cotisations individuelles demandées aux éleveurs, rendent ce dispositif très efficace pour fournir des compensations aux éleveurs. Même si la compensation *stricto sensu* est plus faible que celle qui serait proposée par l'assurance, son coût très faible pour l'exploitation agricole génère un bilan très positif. En moyenne, le cas d'une assurance subventionnée génère un faible bénéfice pour les exploitations (cette moyenne cache toutefois les disparités entre exploitations du fait de la forte dispersion des

⁷⁹ Nous ne disposons pas de l'information concernant les coûts de gestion courante et le coût d'instruction des dossiers d'indemnisation. Ainsi, les coûts de gestion du FMSE n'ont pas pu être intégrés au calcul.

⁸⁰ Classiquement, les fonds publics participent à hauteur de 65% de l'indemnisation des dommages dans le cadre des dispositifs du FMSE. Ce partage est ici indicatif, étant donné que le dispositif mis en place pour compenser les pertes de la pullulation de 2016 était exceptionnel.

⁸¹ Cotisations professionnelles

dommages ; voir Figure 26, p. 101). Le débat entre ces deux dispositifs porte sur deux questions importantes :

- Le consentement à payer des agriculteurs est-il suffisant pour permettre le développement d'un outil assurantiel ?
- Les coûts de gestion du FMSE sont-ils inférieurs à ceux de l'assurance ?

Pour apporter des éléments de réponse, nous proposons d'étudier le développement de l'actuelle assurance Prairies qui couvre certains risques climatiques, mais dont l'idée et le fonctionnement général se rapprocherait de celui d'une assurance contre les pullulations.

Cas de l'assurance Prairies

Le développement d'une assurance contre les pullulations nous semble d'autant plus hypothétique que nous constatons que même la couverture contre les aléas climatiques sur prairies peine à se développer (Mosnier, 2015). De manière générale, l'assurance récolte se développe faiblement en France.

Les modèles de Mosnier (2015) mettent en évidence les principaux facteurs qui conduisent les agriculteurs à ne pas souscrire à l'assurance Prairies. Premièrement, il existe une substitution entre l'assurance Prairies et les mécanismes d'auto-assurance ou d'autoprotection (par exemple, les stocks de fourrages). Par conséquent, les systèmes fourragers n'ont pas la même vulnérabilité face aux risques et donc pas les mêmes incitations à acheter une police d'assurance, ce qui explique une importante sélection adverse. Deuxièmement, il n'est pas évident que les agriculteurs aient la même aversion pour tous les risques, et il n'est donc pas évident qu'ils aient le même consentement à payer pour une assurance. Troisièmement, l'optimisation n'implique pas que l'ensemble des surfaces en prairies d'une ferme donnée devrait être assuré : l'assurance fonctionne comme un complément mais pas comme un outil unique de gestion des risques pour sécuriser les systèmes fourragers. Quatrièmement, l'indice grâce auquel sont déterminés les dommages subis par les prairies n'explique que 71% à 90% de la variation de la production fourragère, ce qui signifie qu'il existe un risque de base significatif pour les agriculteurs qui achètent l'assurance.

Nous complétons ces résultats en ajoutant deux autres explications du faible développement de l'assurance Prairies. D'abord, l'existence d'un mécanisme public de compensation qui diminue la demande pour l'assurance (Blanc, 2003). Notre développement précédent comparant le dispositif FMSE et une assurance hypothétique met en évidence l'effet de substitution qu'il existerait entre ces deux dispositifs. Ensuite, la production fourragère a un statut intermédiaire au sein du système d'élevage et ne constitue pas une production commerciale dans les zones de moyenne montagne : les prairies ne forment pas directement le revenu de l'exploitation, ce sont les animaux d'élevage qui le font.

Substitution entre assurance et filets de sécurité publics

Il existe de nombreux instruments de gestion du risque, ou encore de nombreuses décisions et actions qui, sans pour autant s'inscrire directement dans un programme ou une stratégie explicite de gestion des risques, ont des conséquences sur la manière dont les exploitations agricoles peuvent faire face aux aléas et à leurs conséquences. Du fait des coûts réels ou d'opportunité de mise en place d'instruments de gestion des risques, les agriculteurs sont souvent contraints de choisir de mettre en œuvre un nombre limité d'entre eux. Ces choix s'effectuent selon des effets de complémentarité ou au contraire de substitution entre les instruments de gestion des risques. Des effets de substitution sont particulièrement observés entre les instruments d'autoprotection/auto-assurance, d'assurance de marché et des filets de sécurité publics (Moschini et Hennessy, 1999).

- D'une part, les agriculteurs qui comptent sur une compensation *ex-post* des dommages qu'ils subissent ont tendance à adopter des pratiques plus « à risque » afin d'augmenter leur rendement maximal espéré (Cornaggia, 2013; Hazell *et al.*, 2017), et donc à négliger certains instruments d'autoprotection et d'auto-assurance. Il est notamment classique d'observer que l'assurance pousse les exploitations à spécialiser leur activité et à diminuer la diversification des spéculations qu'elles produisent (OCDE, 2009).
- D'autre part, la présence d'un filet de sécurité publique permettant la compensation des dommages défavorise la souscription à un contrat d'assurance. En effet, l'application des modèles classiques de l'assurance récolte montre que l'existence d'un mécanisme public de compensation conduit à une baisse de la demande des agriculteurs pour une assurance de marché (Blanc, 2003, p. 15). De plus, des simulations de Monte Carlo effectuées par l'OCDE (2009, p. 38) montrent qu'en présence d'un filet de sécurité public, l'assurance récolte ne permet qu'une moindre baisse de la variabilité des revenus (-8%) sans améliorer le revenu minimum espéré. En l'absence de tels mécanismes publics de compensation, l'assurance récolte permet de diminuer la variabilité du revenu de 13% et augmenter le revenu minimum espéré de 16% (Tableau 57).

Tableau 57 : Effet de substitution entre filet de sécurité public et assurance récolte (OCDE, 2009, p. 38)

	Coût d'une assurance équitable	Variance du revenu		Revenu minimum	
		Niveau	Variation	Niveau	Variation
Marché					
Sans assurance récolte		5 132 969		5 311	
avec assurance récolte	94	4 467 150	-13%	6 147	16%
Marché + filet de sécurité					
Sans assurance récolte		4 408 420	-14%	7 041	33%
avec assurance récolte	94	3 980 541	-8%	7 041	0%

Quelle place pour l'assurance ?

L'assurance peine à se développer en lieu et place d'outils publics de compensation des risques (mutualisation professionnelle et solidarité nationale). Il nous semble intéressant de mener une réflexion globale sur la place dans l'assurance parmi l'ensemble des instruments de gestion des risques existants (Figure 12, p. 57) : « L'assurance complète, plutôt que remplace, les autres outils de gestion des risques existants » (Levin et Reinhard, 2007).

Nous avons vu que la gestion du risque de pullulation, notamment la diversification des assolements, pouvait générer des coûts supplémentaires et une moindre rentabilité des systèmes fourragers. C'est une situation couramment rencontrée en agriculture lorsque des pratiques ayant pour objectif la maximisation des rendements se trouvent avoir des effets latents indésirables. Plusieurs travaux de recherche ont proposé l'utilisation de l'assurance comme d'un outil pour corriger la moindre rentabilité de pratiques souhaitables mais considérées comme plus à risque. Par exemple, l'adoption en grandes cultures de pratiques raisonnées diminuant l'usage des pesticides (Belzile *et al.*, 2015) ou encore de pratiques limitant ou éliminant le labour (Adusumilli *et al.*, 2020) est perçue comme une prise de risque par de nombreux agriculteurs.

Ambec et Desquilbet (2011) se sont intéressés au cadre réglementaire nord-américain pour la gestion de la résistance des insectes ravageurs au maïs OGM Bt : les agriculteurs doivent planter une part de leur assolement en maïs non-OGM afin de limiter l'émergence de résistances. Ces zones sont appelées « refuges ». Une telle régulation publique est rendue nécessaire du fait de deux dysfonctionnements

de marché : le manque de « droits de propriété » sur les populations de ravageur d'une part, et les mécanismes de biorésistance (Fenichel *et al.*, 2014), d'autre part. En effet, les bénéfices immédiats des pesticides sont individuels, mais les bénéfices sur la réduction future des populations de ravageurs et sur les coûts liés à l'émergence de résistances sont collectifs : cela fournit aux agriculteurs des incitations soit à sous-utiliser, soit à surutiliser les pesticides, selon les caractéristiques propres de leur système de culture (cas de la production d'un bien collectif). Mitchell *et al.* (2002) ont analysé les effets de plusieurs instruments réglementaires incitatifs pour sécuriser la participation des agriculteurs à la mise en place des zones « refuges » : une assurance sur les refuges potentiellement couplée avec une subvention ; une subvention directe sur les refuges couplée avec un contrôle et un retour de la subvention en cas de non-respect ; une assurance obligatoire ou une combinaison de taxes et de contrôles. Il existe donc un débat entre deux types de mécanismes : un instrument type « commande et contrôle » qui impose la localisation de l'usage des ressources et des externalités, ou bien un instrument basé sur le marché qui délègue le choix aux agents.

Le choix de l'instrument de régulation dépend de la mobilité des ravageurs et de l'hétérogénéité de la vulnérabilité des agents face aux ravageurs : les instruments de marché tels que les taxes ou les subventions sont plus efficaces lorsque les agents sont hétérogènes (individualisation de la taxe/subvention). Ambec et Desquilbet (2011) montrent que, lorsque la localisation a une importance, les agents qui réduisent l'usage d'une ressource ou l'émission d'une pollution ne sont pas toujours situés au « bon endroit », ce qui ne permet pas toujours d'atteindre la situation de *first-best*. Pour atteindre une *second-best solution*, il faut choisir entre : des instruments de marché pertinents pour minimiser les coûts d'opportunité et réduire l'usage de ressources ou l'émission de pollution, ou des instruments de régulation pertinents pour agir sur la localisation des ressources ou des pollutions. Ainsi, l'une des questions majeures est celle de la distribution des responsabilités et des coûts. S'il y a des bénéfices autant pour les agriculteurs que pour le reste de la société, il conviendra de ne pas faire porter l'ensemble des coûts aux agriculteurs.

Nous pourrions considérer de la même manière que la mise en place de cultures annuelles en moyenne montagne est plus risquée que la culture de l'herbe : les coûts de production sont élevés, les rendements espérés faibles et incertains (du fait des conditions pédoclimatiques de ces territoires). Ces cultures annuelles de moyennes montagnes seraient pourtant bénéfiques pour gérer le risque de pullulation de campagnols terrestres. Le soutien à cette diversification des systèmes fourragers et de l'agriculture de moyenne montagne pourrait relever d'une politique publique, considérant par exemple que l'adaptation face au dérèglement climatique en diminuant la vulnérabilité des systèmes d'élevage relève de l'intérêt général. Mais il peut également être considéré que ces choix techniques sont de la responsabilité des éleveurs et qu'ils sont les plus à même de décider de ces pratiques de diversification, puisqu'ils connaissent mieux que quiconque les possibilités agronomiques de leurs systèmes et de leurs territoires. Dans ce cas, l'assurance peut s'avérer être un outil intéressant pour inciter à une modification des comportements individuels. L'assurance Prairies, qui est un échec à cette heure, pourrait devenir une assurance Fourragère, valorisant ainsi la diversification des systèmes fourragers, y compris en zone de moyenne montagne. Un effet positif pourrait ressortir de telles incitations à construire un système fourrager plus résilient face aux aléas climatiques et sanitaires, et sécurisé par une assurance. Un tel dispositif permettrait par ailleurs de diversifier et mutualiser les risques en jouant sur l'hétérogénéité des systèmes fourragers et de leurs capacités d'adaptation flexible et plastique que nous avons présenté au Chapitre 4 (p. 116). Une assurance Fourragère pourrait autant intéresser un éleveur de la Chataigneraie cantalienne, petite région fourragère diversifiée, avec notamment d'importantes cultures de maïs fourrage, qu'un éleveur du Cézaillier, plus fortement dépendant de l'herbe. Il nous semble qu'y compris pour l'assurance (subventionnée ou non), l'approche par le système fourrager peut se révéler pertinente.

De la classification des « biens » à la classification des « maux »

Il est classique d'utiliser la classification des biens proposée par Griffon (1992) pour expliquer la gestion des ressources naturelles (Tableau 58). Les biens sont classés, d'une part, selon la possibilité d'exclure ou non certains agents de sa consommation (exclusion), d'autre part, selon que les agents sont en concurrence ou non pour la consommation de ce bien (rivalité). Cependant, nous avons vu tout au long de notre propos que le comportement et les pratiques des agents ne généraient pas uniquement des biens (ou externalités positives) mais également des « maux » (qui peuvent constituer des externalités négatives). La gestion de ces maux nous semble relever d'une réflexion analogue à celle de la production des différents types de biens.

Tableau 58 : Classification des types de biens (Griffon, 1992)

	Consommation conjointe (non rivalité)	Consommation en concurrence (rivalité)
Accès au bien contrôlé (exclusion)	Biens à « péage » Biens club	Biens privés
Accès au bien ouvert (non exclusion)	Biens publics ou biens collectifs	Biens en commun

Ainsi, nous proposons de transcrire la classification de Griffon (1992) afin de définir plusieurs types de « maux » qui seront concernés, selon leurs caractéristiques, par différentes modalités de gestion (Tableau 59). Nous proposons de classer les maux auxquels les agents économiques sont confrontés selon, d'une part, le caractère systémique ou indépendant du risque (exposition des agents), et d'autre part, la possibilité d'un agent de s'extraire individuellement du risque (sans détruire son système productif et à coûts raisonnables). Nous mettons en regard de cette classification des « maux » les stratégies et outils de gestion les plus pertinents ainsi que le comportement que les agents pourraient adopter pour gérer ces risques.

Tableau 59 : Classification des "maux" et modalités de gestion

	Un agent a la possibilité de s'extraire individuellement du risque	Un agent n'a pas la possibilité de s'extraire individuellement du risque	
Tous les agents sont ne sont pas exposés ou vulnérables au risque	« Mal » privé	« Mal » commun	Type de « mal »
	S'adapter	Eliminer	Stratégie de gestion
	Pratiques individuelles, épargne de précaution	Action collective, FMSE	Outils de gestion
	Risque de fréquence forte et intensité faible	Risques de fréquence moyenne et d'intensité forte	Caractéristique du risque
	Agents « acteurs »	Agents « coopérateurs »	Comportement des agents
Tous les agents sont exposés ou vulnérables au risque	« Mal » club	« Mal » collectif	Type de « mal »
	S'assurer (mutualisation)	Solidarité	Stratégie de gestion
	Assurance	FNGRA, FMSE, aides publiques exceptionnelles	Outils de gestion
	Risque de faible fréquence et forte intensité	Risque de faible fréquence et d'intensité très forte	Caractéristique du risque
	Agents « payeurs »	Agents « victimes, spectateurs »	Comportement des agents

Nos travaux sur l'assurabilité du risque de pullulation tendent à montrer qu'il ne s'agit pas un mal club : en effet, tous les systèmes fourragers ne sont pas exposés ou vulnérables de la même manière, et les éleveurs ne peuvent s'extraire individuellement du risque en le transférant à un assureur (faible consentement à payer, faible capacité de mutualisation ; voir Chapitre 3, p. 94). Les organisations professionnelles ont tendance à défendre davantage l'approche des pullulations comme un mal collectif, qui doit être géré par la solidarité nationale et professionnelle : pour cela, le FMSE a été utilisé en 2017 pour compenser une partie des dommages subis par les exploitations d'élevage alors qu'il ne s'agit pas de son rôle fixé par le cadre réglementaire national (arrêté ministériel de mai 2014). Cette approche est mise en défaut par l'importante fréquence des dommages et le fait que les agents ne sont pas spectateurs du risque mais bel et bien acteurs (par leurs pratiques individuelles et collectives). La vision classiquement défendue par les chercheurs et les techniciens est celle d'un « mal » commun qui ne peut être supporté en l'état par les agents, et doit donc être « éliminé ». Éliminer le risque ne consiste pas à éliminer le phénomène-cause (les campagnols terrestres eux-mêmes) mais plutôt à réduire la fréquence et l'intensité de ce phénomène : pour cela, les agents doivent coopérer et mettre en œuvre une action collective, soutenue par le FMSE (subventions). Cette conception en tant que mal commun est largement présente dans la littérature traitant de la gestion des ravageurs ou autres risques sanitaires. Cette approche n'est cependant que partiellement validée par nos travaux de modélisation (Chapitre 7, p. 188). En effet, si la coordination est un enjeu important pour la réussite d'une maîtrise de long terme des pullulations, certains aspects du risque doivent d'abord être gérés à l'échelle individuelle de l'exploitation d'élevage (résilience et diversification des systèmes fourragers, contributions individuelles à la diversification et la fragmentation des paysages, contributions individuelles à la lutte). Moyennant des coûts de lutte élevés et une action menée précocement et de manière appliquée, il apparaît possible pour un agent isolé de s'extraire du risque, ce qui constitue une caractéristique d'un mal privé. Il semblerait donc que le risque de pullulation partage les caractéristiques d'un mal commun et d'un mal privé.

Toutefois, nous avons mis en évidence que, d'une part, la lutte contre les pullulations génère un bénéfice collectif à l'échelle du territoire, et d'autre part, que si les coûts de la lutte étaient initialement élevés, une action suivie et coordonnée permettait de les diminuer fortement sur le moyen terme (mutualisation des coûts, gains d'efficacité des contributions individuelles). La lutte contre les pullulations production effectivement un bien collectif, et ce risque peut être assimilé à un mal commun, sans pour autant que la condition d'une lutte « collective » soit première et *sine qua non*. Ainsi, nous souhaitons, pour conclure cette discussion générale, interroger la notion d'action collective et ses déterminants.

Théorie de « l'iceberg de l'action collective »

Importance du capital social pour l'action collective

La gestion de la production d'un *output* dont le résultat dépend d'un effort collectif est un problème classiquement traité par des modèles principal-agents (Holmstrom, 1982). Si de tels modèles proposent des solutions théoriques pertinentes pour résoudre les problèmes d'aléa moral (voir 1.4.5.2, p. 52), ces dernières sont rarement applicables dans les faits. Les agents sont en effet rarement capables de calculer l'ensemble des coûts et gains qu'ils pourraient retirer d'une action, et quand bien même en seraient-ils capables, l'incertitude relative aux états de la nature futurs ne leur permettrait pas de maximiser à coup sûr leurs bénéfices. L'information dont disposent les agents au moment de leur prise de décision est incomplète et asymétrique. Ainsi, les contrats qui résultent d'un accord entre les agents sont-ils également imparfaits : non seulement le comportement des agents est difficilement observable mais l'effet propre des contributions individuelles à la production de l'*output* collectif ne peuvent souvent pas être isolées. La présence d'institutions, et en particulier de micro-institutions

(Menard, 2003), est indispensable : ces règles, et dispositifs pour les mettre en œuvre, peuvent orienter l'action individuelle dans le sens de l'intérêt collectif (North, 1990). Ainsi, le système institutionnel en place pour encadrer la gestion des pullulations de campagnols terrestres (6.2.1, p. 177) nous semble-t-il complet et globalement pertinent. En particulier, le rôle des OVS (FREDON, FDGDON) en tant que micro-institutions est fondamental pour réduire les asymétries d'information entre éleveurs et réduire les coûts de transaction inhérents à la coordination de l'action collective. En effet, notre modèle spatialisé tend à confirmer que même pour des agents parfaitement rationnels et informés, une lutte curative menée isolément (*patch par patch*) et tardivement (à l'apparition des premiers dommages) ne permet pas d'enrayer les pullulations. Les éleveurs ont donc besoin d'accéder à une information et un conseil précoces. Pour cela, l'utilisation d'un drone pour appuyer le travail des techniciens des OVS sur le terrain semble prometteuse (4.3.3, p. 148).

Si le cadre institutionnel (règlement national et micro-institution) est pertinent, les dispositifs prévus pour inciter les éleveurs à s'engager dans une action collective nous semblent toutefois bien moins cohérents. D'une part, les contrats de lutte ne fonctionnent actuellement que comme un outil administratif ouvrant droit à des subventions et ne formalisent aucun lien d'intérêt entre les éleveurs. Nos simulations ont confirmé le statut de bien collectif de la lutte contre les campagnols terrestres, démontrant qu'il existait effectivement un bénéfice collectif de la lutte : les éleveurs qui n'interviennent pas sur leurs propres parcelles peuvent bénéficier de l'action des autres agents, lorsqu'un nombre minimum d'éleveurs agit. En revanche, les coûts de la lutte, et en particulier les coûts initiaux, sont très importants, ce qui a tendance à maintenir l'action collective sous l'état d'un groupe latent.

Comme Olson (1965), nous constatons que les incitations « positives » telles que les subventions ne peuvent que rarement être des déclencheurs de l'action collective. Ainsi, comme le montre notre modèle spatialisé, les subventions proposées actuellement par le FMSE sont un dispositif intéressant pour renforcer la rentabilité de l'action pour les éleveurs, mais elles ne prennent véritablement leur sens que si les éleveurs consentent *a priori* à une action suivie pour maîtriser les populations de campagnols terrestres sur le long terme. Les structures formelles de la coordination et de l'action collective (contrats, incitations positives) doivent solidement s'appuyer sur des structures plus informelles, c'est-à-dire du capital social (Bornarel, 2007; Friedberg, 1992; Granovetter, 1983; Oliver, 1993). Ce capital social repose sur de la connaissance partagée, la confiance entre les agents, les réseaux qu'ils sont capables d'entretenir (liens faibles) pour que l'information circule et que la confiance se pérennise. Alors, et seulement alors, des structures plus formelles peuvent émerger et donner corps à l'action collective, qui n'est ni plus ni moins qu'une somme d'actions individuelles, générant un bénéfice collectif, et dont les efforts peuvent être mutualisés et réduits par la coordination.

L'importance du capital social a particulièrement été mise en évidence dans le cas de la lutte collective contre les pullulations de campagnols terrestres (Michelin *et al.*, 2014; Morlans et Michelin, 2014; Peyre *et al.*, 2009). En effet, si nous avons mis en évidence les caractéristiques des systèmes fourragers qui déterminaient leur capacité d'adaptation face aux risques (4.1.3.3, p. 123), et en particulier pour gérer les pullulations de campagnols terrestres (4.1.3.4, p. 125), les considérations technico-économiques ne sont pas les seules à expliquer le comportement des éleveurs face aux pullulations. En plus de déterminer plusieurs classes d'exploitations agricoles selon leurs marges de manœuvre techniques (voir Tableau 21, p. 125), Michelin *et al.* (2014) ont également catégorisé les éleveurs selon quatre groupes de pensée (Tableau 60). Des facteurs sociologiques importants sont mis en avant : la perception du campagnol, l'âge de l'éleveur, la motivation au changement de pratiques, la capacité d'adaptation. Les facteurs sociologiques limitant la lutte contre les campagnols sont principalement le

manque d'intérêt pour l'entretien des parcelles (intégration des prairies comme véritable production végétale), le manque de motivation pour changer certaines pratiques et une faible volonté ou capacité de travail en collectif.

Tableau 60 : Groupes de pensée des éleveurs face au campagnol terrestre, d'après Michelin et al. (2014)

Groupes	Pensée face au campagnol	Conséquences en termes de gestion
G1	Intérêt fort pour l'entretien de l'espace et le soin aux animaux. Campagnol défini comme un « nuisible ».	Mise en œuvre d'une lutte pour limiter le développement du campagnol.
G2	Proches de la retraite, les pratiques ont été intégrées dans le système d'élevage.	Envie de transmettre leur expérience en matière de lutte contre le campagnol ou, au contraire, désintérêt.
G3	Approche systémique du problème, envie de tester de nouvelles pratiques et d'en finir avec la lutte chimique.	Expérimentation et innovation.
G4	Singuliers, avec une grande capacité d'adaptation, actifs dans la lutte, mais du mal à se positionner dans le collectif.	Action individuelle.

Michelin *et al.* (2014) concluent par le croisement de ces deux catégorisations (technique et sociologique) pour déterminer quel type d'exploitation et quel groupe de pensée met en œuvre quelle stratégie de gestion (Tableau 61). Il est intéressant de constater que le type de fonctionnement de l'exploitation seul ou le groupe de pensée seul ne permettent pas d'expliquer les choix stratégiques. C'est bien le croisement de ces deux considérations qui permet d'expliquer les choix de gestion des pullulations et la participation à la production de ce bien collectif. Il est également intéressant de noter une plus grande homogénéité de stratégies au sein des groupes sociologiques qu'au sein des classes de systèmes d'élevage.

Tableau 61 : Répartition des stratégies de lutte des exploitations enquêtées selon leur classe d'exploitation et le groupe de pensée de l'exploitant (source : Michelin et al., 2014)

Groupe sociologique (Tableau 60, p. 235)	Classe de fonctionnement du système d'élevage (Tableau 21, p. 125)			
	C1 Grandes marges de manœuvre	C2 Faibles marges de manœuvre	C3 Souplesse de gestion de l'herbe	C4 Souplesse d'organisation du travail
G1 Intérêt pour l'entretien des parcelles				
G2 Proche de la retraite				
G3 Approche systémique, évolution des pratiques				
G4 Capacité d'adaptation, peu de collectif				

Légende :

- Stratégie de contrôle, pour éviter les pertes trop importantes de fourrages
- Stratégie d'adaptation, rendue possible par des marges de manœuvre plus grandes
- Pas de réponse spécifique, pour les exploitations plus petites et en fin de carrière

La théorie de l'iceberg de l'action collective

Plus l'action individuelle est coûteuse pour l'agent, plus les structures formelles (contrats, subventions) seront nécessaires et importantes pour maintenir un niveau d'effort suffisant. Toutefois, sur le long terme, le poids des structures formelles peut conduire l'action individuelle (et donc les contributions individuelles à la production du bien collectif) à diminuer voire disparaître, par découragement. Le poids de l'action collective formellement structurée et coordonnée doit être équilibrée par une poussée contraire de structures plus informelles : la connaissance, la confiance, les liens faibles et l'information. Pour résumer : le capital social doit être suffisamment important pour exercer une poussée qui empêche l'action collective de sombrer.

L'image de l'iceberg utilisée par Friedberg (1992) nous semble bien représenter le fonctionnement de l'action collective. Les structures formelles (telles que les contrats, les subventions) ne sont que la partie émergée de l'iceberg de l'action collective et ne peuvent exister que si elles reposent sur des structures informelles *préexistantes* (relations de confiance, cohésion, liens faibles), partie immergée de l'iceberg (Figure 73). Comme l'iceberg, sans la base de la structure, à savoir les structures informelles, aucune structure formelle ne peut émerger durablement : le capital social est une forme de capital productif (Bourdieu, 1980; Coleman, 1988).

Pour qu'une action collective prennent effectivement corps, il faut :

- Un intérêt commun, c'est-à-dire un océan commun où la glace peut se solidifier. Cet océan est vaste, et comprend de nombreuses incitations alternatives voire contradictoires qui rendent difficile la formalisation de l'intérêt commun.
- Une envie commune, c'est-à-dire une température suffisamment basse pour apaiser les intérêts divergents, amener les agents à penser l'intérêt collectif et les moyens de l'atteindre, c'est-à-dire créer les conditions initiales pour que la glace de l'iceberg puisse se former.
- Une masse émergée d'action suffisamment importante pour être efficace, c'est-à-dire des structures formelles qui permettent à chaque agent de mettre en œuvre des actions contribuant à la production du bien collectif, selon ses marges de manœuvre. Les structures formelles ont pour mission de réduire les coûts individuels de la production du bien collectif par des subventions mais également par la coordination (mutualisation des efforts). A la base de ces structures formelles se trouvent les institutions ainsi que les dispositifs de coordination qu'elles proposent, par exemple les contrats. Enfin, pour maintenir en surface des contributions individuelles suffisantes, des incitations (subventions) doivent réduire le poids des coûts qui pèse sur chaque agent.
- Une masse immergée suffisante pour soutenir ces structures formelles et maintenir à la surface une masse d'action collective efficace. Ces structures informelles sont à la base de l'iceberg : elles se forment en premier lorsque la température diminue suffisamment pour que la connaissance scientifique grandisse. Plus la connaissance circule, plus elle est partagée par les agents, plus la confiance qu'ils accordent aux autres acteurs augmente et plus les réseaux se renforcent. Ce sont tout d'abord des liens forts que les agents doivent constituer afin de renforcer la confiance qu'ils accordent aux uns et aux autres. Une fois cette confiance suffisamment solide, des liens faibles peuvent prendre le relais : l'information circule plus efficacement.

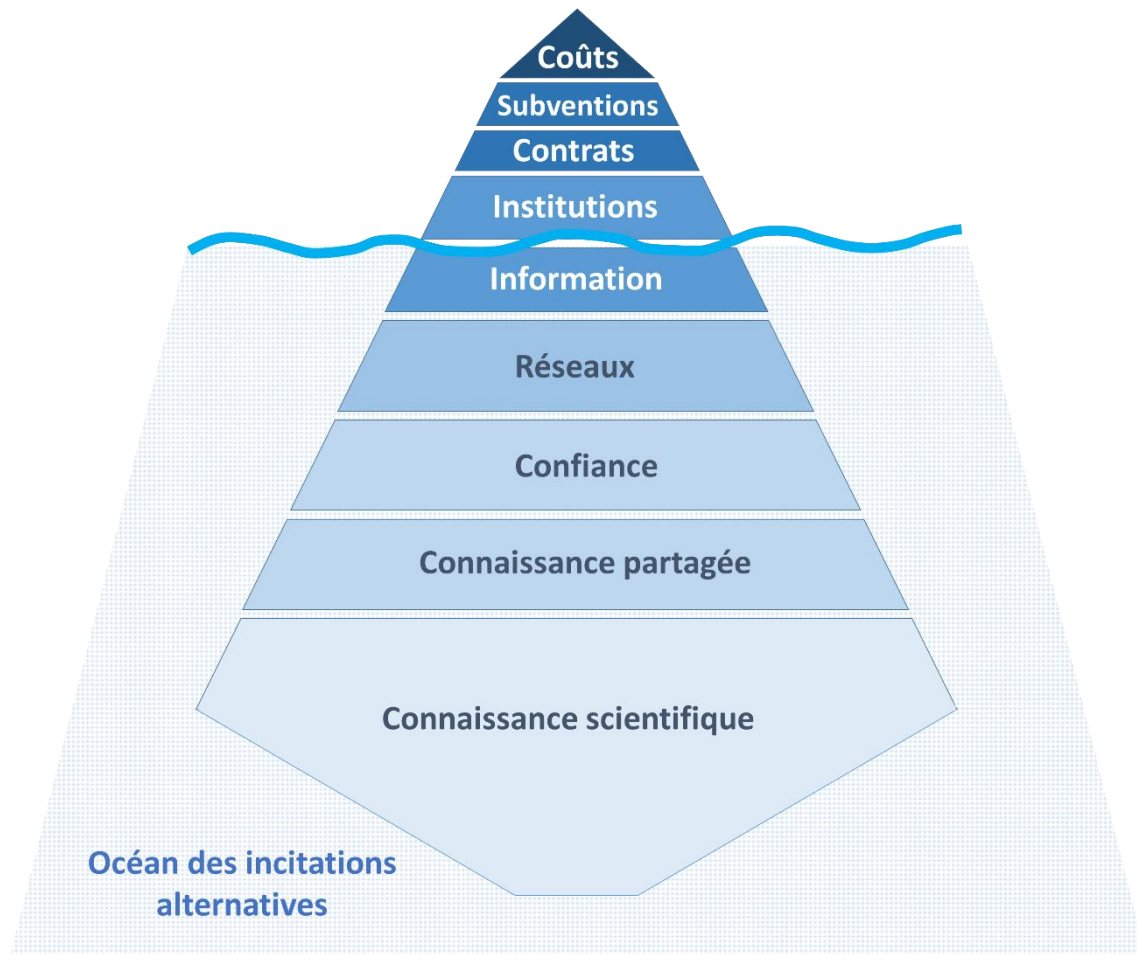


Figure 73 : Théorie de l'iceberg de l'action collective (auteur)

Evaluer la poussée suffisante que doivent exercer les structures informelles, c'est-à-dire évaluer la valeur du capital social nécessaire pour initier et maintenir une action collective, est bien évidemment difficile. Si l'iceberg de l'action collective flotte, c'est que le poids de l'action collective (F_P) est équilibré par une force assimilable à la poussée d'Archimède (F_A).

Ainsi,

$$F_P = F_A$$

$$\rho_L V_i = \rho_s V$$

$$V_i = \frac{\rho_s}{\rho_L} \cdot V$$

avec ρ_L la masse volumique du liquide, ρ_s la masse volumique du solide, V_i le volume immergé, V le volume de solide

Pour que le solide flotte en surface, la condition est : $V_i > V$, c'est-à-dire $\rho_s > \rho_L$.

Nous pouvons donc supposer, en continuant l'analogie, que l'action collective et le capital social qui la soutient doivent former une masse plus dense que l'océan des incitations alternatives. Notamment, la masse des structures informelles doit expulser une masse conséquente de liquide qui constituait autant d'incitations alternatives à la participation à l'action collective (comportement de passager clandestin par exemple). Le rôle des institutions, et en particulier des micro-institutions, est fondamental puisqu'elles sont à l'interface entre les structures formelles et les structures informelles.

Enfin, dans le cas de l'iceberg, le volume immergé – les structures informelles – représente 90% du volume total de l'iceberg, c'est-à-dire que la partie visible et émergée – les structures formelles – ne représentent que 10% du volume total. La volonté d'action, que ce soit par des adaptations flexibles ou plastiques, dépendamment des marges de manœuvre individuelles, est le facteur fondamental de la mise en œuvre d'une stratégie d'action collective. Elle dépend de la capacité à générer un capital social suffisamment solide pour supporter les coûts initiaux de l'action et ainsi mobiliser les agents autour de la production d'un bien collectif, bénéfique à tous.

Ainsi, la théorie de l'iceberg de l'action collective interroge l'importance *relative* des structures formelles (institutions, contrats, subventions) et informelles (capital social – connaissance, partage, confiance, réseaux, information – liens faibles) pour expliquer l'émergence et le maintien d'une action collective naturellement intéressante pour les agents mais coûteuse. La théorie de l'iceberg de l'action collective suggère que le poids des structures formelles doit être compensé par une poussée suffisante des structures informelles, faute de quoi l'action collective sombre ou ne se cristallise pas dans l'océan des incitations alternatives (gestion individuelle, comportement de passager clandestin...). En cela, le capital social est une forme de capital productif puisqu'il renforce les structures formelles de l'action collective.

Conclusion générale

En conclusion générale, nous souhaitons brièvement résumer ce qui nous semble être les apports de notre travail de thèse et expliciter les perspectives de recherche ouvertes par ces travaux ou au contraire laissées inexplorées à cette heure.

Apports méthodologiques

Notre thèse a proposé d'étudier le phénomène de pullulation des campagnols terrestres et ses conséquences pour les systèmes d'élevage au prisme de l'économie du risque. Le premier apport méthodologique de nos travaux est la conception d'une méthode et d'une grille de caractérisation économiques des risques fondée sur cinq sous-concepts : l'aléa, l'exposition, la vulnérabilité, les dommages et la gestion du risque (2.1, p. 60). Comme la représentation du risque que nous avons proposée le montre (1.2.3, p. 38), ces éléments se recoupent et sont parfois liés par des relations de causalité, si bien que ces distinctions peuvent s'avérer artificielles. Cependant, décomposer et analyser le phénomène, ses causes, ses conséquences, les enjeux exposés, les facteurs qui augmentent la probabilité qu'un système subisse des dommages, ..., est une démarche utile pour la compréhension de phénomènes complexes tels que les mécanismes socio-agro-écologiques. Dans un second temps, une synthèse est nécessaire pour tirer des conclusions opérationnelles de la caractérisation du risque en mettant en évidence ses particularités. L'application de cette grille de caractérisation des risques a permis de comprendre que, d'une part, les dommages associés aux pullulations de campagnols terrestres était trop intenses pour être absorbés par les systèmes productifs, et, d'autre part, que la fréquence et le caractère systémique du risque à l'échelle des enjeux le rendaient difficilement assurable. Ces conclusions préalables ont guidé notre analyse tout au long de nos travaux.

Notre revue de littérature et nos enquêtes, auprès d'éleveurs ou d'acteurs institutionnels, ont mis en évidence que l'action collective face aux pullulations de campagnols terrestres était défaillante (Chapitre 6, p. 172). Les explications classiques expliquant le sous-engagement des agents dans l'action collective concernent les coûts des contributions individuelles (coûts directs, coûts d'opportunité, coûts de transaction, externalités négatives liées au comportement de passager clandestin). Toutefois, d'une part, des expériences de long terme démontrent que les coûts de la lutte sont décroissants avec une application suivie (Giraudoux *et al.*, 2017), et d'autre part, certains éleveurs maîtrisent individuellement les populations de campagnols terrestres malgré le sous-investissement collectif sur leur territoire. Ainsi, il nous semble, dans la lignée d'Olson (1965), que les coûts, s'ils sont un facteur explicatif important de l'action collective (Balme, 1990; Cabon-Dhersin et Ramani, 2007; Oliver, 1993), ne sont pas la seule focale d'analyse pertinente : notamment, l'approche néo-institutionnelle de la coordination fournit des clés de compréhension intéressantes pour expliquer le sous-engagement des agents dans un processus collectif, malgré l'intérêt évident qu'aurait chacun d'entre eux à agir. Nous avons donc complété la théorie d'Olson (1965) en intégrant quatre composantes principales de la coordination : les institutions, les contrats, l'information et la confiance (Brousseau, 1992; Brousseau et Glachant, 2000; Menard, 2003). Ce cadre d'analyse de la coordination (6.1, p. 173) constitue un second apport méthodologique de nos travaux.

Enfin, nos travaux ont abouti à la construction d'un modèle multiagent spatialisé permettant de mener des travaux de simulation informatisés (Chapitre 7, p. 188). Cette approche par la modélisation était rendue indispensable par la temporalité du phénomène sous-jacent à notre étude. La conception d'un tel modèle multiagent, si elle est bien renseignée dans la littérature traitant des risques sanitaires (Epanchin-Niell et Wilen, 2015, 2012; Krebs, 2016), s'est heurté au manque de connaissances fines sur certains aspects des processus de pullulation et de dispersion des campagnols terrestres. A ce jour, les travaux de modélisation menés sur le cas spécifique des campagnols terrestres en moyennes montagnes sont capables d'expliquer les mécanismes de dispersion à l'échelle d'un vaste paysage,

mais n'intègrent pas encore les phénomènes de pullulation à l'échelle de la parcelle, ni les déterminismes des phases de croissance et de déclin des populations (Marilleau *et al.*, 2018). Pour les besoins de la modélisation, nous avons notamment dû poser des hypothèses sur la saturation des prairies pour rendre effectif le phénomène de pullulation. A ce stade, ces hypothèses ne compromettent pas la validité de nos résultats, et les possibilités d'intégrer les résultats de futurs travaux en écologie des populations sont grandes. Ce modèle multiagent constitue un apport méthodologique intéressant pour notre discipline mais également pour d'autres travaux en agronomie, zootechnie ou écologie des populations.

Apports théoriques

Nos travaux avaient pour objectif d'apporter de nouvelles clés de compréhension d'un phénomène complexe et de proposer de nouvelles approches pour appuyer les politiques publiques de gestion du risque de pullulation. Ainsi, les apports pratiques (que nous présentons au paragraphe suivant) sont-ils plus significatifs que les apports théoriques.

Nos travaux d'enquête puis de modélisation ont validés un certain nombre d'hypothèses que nous avons formulées à partir des théories économiques préexistantes concernant l'action collective, la coordination, l'agence et la production de biens collectifs. A partir de nos observations expérimentales, nous avons souhaité opérer une montée en généralité en synthétisant ces théories et nos conclusions : nous proposons d'approcher la question de l'action collective selon la théorie de « l'iceberg de l'action collective » (p. 233 ; Figure 73, p. 237). Cette théorie propose d'interroger l'importance *relative* des structures formelles (institutions, contrats, subventions) et informelles (capital social – connaissance, partage, confiance, réseaux, information – liens faibles) pour expliquer l'émergence et le maintien d'une action collective naturellement intéressante pour les agents mais coûteuse. La théorie de l'iceberg de l'action collective propose que le poids des structures formelles doit être compensée par une poussée suffisante des structures informelles, faute de quoi l'action collective sombre ou ne se cristallise pas dans l'océan des incitations alternatives (gestion individuelle, comportement de passager clandestin...). En cela, le capital social est une forme de capital productif puisqu'il renforce les structures formelles de l'action collective. Nous souhaitons à l'avenir renforcer cette théorie et l'explicitier davantage (mise en équation) par des travaux complémentaires (simulations, économie expérimentale) : nous pourrions pour cela remobiliser les modèles proposés dans notre thèse, que ce soit le modèle informatique ou le jeu sérieux.

Apports pratiques

L'un des apports pratiques de nos travaux le plus évident est la conception du jeu sérieux (Chapitre 5, p. 156) comme outil d'animation d'un territoire où l'action collective peine à émerger. Selon la théorie de l'iceberg de l'action collective, si la connaissance scientifique est à la base de l'édifice, sa transmission aux techniciens et aux agriculteurs, c'est-à-dire la construction d'une connaissance partagée, est nécessaire pour que l'action collective formelle repose sur une base large et solide. Ainsi, mettre les éleveurs autour d'une table, dans un contexte ludique (format d'un jeu de plateau), nous semble être une méthode intéressante pour les amener à échanger et construire ensemble d'abord une connaissance et une vision partagée du risque de pullulation, puis une stratégie collective prenant en considération les marges de manœuvre de chaque système d'élevage (voir Chapitre 4, p. 116 sur l'approche par le système fourrager). L'intérêt majeur de ce jeu est de mettre en avant les facteurs agroécologiques déterminant la fréquence et l'intensité des pullulations, d'explicitier l'intérêt de l'action coordonnée (pour mutualiser les efforts de lutte et réduire les coûts) mais également de montrer aux éleveurs qu'une action isolée n'est pas, *a priori*, vouée à l'échec (comme tendent à le montrer nos simulations informatiques ; 7.2.3, p. 208 et 7.3, p. 217).

De plus, nos travaux permettent d'envisager des pistes d'amélioration des politiques publiques mises en œuvre pour inciter les éleveurs à maîtriser collectivement les pullulations de campagnols terrestres. D'une part, nous suggérons de sortir du débat stérile qui oppose la maîtrise *ex-ante* du risque de pullulation et la compensation *ex-post* des dommages. En l'état, à grande échelle, le risque n'est ni maîtrisable par des actions de lutte directe (coût important, probabilité d'échec de la coordination significatif) ni assurable (dommages trop intenses, fréquence trop importante, risque trop systémique à l'échelle des enjeux). Si, en cas de survenance d'une forte pullulation, les systèmes d'élevage du Massif Central, déjà fragilisés par le cumul des aléas climatiques (sécheresses à répétition) et économiques (prix inférieurs aux coûts de production, spéculations sur le prix des fourrages), ne peuvent être laissés sans soutien de crise, cette perspective de solidarité professionnelle et nationale par l'intermédiaire du FMSE ne doit pas empêcher la mise en place d'un plan ambitieux de transformation (à moyen terme) des systèmes fourragers, pour les rendre moins vulnérables aux sécheresses d'une part, et réduire l'intensité et la fréquence des pullulations à l'échelle du paysage d'autre part. Face à la rigidité de nombreux systèmes fourragers, ces transformations devront être soutenues par des dispositifs publics (sous la forme d'une Mesure Agro-Environnementale, par exemple) mais aussi par des dispositifs privés (soutien des coopératives pour stabiliser les prix intégrant les coûts de production liés à la gestion du risque, transformation de l'assurance Prairies en assurance Fourragère...). A plus court terme, les actions collectives concrètes de maîtrise des populations de campagnols terrestres doivent être soutenues par des institutions repensées. Les OVS et les chercheurs devraient avoir pour mission première la diffusion de la connaissance et de l'information dans le milieu agricole (cette diffusion, sous la forme du BSV⁸² Prairies par exemple, est aujourd'hui trop faible). Les contrats devraient avoir pour objectif de formaliser le lien d'intérêt entre éleveurs d'un territoire et non uniquement de constituer un lien administratif entre le FMSE et un signataire. Enfin, les subventions sont nécessaires pour maintenir l'intérêt à l'action collective mais ne sont pas suffisantes pour générer la participation des éleveurs à la production d'un bien collectif : elles doivent être conditionnées à la signature d'un contrat collectif et à la participation des éleveurs aux institutions (groupes de lutte locaux, GDON ; participation au réseau de surveillance biologique du territoire). Une part de ces subventions pourrait financer l'externalisation d'une partie de la lutte, sur des espaces stratégiques du territoire identifiés comme foyers de démarrage des pullulations, et ainsi réduire le niveau des contributions individuelles nécessaires : si l'intuition de Wilen (2007) est juste, un agent pourrait être prêt à cofinancer l'action de lutte sur des parcelles voisines aux siennes appartenant à un autre éleveur s'il peut en retirer un bénéfice (effet collectif de la lutte mis en évidence sur le terrain et par notre modèle informatique ; 7.2.3, p. 208).

Ces propositions ne changent pas fondamentalement les structures du système institutionnel (règlements, dispositifs) en place ; il s'agit simplement d'en changer les finalités et le fonctionnement. Toutefois, cela suppose un changement de logique assez important dans la vision des systèmes agraires : l'espace agricole est repensé par ces approches comme un espace productif commun, où les structures de propriétés (Coase, 1960) sont reléguées au second plan par l'existence d'externalités spatiales dues aux mécanismes de dispersion des risques sanitaires (Feder et Regev, 1975; Fenichel *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2009). Cette conception collective des pratiques agricoles constitue un appui majeur pour la réussite d'une stratégie de lutte intégrée contre les pullulations ; c'est précisément ce changement de logique, opérant le passage d'un espace fragmenté et déterminé par les structures de propriété et à un espace commun et partagé, qui nécessite l'existence préalable d'un capital social solide et partagé. Il n'est pas anecdotique que les territoires où une forme plus collective de gestion des systèmes agricoles (par exemple : la coulée publique du lait destiné à la fabrication du fromage

⁸² Bulletin de santé du végétal, édité par les OSV

AOP Comté, la présence de CUMA⁸³, etc.) soient plus propices à l'émergence naturelle d'une coordination sur la question spécifique des pullulations de campagnols terrestres.

Perspectives scientifiques

Nos travaux ouvrent des perspectives scientifiques pour prolonger l'analyse et préciser certains résultats.

Notamment, nous pensons utile de dépasser le caractère qualitatif de nos enquêtes en proposant une méthodologie d'enquête quantitative (sous forme de questionnaires) qui, sans perdre la finesse d'analyse des particularités des systèmes fourragers, puisse fournir des données plus homogènes et nombreuses dans l'optique d'une montée en généralité. Dans ce cadre, nous souhaitons notamment déployer plus largement le test du jeu sérieux afin de terminer sa conception opérationnelle mais aussi de collecter davantage de données sur le comportement collectif des éleveurs face à un risque dont la gestion relève de la production d'un bien collectif. Nous pouvons également compléter notre analyse de l'assurabilité du risque de pullulation en recueillant des données sur le consentement à payer des éleveurs pour un tel dispositif : nous avons conçu un tableur pour cela mais n'avons pas pu l'utiliser à cette heure.

Enfin, la perspective de recherche la plus prometteuse est de compléter et de parfaire le modèle multiagent spatialisé afin de préciser plus finement les conséquences de diverses politiques publiques : intégration des aléas climatiques, approche par le système fourrager intégrant les besoins du troupeau, intégration du paysage comme élément de gestion du risque de pullulation, intégration des contraintes temporelles et financières, etc. Il est également envisageable de concevoir ce modèle comme un outil de simulation concret pour proposer, à partir des caractéristiques agroécologiques (systèmes fourragers, paysage) et socio-économiques (contraintes des exploitations, préférence des éleveurs) d'un territoire, les options de gestion les plus efficaces. Cette montée en généralité nécessitera un travail supplémentaire mais nous semble intéressante pour proposer un outil concret au service d'une gestion plus fine des systèmes fourragers.

⁸³ Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole

Bibliographie

- Adusumilli N., Wang H., Dodla S. et Deliberto M. 2020. Estimating risk premiums for adopting no-till and cover crops management practices in soybean production system using stochastic efficiency approach. *Agricultural Systems*, n°178, p. 1-5.
- Agreste. 2015. *Agreste Auvergne - Memento de la statistique agricole*. 135. 35 p.
- Akerlof G. A. 1970. The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism. *Quarterly Journal of Economics*, n°84, p. 488-500.
- Alcaras J.-R. et Lacroux F. 1999. Planifier, c'est s'adapter. *Economies et Sociétés*, n°26-27, p. 7-37.
- Ambec S. et Desquilbet M. 2011. Regulation of a Spatial Externality: Refuges versus Tax for Managing Pest Resistance. *Environmental and resource economics*, n°51 (1), p. 79-104.
- Amblard G., Bonnavaud H., Buche C., Cercueil D., Charvet L., Chréien Y., Davaine J.-B., Degueurce D., Dupupet J.-L. et Eggenschwiller C. 2009. *Caractérisation du risque pesticide : effets sur la santé et outils règlementaires*. Pesticides au quotidien. 5 p.
- Andrieu N., Coléno F. et Duru M. 2008. *L'organisation du système fourrager : source de flexibilité face aux variations climatiques*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 95-110. Editions Quae.
- Arrow K. J. 1971. *Essays in the Theory of Risk Bearing*. Markham Publishing Co. 278 p.
- Attonaty J. M. 1980. Qu'est-ce que le système fourrager? *Perspectives agricoles*, p. 20-27.
- Aubron C., Lurette A. et Moulin C.-H. 2010. *Simulation des conséquences économiques de différentes stratégies fourragères avec foin face aux aléas climatiques en élevage bovin laitier*. Rencontres Recherche Ruminants, Vol.
- Ayrest I. et Gertner R. 1989. Filling Gaps in Incomplete Contracts: An Economic Theory of Default Rules. *The Yale Law Journal*, n°99, p. 87-130.
- Babusiaux C. 2000. *L'assurance récolte et la protection contre les risques en agriculture*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie. 288 p.
- Balme R. 1990. L'action collective rationnelle dans le paradigme d'Olson. *L'Année sociologique (1940/1948-), Troisième série*, n°40, p. 263-285.
- Banque Mondiale. 2014. *Rapport sur le développement dans le monde 2014 — Abrégé : Risques et opportunités: La gestion du risque à l'appui du développement*. Washington DC. 66 p.
- Bardsley P., Abey A. et Davenport S. 1984. The economics of insuring crops against drought. *The Australian Journal of Agricultural Economics*, n°1 (28), p. 14.
- Barzman M., Bàrberi P., Birch A. N. E., Boonekamp P., Dachbrodt-Saaydeh S., Graf B., Hommel B., Jensen J. E., Kiss J., Kudsk P., Lamichhane J. R., Messéan A., Moonen A.-C., Ratnadass A., Ricci P., Sarah J.-L. et Sattin M. 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, n°4 (35), p. 1199-1215.
- Baumont R., Picard F., Delmas B., Violleau S., Zapata J., Chabalière C., Torrent A., Piquet M., Louault F., Andueza D. et Farruggia A. 2012. Production et valeur nutritive des prairies permanentes dans les fermes productrices de fromages AOP du Massif Central en France. *Fourrages*, n°209, p. 23-32.
- Beck U. 1992. *Risk Society. Towards a New Modernity*. Sage Publication. Londres. 260 p.
- Belzile L., Li J., West G., Gaudreau É. et Gauthier É. 2015. L'adoption de la lutte intégrée accentue-t-elle le risque économique ? In *L'adoption de la lutte intégrée accentue-t-elle le risque économique ?*, 2 p. Québec: IRDA - Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement.
- Bendjebbar P., Bricas N. et Giordano T. 2019. *Food systems at risk : trends and challenges. A scientific handout*. CIRAD. Montpellier. 48 p.
- Bergot S. 2016. Pourquoi et comment choisir l'assurance des prairies ? *La France Agricole*, n°3631, p. 66-67.
- Berliner B. 1982. *Limits of insurability of risks*. N.J. : Prentice-Hall Englewood Cliffs. 118 p.

- Berthier K., Foltête J.-C. et Giraudoux P. 2014a. Hétérogénéité du paysage et diffusion des pullulations de campagnols terrestres. *Fourrages*, n°220, p. 319–326.
- Berthier K., Piry S., Cosson J. F., Giraudoux P., Foltete J. C., Defaut R., Truchetet D. et Lambin X. 2014b. Dispersal, landscape and travelling waves in cyclic vole populations. *Ecol Lett*, n°1 (17), p. 53-64.
- Betbeze J.-P. et Bentoglio G. 2005. *L'Etat et l'assurance des nouveaux risques*. Commissariat général du plan. Projet Télémaque. 106 p.
- Bidou J.-E. et Droy I. 2013. De la vulnérabilité individuelle aux syndromes de vulnérabilité : quelles mesures ? *Revue Tiers Monde*, n°213 (1), p. 123.
- Blanc C. 2003. *La gestion des risques en agriculture : modèle offre-demande d'assurance récolte*. Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. 40 p.
- Blanc F., Bocquier F., Agabriel J., D'Hour P. et Chilliard Y. 2008. *La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 73-94. Editions Quae.
- Blanc F., Dumont B., Brunschwig G., Bocquier F. et Agabriel J. 2010. Robustesse, flexibilité, plasticité : des processus adaptatifs révélés dans les systèmes d'élevage extensifs de ruminants. *INRA Productions Animales*, n°1 (23), p. 65-80.
- Bornarel F. 2007. La confiance comme instrument d'analyse de l'organisation. *Revue française de gestion*, n°175 (33), p. 95-110.
- Bourdieu P. 1980. *Le capital social*. Actes de la Recherche en Sciences Sociales, Vol. 31, p. 2-3.
- Bourgeois L. et Demotes-Mainard M. 2000. Les cinquante ans qui ont changé l'agriculture française. *Économie rurale*, n°255, p. 14-20.
- Bourgeon J.-M. et Picard P. 2019. Insurance Law and Incomplete Contracts. In *Insurance Law and Incomplete Contracts*.
- Bournigal J.-M., Houllier F., Lecouvey P. et Pringuet P. 2015. *Rapport Agriculture Innovation 2025*. Paris, France Ministère de l'Agriculture et Ministère de la Recherche. 70 p.
- Boussard J.-M. 1988. *Economie de l'agriculture*. Economica. Paris. 283 p.
- Boussard J.-M. 2010. Pourquoi l'instabilité est-elle une caractéristique structurelle des marchés agricoles ? *Économie rurale*, n°320, p. 69-82.
- Boussard J.-M. 1994. Revenus, marchés et anticipations : la dynamique de l'offre agricole. *Économie rurale*, n°220-221 (numéro thématique "Les revenus agricoles"), p. 61-68.
- Bradshaw B., Dolan H. et Smit B. 2004. Farm-Level Adaptation To Climatic Variability And Change: Crop Diversification In The Canadian Prairies. *Climatic Change*, n°67, p. 119-141.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debacque P., Gaudillère J. P., Hénault C., Maraux F., Seguin B. et Sinoquet H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, n°3 (18), p. 309-332.
- Brossier J. 1989. *Risque et incertitude dans la gestion de l'exploitation agricole. Quelques principes méthodologiques*. In *Le Risque en agriculture*, ed. Editions de l'ORSTOM, p. 25-47. Paris.
- Brousseau E. 1992. Coûts de transaction et impact organisationnel des technologies d'information et de communication. *Réseaux*, n°54 (10), p. 31-55.
- Brousseau E. 1995. De la science du marché à l'analyse économique des formes de coordination. *Les Cahiers Français*, n°272, p. 54-63.
- Brousseau E. et Glachant J.-M. 2000. Introduction : Économie des contrats et renouvellements de l'analyse économique. *Revue d'économie industrielle*, n°1 (92), p. 23-50.
- Burt R. S. 1995. Le capital social, les trous structurels et l'entrepreneur. *Revue française de sociologie*, n°4 (36), p. 599-628
- Burt R. S. 1992. *Structural holes : the social structure of competition*. Harvard University Press. 310 p.
- Cabantous L. 2007. Ambiguity Aversion in the Field of Insurance: Insurers' Attitude to Imprecise and Conflicting Probability Estimates. *Theory and Decision*, n°3 (62), p. 219-240.

- Cabon-Dhersin M.-L. et Ramani S. 2007. La rationalité des agents économiques va-t-elle toujours à l'encontre de la coopération ? *Revue d'économie politique*, n°2 (117), p. 271.
- Cahuc P. 1998. *La nouvelle microéconomie*. La Découverte. Repères. Paris. 120 p.
- Carlson G. A. 1979. Insurance, information, and organizational options in pest management. *Annual Review of Phytopathology*, n°17, p. 149-161.
- Caron P. 2008. Niveaux d'organisation et horizons temporels multiples pour lire les flexibilités et les plasticités des systèmes d'élevage : le cas du Nordeste du Brésil. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 197-209. Editions Quae.
- Cayatte J.-L. 2009. *Microéconomie de l'incertitude*. De Boeck. Ouvertures économiques. Bruxelles. 254 p.
- Chambers R. 1989. Editorial Introduction: Vulnerability, Coping and Policy. *IDS Bulletin*, n°2 (20), p. 1-7.
- Chevalier B. 2007. *Les agriculteurs recourent de plus en plus à des prestataires de services*. INSEE, division Agriculture. INSEE Première, n°1160. 4 p.
- Chia E. et Marchesnay M. 2008. *Un regard des sciences de gestion sur la flexibilité : enjeux et perspectives*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 23-54. Editions Quae.
- Chiappori A. 1997. *Risque et Assurance*. Flammarion. Collection Dominos. France. 122 p.
- Chiappori P.-A. et Salanié B. 2013. *Asymmetric Information in Insurance Markets: Predictions and Tests* In *Handbook of Insurance*, ed. Dionne G. (éd.), p. 397-422. Springer New York.
- Coase R. H. 1937. The Nature of the Firm. *Economica*, n°16 (4), p. 386-405.
- Coase R. H. 1960. The Problem of Social Cost. *The Journal of Law and Economics*, n°3, p. 1-44.
- Cochereau P. 1989. *L'insecte et le risque agricole*. In *Le Risque en agriculture*, p. 153-166. Paris. Collection A travers champs.
- Coeurdassier M., Berny P., Couval G., Decors A., Jacquot M. et Queffélec S. 2014. Évolution des effets non intentionnels de la lutte chimique contre le campagnol terrestre sur la faune sauvage et domestique. *Fourrages*, n°220, p. 327-335.
- Coleman J. S. 1988. Social Capital in the Creation of Human Capital. *The American Journal of Sociology*, n°Supplement : Organizations and Institutions: Sociological and Economic Approaches to the Analysis of Social Structure (94), p. S95-S120.
- Collectif. 2016. Les drones au service de l'agriculture. *ICT Update*, n°82, p. 28.
- Cordier J. 2008. *Etude des risques de marché agricole en France : cadre d'analyse, modélisation et organisation des instruments*. Paris Conseil de Prospective Européenne et Internationale pour l'Agriculture et l'Alimentation (COPEIAA). 106 p.
- Cordier J. et Debar J.-C. 2004. *Gestion des risques agricoles : la voie nord-américaine. Quels enseignements pour l'Union européenne ?* Club Demeter. 69 p.
- Cordier J., Erhel A., Pindard A. et Courleux F. 2008. La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en oeuvre: éléments de réflexion pour l'action publique. *Notes et études économiques*, n°30, p. 33-71.
- Cornaggia J. 2013. Does risk management matter? Evidence from the U.S. agricultural industry. *Journal of Financial Economics*, n°2 (109), p. 419-440.
- Cornes R. 1993. Dyke Maintenance and Other Stories: Some Neglected Types of Public Goods. *The Quarterly Journal of Economics*, n°1 (108), p. 259-271.
- Couty P. 1989. *Risque agricole, périls économiques*. In *Le risque en agriculture*, ed. Editions de l'ORSTOM, p. 561-568. Paris.
- Couval G., Michelin Y., Giraudoux P., Maire F. et Truchetet D. 2014. Changements agricoles de 1956 à 2010 et évolution des pullulations d'*Arvicola terrestris* : comparaison entre la Bourgogne, la Franche-Comté et les Alpes. *Fourrages*, n°220, p. 303-310.
- Couval G. et Truchetet D. 2014. Le concept de lutte raisonnée: combiner des méthodes collectives contre le campagnol terrestre afin de conserver une autonomie fourragère. *Fourrages*, n°220, p. 343-347.

- Cummins D. et Mahul O. 2008. *Catastrophe Risk Financing in Developing Countries: Principles for Public Intervention*. The World Bank. 299 p.
- Dauphiné A. et Provitolo D. 2007. La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de Géographie*, n°654 (2), p. 115.
- Debatisse M. 1963. *La Révolution silencieuse. Le combat des paysans*. Calmann-Levy. Coll. Questions d'actualité. Paris. 275 p.
- Décamps H. 2007. La vulnérabilité des systèmes socioécologiques aux événements extrêmes : exposition, sensibilité, résilience. *Natures Sciences Sociétés*, n°1 (15), p. 48-52.
- Dedieu B., Chia E., Moulin C.-H., Leclerc B. et Tichit M. 2008. *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Editions Quae. 294 p. p.
- Desroches-Noblecourt C. 2004. *Lorsque la nature parlait aux Egyptiens*. Points. Points Documents. 160 p.
- Destrez A., Perrot E., Granger S., Gaillard C. et Michelin Y. 2014. Les impacts du campagnol terrestre sur les systèmes fourragers : le cas de l'élevage bovin allaitant en Bourgogne. *Fourrages*, n°220, p. 291-296.
- Dionne G. 2013. *Gestion des risques: histoire, définition et critique*. Montréal (Canada) Centre internuniversity de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport. 23 p.
- Dionne G., Michaud P.-C. et Dahchour M. 2004. Separating Moral Hazard from Adverse Selection in Automobile Insurance: Longitudinal Evidence from France. *SSRN Electronic Journal*, n°11 (4), p. 1-48.
- Dobermann A., Blackmoore S., Cook S. et Adamchuk V. I. Year. *Precision farming : Challenges and future directions*. New Directions for a Diverse Planet. Proceeding of 4th International Crop Sci. Congr. , p. 1–19. Brisbane, Australia.
- Dobremez L., Josien E., Camacho O. et Andrieu N. 2008. *La sécurisation des systèmes fourragers et la réponse aux enjeux agri-environnementaux en montagne*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 241-258. Editions Quae.
- Duby G. 1954. La révolution agricole médiévale. *Revue de géographie de Lyon*, n°4 (29), p. 361-366.
- Dufumier M. 1989. *La prise en compte des risques dans la définition des politiques de développement agricole*. In *Le Risque en agriculture*, ed. Editions de l'ORSTOM, p. 547-560. Paris.
- Duncan J. et Myers R. J. 2000. Crop Insurance under Catastrophic Risk. *American Journal of Agricultural Economics*, n°4 (82), p. 842-855.
- Duriez J.-L. 2010. *Mission d'expertise concernant les destructions occasionnées par les campagnols en Franche-Comté, dans le Massif-Central et dans le Massif des Alpes*. Conseil général de l'alimentation de l'agriculture, et des espaces ruraux. 67 p.
- Duru M., Cruz P. et Magda D. 2008. *La conduite des couverts prairiaux, source de flexibilité*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 57-72. Editions Quae.
- Duru M., Fiorelli J. L. et Osty P. L. 1988a. Proposition pour le choix et la maîtrise du système fourrager. I - Notion de trésorerie fourragère. *Fourrages*, n°113, p. 37-56.
- Duru M., Gibon A. et Osty P. L. 1988b. *Pour une approche renouvelée de l'étude du système fourrager*. In *Pour une agriculture diversifiée*, ed. L'Harmattan, p. 35-48. sous la direction de M. Jollivet.
- Duru M., Nocquet J. et Bourgeois A. 1988c. Le système fourrager: un concept opératoire? *Fourrages*, n°115, p. 251-272.
- Ehle L. E. 2006. Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science*, n°62, p. 787–789.
- Ehrlich I. et Becker G. S. 1972. Market Insurance, Self-Insurance, and Self-Protection. *Journal of Political Economy*, n°4 (80), p. 623-648.
- Eldin M. 1989. *Du risque de sécheresse au risque de mauvaise récolte : un effort de clarification des concepts*. In *Le Risque en agriculture*, p. 19-24. Paris. Collection A travers champs.
- Enjolras G. 2008. *De l'assurabilité des catastrophes naturelles : modélisation et application à l'assurance récolte*. Thèse de doctorat. Sciences de gestion, Université Montpellier I. 253 p.

- Epanchin-Niell R. et Wilen J. 2015. Individual and Cooperative Management of Invasive Species in Human-mediated Landscapes. *American Journal of Agricultural Economics*, n°1 (97), p. 180-198.
- Epanchin-Niell R. et Wilen J. 2012. Optimal spatial control of biological invasions. *Journal of Environmental Economics and Management*, n°2 (63), p. 260-270.
- Ezekiel M. 1938. The Cobweb Theorem. *The Quarterly Journal of Economics*, n°2 (52), p. 255-280.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP et WHO. 2019. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguarding against economic slowdowns and downturns*. . Rome Food and Agriculture Organization (FAO). 239 p.
- Feder G. et Regev U. 1975. Biological interactions and environmental effects in the economics of pest control. *Journal of Environmental Economics and Management*, n°2 (2), p. 75-91.
- Fenichel E. P., Richards T. J. et Shanafelt D. W. 2014. The Control of Invasive Species on Private Property with Neighbor-to-Neighbor Spillovers. *Environmental and resource economics*, n°2 (59), p. 231-255.
- Feola G. et Binder C. R. 2010. Towards an improved understanding of farmers' behaviour: The integrative agent-centred (IAC) framework. *Ecological Economics*, n°12 (69), p. 2323-2333.
- Fichet-Calvet E., Pradier B., Quéré J.-P., Giraudoux P. et Delattre P. 2000. Landscape composition and vole outbreaks: evidence from an eight year study of *Arvicola terrestris*. *Ecography*, n°23, p. 659–668.
- Fluet C. 2002. Assurance de responsabilité et aléa moral dans les régimes de responsabilité objective et pour faute. *Revue d'économie politique*, n°6 (112), p. 845.
- FMSE. 2018. *Rapport d'activité 2017*. Fonds national agricole de Mutualisation du risque Sanitaire et Environnemental. 23 p.
- Folke C., Carpenter S., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C. S. et Walker B. 2002. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *Ambio*, n°5 (31), p. 437-440.
- Foltête J.-C., Berthier K. et Cosson J.-F. 2005. Paysage et pullulation animale : les facteurs paysagers de la vitesse de propagation des vagues de pullulations du campagnol terrestre. *Cybergeo*, p. 1-21.
- Foltête J.-C., Couval G., Girardet X., Giraudoux P., Michelin Y. et Vuidel G. 2015. *Graphes paysagers pour la modélisation et la gestion des pullulations de campagnols terrestres*. CNRS/Université de Franche-Comté. 18 p.
- Frésard M. 2008. *Analyse économique du contrôle d'une invasion biologique. Modélisation théorique et application à la pêcherie de coquille Saint-Jacques de la baie de Saint-Brieuc envahie par la crépidule*. Thèse de doctorat. Economies et finances, Université de Bretagne occidentale. 153 p.
- Frésard M. 2011. L'analyse économique du contrôle des invasions biologiques : Une Revue de Littérature. *Revue d'économie politique*, n°4 (121), p. 489-525.
- Friedberg E. 1992. Les quatre dimensions de l'action organisée. *Revue française de sociologie*, n°4 (33), p. 531-557.
- Gemenne F. 2013. Impacts géopolitiques du changement climatique. L'agriculture au cœur des enjeux. *Fourrages*, n°214, p. 87-90.
- Gibon A., Duru M. et Balent G. 1983. *Ajustements entre les besoins du troupeau et les rythmes de croissance de l'herbe*. 8e journées de la Recherche Ovine et Caprine, Vol. 8, p. 343-380.
- Gillon Y. 1989. *Le risque acridien*. In *Le Risque en agriculture*, ed. Editions de l'ORSTOM, p. 143-152. Paris.
- Girard A. 2012. *L'intégration des médias sociaux dans les stratégies d'e-GRH : le cas du recrutement*. Thèse de doctorat. Economie et Gestion, Université de Montpellier. 329 p.
- Giraudoux P., Couval G., Levret A., Mougins D. et Delavelle A. 2017. Suivi à long terme d'une zone de pullulation cyclique de campagnols terrestres : le contrôle raisonné des populations est possible ! *Fourrages*, n°230, p. 169-176.
- Giraudoux P., Delattre P., Foltête J.-C., Josselin D., Defaut R. et Truchetet D. 2002. Les "vagues voyageuses" du campagnol terrestre en Franche-Comté. *Images de Franche-Comté*, p. 10–13.

- Giraudoux P., Pradier B., Delattre P., Deblay S., Salvi D. et Defaut R. 1995. Estimation of water vole abundance by using surface indices. *Acta theriologica*, n°40, p. 77–96.
- Gollier C. 2015. Dans quel sens la revolution numerique affecte-t-elle l'assurabilité des risques ? *Revue d'économie financière*, n°118 (2), p. 197.
- Goulamoussène Y., Perrot E., Toumazet J.-P., Michelin Y., Dureau R. et Vautier F. 2020. Utilisation d'un drone pour la surveillance et la lutte raisonnée contre les campagnols terrestres. *Fourrages*, n°243, p. 21-30.
- Goulamoussène Y., Vautier F. et Michelin Y. 2018. *Utilisation d'un drone équipé d'une caméramultispectrale pour la surveillance de parcelles agricoles infestées par le campagnol terrestre (Arvicolerterrestres)*. Conférence Française de Photogrammétrie et de Télédétection CFPT, Vol. Champs-sur-Marne, France.
- Granovetter M. 1983. The Strength of Weak Ties: A Network Theory Revisited. *Sociological Theory*, n°1, p. 201-233.
- Griffon M. 1992. Economie institutionnelle et gestion des ressources naturelles renouvelables. *Économie rurale*, n°208-209, p. 70-74.
- Grimm V., Berger U., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske J., Goss-Custard J., Grand T., Heinz S. K., Huse G., Huth A., Jepsen J. U., Jørgensen C., Mooij W. M., Müller B., Pe'er G., Piou C., Railsback S. F., Robbins A. M., Robbins M. M., Rossmannith E., Rüger N., Strand E., Souissi S., Stillman R. A., Vabø R., Visser U. et DeAngelis D. L. 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, n°1-2 (198), p. 115-126.
- Hansen Zeynep K. et Libecap Gary D. 2004. Small Farms, Externalities, and the Dust Bowl of the 1930s. *Journal of Political Economy*, n°3 (112), p. 665-694.
- Hardaker J. B., Lien G., Anderson J. R. et Huirne R. B. M. 2015. *Coping with Risk in Agriculture. Applied Decision Analysis*. CABI. CABI. United Kingdom. 290 p.
- Harwood J., Heifner R., Coble K., Perry J. et Somwaru A. 1999. *Managing Risk in Farming: Concepts, Research, and Analysis*. United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Agricultural Economics Reports. 131 p.
- Hazell P., Sberro-Kessler R. et Varangis P. 2017. *When And How Should Agricultural Insurance Be Subsidized ? Issues And Good Practices*. World Bank Group. 60 p.
- Hazell P. et Skees J. 2005. *Insuring Against Bad Weather. Recent thinking*. 19 p.
- Headley J. C. 1972. Economics of Agricultural Pest Control. *Annual Review of Entomology*, n°1 (17), p. 273-286.
- Hirshleifer J. 1985. From Weakest-Link to Best-Shot : Correction. *Public Choice*, n°2 (46), p. 221-223.
- Hirshleifer J. 1983. From Weakest-Link to Best-Shot: The Voluntary Provision of Public Goods. *Public Choice*, n°3 (41), p. 371-386.
- Hirshleifer J. 1971. The Private and Social Value of Information and the Reward to Inventive Activity. *The American Economic Review*, n°4 (61), p. 561-574.
- Holmstrom B. 1979. Moral Hazard and Observability. *The Bell Journal of Economics*, n°1 (10), p. 74-91.
- Holmstrom B. 1982. Moral Hazard in Teams. *The Bell Journal of Economics*, n°2 (13), p. 324-340.
- Hosmer L. 1995. Trust: the Connecting Link Between Organizational Theory and Philosophical Ethics. *Academy of Management Review*, n°2 (20), p. 379-403.
- Huyghe C. 2009. Evolution des prairies et cultures fourragères et de leurs modalités culturales et d'utilisation en France au cours des cinquante dernières années. *Fourrages*, n°200, p. 407-428.
- IDELE. 2018a. *Les cas-types ovins viande d'Auvergne-Loire-Rhône*. Inosys, réseaux d'élevage. 6 p.
- IDELE. 2018b. *Système bovins viande dans le Sud Massif Central (Aveyron, Cantal, Haute-Loire, Lozère) (cas type en conjoncture 2017 - Aubrac, Salers et Limousine)*. Inosys, réseaux d'élevage. 131 p.
- IDELE. 2018c. *Systèmes bovins laitiers des zones de montagnes et piémonts d'Auvergne et de Lozère (cas-types en conjoncture 2017)*. Inosys, réseaux d'élevage. 140 p.

InPact. Year. *La souveraineté technique et technologique des paysans en question*. Séminaire InPACT/AgroParisTech : La souveraineté technique et technologique des paysans en question, p. 28. AgroParis Tech, Paris.

InPact. 2016. *Souveraineté technologique des paysans. Défendre l'intérêt général autour des agroéquipements*. France Réseau InPact. 12 p.

Isaac H. et Pouyat M. 2015. *Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique*. France Renaissance Numérique. 106 p.

Jeanneaux P., Boulleau T. et Lherm M. 2019. *Les transformations de l'agriculture auvergnate : l'influence réciproque des politiques agricoles et des stratégies des filières*. In *L'agriculture entre plaine et montagne. D'hier à aujourd'hui*, ed. Revue d'Auvergne, p. 147-180. France. Alliance Universitaire d'Auvergne.

Just R. E. et Pope R. D. 2003. Agricultural Risk Analysis: Adequacy of Models, Data, and Issues. *American Journal of Agricultural Economics*, n°5 (85), p. 1249-1256.

Kermisch C. 2012. Vers une définition multidimensionnelle du risque. *Vertigo*, n°2 (12), p. 1-18.

Keynes J. M. 1937. The General Theory of Employment. *The Quarterly Journal of Economics*, n°2 (51), p. 209-223.

Kirat T. 2003. L'allocation des risques dans les contrats : de l'économie des contrats « incomplets » à la pratique des contrats administratifs. *Revue internationale de droit économique*, n°1 (t. XVII, 1), p. 11.

Kirat T. et Marty F. 2007. *Economie de la responsabilité civile*. In *Economie du droit et de la réglementation*, ed. Gualino éditeur, p. 63-87. France.

Knight F. 1921. *Risk, Uncertainty, and Profit*. University of Illinois at Urbana-Champaign's Academy for Entrepreneurial Leadership Historical Research Reference in Entrepreneurship. 445 p.

Komarek A. M., De Pinto A. et Smith V. H. 2020. A review of types of risks in agriculture: What we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, n°178, p. 1-10.

Krebs S. 2016. *Maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles : Une approche par automate cellulaire*. Xèmes Journées de Recherches en Sciences Sociales, Vol. 10. Paris.

Labonne M. 1989. *Du risque naturel au risque économique dans les pays à faible revenu*. In *Le risque en agriculture*, ed. Editions de l'ORSTOM, p. 569-574. Paris.

Lafrance É. 2015. *La gestion des risques. La perception des risques des agriculteurs québécois*. Mémoire de Maîtrise en agroéconomie, Université Laval. 117 p.

Landais E. 1994. *Système d'élevage : d'une intuition holiste à une méthode de recherche, le cheminement d'un concept*. In *Dynamique des systèmes agraires : à la croisée des parcours : pasteurs, éleveurs, cultivateurs*, ed. ORSTOM, p. 15-49. Paris, France.

Lemaire G., Micol D., Delaby L., Fiorelli J. L., Duru M. et Ruget F. 2006. *Sensibilité à la sécheresse des systèmes fourragers et de l'élevage des herbivores*. In *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau* Expertise scientifique collective, p. 88-108. INRA.

Lemaire G. et Pflimlin A. 2007. Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ? *Fourrages*, n°190, p. 163-180.

Leméry B., Ingrand S., Dedieu B. et Degrange B. 2008. *La flexibilité des élevages allaitants face aux aléas de production et aux incertitudes de la filière*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 143-160. Editions Quae.

Lestrade P. 2016. *Incidences fourragères et économiques d'une pullulation de campagnols terrestres, sur une exploitation du Cézallier*. Chambre d'Agriculture et FDGDON du Cantal. 8 p.

Levin T. et Reinhard D. 2007. Microinsurance aspects in agriculture. *Munich Re Foundation From Knowledge to Action*, p. 41.

Lidsky V., Maudet C., Malpel G.-P., Gerster F., Helfter M., Lejeune H. et Theule F.-G. L. 2017. *Les outils de gestion des risques en agriculture*. CGAAER, IGF. N° 16-104. 67 p.

- Lin N., Fu Y.-C. et Hsung R.-M. 2001. *The position generator : measurement technics for investigations on social capital*. In *Social Capital: Theory and Research*, ed. Karen Cook Nancy Lin, Ronald S. Burt, p. 57-81. Transaction Publishers.
- Loyat J. 2012. *Une PAC pour quels modèles de développement ? Histoire et perspectives*. Editions France Agricole. France. 233 p.
- Lupton S., Chauveau-Aussourd V. et Randrianasolo-Rakotobe H. 2019. *Faire face aux risques en agriculture. Perspectives croisées de chercheurs et de professionnels* L'Harmattan. 401 p.
- MAAF. 2016. Cahier des charges applicable aux entreprises d'assurance pour la prise en charge partielle de primes et cotisations d'assurance récolte 2016. In *Cahier des charges applicable aux entreprises d'assurance pour la prise en charge partielle de primes et cotisations d'assurance récolte 2016*, ed. Bureau Gestion des risques, 59 p.
- MAAF. 2012. *Graph'Agri 2012 - Endettement*. Paris, France Ministère en charge de l'Agriculture. 4 p.
- Mahul O. 1998. Vers une redéfinition du rôle de l'assurance agricole dans la gestion des risques sur récoltes. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n°49, p. 34-58.
- Maichanou A. 2014. *Comportement face au risque et risque de comportement. Analyse et implications au Niger*. Thèse de doctorat. Sciences économiques, Université de Bordeaux. 308 p.
- Marilleau N., Lang C. et Giraudoux P. 2018. Coupling agent-based with equation-based models to study spatially explicit megapopulation dynamics. *Ecological Modelling*, n°384, p. 34-42.
- Markowitz H. M. 1952. Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, n°1 (7), p. 77-91.
- Marzen C. G. et Ballard J. G. 2016. Climate Change and Federal Crop Insurance. *Environmental Affairs*, n°2 (43), p. 387-410.
- Mazoyer M. et Roudart L. 2002. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Editions du Seuil. 658 p.
- Menard C. 2003. L'approche néo-institutionnelle : des concepts, une méthode, des résultats. *Cahiers d'économie Politique / Papers in Political Economy*, n°1 (44), p. 103-118.
- Michelin Y., Coulaud F., Morlans S. et Ingrand S. 2014. Pullulations de campagnols terrestres : perception du phénomène, impact sur les systèmes bovins laitiers de Franche-Comté et perspectives pour l'action. *Fourrages*, n°220, p. 285-290.
- Michels M., Fecke W., Feil J.-H., Musshoff O., Pigisch J. et Krone S. 2019. Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany. *Precision Agriculture*, p. 403-425.
- Mitchell P., Hurley T., Babcock B. et Hellmich R. L. 2002. Insuring the stewardship of Bt corn : 'A carrot' versus 'a stick'. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, n°2 (27), p. 311-27.
- Morand S., Guégan J.-F. et Laurans Y. 2020. *De One Health à Ecohealth, cartographie du chantier inachevé de l'intégration des santé humaine, animale et environnementale*. Iddri. Décryptage N°04/20. 4 p.
- Moreau J. C., Frappat B. et Beauchamp J.-J. 2014. Rénover le conseil autour de la prairie : les propositions du projet PraiCoS. *Fourrages*, n°219, p. 235-245.
- Morlans S. et Michelin Y. 2014. Comment limiter la lutte chimique contre les campagnols terrestres? Enseignements d'une analyse agro-anthropologique dans 4 territoires montagneux français. *Fourrages*, p. 357-363.
- Moschini G. et Hennessy D. 1999. Uncertainty, Risk Aversion and Risk Management for Agricultural Producers. *Economic Staff Paper Series*, n°315, p. 1-105.
- Mosimann E., Bossuyt N. et Frund D. 2017. *Préparation de la production fourragère au changement climatique*. Suisse Agroscope. Agroscope Science, n°49. 36 p.
- Mosnier C. 2015. Self-insurance and multi-peril grassland crop insurance: the case of French suckler cow farms. *Agricultural Finance Review*, n°4 (75), p. 533-551.
- Moulin C.-H., Ingrand S., Lasseur J., Madelrieux S., Napoléone M., Pluvillage J. et Thénard V. 2008. *Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations : propositions méthodologiques*. In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 181-196. Editions Quae.

- Muet P.-A. 1993. Modèles d'équilibre et de déséquilibre dans les théories contemporaines des cycles. *Revue de l'OFCE*, n°1 (45), p. 53-93.
- Mumford J. D. et Norton G. A. 1984. Economics of Decision Making in Pest Management. *Annual Review of Entomology*, n°1 (29), p. 157-174.
- Nicolas H. et Dusseux P. Year. *La télédétection et la gestion du pâturage*. Prairiales. Normandie Le Robillard, France.
- Niemiec R. M., Ardoin N. M., Wharton C. B. et Asner G. P. 2016. Motivating residents to combat invasive species on private lands: social norms and community reciprocity. *Ecology and Society*, n°21 (2), p. 30.
- Nigou V. 2017. *Mission d'expertise concernant l'estimation des dégâts occasionnés par les rats taupiers dans le département du Cantal pour l'année 2016*. Cantal Chambre d'Agriculture du Cantal. 13 p.
- North D. 1990. *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge University Press. Cambridge. 153 p.
- Norton M., van Sprundel G.-J., Turvey C. G. et Meuwissen M. P. M. 2016. Applying weather index insurance to agricultural pest and disease risks. *International Journal of Pest Management*, n°3 (62), p. 195-204.
- Note P. 2001. *Etude de la dynamique de prolifération du Campagnol terrestre (Arvicola terrestris) selon les caractéristiques paysagères à l'échelle régionale en Auvergne*. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. 41 p.
- Note P. et Michelin Y. 2014. Impact du paysage sur les dynamiques de pullulations de campagnol terrestre (*Arvicola terrestris sherman*) dans le Massif central. *Fourrages*, n°220, p. 311-318.
- OCDE. 2009. *Gestion des risques dans l'agriculture. Une approche holistique*. Editions OCDE. Paris. 207 p.
- Oliver P. E. 1993. Formal models of collective action. *Annual Review of Sociology*, n°19, p. 271-300.
- Olson M. 1965. *The Logic of Collective Action : Public Goods and the Theory of Groups*. Harvard University Press. United Kingdom. 199 p.
- Pascal M. 1998. Lutte chimique, Campagnol terrestre, bavures et état d'âme - mise au point. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n°35, p. 61-64.
- Perrings C., Williamson M., Barbier E. B., Delfino D., Dalmazzone S., Shogren J., Simmons P. et Watkinson A. 2002. Biological invasion risks and the public good: an economic perspective. *Conservation Ecology*, n°1.
- Perrot C., Béguin E., Morhain B. et Tchakérian E. 2005. L'élevage dans les exploitations françaises. *Économie rurale*, n°288, p. 25-39.
- Petit M. 1971. Recherche sur les obstacles au progrès fourrager. *Fourrages*, n°47, p. 163-188.
- Petit M., Deffontaines J.-P. et Osty P.-L. 1975. Vos bonnes raisons de décider, les connaissez-vous ? . *Entreprises agricoles*, p. 6-10.
- Petit S. 2015. Faut-il absolument innover ? À la recherche d'une agriculture d'avant-garde. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n°65, p. 19-28.
- Peyre G., Coulaud F., Dampfhofer M., Morlans S. et Michelin Y. 2009. *Croiser les approches agronomique et anthropologique pour mieux appréhender les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage face aux pullulations de campagnols terrestres*. Rencontres Recherche Ruminants, Vol. 13, p. 97-100.
- Posner R. A. et Landes W. M. 1980. The Positive Economic Theory of Tort Law. *Georgia Law Review*, n°15, p. 851-924.
- Pottier E., Jacquin A., Roumiguié A. et Fougere M. 2017. Les nouvelles technologies au service de la prairie. *Fourrages*, n°230, p. 161-168.
- Pradier P.-C. 2004. *Histoire du risque*. In *Historia de la Probabilidad y la Estadística*, ed. Delta Publicaciones, p. 171-186. Madrid, Espagne.
- Pradier P.-C. 2006. *La notion de risque en économie*. La Découverte. 128 p.

Provost F. et Fawcett T. Year. *Robust classification systems for imprecise environments* Mapping of invasive phragmites (common reed) in Gulf of Mexico coastal wetlands using multispectral imagery and small unmanned aerial systems p. 2861–2882.

Putnam R. D. 2001. Social capital : Measurement and consequences. *Canadian journal of policy research*, n°2, p. 41-51.

Quéré J.-P., Garel J. P., Rous C., Pradier B. et Delattre P. 1999. Estimer les dégâts du Campagnol terrestre en prairie naturelle. *Fourrages*, n°158, p. 133-147.

Quéré J.-P. et Le Louarn H. 2011. *Les rongeurs de France*. Quae. Guide pratique. 312 p.

Ramadier E., Pinot A. et Sobczyk-Moran G. 2019. *Discussions autour de l'estimation de la densité des populations de campagnols terrestres*. Présentation du programme de recherche sur le déclin des populations de campagnols terrestres. Mini-symposium de recherche sur la forme fousseuse des campagnols terrestres Vol. 1. Clermont-Ferrand, France.

Regnault H., Arnauld de Sartre X. et Regnault- Roger C. 2012. *Les révolutions agricoles en perspective*. Editions France Agricole. France. 192 p.

Reix R. 1997. Flexibilité. In *Flexibilité*, ed. Economica Simon Y. et Joffre P. (éds), Encyclopédie de Gestion, 1407-1420.

Renting H., Rossing W., Groot J., Van der Ploeg J., Laurent C., Perraud D., Stobbelaar D. et Van Ittersum M. 2009. Exploring multifunctional agriculture. A review of conceptual approaches and prospects for an integrative transitional framework. *Journal of Environmental Management*, n°Supplement 2 (90), p. S112-S123.

Richards T. J., Eaves J., Fournier V., Naranjo S. E., Chu C. C. et Henneberry T. J. 2006. Managing economic risk caused by insects: bug options. *Agricultural Finance Review*, n°1 (66), p. 27-45.

Rigolot C., Martin G. et Dedieu B. 2019. Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants: Cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement. *INRAE Productions Animales*, n°1 (32), p. 1-12.

Rothschild M. et Stiglitz J. 1976. Equilibrium in Competitive Insurance Markets: An Essay on the Economics of Imperfect Information. *The Quarterly Journal of Economics*, n°4 (90), p. 629-649.

Ruget F., Noval S. et Granger S. 2006. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, n°186, p. 241-256.

Savage L. J. 1954. *The Foundations of Statistics*. Wiley Publications in Statistics. 294 p.

Schellberg J., Hill M., Gerhards R., Rothmund M. et Braun M. 2008. *Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints*. 13 p.

Schmoll P. 2011. Jeux sérieux : exploration d'un oxymore. *Revue des Sciences sociales*, n°45, p. 158-167.

Schouwet B., Cassez M., Couval G., Fontanier M. et Michelin Y. 2014. Campagnol terrestre et lutte raisonnée : quels impacts économiques sur les exploitations en AOP Comté ? *Fourrages*, n°220, p. 297-302.

Schouwey B., Cassez M., Couval G., Fontanier M. et Michelin Y. 2014. Campagnol terrestre et lutte raisonnée : quels impacts économiques sur les exploitations en AOP Comté ? *Fourrages*, n°220, p. 297-302.

Sharpe W. F. 1964. Capital Asset Prices A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. *The Journal of Finance*, n°3 (19), p. 425-442.

Simon H. A. 1960. *The new science of management decision*. Harper. New York. 50 p.

Smith M. D., Sanchirico J. N. et Wilen J. E. 2009. The economics of spatial-dynamic processes: Applications to renewable resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, n°1 (57), p. 104-121.

Smith V. H., Glauber J. W. et Goodwin B. K. 2017. *Time to Reform the US Federal Agricultural Insurance Program*. USA American Enterprise Institute. 29 p.

Sneessens I., Ingrand S., Randrianasolo H. et Sauvee L. 2017. *A quantitative approach to assess farming systems vulnerability: an application to mixed crop-livestock systems*. 11èmes Journées de Recherches en Sciences Sociales, Vol. 11. Lyon, France.

- Starr C., Rudman R. et Whipple C. 1976. Philosophical Basis for Risk Analysis. *Annual Review of Energy*, n°1 (1), p. 629-662.
- Stenberg J. A. 2017. A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. *Trends Plant Sci*, n°9 (22), p. 759-769.
- Stohlgren T. J. et Schnase J. L. 2006. Risk analysis for biological hazards: what we need to know about invasive species. *Risk Anal*, n°26 (1), p. 163-173.
- Tendall D., Joerin J., Kopainsky B., Edwards P., Shreck A., Le Q. B., Krütli P., Grant M. et Six J. 2015. Food system resilience: Defining the concept. *Global Food Security*, n°6, p. 17-23.
- Thompson J., Millstone E., Scoones I., Ely A., Marshall F., Shah E. et Stagl S. 2007. Agrifood system dynamics: pathways to sustainability in an era of uncertainty. In *Agrifood system dynamics: pathways to sustainability in an era of uncertainty*, ed. STEPS Centre, STEPS Working Paper 4, 79 p.: Brighton.
- Tichit M., Ingrand S., Moulin C.-H., Cournot S., Lasseur J. et Dedieu B. 2008. *Capacités d'adaptation du troupeau : la diversité des trajectoires productives est-elle un atout ?* In *L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, p. 119-134. Editions Quae.
- Trotter M. Year. *Precision agriculture for pasture, rangeland and livestock systems*. Australian Society of Agronomy Inc. Conference, p. 6. Australia: Precision Agriculture Research Group, University of New England.
- Truchetet D., Couval G., Michelin Y. et Giraudoux P. 2014. Genèse de la problématique du campagnol terrestre (*Arvicola terrestris*) en prairies. *Fourrages*, n°220, p. 279–284.
- Urruty N., Tailliez-Lefebvre D. et Huyghe C. 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, n°1 (36), p.
- Veyret Y. et Reghezza M. 2016. Vulnérabilité et risques - L'approche récente de la vulnérabilité. *Responsabilité et Environnement*, n°43, p. 9-14.
- Vié Le Sage R. 1989. *La Terre en otage : gérer les risques naturels majeurs ?* Edition Le Seuil. 249 p.
- Vigneau N., Chéron C., Verger A. et Baret F. 2014. *Imagerie aérienne par drone : Exploitation des données pour l'agriculture de précision*. Colloque scientifique francophone : Drones et moyens légers aéroportés d'observation, Vol. p. 7. Montpellier, France.
- Vinet F. 2002. La question du risque climatique en agriculture: le cas de la grêle en France. *Annales de Géographie*, (111), p. 592-613.
- Von Neumann J. et Morgenstern O. 1944. *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press. 46 p.
- Walker B., Carpenter S., Anderies J., Abel N., Cumming G., Janssen M., Lebel L., Norberg J., Peterson G. D. et Pritchard R. 2002. Resilience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach. *Conservation Ecology*, n°6 (1), p. 14.
- Wilén J. 2007. Economics of Spatial-Dynamic Processes. *American Journal of Agricultural Economics*, (89), p. 1134-1144.
- Williamson O. 2000. The New Institutionnal Economics : Taking Stock, Looking Ahead. *Journal of Economic Literature*, n°3 (38), p. 595-613.
- Williamson O. 1979. Transaction-Cost Economics: The Governance of Contractual Relations. *Journal of Law and Economics*, n°2 (22), p. 233-361.
- World Bank. 2017. *ICT in Agriculture: Connecting Smallholders to Knowledge, Networks, and Institution. Updated Edition*. Washington, DC. 257-282 p.