

Faculté des bioingénieurs

Risque volcanique et agriculture : description de la vulnérabilité des exploitations agricoles soumises à des retombées de téphra

Cas d'étude : volcan Sangay, Équateur

Auteur : Inessa Del Natale
Promoteurs : Pierre Delmelle (SST/ELI/ELIE)
 Sophie Malherbe (SST/ELI/ELIE)
Lecteurs : Xavier Draye (SST/ELI/ELIA)
 Fabien Stark (INRAE-UMR SELMET)

Année académique 2023-2024

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mon promoteur, le Professeur Pierre Delmelle pour avoir accepté de m'embarquer sur ce sujet de mémoire passionnant en lien avec les volcans. Je suis reconnaissante d'avoir découvert une passion pour les volcans dès la première année de bachelier grâce à son cours d'introduction aux sciences de la Terre, ce qui a sans aucun doute influencé mon choix de sujet de mémoire. De plus, je tiens à le remercier chaleureusement pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser un travail de terrain en Équateur. Cette expérience restera gravée dans ma mémoire comme une expérience enrichissante qui a considérablement marqué mon parcours académique.

Ensuite, je souhaite exprimer ma reconnaissance tout particulièrement envers ma co-promotrice, la Doctorante Sophie Malherbe. Ta présence constante, ton soutien et tes relectures attentives ont été d'un grand réconfort tout au long de ce travail. Je te suis également reconnaissante pour ta disponibilité à répondre à toutes mes questions et à apaiser mes nombreuses inquiétudes et mon stress. Ton soutien et tes conseils ont été d'une valeur inestimable depuis le début de ce mémoire.

Je tiens également à remercier chaleureusement le Chercheur Fabien Stark pour sa contribution précieuse lors des nombreuses réunions liées à l'établissement des flux d'azote. Sa disponibilité et le temps qu'il a consacré à répondre à chacune de mes questions ont été d'une grande aide pour la progression de mon travail.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance au Professeur Xavier Draye et au Chercheur Fabien Stark d'avoir accepté de faire partie de mon jury en tant que lecteurs. J'espère que vous trouverez ce sujet aussi captivant que je l'ai trouvé moi-même.

Merci à toutes les personnes qui ont rendu possible la réalisation du travail de terrain. Un grand merci à Marlon et à ses parents pour leur accueil chaleureux, ainsi qu'à Anaïs, David et Edwin pour leur accompagnement lors des visites d'exploitations et leur participation aux entretiens. Leur collaboration précieuse a été indispensable pour la collecte des données nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci également à mon acolyte de terrain, Saskia, qui a également été notre remarquable interprète. Merci pour les chouettes moments, notamment à déguster des plats exotiques.

Je suis reconnaissante envers mes camarades de cours pour leur soutien constant et l'entraide précieuse que nous avons développée tout au long de ces cinq années d'études, particulièrement pendant la période de réalisation du mémoire. Leurs petits mots d'encouragement réguliers ont été d'une importance capitale.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude infinie envers mes parents pour leur soutien indéfectible, leur présence constante et leurs encouragements tout au long de ces mois de travail. Leur soutien inconditionnel a été ma motivation tout au long de ce parcours. Je leur suis profondément reconnaissante d'avoir été mes piliers durant cette période intense en stress. Un grand merci également à mes grands-parents pour leurs encouragements constants et leurs petites attentions qui m'ont apporté réconfort et motivation.

Table des matières

Liste des Figures.....	IV
Liste des Tableaux	VI
I. Introduction	1
II. État de l'art.....	3
1. L'activité volcanique	3
2. Téphra : le produit le plus répandu des éruptions explosives.....	4
3. Les régions volcaniques.....	7
3.1. Proximité des volcans et densité de population.....	7
3.2. La fertilité des sols volcaniques.....	7
4. Exploration de l'impact des éruptions volcaniques sur le secteur agricole.....	9
4.1. Notion de système	9
4.2. Les impacts des dépôts de téphra sur la végétation	9
4.3. Les impacts des dépôts de téphra sur les animaux d'élevage.....	12
4.4. Les impacts des dépôts de téphra sur les ressources en eau.....	14
5. Le risque volcanique : une évaluation multidimensionnelle.....	14
6. La résilience des exploitations agricoles face à l'aléa volcanique.....	16
6.1. Santé globale de l'écosystème	16
6.1.1. Résilience des exploitations agricoles grâce à l'agroécologie	17
7. Réduction des impacts sur les exploitations agricoles	18
III. Objectifs du travail.....	20
IV. Matériels et méthodes.....	21
1. Exploration de la zone d'étude.....	21
1.1. Description du volcan Sangay	21
1.2. Conditions climatiques régionales.....	22
1.3. Description de l'activité agricole régionale	22
2. Méthode de collecte des données	23
3. Analyse qualitative.....	24
3.1. Modèle conceptuel : schématisation d'exploitations agricoles	24
3.2. Analyse visuelle sous forme de réseaux	28
4. Analyse quantitative	28
4.1. Analyse économique dans un contexte <i>bors éruption volcanique</i>	28
4.2. Analyse du fonctionnement global d'une exploitation agricole	29
4.3. Évaluation des pertes engendrées par un dépôt de téphra	31
V. Résultats.....	38

1.	Description générale de la conduite agricole des exploitations étudiées.....	38
2.	Situation économique des diverses exploitations – <i>bors-éruption</i>	39
3.	Description détaillée de la conduite agricole de l'exploitation n°3	40
3.1.	Analyse descriptive de la conduite agricole	40
3.2.	Analyse du fonctionnement global de l'exploitation par une méthode d'analyse de réseaux écologiques	43
4.	Quantification de la vulnérabilité - <i>Analyse économique</i>	45
4.1.	Analyse détaillée de la situation économique de l'exploitation n°3 <i>bors-éruption</i>	45
4.2.	Analyse économique de l'exploitation n°3 en <i>contexte éruptif</i>	47
4.3.	Analyse des pertes de productions végétales.....	49
5.	Quantification de la vulnérabilité - <i>Analyse de flux de matière en contexte éruptif</i>	51
5.1.	Sous-système de cultures.....	51
5.2.	Sous-système d'élevage.....	53
5.3.	Projection des pertes au niveau global du système	57
5.4.	Impacts sur les différentes catégories de flux	60
VI.	Discussion	63
1.	Analyse de la structure, du fonctionnement et des performances agroécologiques de l'exploitation n°3.....	63
2.	Analyse économique de l'exploitation n°3 <i>bors éruption</i>	64
3.	Quantification de la vulnérabilité de l'exploitation n°3 face aux dépôts de téphra	65
3.1.	Pertes économiques	65
3.2.	Pertes de productions végétales	67
3.3.	Pertes de flux d'azote.....	68
4.	Obstacles à la diversifications des cultures	73
5.	Contextualisation des craintes des exploitants agricoles de la région de <i>Guamote</i>	74
6.	Limitations de l'étude.....	75
7.	Perspectives.....	77
VII.	Conclusion	79
VIII.	Références bibliographiques	81
VII.	Annexes	92
A.	Questionnaire d'entretien de terrain.....	92
B.	Modèles conceptuels relatifs aux différentes exploitations	107
C.	Évaluation de la situation économique des différentes exploitations – <i>bors-éruption</i>	112
	Exploitation n°1.....	112
	Exploitation n°2.....	114
	Exploitation n°3.....	116

Exploitation n°4.....	118
Exploitation n°5.....	120
D. Évaluation économique en contexte éruptif - <i>exploitation n°3</i>	122
a. Calendrier culturel – <i>exploitation n°3</i>	122
b. Détermination des coefficients de pertes – <i>Fonctions de fragilité</i>	123
c. Revenus annuels bruts (\$/an) selon un dépôt de cinq ou cinquante millimètres d'épaisseur.....	125
E. Analyse des flux de matière sous forme de flux d'azote	127
a) Établissement des coefficients de conversion de matière en matière azotée.....	127
b) Coefficients <i>tropical livestock unit</i>	129
c) Équations des divers indicateurs de <i>structure – fonctionnement – performances</i>	130
d) Bilan des différents flux selon les espèces animales et culturelles	131
e) Proportions relatives de matière sèche et matière fraîche dans les cultures.....	140
f) Proportions relatives de protéines brutes dans les cultures.....	140
g) Pertes de flux d'azote (%) – <i>contexte éruptif – cinq millimètres</i>	141
h) <i>Pertes de flux d'azote (%) – contexte éruptif – cinquante millimètres</i>	147

Liste des Figures

Figure 1 – Processus de fragmentation du magma et propulsion de téphra dans l’atmosphère (Michaud-Dubuy, 2019).....	5
Figure 2- Effet du vent sur les flux turbulents et la dispersion des téphras – Vitesse du panache volcanique - Sédimentation des particules volcaniques (Michaud-Dubuy, 2019)	6
Figure 3 - Représentation schématique des impacts attendus à court et à long terme en raison d'une éruption explosive. Adapté de (Paredes-Mariño et al., 2022).....	6
Figure 4 – Représentation de la répartition mondiale des volcans de l'Holocène et de la population humaine. Les volcans historiquement actifs sont représentés par des cercles rouges, tandis que ceux de l'Holocène sans éruptions historiques sont représentés par des croix bleues. La densité de population est affichée sur une échelle logarithmique (Small & Naumann, 2001)	8
Figure 5- Ensevelissement de cultures de maïs après l'éruption du Tungurahua de 2015, Équateur (Ugrin, 2015).....	10
Figure 6- Image représentant le LAI en fonction de la couverture foliaire (Abdellatif & Valdenebro, 2016)	11
Figure 7 - Destruction de la prairie à destination de alimentation des bovins après éruption du Tungurahua, Equateur (EFEverde, 2014) - Moutons mérinos couverts de cendres à la suite de l'éruption du Ruapehu en 1995-1996 (Wilson & Kaye, 2007).....	13
Figure 8 - Evaluation des risques suite à un dépôt de téphra. Adapté de (Ligot, 2022).....	15
Figure 9 - Fonction de fragilité concernant la production horticole expriment la perte de rendement (%) selon une certaine épaisseur de téphra (mm) (Wilson & Kaye, 2007)	16
Figure 10 - Diversité des arbres et résilience socio-écologique de l'agroforesterie après le dépôt de cendres volcaniques en Indonésie (Sari et al., 2023).....	17
Figure 11 - Les 10 éléments de l'agroécologie établis par la FAO définissant les principes de l'agroécologie (FAO, 2024)	18
Figure 12 - Nettoyage à l'eau de cultures après l'éruption du Taal aux Philippines en 2020 (S et al., 2020)	19
Figure 13 - Représentation des différents dépôts de téphra (kg/m ²) lors de l'éruption de 2020 (Hidalgo et al., 2022).....	21
Figure 14 - Localisation du Sangay, Equateur (Hidalgo et al., 2022).....	21
Figure 15 - Localisation géographique des cinq exploitations agricoles où les entretiens ont été menés	23
Figure 16 - Modèle conceptuel général d'exploitations agricoles.....	27
Figure 17 - Interface du logiciel Gephi avec un exemple de réseau établi (Zonin, 2024)	28
Figure 18 - Représentation des différentes étapes de l'établissement des ENA (Stark, Archimède, et al., 2019)	30
Figure 19 - Part du revenu annuel brut issu de la production végétale et animale par exploitation (%).....	40
Figure 20 - Photos illustrant la conduite agricole de l'exploitation n°3 – (1) Prairie permanente et Luzerne, (2) Oignons en phase expérimentale, (3) Cochons d'Inde, (4) Maïs.....	41
Figure 21 - Représentation visuelle interconnexions entre les divers constituants de l'exploitation n°3. La taille des cercles et des flèches dans le réseau indique respectivement l'importance des différentes éléments du système et des flux d'interactions	42
Figure 22 - Proportion des revenus annuels bruts de l'exploitation n°3 - Hors éruption.....	46
Figure 23 - Pertes de revenus bruts annuels différenciées selon la perte liée à la production végétale et animale pour un dépôt de 5 mm (%).....	48

Figure 24 - Pertes de revenus bruts annuels différenciées selon la perte liée à la production végétale et animale pour un dépôt de 50 mm (%).....	49
Figure 25 - Pertes de productions végétales annuelles pour un dépôt de 5 mm (%)	50
Figure 26 - Pertes de productions végétales annuelles pour un dépôt de 50 mm (%)	50
Figure 27 - Pertes de flux d'azote pour l'ensemble du sous-système de production selon le mois d'éruption sous 5 mm de téphra (%)	52
Figure 28 - Pertes de flux d'azote pour l'ensemble du sous-système de production selon le mois d'éruption sous 50 mm de téphra (%)	53
Figure 29 - Pertes des naissances animales selon le mois d'éruption (%).....	54
Figure 30 -Pertes selon les différentes finalités des petits nés au sein de l'exploitation - 5 mm (%)	54
Figure 31 - Pertes de produits animaux différenciées selon la part des ventes et de l'autoconsommation - 5 mm (%).....	55
Figure 32 - Pertes selon les différentes finalités des petits nés au sein de l'exploitation - 5 mm (%)	56
Figure 33 - Pertes de produits animaux différenciées selon la part des ventes et de l'autoconsommation - 5 mm (%).....	56
Figure 34 - Modèle conceptuel adapté à l'exploitation n°3 - Hors-éruption.....	58
Figure 35 - Contributions relatives des différents types de flux de l'exploitation n°3 - Hors-éruption	60
Figure 36 - Valeur des outflow totaux selon le mois d'éruption (kg N/an).....	61
Figure 37 - Valeur des throughflow totaux selon le mois d'éruption (kg N/an).....	62
Figure 38 -Valeur des selfflow totaux selon le mois d'éruption (kg N/an).....	62
Figure 39 - Modèle conceptuel - exploitation n°1	107
Figure 40 - Modèle conceptuel - exploitation n°2	108
Figure 41 - Modèle conceptuel - exploitation n°3	109
Figure 42 - Modèle conceptuel - exploitation n°4	110
Figure 43 - modèle conceptuel - exploitation n°5.....	111
Figure 44 – Fonction de fragilité pour les animaux d'élevage (Wilson & Kaye, 2007)	123
Figure 45 - Fonction de fragilité pour les cultures horticoles (Wilson & Kaye, 2007)	123
Figure 46 - Fonctions de fragilité pour des cultures spécifiques (Ligot et al., 2023).....	124
Figure 47 - Fonction de fragilité pour les céréales et la viticulture (Hm et al., 2021)	124

Liste des Tableaux

Tableau 1 - Indice d'explosivité volcanique (Kennedy, 2023)	3
Tableau 2 - Coefficients de saisonnalité selon le stade phénologique des cultures	32
Tableau 3 - Coefficients de pertes de productions selon l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson & Kaye, 2007) (Craig et al., 2021)	34
Tableau 4 - Coefficients de pertes de production pour une épaisseur de cinq millimètres incluant la saisonnalité (Ligot et al., 2023).....	34
Tableau 5 - Coefficients de perte animale selon l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson & Kaye, 2007; Craig et al., 2021)	35
Tableau 6 - Caractéristiques générales des cinq exploitations de la région de Guamote	38
Tableau 7 - Résumé économique des cinq exploitations - Hors-éruption	39
Tableau 8 - Matrice de flux de l'exploitation n°3	43
Tableau 9 - Identification des indicateurs de structure - fonctionnement - performance de l'exploitation 3. IAE : Intégration agriculture-élevage	44
Tableau 10 - Contribution des sous-systèmes d'élevage et de cultures aux divers indicateurs de fonctionnement et de performance.....	44
Tableau 11 - Détail économique des différentes composantes de l'exploitation 3	45
Tableau 12 - Récapitulatif économique exploitation n°3	47
Tableau 13 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°1	112
Tableau 14 - Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°1	113
Tableau 15 – résumé économique global – exploitation n°1	113
Tableau 16 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°2.....	114
Tableau 17 - Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°2	115
Tableau 18- Résumé économique global – exploitation n°2.....	115
Tableau 19 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°3.....	116
Tableau 20 - évaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°3.....	117
Tableau 21 - Résumé économique global – exploitation n°3.....	117
Tableau 22 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°4.....	118
Tableau 23- Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°4.....	119
Tableau 24 - Résumé économique global – exploitation n°4.....	119
Tableau 25 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°5.....	120
Tableau 26 - Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°5	121
Tableau 27 - Résumé économique global – exploitation n°5.....	121
Tableau 28 – Sous-système d'élevage - revenus annuels bruts pour un dépôt d'une épaisseur de 5 mm- 50 mm et hors-éruption : exploitation n°3	125
Tableau 29 - Sous-système de cultures - revenus annuels bruts pour un dépôt d'une épaisseur de 5 mm- 50 mm et hors-éruption : exploitation n°3.....	126
Tableau 30- Coefficients de conversion en azote	127
Tableau 31 - Tropical livestock unit.....	129
Tableau 32 – Formules mathématiques des différents indicateurs nécessaire à l'évaluation de la performance et du fonctionnement des exploitations agricoles (Stark et al., 2019).....	130
Tableau 33 – Ensembles des flux comptabilisés pour les bovins	131
Tableau 34 – Bilan entrées – sorties pour les bovins.....	131
Tableau 35 - Ensembles des flux comptabilisés pour les ovins	132
Tableau 36 - Bilan entrées – sorties pour les ovins.....	132
Tableau 37 - Ensembles des flux comptabilisés pour les volailles.....	133
Tableau 38 - Bilan entrées – sorties pour les volailles	133

Tableau 39 - Ensembles des flux comptabilisés pour les léporidés.....	134
Tableau 40 - Bilan entrées – sorties pour les volailles	134
Tableau 41 - Ensembles des flux comptabilisés pour les volailles.....	135
Tableau 42 - Bilan entrées – sorties pour les volailles	135
Tableau 43 - Ensembles des flux comptabilisés pour les légumineuses	136
Tableau 44- Bilan entrées – sorties pour les légumineuses	137
Tableau 45 - Ensembles des flux comptabilisés pour les cultures racines.....	137
Tableau 46 - Bilan entrées – sorties pour les cultures racines	138
Tableau 47 - Ensembles des flux comptabilisés pour les céréales	138
Tableau 48 - Bilan entrées – sorties pour les cultures racines	139
Tableau 49 – Proportion de matière fraîche et de matière sèche dans les diverses cultures.....	140
Tableau 50 - Proportion de protéines brutes dans les diverses cultures.....	140
Tableau 51 – Pertes de flux d’azote du sous-système de cultures selon les différentes destinations des productions culturales (%) – 5 mm	141
Tableau 52 - Pertes de flux d’azote du sous-système d’élevage selon les différentes destinations des naissances (%) – 5 mm.....	141
Tableau 53 - Pertes de flux d’azote du sous-système d’élevage selon les différentes destinations de productions animales(%) – 5 mm	142
Tableau 54 - Pertes de flux d’azote du sous-système d’élevage selon les différentes destinations des déjections (%) – 5 mm	142
Tableau 55 – Pertes de flux d’azote selon les différents flux du système (%) – pris individuellement – 5 mm	143
Tableau 56 – Pertes de flux d’azote selon les différents flux du système (%) – pris proportionnellement – 5 mm	145
Tableau 57 – Pertes de flux d’azote du sous-système de cultures selon les différentes destinations des productions culturales (%) – 50 mm.....	147
Tableau 58 - Pertes de flux d’azote du sous-système d’élevage selon les différentes destinations des naissances (%) – 50 mm.....	147
Tableau 59 - Pertes de flux d’azote du sous-système d’élevage selon les différentes destinations des déjections (%) – 50 mm	148
Tableau 60 – Pertes de flux d’azote selon les différents flux du système (%) – pris individuellement – 50 mm	149
Tableau 61 – Pertes de flux d’azote selon les différents flux du système (%) – pris proportionnellement – 50 mm.....	151

I. Introduction

À l'échelle mondiale, la présence de volcans actifs dans 86 pays expose au risque volcanique plus de 800 millions de personnes résidant à moins de 100 kilomètres de ces phénomènes géologiques (S. Brown et al., 2015). Selon Scandone et al., (2015), ce chiffre est appelé à augmenter dans le futur. Cette tendance s'explique par la croissance démographique soutenue et l'augmentation des migrations vers les régions volcaniques. Les sols fertiles formés sur les dépôts volcaniques attirent particulièrement les populations des communautés rurales (Small & Naumann, 2001).

En outre, les volcans se situent principalement dans des régions économiquement moins développées, telles que l'Amérique Centrale, l'Amérique du Sud et l'Asie du Sud-Est (Eley, 2014). Dans ces régions, l'agriculture joue un rôle important dans l'économie, comme en Équateur, où en 2022, elle a contribué à hauteur de 8,84 % du PIB, avec une population rurale représentant 36,5 % de la population totale (World Bank Open data, 2022; IFAD, 2023).

Lors des éruptions volcaniques explosives, les chutes de téphra représentent l'un des dangers les plus répandus. Ces matériaux éjectés lors des éruptions peuvent recouvrir des milliers de kilomètres carrés de terres. Cela inclut également les zones agricoles, posant ainsi un risque significatif pour le secteur agricole. Ces dépôts causent des dommages aux cultures, allant de perturbations temporaires dans la physiologie des feuilles à des dommages mécaniques irréversibles. Cette situation se traduit par des récoltes de qualité inférieure dans les zones touchées (Craig et al., 2016 ; Ligot, et al., 2023 ; Ayris & Delmelle, 2012). D'autre part, les éruptions peuvent entraîner des dommages graves sur le bétail, allant jusqu'à une mortalité importante du cheptel due à l'ingestion de cendres (Craig et al., 2016; Bitschene et al., 1994). Tout ceci entraîne des pertes économiques pour les exploitants agricoles touchés ainsi que des pénuries alimentaires locales et régionales, dont la gravité varie en fonction de la magnitude de l'éruption.

Ainsi, la quantification des risques encourus par le secteur agricole face aux retombées de téphra revêt une grande importance. Cela permet non seulement d'établir des stratégies de prévention efficaces, mais aussi de renforcer la résilience des communautés confrontées à de tels événements. Le risque volcanique résulte de la combinaison du danger, de l'exposition et de la vulnérabilité (Blong, 1996). Si les deux premiers termes sont largement documentés dans la littérature scientifique, l'évaluation de la vulnérabilité reste encore largement sous-étudiée et peu développée. Cette lacune rend la quantification des risques particulièrement complexe à réaliser. Sans une compréhension approfondie de la vulnérabilité, il devient ardu de quantifier avec précision les risques auxquels une exploitation agricole peut être confrontée lors d'une éruption volcanique.

Les études qui évaluent la vulnérabilité des activités agricoles face aux retombées de téphra sont restreintes, se concentrant principalement sur les pertes de production individuelles (Ligot et al., 2023). Ils négligent les impacts en cascade qu'une perte d'élément peut avoir sur l'activité agricole, et ne considèrent donc pas une exploitation agricole comme un système intégré.

Ce mémoire de fin d'études vise à approfondir la compréhension de la vulnérabilité des exploitations agricoles en tant que système confronté aux retombées de téphra. Ceci en estimant de manière semi-quantitative les pertes économiques et les pertes de flux de matière provoquées par des dépôts de téphra d'épaisseur différentes. Cette approche holistique permet de saisir les dynamiques complexes régissant l'impact des chutes de téphra sur l'ensemble de l'exploitation agricole considérée. En analysant les interactions entre ses différents composants tels que les cultures et le bétail, les éléments les plus sensibles aux retombées de téphra pourraient être

identifiés, permettant ainsi de proposer dans le futur des mesures d'atténuation adaptées pour renforcer la résilience des exploitations agricoles face à ce risque volcanique spécifique.

Cette étude porte sur une région agricole située dans le canton de Guamote, en Équateur. Cette zone se trouve à environ cinquante kilomètres du volcan Sangay, lequel a entamé sa plus récente activité éruptive en 2019.

II. État de l'art

1. L'activité volcanique

L'activité volcanique engendre divers risques pour les sociétés, influencés par des facteurs tels que la forme du volcan, la composition du magma, la magnitude de l'éruption, la topographie locale et les conditions climatiques comme l'intensité du vent et des précipitations (Crisp, 1984). Parmi les principaux dangers pour les communautés se trouvent les téphra, les coulées pyroclastiques, les coulées de lave, les lahars, les inondations, les avalanches de débris, ainsi que les émissions de gaz toxiques (Blong, 1984).

Les éruptions volcaniques peuvent être explosives ou effusives, en fonction de la quantité de gaz dans le magma. Les volcans effusifs, comme le Piton de la Fournaise à la Réunion, libèrent une grande quantité de lave fluide qui s'écoule doucement, entraînant des explosions peu violentes. Les volcans explosifs, tels que le Vésuve en 79 après J.-C. et le Mont St Helens en 1980, libèrent peu de lave mais génèrent des explosions violentes et des nuées ardentes (Gertisser et al., 2023).

Pour évaluer l'ampleur d'une éruption volcanique explosive, l'Indice d'Explosivité Volcanique (VEI) est généralement utilisé (Tableau. 1). Contrairement aux séismes, l'intensité d'une éruption ne peut pas être mesurée directement. Ainsi, le VEI repose sur une combinaison de mesures et d'observations. Le volume de cendres émises est un critère important pour déterminer cet indice (Newhall & Self, 1982).

Tableau 1 - Indice d'explosivité volcanique (Kennedy, 2023)

<i>VEI</i>	<i>Principaux danger</i>	<i>Taille de la colonne éruptive</i>	<i>Volume de cendre</i>	<i>Empreinte du danger liée aux cendres</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Exemples</i>
1 Hawaïenne	Coulées de lave : 0 – 10 km Distance des cendres : < 1 km Éclaboussures : < 1 km	< 1 km	/	/	Quotidienne	Péninsules de Reykjanes (Islande)
2 Strombolienne	Coulées de lave : 0-10 km Distance des cendres : 1-10 km	1 – 5 km	< 0,1 km ³	> 1 km ²	Quotidienne	Heimaey (Islande)
3 Vulcanienne	Coulées de lave : 0-10 km Distance des cendres : 5-30 km Dômes de lave : < 1 km Coulées pyroclastiques : 0-15 km Lahars : 0-30 km	3 – 15 km	0,1 – 1 km ³	5 – 50 km ²	Annuelle	Eyjafjallajökull (Islande)
4-6 Plinienne	Distance des cendres : 10-100 km Coulées pyroclastiques : 0-30 km Lahars : 0-100 km	10 – 35 km	1 – 10 km ³	50 – 1000 km ²	10 – 100 ans	Kaharoa (Nouvelle-Zélande)

7-8 Ultra plinienne	Distance des cendres : 100-1000 km Coulées pyroclastiques : 10-50 km Lahars : 10-200 km	> 30 km	100 – 1000 km ³	> 1000 km ²	1000 – 100 000 ans	Taupo (Nouvelle- Zélande)
-----------------------------------	---	---------	-------------------------------	---------------------------	-----------------------	---------------------------------

La quantité de cendres n'est pas le seul facteur important, la durée de l'éruption et d'autres conditions influent également. Les phénomènes locaux, tels que les coulées pyroclastiques, les avalanches de débris, les lahars et les glissements de terrain, sont souvent les plus dévastateurs (Brown et al., 2017). Les téphra, comprenant les cendres, sont les plus fréquemment rencontrés, survenant dans plus de 90 % de toutes les éruptions, et constituent le danger volcanique le plus répandu, mais pas le plus dévastateur (Newhall & Hoblitt, 2002; Wilson et al., 2012).

2. Téphra : le produit le plus répandu des éruptions explosives

Le téphra est un matériau abrasif, résultant de la fragmentation des magmas et des roches volcaniques, se compose principalement de cendres volcaniques de moins de deux millimètres de diamètre et de fragments plus gros tels que des lapillis¹ ou des bombes volcaniques² (Fisher & Schmincke, 1984).

La genèse du téphra est le résultat de processus physiques complexes. Avant une éruption, le magma remonte et forme des bulles de gaz par exsolution³, qui restent piégées en raison de la viscosité élevée du magma (Michaud-Dubuy, 2019). Lorsque la pression diminue, le volume de gaz augmente jusqu'à ce que le magma se fragmente en particules plus ou moins grossières. Le degré de fragmentation influe sur la texture et la taille des fragments de téphra (Fowler et al., 2009). L'explosion propulse téphra et gaz dans l'atmosphère sous forme d'une colonne éruptive (Figure. 1). Le réchauffement de l'air dans la colonne éruptive par les matériaux volcaniques la dilate. Parfois, cela la rend moins dense que l'air ambiant, favorisant ainsi l'ascension d'un panache convectif par poussée d'Archimède. Ce panache peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de hauteur. À un niveau de flottabilité neutre, la colonne s'étale pour former une ombrelle volcanique (Figure. 1) (Sparks, 1986). Cependant, si elle devient trop dense par rapport au flux de matériaux pyroclastiques, elle peut s'effondrer sous son propre poids, entraînant la formation de coulées pyroclastiques (Figure.1), les phénomènes volcaniques les plus dangereux en raison de leurs vitesses et températures élevées (Wilson et al., 1980).

¹ Les lapilli sont des fragments de roche, de minéraux et de verre volcanique créés lors d'une éruption et mesurant entre 2 et 64 mm (Kennedy, 2023)

² Les bombes sont des morceaux de roche, de minéraux et de verre volcanique formés pendant une éruption et dont la taille dépasse les 64 mm (Kennedy, 2023)

³ L'exsolution, processus par lequel une solution solide monophasée initiale se décompose en un assemblage à deux phases, est piloté par la minimisation de l'énergie libre et se produit par diffusion (Parsons & Brown, 1991).

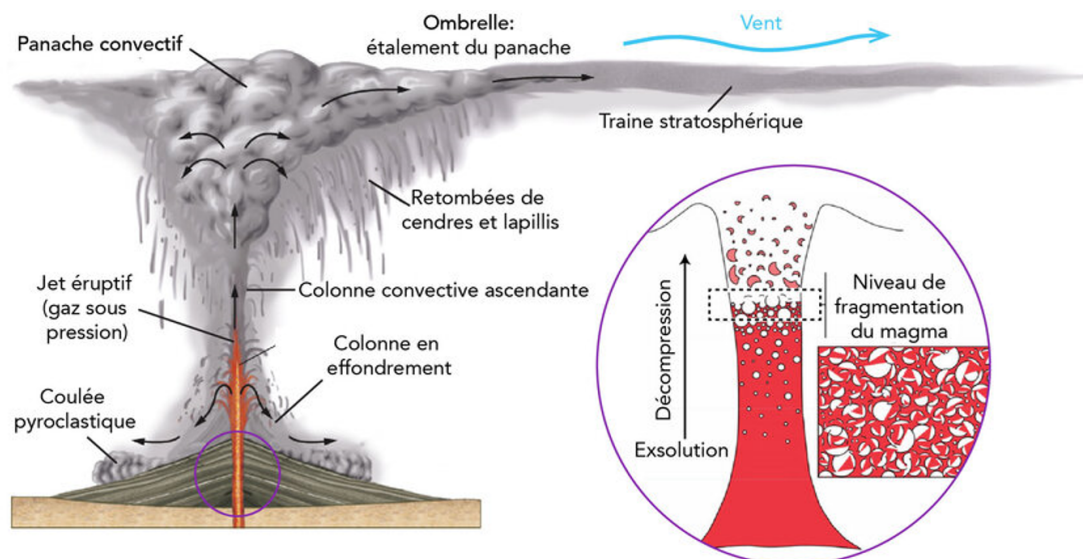


Figure 1 – Processus de fragmentation du magma et propulsion de téphra dans l'atmosphère (Michaud-Dubuy, 2019b).

Les éruptions volcaniques peuvent avoir des impacts considérables à diverses échelles, allant de zones proches du volcan, couvrant moins d'un kilomètre carré, à des régions vastes s'étendant sur des milliers de kilomètres carrés (Tableau. 1). Les plus gros fragments retombent rapidement près du volcan sous l'effet de la gravité, tandis que les particules plus fines peuvent rester en suspension dans l'atmosphère pendant des jours, voire des mois, avant de se disperser sur de grandes distances (Bonadonna et al., 2012). Cette dispersion est facilitée par la flottabilité de la colonne éruptive et l'action des vents, permettant ainsi le transport sur des distances considérables (Cuchiipe & Mishell, 2021). Les régions éloignées de la source volcanique recevront les particules plus fines qui seront davantage affinées par altération avant leur dépôt. Ainsi, la dispersion et la sédimentation des particules dépendent de leurs caractéristiques, des conditions atmosphériques, et de la dynamique du panache volcanique (Figure. 2). Les interactions entre les particules, telle que l'agrégation, ainsi que les instabilités gravitationnelles, influent sur la durée de séjour des particules dans l'atmosphère et peuvent accélérer la retombée des fractions le plus fines (Bonadonna et al., 2015).

De plus, le téphra peut servir de vecteur pour transporter divers éléments tels que des gaz, des aérosols et des sels, qui sont libérés lors d'une éruption et adsorbés dans la colonne éruptive (Armienta et al., 2002). Les particules les plus fines présentent une capacité d'adsorption accrue en raison de leur surface spécifique élevée, qui représente la quantité de surface par unité de masse (Thorarinsson, 1979).

L'analyse des dépôts de téphra lors des éruptions volcaniques est importante. En comprenant leurs propriétés physiques et chimiques, il devient envisageable d'anticiper les risques et de garantir la sécurité des populations et des infrastructures (Folch, 2012). De plus, cette compréhension contribue à améliorer la prédiction des éruptions et à faire progresser la recherche scientifique sur les phénomènes géologiques associés aux volcans (Rothery et al., 2022).

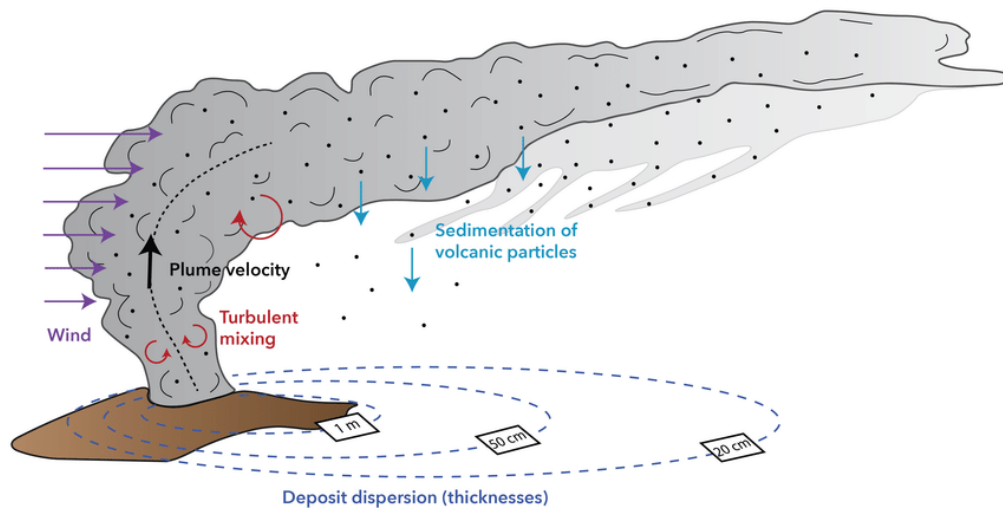


Figure 2- Effet du vent sur les flux turbulents et la dispersion des téphras – Vitesse du panache volcanique - Sédimentation des particules volcaniques (Michaud-Dubuy, 2019)

Les retombées de téphra peuvent avoir divers effets négatifs sur la santé humaine, les infrastructures et les écosystèmes (Figure. 3). Elles peuvent provoquer des problèmes respiratoires, endommager les bâtiments, perturber le trafic aérien et nuire à la faune, à la flore et aux sols. Toutefois, à long terme, le téphra peut aussi enrichir la fertilité des sols et favoriser la productivité agricole (Paredes-Mariño et al., 2022a). Les chutes de téphra affectent plusieurs composantes de la Terre considérée comme un système intégrant l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la technosphère, reflétant l'interconnexion entre les aspects naturels et humains. Chaque élément de ce système est essentiel, et la défaillance de l'un d'entre eux peut entraîner des répercussions en cascade sur les autres aspects du système (Gasparini & Garcia-Aristizabal, 2021; Pardo et al., 2015).

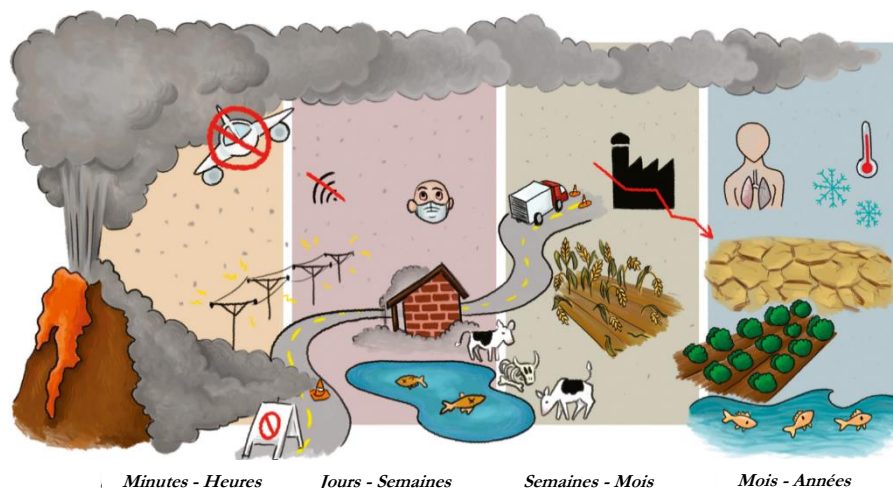


Figure 3 - Représentation schématique des impacts attendus à court et à long terme en raison d'une éruption explosive. Adapté de (Paredes-Mariño et al., 2022)

3. Les régions volcaniques

3.1. Proximité des volcans et densité de population

La plupart des volcans mondiaux se trouvent dans le bassin océanique du Pacifique, avec de nombreuses éruptions sous-marines (Crisp, 1984). Les éruptions terrestres surviennent principalement le long des marges des plaques tectoniques, notamment dans les zones de subduction (Figure. 4). Malgré les dangers que représentent les éruptions dans ces régions volcaniques, de nombreuses personnes choisissent d'y habiter en raison des sols riches et fertiles qu'elles offrent (Small & Cohen, 2004). Bien que les distributions des volcans et de la population humaine montrent des similitudes, les zones les plus peuplées ne coïncident pas toujours avec les zones volcaniques les plus actives (Figure. 4) (Small & Naumann, 2001b). Cependant, la rapide urbanisation et la croissance démographique dans les régions tropicales en développement, ainsi que l'expansion de l'agriculture dans les zones volcaniques fertiles, pourraient augmenter l'exposition de la population mondiale aux risques volcaniques en raison de l'occupation croissante de ces zones. Ces dynamiques pourraient avoir des répercussions significatives, tant au niveau local que mondial, dans les années à venir, particulièrement pour les populations rurales (Small & Naumann, 2001b).

3.2. La fertilité des sols volcaniques

Des régions agricoles très fertiles émergent dans des zones volcaniques jeunes où le processus de météorisation⁴ s'est produit. Près de 27% de la population active mondiale, soit 866 millions de personnes, travaille dans le secteur agricole, et une partie de cette population réside ces zones volcaniques (FAO, 2022). Bien qu'environ 1 % de la surface terrestre soit couverte par des sols d'origine volcanique, ceux-ci ont un potentiel agronomique important, étant le support de productions agricoles pour environ 10 % de la population mondiale (Small & Naumann, 2001b).

Le téphra déposé initialement ne favorise pas la croissance végétale en raison de son absence de matière organique, sa faible capacité d'échange cationique et sa faible teneur en phosphore (Craig, 2016). Cependant, les sols formés à partir du téphra altéré, tels que les andosols, deviennent très fertiles (Eswaran et al., 1993; Shoji et al., 1993). L'altération du téphra et la restitution des nutriments au sol peuvent prendre de deux à quatre ans (Becerra-Sanabria et al., 2007)

Ces sols présentent également des propriétés spécifiques de rétention d'eau grâce à leur porosité élevée et leur faible densité apparente, favorisant la croissance des plantes. Cependant, dans les zones affectées par des chutes de cendres fraîches, cette rétention d'eau peut devenir problématique en raison de l'homogénéité de la taille des particules (Maeda et al., 1977).

⁴ La météorisation correspond à la diversité des processus de dégradation des roches qui se produisent à la surface de la Terre (Étienne & André, 2003).

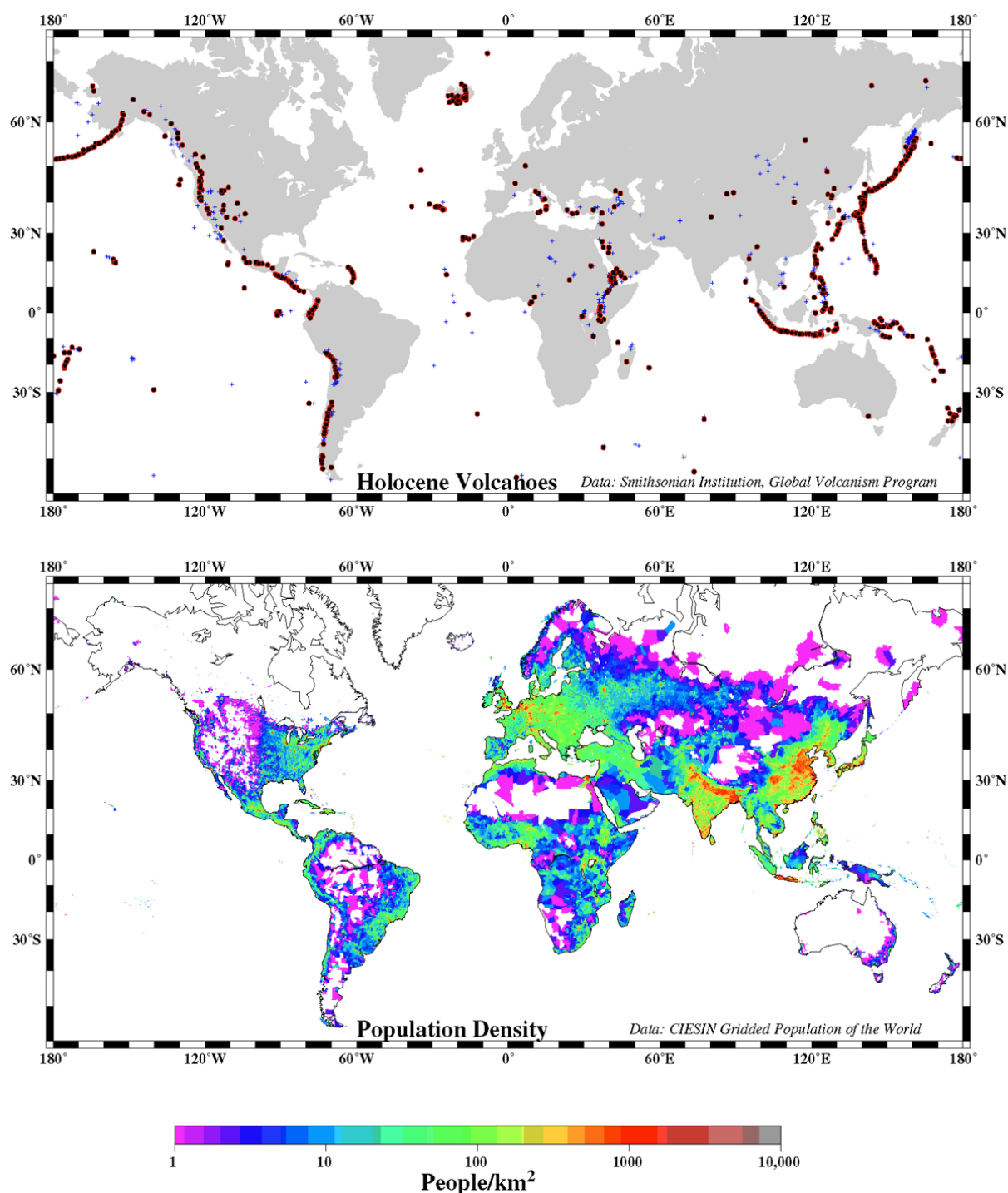


Figure 4 – Représentation de la répartition mondiale des volcans de l'Holocène et de la population humaine. Les volcans historiquement actifs sont représentés par des cercles rouges, tandis que ceux de l'Holocène⁵ sans éruptions historiques sont représentés par des croix bleues. La densité de population est affichée sur une échelle logarithmique (Small & Naumann, 2001b)

⁵ L'Holocène est une époque géologique qui s'étend sur les 12 000 dernières années et est toujours en cours (Vacchi et al., 2016)

4. Exploration de l'impact des éruptions volcaniques sur le secteur agricole

4.1. Notion de système

La nature interdépendante et complexe d'un système implique que toute modification, quelle qu'elle soit, d'un élément engendre des changements dans les autres composantes, impactant ainsi leurs interactions globales (Durand, 2017).

Étudier une exploitation agricole comme un système revient à considérer d'abord l'ensemble avant de se pencher de manière plus approfondie sur les différentes parties qui le composent. Il s'agit également de prendre en compte, même qualitativement, les relations internes essentielles, notamment leur articulation dans le temps. Le fonctionnement d'une exploitation ne se décrit pas par des relations linéaires, mais par des équilibres imbriqués et évolutifs. L'approche systémique vise à appréhender les phénomènes complexes dans leur globalité, en tenant compte des multiples interactions qui les animent, sans pour autant négliger l'importance de la démarche analytique préalable (Osty, 1978; *Ecoges*, 2017).

La vulnérabilité des exploitations agricoles aux retombées de téphra est multifactorielle et résulte généralement de l'interaction de différents éléments (Arnalds, 2013). Ainsi, une approche systémique s'impose, envisageant l'exploitation comme un ensemble complexe d'éléments interdépendants, où la disparition d'un élément pourrait perturber d'autres aspects de l'activité agricole.

4.2. Les impacts des dépôts de téphra sur la végétation

Les effets sur la végétation présentent une diversité d'impacts, ayant des répercussions à long terme sur l'élevage, l'agriculture, les activités humaines ainsi que la santé animale et humaine (Wilson et al., 2011). La magnitude des dommages physiques subis dépend de plusieurs facteurs, notamment l'épaisseur du dépôt de téphra, la taille et les caractéristiques physico-chimiques des particules de téphra, ainsi que la sensibilité de la végétation, influencée par des éléments tels que la morphologie et la phénologie des plantes, ainsi que la durée pendant laquelle elles sont exposées au dépôt de téphra (Craig et al., 2016b; Ayris & Delmelle, 2012).

En outre, les éruptions explosives peuvent endommager la végétation par d'autres mécanismes, en particulier les incendies déclenchés par la chaleur des cendres, ainsi que les effets chimiques des gaz toxiques qui se propagent à travers la pollution atmosphérique, les pluies acides ou la contamination des eaux souterraines (Delmelle, 2003). Lorsqu'il n'y a pas d'incendie, la température des dépôts de téphra joue également un rôle crucial dans l'impact sur la végétation. Les couches épaisses et chaudes de téphra peuvent entraîner des pertes importantes en un court laps de temps, tandis que les dépôts plus froids peuvent causer des pertes similaires sur une période prolongée (Leonard et al., 2005).

Avant même d'atteindre la surface terrestre, les particules de téphra peuvent être capturées par le feuillage des arbres ou des plantes basses (Ayris & Delmelle, 2012). La durée pendant laquelle ces particules demeurent sur les surfaces végétales dépend de divers facteurs physiques, dont la rugosité de la surface foliaire. En effet, une surface plus rugueuse offre davantage de points d'ancrage pour retenir les particules, alors qu'une surface lisse retiendra moins de particules (Xie et al., 2022). Les feuilles pubescentes, comme celles des plants de tomates, retiennent généralement plus de cendres que celles sans poils, comme les plants de piment, en raison d'une plus grande surface de collecte (Ligot et al., 2023; Smith & Staskawicz, 1977; Sæbø et al., 2012).

Par ailleurs, la structure globale des branches pour les arbres et des feuilles joue un rôle dans la rétention des particules. Le nombre de ramifications et la densité foliaire contribuent à fournir une plus grande surface de contact avec les particules, augmentant ainsi les chances de rétention. De même, la taille des feuilles, qu'il s'agisse de leur longueur, de leur largeur ou de leur surface individuelle, influence directement la quantité de particules qu'elles peuvent retenir (Xie et al., 2022). Enfin, la forme générale de la couronne d'un arbre est un facteur à prendre en compte. Une couronne dense et ramifiée peut capturer les particules plus efficacement qu'une couronne moins dense et peu ramifiée (Xie et al., 2022).

Ajouté à cela, l'humidité préalable des feuilles favorise la rétention des particules en créant une tension de surface, ce qui rend le dépôt plus homogène (Tabor, 1977). Toutefois, des conditions météorologiques telles que de fortes pluies peuvent entraîner l'érosion des cendres, annulant ainsi les effets de rétention de l'humidité (Ligot et al., 2023).

L'accumulation de téphra sur le sol peut étouffer ou ensevelir (Figure. 5) la structure végétale des plantes plus petites, provoquant des ruptures structurelles et une diminution, voire une interruption, de la photosynthèse, conduisant à la sénescence des plantes (Neumann, 1996). Les arbres et les plantes plus grandes peuvent également subir des dommages importants lorsque le téphra dépasse leur résistance mécanique (Ayrís & Delmelle, 2012). En revanche, les plantes plus petites comme les arbustes, les herbes et les mousses sont souvent ensevelies par le téphra et peuvent mourir en conséquence (Harris et al., 1987).



Figure 5- Ensevelissement de cultures de maïs après l'éruption du Tungurahua de 2015, Équateur (Ugrin, 2015)

En réaction aux dépôts de téphra, les végétaux peuvent développer divers mécanismes de survie, certaines espèces étant capables de supporter des périodes prolongées, jusqu'à plusieurs années, sous le téphra (Antos & Zobel, 1985). Une espèce végétale peut réagir de trois manières différentes : *tolérance*, *évitement* et *régénération* (Burylo et al., 2012). La tolérance implique que la plante puisse survivre et prospérer grâce à des adaptations morphologiques et physiologiques. D'autre part, la stratégie d'évitement comprend des actions telles que l'orientation des feuilles, la transpiration pour le refroidissement, et des ajustements dans la composition lipidique des membranes pour atténuer le stress thermique, par exemple (Tanveer et al., 2023). Quant au mécanisme de régénération, il désigne les processus par lesquels les plantes sont capables de se reproduire et de restaurer leur population après une perturbation (Buhk et al., 2007). La plasticité phénotypique permet à un seul génotype de présenter différentes apparences selon les environnements.

Les plantes montrent une remarquable plasticité dans de nombreux aspects écologiquement importants, tels que la morphologie, la physiologie, l'anatomie, le développement et la reproduction (Sultan, 2000).

Les cultures exposées aux retombées de téphra montrent une réduction de l'indice de surface foliaire (LAI), une mesure qui dépend de plusieurs facteurs incluant la taille des particules de cendres, les propriétés des plantes et les conditions environnementales. Cette diminution peut être utilisée comme un indicateur de la vulnérabilité des cultures et peut aider à anticiper les pertes de rendement (Ligot et al., 2023). Le LAI, qui mesure la quantité de feuillage dans le couvert végétal et détermine la surface d'interception du rayonnement incident et d'échanges gazeux avec l'atmosphère (Figure. 6), est une caractéristique écologique fondamentale (Kandasamy, 2013), essentielle pour la structure végétale et divers processus tels que la production primaire nette, l'utilisation de l'eau et des nutriments, ainsi que l'équilibre du carbone (Bréda, 2008).

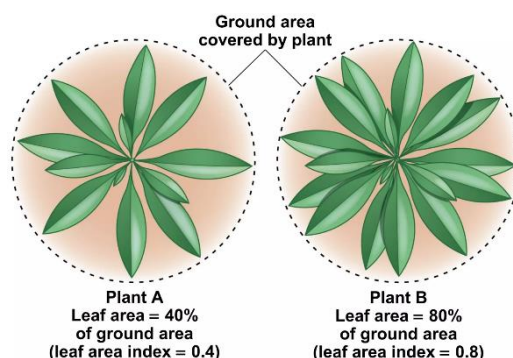


Figure 6- Représentation du LAI en fonction de la couverture foliaire (Abdellatif & Valdenebro, 2016)

Par ailleurs, l'abrasion causée par le téphra peut affaiblir les tissus végétaux, facilitant l'entrée de pathogènes qui endommagent davantage les plantes. Les tissus endommagés sont ainsi plus susceptibles d'être envahis par des parasites (Tarr, 1972).

Ces perturbations peuvent provoquer une perte d'énergie et un déséquilibre physiologique chez les plantes, conduisant à une défoliation et une baisse des rendements agricoles, ce qui engendre des pertes économiques pour les exploitants agricoles.

La reprise végétative, quant à elle, peut être freinée par des conditions de sols complexes. Ces dernières font référence à la formation d'une surface compacte due aux dépôts de téphra, ce qui restreint l'infiltration de l'eau et entrave la croissance des végétaux. Néanmoins, le téphra peut aussi agir comme un paillis, améliorant la capacité du sol à retenir l'eau en réduisant son évaporation grâce à ses propriétés thixotropes⁶ (Ugolini & Dahlgren, 2002). De plus, le déficit d'agents pollinisateurs diminue la dissémination du pollen, entravant la reproduction végétale. Les plantes recouvertes par des cendres entravent l'accès aux pollinisateurs et le transport de pollen d'une plante à l'autre. La présence des insectes et des oiseaux est essentielle dans le processus de développement et de maturation des fleurs et des fruits, ce qui a un impact majeur sur le rendement des cultures vivrières et horticoles ainsi que sur les revenus des agriculteurs (Cook et al., 1981).

⁶ Propriété d'un sédiment meuble et gorgé d'eau de devenir brusquement liquide sous l'effet d'un ébranlement mécanique qui remet les particules en suspension dans l'eau (Larousse, 2024.).

4.3. Les impacts des dépôts de téphra sur les animaux d'élevage

Les éruptions volcaniques ont souvent engendré divers impacts au niveau du bétail. L'éruption de 1991 du Volcán Hudson, au Chili, a eu des conséquences graves et répandues sur le bétail, entraînant une mortalité estimée à environ un million de moutons et plusieurs milliers de bovins (Wilson et al., 2011. Scasso et al., 1994). Des agriculteurs ont rapporté des impacts extrêmes sur plusieurs mois après l'éruption, avec des tempêtes de cendres continuant à affecter le bétail et à détruire les pâturages pendant des mois, voire des années. Les troupeaux ont subi des pertes importantes, principalement dues à l'ingestion de cendres et à la famine causée par la contamination des aliments et de l'eau (Wilson et al., 2011). De plus, la déshydratation causée par la contamination des sources d'eau par la cendre a participé à la perte de bétail. La cendre assèche également la végétation, autre source d'eau pour le bétail, aggravant ainsi leur situation. Dans certaines régions, les animaux sont restés piégés dans des marais boueux formés par les cendres, ce qui a entraîné de nombreux décès (Bitschene et al., 1994).

Le téphra, principalement les cendres, comporte des risques gastro-intestinaux pour les animaux d'élevage. Bien que des faibles dépôts puissent permettre le pâturage du bétail, leur adhérence sur la végétation peut causer des problèmes digestifs une fois ingérés. L'accumulation de cendres dans la panse des ruminants peut créer des blocages, obstruant les intestins et provoquant un gonflement contre les poumons, entraînant potentiellement la mort par asphyxie (Lebon, 2009 ; Bitschene et al., 1994). De plus, l'inhalation de cendres peut entraîner une surproduction de mucus dans les poumons, causant des inflammations, un risque accru dans les régions plus éloignées du volcan où les particules fines, soumises à l'érosion éolienne, sont transportées (Wilson et al., 2011). Les éruptions volcaniques perturbent également l'alimentation des animaux d'élevage en altérant la composition de leurs rations alimentaires. Selon l'épaisseur du dépôt de téphra, les terres de pâturage peuvent être ensevelies, entravant leur régénération et pouvant conduire à l'abandon des exploitations agricoles (Craig et al., 2016c).

Les particules plus fines ont été associées à l'usure des dents du bétail, résultant du pâturage d'herbes recouvertes de cendres. Les remobilisations, en grande partie par le vent, répétées aggravent ce problème (Craig et al., 2016c). De plus, la mobilité des animaux peut être affectée, notamment chez les ovins dont les particules s'incrudent dans la laine (Figure. 7), augmentant leur fragilité et compromettant leur capacité à supporter un surplus de poids dû à l'accumulation de cendres (Inbar et al., 1995).



Figure 7 - Destruction de la prairie à destination de alimentation des bovins après éruption du Tungurahua, Equateur (EFEverde, 2014) - Moutons mérinos couverts de cendres à la suite de l'éruption du Ruapehu en 1995-1996 (Wilson & Kaye, 2007)

Outre les effets physiques, les impacts chimiques potentiels sont à considérer. À la suite d'une éruption volcanique, l'accumulation de fluorure (F⁻) dans la végétation peut représenter un danger pour les animaux de pâturage. Cet élément, généralement contenu dans le téphra peut être libéré sur une période relativement longue. Lors d'événements éruptifs antérieurs en Islande et au Chili, le fluorure a été identifié comme la cause principale d'intoxication des animaux (Araya et al., 1993).

Peu d'événements rapportent l'évacuation du bétail pendant les crises volcaniques, malgré l'importance économique du bétail pour les agriculteurs (FAO, 2024a). Généralement, la décision d'évacuer le bétail repose sur les agriculteurs eux-mêmes, mais ces derniers sont souvent confrontés à des contraintes financières et logistiques qui les empêchent d'agir efficacement. Seule une fraction du bétail parvient à être évacuée, entraînant la perte de nombreux animaux ou leur vente à perte ultérieurement (Wilson et al., 2012). Les évacuations peuvent ne pas être avantageuses pour les agriculteurs sur le long terme. (Wilson et al., 2009). Le coût élevé des évacuations rend cette mesure inaccessible pour la plupart des exploitants, et les animaux évacués ne peuvent être ramenés chez eux rapidement en raison du manque de nourriture et de surfaces pastorales disponibles. Cette situation entraîne une pression supplémentaire sur le marché, obligeant les agriculteurs à vendre leur bétail à des prix dérisoires, ce qui compromet leur capacité à se remettre des effets de l'éruption. La récupération de la végétation et l'accès au crédit sont devenus des facteurs essentiels pour la reconstitution des cheptels et la survie des exploitations agricoles, tandis que dans les zones les plus touchées, l'abandon des terres agricoles est une réalité, accentuant ainsi les difficultés économiques locales (Wilson et al., 2011).

4.4. Les impacts des dépôts de téphra sur les ressources en eau

Les dépôts de téphra peuvent entraîner des répercussions significatives sur les approvisionnements en eau, engendrant des altérations physiques et chimiques à court terme de la qualité de l'eau, une augmentation de l'usure et des dommages aux systèmes de distribution, ainsi que des défaillances dues aux opérations de nettoyage des cendres (Stewart et al., 2006).

Les activités agricoles modernes, telles que l'abreuvement du bétail, l'irrigation, et les usages domestiques, sont essentiellement tributaires de l'eau. En effet, le secteur agricole est le plus grand utilisateur mondial d'eau, avec plus de 70 % du prélèvement total d'eau douce (WWAP, 2003; Wilson et al., 2010).

Les dépôts de téphra peuvent avoir des répercussions significatives sur les systèmes d'eau agricoles, comme en témoigne l'éruption du Mont St Helens en 1980. Dans le comté de Kittitas, par exemple, ces dépôts ont entravé les canaux d'irrigation, nécessitant un nettoyage fréquent. En revanche, le comté de Ritzville, alimenté principalement par des eaux souterraines, a démontré une résilience accrue face à ces perturbations. Cette disparité de réaction souligne l'importance de la source d'eau utilisée et de la capacité de stockage dans la résilience des approvisionnements en eau agricoles (Wilson et al., 2010).

Après une éruption volcanique explosive, la demande en eau connaît une augmentation significative, en raison des besoins accrus en nettoyage. Cela englobe le nettoyage des cultures, des équipements, des bâtiments et des véhicules agricoles (Stewart et al., 2006a). La formation d'une croûte hydrophobe sur la cendre déposée peut également réduire l'infiltration de l'eau dans le sol, augmentant ainsi les besoins en irrigation dans certaines régions (Leavesley et al., 1989).

En outre, les dépôts de téphra présentent des risques de contamination de l'eau, notamment par des éléments lessivables tels que le fluorure, qui peuvent affecter la santé du bétail (Witham et al., 2005). D'autre part, ils peuvent augmenter la turbidité de l'eau à des épaisseurs supérieures à 2 mm, ce qui peut compromettre la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation et d'autres besoins agricoles (Stewart et al., 2006b).

5. Le risque volcanique : une évaluation multidimensionnelle

Le risque représente la probabilité qu'un événement néfaste se produise. Son évaluation est rendue compliquée en raison de la diversité des dangers présents lors des phases d'instabilité et d'éruption, qui se manifestent sur de vastes échelles spatiales et temporelles. Élaborer une méthode d'évaluation des risques liée aux éruptions est complexe en raison de la nature multidimensionnelle et de la dynamique inhérente à ces risques (Wisner, 2014).

Cependant, la réalisation d'évaluations de risques est nécessaire pour guider les décisions et atténuer l'impact des dangers volcaniques afin de permettre la construction de sociétés résilientes face aux éruptions (Fournier, 1979). Cela implique de développer une compréhension holistique de la manière dont les aspects sociaux, tels que les individus, les infrastructures et les activités agricoles, réagiront lors de futures éruptions (Deligne et al., 2021).

Le risque est généralement défini comme une perte résultant de la combinaison de dangers, d'expositions et de vulnérabilités (Figure. 8) (Blong, 1996).

Risque =

Danger

x

Exposition

x

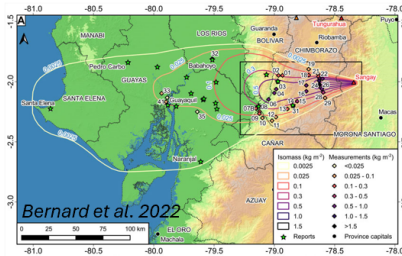
Vulnérabilité

Isopleth

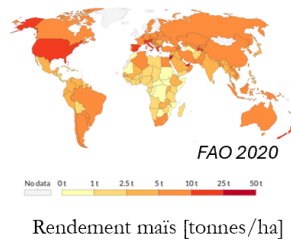
Production agricole mondiale

Saisonnalité des cultures

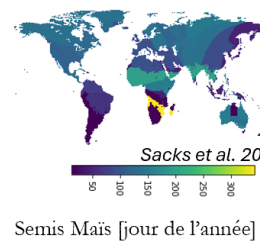
Fonction de fragilité



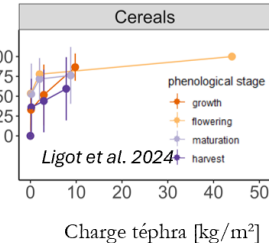
Distribution de la taille des grains
provenant du volcan Sangay [kg/m²]



Rendement maïs [tonnes/ha]



Semis Maïs [jour de l'année]



Charge téphra [kg/m²]

Figure 8 - Evaluation des risques suite à un dépôt de téphra. Adapté de (Ligot, 2022)

Le danger est défini comme la probabilité qu'une certaine zone soit affectée par une éruption volcanique (Alberico et al., 2002). L'exposition représente le nombre de vies ou la valeur monétaire des biens en danger dans une zone volcanique. Elle peut être évaluée en prenant en compte la valeur totale des biens matériels exposés (Bardintzeff, 2021). La vulnérabilité, un concept clé dans l'évaluation des risques, quantifie le pourcentage de biens susceptibles d'être perdus en raison d'un événement volcanique donné. Les évaluations de la vulnérabilité prennent en compte la manière dont les caractéristiques d'un système influencent les impacts sous différentes intensités de danger.

Les conséquences d'une éruption volcanique dépendent non seulement de la magnitude de l'événement, mais également de la vulnérabilité sociale, culturelle et préexistante. Des facteurs divers tels que l'utilisation des terres, la répartition de la population, la gouvernance, la perception des risques, l'expérience passée et même la chance jouent un rôle dans la réponse à l'aléa volcanique, comme souligné par (Ágústssdóttir, 2015a).

La vulnérabilité des exploitations agricoles aux dépôts de téphra varie en fonction de plusieurs facteurs. Les fermes pastorales, par exemple, présentent une certaine résilience face à des retombées de cendres légères à modérées (≤ 25 millimètres), tandis que des dépôts plus épais peuvent avoir des conséquences plus graves, notamment en ensevelissant les zones de pâturages et en contaminant les sources d'eau (Wilson et al., 2011).

Par ailleurs, les exploitations horticoles sont généralement plus sensibles aux dépôts de téphra, en raison de divers facteurs tels que la saison des cultures, le stade de maturité des plantes, la quantité et la solubilité des cendres, ainsi que les conditions météorologiques suivant le dépôt ; Wilson & Kaye, 2007).

Comme indiqué précédemment, l'évaluation des risques repose sur diverses variables. Actuellement, le danger est bien documenté dans la littérature et peut être quantifié. Des modèles probabilistes tels que TEPHRA2 et BET_VH sont couramment utilisés pour cette quantification. TEPHRA2 prévoit les retombées et dépôts de cendres volcaniques en utilisant une approche d'advection-diffusion-sédimentation pour calculer la quantité de particules déposées au sol lors d'une éruption (Bonadonna et al., 2005). BET_VH, quant à lui, compile de manière exhaustive toutes les informations disponibles sur un volcan ainsi que les incertitudes associées (Thompson et al., 2017 ; Tonini et al., 2015). L'exposition est également relativement bien comprise et peut

être évaluée par télédétection. Les capteurs multispectraux à bord des satellites offrent des décennies de surveillance mondiale de la végétation, permettant de capturer la réponse de la végétation après des retombées de téphra (Biass et al., 2023).

Cependant, la vulnérabilité reste mal comprise, ce qui empêche de quantifier de manière fiable les risques pour l'agriculture en cas d'éruptions volcaniques. Il est donc nécessaire de mener des études sur ce sujet afin d'enrichir les connaissances et de mieux caractériser cette variable.

Les rares modèles de vulnérabilité disponibles dans la littérature permettent de relier l'intensité du danger aux éléments exposés. Parmi ceux-ci, les fonctions de fragilité peuvent être citées (Figure 9). Elles établissent un lien entre le niveau de danger, évalué à travers des indicateurs tels que l'épaisseur du dépôt de téphra, et les conséquences qui en découlent, comme les pertes de récoltes agricoles ou de bétail. (Hayes et al., 2024). Cependant, ces fonctions peuvent être contraignantes car elles nécessitent une compréhension quantitative précise des impacts potentiels (Wilson et al., 2014). De plus, la disponibilité limitée des données peut compliquer l'analyse, et les incertitudes dans les modèles de vulnérabilité ne sont pas toujours bien quantifiées, ce qui peut introduire des biais significatifs dans les prédictions de ces fonctions de fragilité (Ligot et al., 2022).

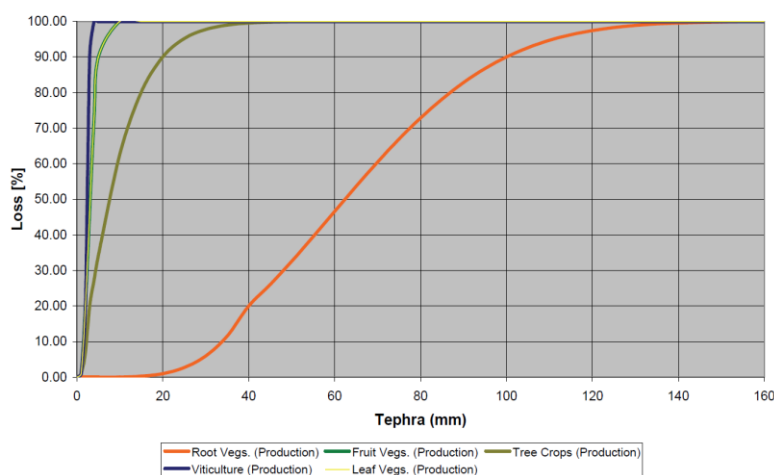


Figure 9 - Fonction de fragilité concernant la production horticole exprimant la perte de rendement (%) selon une certaine épaisseur de téphra (mm) (Wilson & Kaye, 2007b)

6. La résilience des exploitations agricoles face à l'aléa volcanique

6.1. Santé globale de l'écosystème

Les systèmes naturels sont constamment en évolution. Les éruptions volcaniques, survenant brusquement, peuvent entraîner des dommages importants en raison du manque de temps pour anticiper et s'adapter (Ágústsdóttir, 2015). Ces perturbations ont souvent des effets prolongés et déclenchent des réactions en cascade entraînant des dommages supplémentaires aux systèmes. La préservation des écosystèmes sains et une gestion environnementale adéquate sont cruciales pour réduire les risques de catastrophe, comme le souligne le Cadre d'Action de Hyogo/Sendai de l'UNISDR⁷ (Aitsi-Selmi et al., 2016).

La résilience aux perturbations causées par des chutes de téphra dépend de la santé globale de l'écosystème (Ágústsdóttir, 2015). Les plantes plus grandes et plus robustes ont une meilleure probabilité de survie comparativement aux plantes plus petites ou stressées. De plus, une

⁷ United Nation Office for Disaster Risk Reduction

végétation dense et robuste limite le transport secondaire du téphra, accélérant ainsi le processus de récupération. Les zones peu végétalisées et déjà fragilisées sont plus vulnérables, car le téphra y reste instable, pouvant être remobilisé par les vents, et pouvant causer davantage de dommages (Ágústsdóttir, 2015 ; Scheffer et al., 2001). En restaurant les terres vulnérables et en encourageant la diversité des écosystèmes (Figure. 10), leur capacité à supporter les retombées de téphra est renforcée, augmentant ainsi leur résilience et réduisant les coûts pour la société. Cette diversité peut améliorer la résilience aux chocs extrêmes, ce qui bénéficie à la souveraineté alimentaire, aux revenus et aux services écosystémiques (Díaz & Malhi, 2022; Sari et al., 2023).

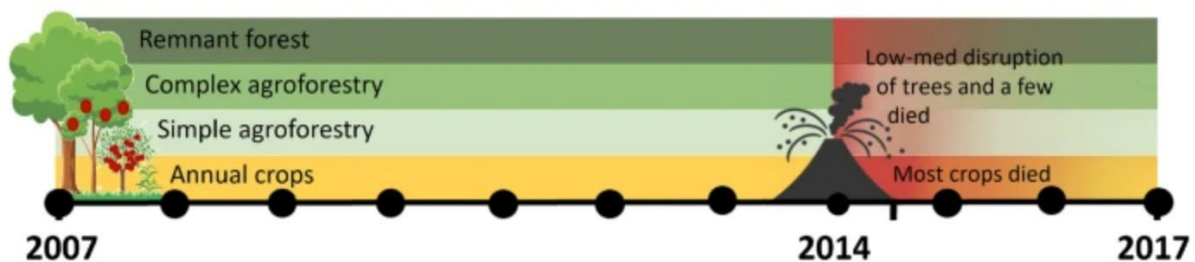


Figure 10 - Diversité des arbres et résilience socio-écologique de l'agroforesterie après le dépôt de cendres volcaniques en Indonésie (Sari et al., 2023)

6.1.1. Résilience des exploitations agricoles grâce à l'agroécologie

Les systèmes agricoles traditionnels se distinguent des monocultures de l'agriculture industrielle par leur diversité de méthodes de gestion, favorisant ainsi la biodiversité fonctionnelle dans les champs et soutenant la résilience des agroécosystèmes (Altieri et al., 2015). Les pratiques traditionnelles offrent une résilience, grâce à des stratégies telles que la diversification des cultures, la conservation de l'eau et des sols, et la préservation de la biodiversité agricole (Denevan, 1995). Cette diversité agroécologique joue un rôle essentiel dans la stabilisation des agroécosystèmes, offrant ainsi une voie prometteuse pour concevoir des systèmes agricoles résilients face aux chocs environnementaux et climatiques, y compris les éruptions volcaniques et leurs effets associés. Dans ce contexte, les pratiques agricoles traditionnelles et la diversité des cultures peuvent jouer un rôle dans la résilience des communautés agricoles en leur permettant de s'adapter et de se rétablir après de tels événements (Sari et al., 2023).

L'agroécologie est une approche intégrée qui combine des concepts écologiques et sociaux pour concevoir et gérer des systèmes alimentaires durables (Figure.11). Elle vise à optimiser les interactions entre les plantes, les animaux, les humains et l'environnement, tout en garantissant des systèmes alimentaires équitables où les individus ont le choix sur ce qu'ils consomment et comment cela est produit (FAO, 2024)

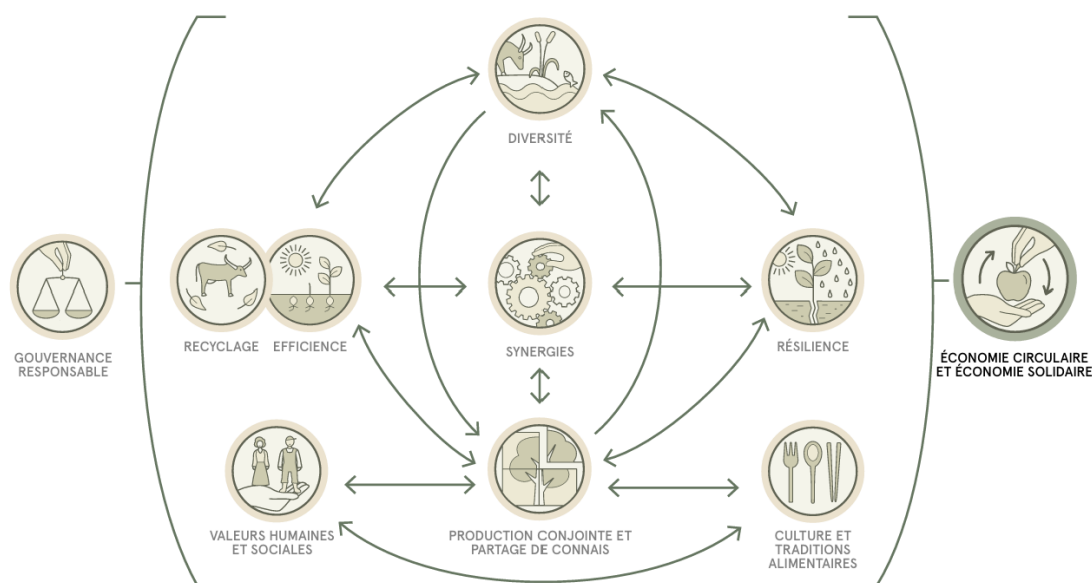


Figure 11 - Les 10 éléments de l'agroécologie établis par la FAO définissant les principes de l'agroécologie (FAO, 2024)

Pour réduire efficacement les risques, il est indispensable d'avoir une gouvernance robuste, une coordination entre les différents secteurs et une harmonisation des politiques concernant l'utilisation des terres, l'agriculture, la gestion des ressources naturelles (Ágústsdóttir, 2015).

6.1.1.1. Les systèmes mixtes agriculture-élevage

Les systèmes mixtes agriculture-élevage (SMAE) se présentent comme des solutions pour relever les défis de l'agriculture dans le cadre de l'approche agroécologique. Ces systèmes, qui intègrent diverses activités agricoles et d'élevage, offrent une gamme étendue de services dépassant la simple production alimentaire. Ils favorisent la diversité, la synergie, le recyclage et la résilience, qui sont parmi les dix éléments clés de l'approche agroécologique définie par la FAO (FAO, 2024; Steinfeld et al., 2006).

Les SMAE sont largement répandus à travers le monde, en particulier dans des régions telles que l'Amérique latine, l'Asie et l'Afrique. Ils jouent un rôle pour environ les deux tiers de la population mondiale, qui dépendent directement ou indirectement de ces systèmes pour leur alimentation et leurs moyens de subsistance (Stark et al., 2017; Altieri et al., 2015).

De plus, ils favorisent également l'autonomie des agriculteurs en réduisant leur dépendance à l'égard des fournisseurs externes et en leur permettant de mieux contrôler leur production et leur commercialisation. D'autre part, ces systèmes contribuent à la préservation de l'environnement en réduisant la pollution et en améliorant la fertilité des sols grâce à l'utilisation de déjections animales comme fertilisants organiques (Rufino et al., 2009).

7. Réduction des impacts sur les exploitations agricoles

La restauration des sols après l'accumulation de téphra est importante afin de permettre une reprise rapide des activités agricoles (Titus & Tsuyuzaki, 2003). Les processus d'érosion éolienne et hydrique éliminent progressivement le téphra des surfaces végétales. Cependant, l'humidification

du téphra peut également prolonger sa présence en formant une croûte sur les surfaces végétales (Seymour et al., 1983).

Pour atténuer les effets des dépôts de téphra, l'une des méthodes les plus couramment utilisées consiste à les intégrer dans la couche supérieure du sol. Cela favorise leur assimilation rapide et leur transformation, tout en améliorant l'aération du sol grâce à l'activité biologique (Neild et al., 1998). Dans certains cas, l'utilisation d'outils agricoles tels que les chisels, les burins ou les charrues à sillons peut être nécessaire pour briser la croûte de cendres, en fonction des ressources disponibles. De plus, il peut être nécessaire de mélanger le sol après plusieurs cycles de culture, en raison de l'accumulation de particules plus grossières en surface. La végétation existante, notamment les arbres aux racines profondes, peut également contribuer à la formation de matière organique nécessaire au développement du sol, bien que cela puisse prendre plusieurs décennies (Lebon, 2009).

Selon l'ampleur des dommages, la restauration naturelle peut prendre des décennies à des millénaires, mais l'intervention humaine, telle que le reboisement et l'ajout de matière organique, peut accélérer le processus (Saputra et al., 2022).

Les cultures recouvertes de cendres ainsi que les animaux sont souvent nettoyés avec de l'eau de façon post-éruptive (Figure. 12). L'utilisation d'eau augmente de manière significative après une chute de cendres volcaniques, car les communautés touchées commencent les opérations de nettoyage (Wilson et al., 2010).

Dans la région touchée par les éruptions explosives du volcan Tungurahua (1999-2014), les agriculteurs ont adopté diverses mesures pour atténuer les impacts des retombées de cendres sur les cultures. Ces techniques, adaptées à chaque type de culture, visent à minimiser les dommages et à préserver la productivité agricole. Par exemple, les feuilles des pommes de terre sont nettoyées à l'eau pour éviter l'obstruction des stomates, tandis que les plants de maïs sont secoués manuellement pour retirer les cendres. Les fèves sont nettoyées manuellement pour garantir leur croissance, et les oignons blancs sont nettoyés après la récolte pour assurer leur qualité. Pour les pâturages, les agriculteurs dépoussièrent l'herbe afin de maintenir un fourrage sain pour le bétail. Ces méthodes témoignent de l'adaptation des agriculteurs face aux défis posés par les chutes de téphra (Ligot, 2022).



Figure 12 - Nettoyage à l'eau de cultures après l'éruption du Taal aux Philippines en 2020 (S et al., 2020)

III. Objectifs du travail

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est de décrire semi-quantitativement la vulnérabilité des exploitations agricoles aux éruptions volcaniques, en particulier face aux retombées de téphra.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- i) Caractériser le fonctionnement global, la structure, ainsi que les performances agroécologiques d'exploitations agricoles, prises comme système, dans un contexte *hors éruption*.
- ii) Évaluer la situation économique des exploitations agricoles en période *hors éruption* et en *période éruptive*, en tenant compte de la temporalité de l'événement volcanique pour identifier les pertes économiques des différentes activités agricoles du système.
- iii) Projeter la vulnérabilité, en évaluant la perte des éléments non mesurables sur le plan économique, en plus de ceux mesurables économiquement, en *période éruptive*, en considérant la temporalité de l'événement volcanique.

IV. Matériels et méthodes

1. Exploration de la zone d'étude

Cette étude porte sur le canton de Guamote en Équateur, situé dans la région de Chimborazo, principalement touché par l'activité volcanique du volcan Sangay (Figure. 14). Bien que la région puisse également être affectée par d'autres volcans, tel que le Tungurahua, en fonction de la magnitude des éruptions, le Sangay, étant le plus proche et potentiellement le plus impactant, sera le sujet de cette étude.

1.1. Description du volcan Sangay

Situé à 5 286 mètres d'altitude dans la province de Chimborazo en Équateur, le volcan Sangay est l'un des plus actifs de la région andine. Depuis mai 2019, il est en éruption, générant des coulées de lave et des projections de téphra. Ces éruptions, bien que quasi-constantes, peuvent parfois connaître des phases plus intenses, provoquant des nuées ardentes et des émissions de téphra en direction de l'ouest du pays, affectant les populations des régions andines et côtières (Figure. 13). Jusqu'à ce jour, la localisation du volcan dans un parc national a limité son impact sur les populations paysannes de la région, la ville la plus proche étant à environ quarante kilomètres (Hidalgo et al., 2022; Hidalgo et al., 2023).

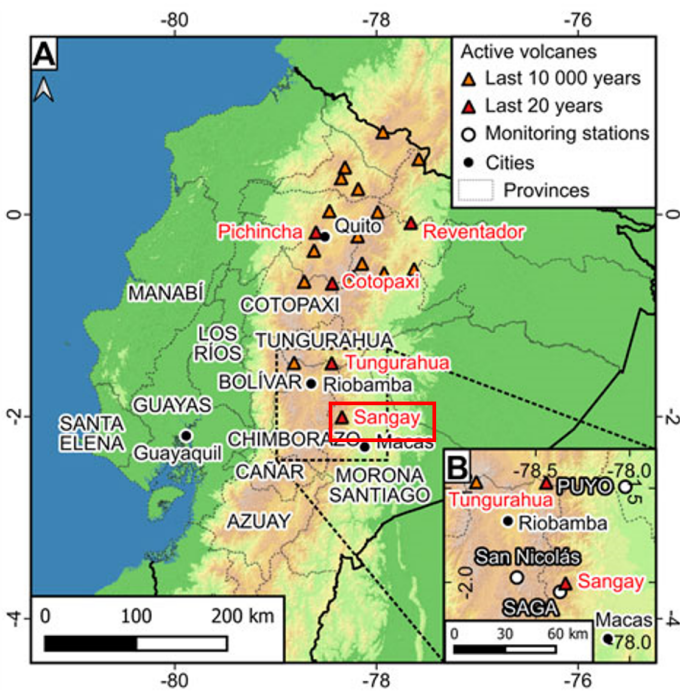


Figure 14 - Localisation du Sangay, Equateur (Hidalgo et al., 2022)

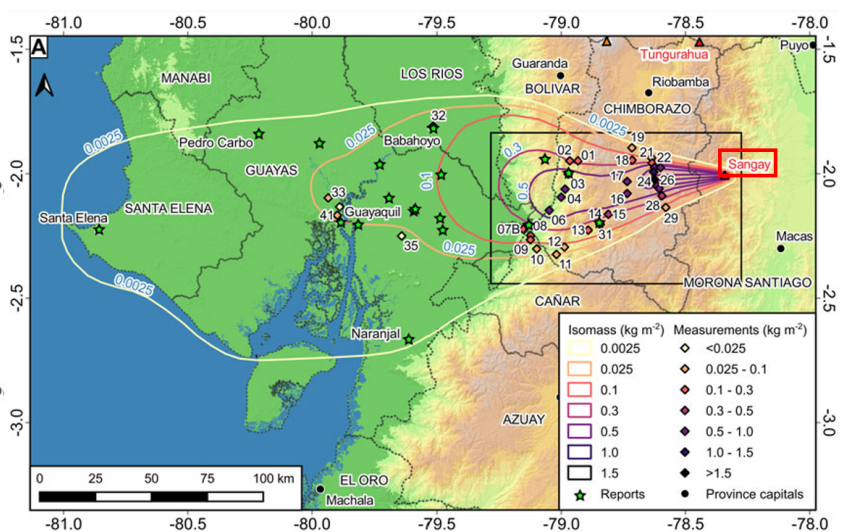


Figure 13 - Représentation des différents dépôts de téphra (kg/m^2) lors de l'éruption de 2020 (Hidalgo et al., 2022)

Entre 2001 et 2020, le Sangay a connu des périodes de calme prolongé, marquées par une faible activité sismique, des émissions de SO_2 restreintes et des nuages de cendres peu importants (Vasconez et al., 2022). Cependant, depuis 2019, son activité éruptive a nettement augmenté, avec une fréquence accrue des événements sismiques, des émissions de SO_2 plus importantes, et une observation plus fréquente d'incandescence et de téphra. En 2021, des éruptions explosives ont produit des colonnes éruptives atteignant neuf kilomètres au-dessus du cratère, enregistrant un VEI de 3 (Tableau. 1). Ce niveau correspond à une éruption vulcanienne caractérisée par des coulées de lave, des écoulements pyroclastiques, et des lahars, avec une colonne de cendres

pouvant monter jusqu'à 10 kilomètres, un volume de cendres de 0,1 à 1 kilomètre cube, et une zone de danger s'étendant sur 5 à 50 kilomètres carrés (Ortiz et al., 2021; Hidalgo et al., 2022).

Cette éruption a eu des conséquences néfastes pour l'agriculture, causant d'importantes pertes économiques en endommageant environ 80 000 hectares de cultures en 2020. Ces dommages ont exacerbé les difficultés économiques déjà existantes, particulièrement durant la pandémie de Covid-19 (Menéndez, 2020).

1.2. Conditions climatiques régionales

La zone centrale de la vallée inter-andine, où se trouve le canton de Guamote, est caractérisée par des températures variant de 2 à 19 °C et des précipitations entre 500 et 1 500 mm par an. Les altitudes, qui comprennent des terres cultivables, varient entre 1 500 et 3 200 mètres. Les zones de páramo⁸ peuvent atteindre jusqu'à 4 650 mètres, caractérisées par une végétation composée de graminées d'altitude, rendant les cultures impossibles à ces hauteurs (Aguayo & Suárez-Duque, 2020). Ces conditions sont influencées par la Zone de Convergence Intertropicale⁹ (Lasso & Espinosa, 2018) avec une saison des pluies concentrée entre avril et août, due au transport d'humidité depuis l'Amazonie et à la topographie des Andes (Lasso & Espinosa, 2018; Ilbay-Yupa et al., 2021; Rollenbeck & Bendix, 2011). Ces caractéristiques climatiques façonnent l'agriculture locale, influençant les cycles de développement des cultures (Ray et al., 2015).

1.3. Description de l'activité agricole régionale

Les bassins inter-andins de la Sierra du Nord sont marqués par des dépôts volcano-sédimentaires formés par l'activité des stratovolcans environnants, tels que le Tungurahua, le Sangay et le Cotopaxi, parmi les plus actifs. Malgré un climat peu propice à l'agriculture, en raison de l'altitude élevée, ces régions sont utilisées principalement pour le pâturage extensif (Lasso & Espinosa, 2018). Dans les Hautes Terres, l'agriculture, principalement pratiquée dans de petites exploitations, est importante pour assurer la sécurité alimentaire de la région (David Salazar et al., 2013). Les cultures principales telles que le maïs, la pomme de terre, l'orge et le blé jouent un rôle vital dans l'économie locale. Ces cultures ancestrales sont essentielles pour maintenir les traditions agricoles et assurer la subsistance des populations des Hautes Terres.

⁸ Le páramo est un écosystème montagnard d'Amérique du Sud qui offre une biodiversité abondante et joue un rôle essentiel dans la régulation de l'eau, bénéficiant ainsi aux communautés environnantes en cas de sécheresse (Portillo, 2023).

⁹ La zone de convergence intertropicale est une région équatoriale caractérisée par une large bande de faible pression atmosphérique où l'ascension de l'air chaud et humide provoque des précipitations abondantes et des phénomènes orageux (Schneider et al., 2014).

2. Méthode de collecte des données

Pour cette étude, les données ont été recueillies auprès de plusieurs exploitants agricoles du canton de Guamote. À cet effet, une enquête de terrain a été réalisée en Équateur entre le 1^{er} et le 18 septembre 2023. Durant cette période, des entretiens ont été menés dans cinq exploitations agricoles situées dans un rayon d'environ cinquante kilomètres autour du volcan Sangay (Figure. 15).

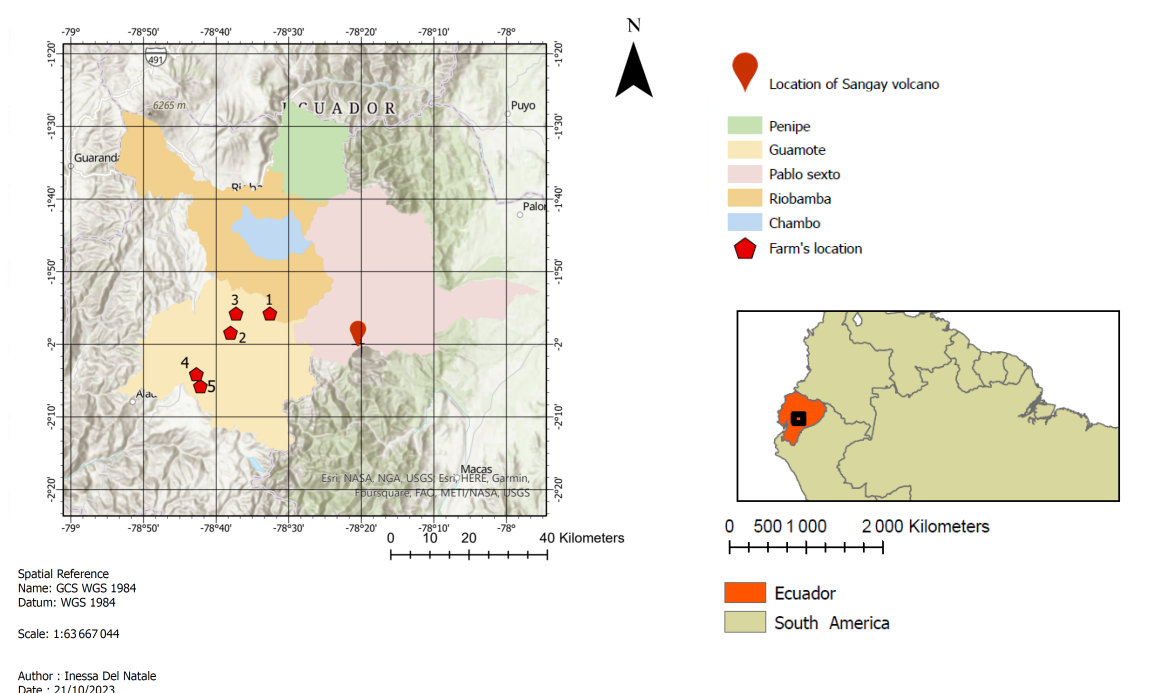


Figure 15 - Localisation géographique des cinq exploitations agricoles où les entretiens ont été menés

Deux équipes ont été formées pour mener cinq entretiens dans un délai défini. Ceux-ci ont été menés à l'aide d'un questionnaire initialement rédigé en anglais puis traduit en espagnol, couvrant sept catégories principales (Annexe. A). Cette démarche vise à réaliser des entretiens semi-structurés en utilisant des questions clés pour explorer divers aspects. La conception d'un tel programme nécessite de formuler des questions permettant de recueillir un large éventail d'informations tout en répondant aux objectifs de la recherche (Gill et al., 2008). Ces catégories comprennent :

1. Informations de contact et généralités sur l'exploitation
2. Système d'élevage
3. Système de culture
4. Main-d'œuvre
5. Dépenses et revenus
6. Préoccupations pour l'avenir
7. Volcan et chutes de téphra

Les entretiens ont été menés dans le but de recueillir des informations sur la gestion des exploitations agricoles, tant en production animale qu'en production végétale. À travers une série de questions, les exploitants agricoles ont été sollicités pour fournir des détails précis sur différents aspects de leur exploitation, notamment la taille, le mode d'élevage, le système de culture, les effectifs, les dépenses, les revenus, ainsi que les appréhensions liées à leur activité agricole. Ceci dans le but de pouvoir caractériser de manière fiable le mode de conduite de leur exploitation et d'y appliquer une contrainte volcanique afin d'examiner dans quelle mesure cette conduite agricole peut subir des pertes.

La partie consacrée à la description générale de l'exploitation a rassemblé des informations telles que sa superficie totale et le type de production (cultures, élevage). Ensuite, le système d'élevage a été examiné, couvrant les espèces élevées, leur mode de conduite (intérieur ou extérieur), leur alimentation, les soins vétérinaires, les ventes d'animaux et la production destinée à la consommation personnelle. De même, le système de cultures a été examiné, comprenant les types de cultures, les pratiques culturales, l'utilisation de semences et de produits chimiques, ainsi que les ventes et la conservation des récoltes.

Ces données sur le système d'élevage et de culture sont essentielles pour appréhender l'activité économique de l'exploitation, en offrant des indications sur les quantités produites tant végétales qu'animales, sur les quantités destinées à la consommation familiale et celles génératrices de revenus pour l'exploitation. Elles permettent également de saisir la conduite agricole de l'exploitation et les périodes de plantation des différentes cultures.

Les besoins de main-d'œuvre ont également été abordés, notamment en ce qui concerne le nombre d'employés, les heures de travail et les coûts associés à la main-d'œuvre.

De plus, la section sur les préoccupations permet de mettre en lumière les défis auxquels les exploitants agricoles sont confrontés, comme les contraintes physiques ou environnementales, les problèmes récurrents, ainsi que les plans futurs pour l'exploitation et les inquiétudes concernant les risques naturels tels que les éruptions volcaniques.

Ces entretiens ont permis de recueillir des informations détaillées sur la gestion des différentes exploitations agricoles, fournissant ainsi une vision globale de son fonctionnement et de ses défis.

3. Analyse qualitative

3.1. Modèle conceptuel : schématisation d'exploitations agricoles

Dans ce travail, l'exploitation agricole est considérée comme un système comportant de nombreuses interconnexions entre ses diverses composantes. Afin de caractériser ce système, la méthodologie développée par Stark et al., (2019) est utilisée. Cette approche consiste à définir le système étudié en identifiant ses divers compartiments écologiques ainsi que les interactions entre eux et avec leur environnement, c'est-à-dire les éléments extérieurs au système.

Cette conceptualisation repose sur quatre étapes :

1. Définir les frontières du système avec son environnement,
2. Choisir les compartiments du système tels que les sous-systèmes de culture et d'élevage,
3. Identifier tous les flux impliqués (intrants, productions, pertes, ...),
4. Élaborer le diagramme de flux.

Dans le cas présent, la délimitation se fait au niveau de l'exploitation agricole. Un modèle conceptuel commun a été élaboré pour comparer les cinq exploitations agricoles à partir d'une même base (Figure. 16). Ce dernier a été réalisé sur l'application *Mural*. L'exploitation a été subdivisée en deux sous-systèmes principaux, l'un concernant les cultures et l'autre l'élevage. Les cultures sont réparties en cinq compartiments au sein du sous-système de culture, en fonction de leur cycle de développement et de leurs caractéristiques agronomiques. La vulnérabilité des cultures face aux dépôts de téphra varie en fonction de leur cycle de développement. Pour les cultures annuelles et pérennes, les rendements seront impactés quelle que soit la période de l'année, car ces cultures sont présentes tout au long de l'année. En cas de pertes, il faudra attendre au moins un an avant de retrouver un rendement, voire plus pour certaines cultures pérennes. Par exemple, les arbres fruitiers sont plus résilients que les plantes herbacées face aux dépôts de téphra (Scheffer et al., 2001). Cependant, la perte d'un arbre entraînera une diminution de rendement et de revenus sur plusieurs années en raison de la durée de son cycle de développement, ce qui représente une perte économique significative pour un exploitant agricole. En revanche, une culture à cycle court ne sera pas impactée toute l'année car elle n'est présente sur le champ que pendant quelques mois. En cas de perte, le délai avant de pouvoir espérer une nouvelle récolte est donc plus court.

D'autre part, les cultures sous bâche et sous serre ont été distinguées. Sous serres, les cultures seront protégées, moins exposées et le risque de perte est réduit. Sous bâche, le risque de perte est tout de même présent car les cendres pourront s'infiltrer et endommager les cultures. De plus, les bâches peuvent s'effondrer sous le poids des cendres, pouvant entraîner une perte des cultures situées en-dessous.

De la même manière, les compartiments d'élevage sont définis en tenant compte des principales espèces présentes, avec une distinction entre les animaux à cycle long et à cycle court, ainsi qu'entre ceux élevés en intérieur et en extérieur. Les animaux à cycle long incluent des espèces comme les bovins et les ovins, caractérisés par des périodes de gestation de plusieurs mois. En cas de perte d'animaux, le renouvellement du cheptel prendra plus de temps que pour des animaux à cycle court. En revanche, les animaux à cycle court, tels que les léporidés, les cobayes et la volaille, ont des temps de gestation plus courts, de l'ordre de deux à trois mois, maximum, ce qui permet un renouvellement plus rapide du cheptel.

La vulnérabilité du bétail dépend aussi de leur environnement, qu'ils soient en intérieur ou en extérieur, ainsi que de la robustesse des bâtiments. Certains animaux sont gardés dans des abris fragiles, comme des structures en tôle, qui peuvent facilement s'effondrer, tandis que d'autres sont protégés dans des bâtiments plus solides en briques, offrant une meilleure protection.

De plus, deux compartiments de stockage sont définis pour souligner des pratiques telles que la conservation du fumier et du fourrage.

Quatre types de flux sont distingués au sein des systèmes agricoles pour mieux appréhender leurs interactions complexes et leur vulnérabilité aux éruptions. Ces flux comprennent les flux transversaux entre les compartiments (*throughflow*), les flux entrants (*inflow*) de l'environnement vers les compartiments, les flux sortants (*outflow*) des compartiments vers l'environnement et les flux qui restent au sein d'un même compartiment (*selfflow*) comme les naissances d'animaux par exemple.

Les inflow comprennent les intrants externes tels que les engrais, les produits phytosanitaires, les aliments pour animaux, les soins vétérinaires, la main-d'œuvre, ainsi que les animaux achetés et reçus. Les outflow incluent les produits animaux tels que la viande, ainsi que d'autres produits

d'origine animale comme des œufs, de la laine et du lait. Ils peuvent également comprendre, des animaux morts ou volés, ainsi que des végétaux exportés.

Les pertes sont liées aux sources de pollution, aux émissions des animaux et des cultures, ainsi qu'aux lixiviats.

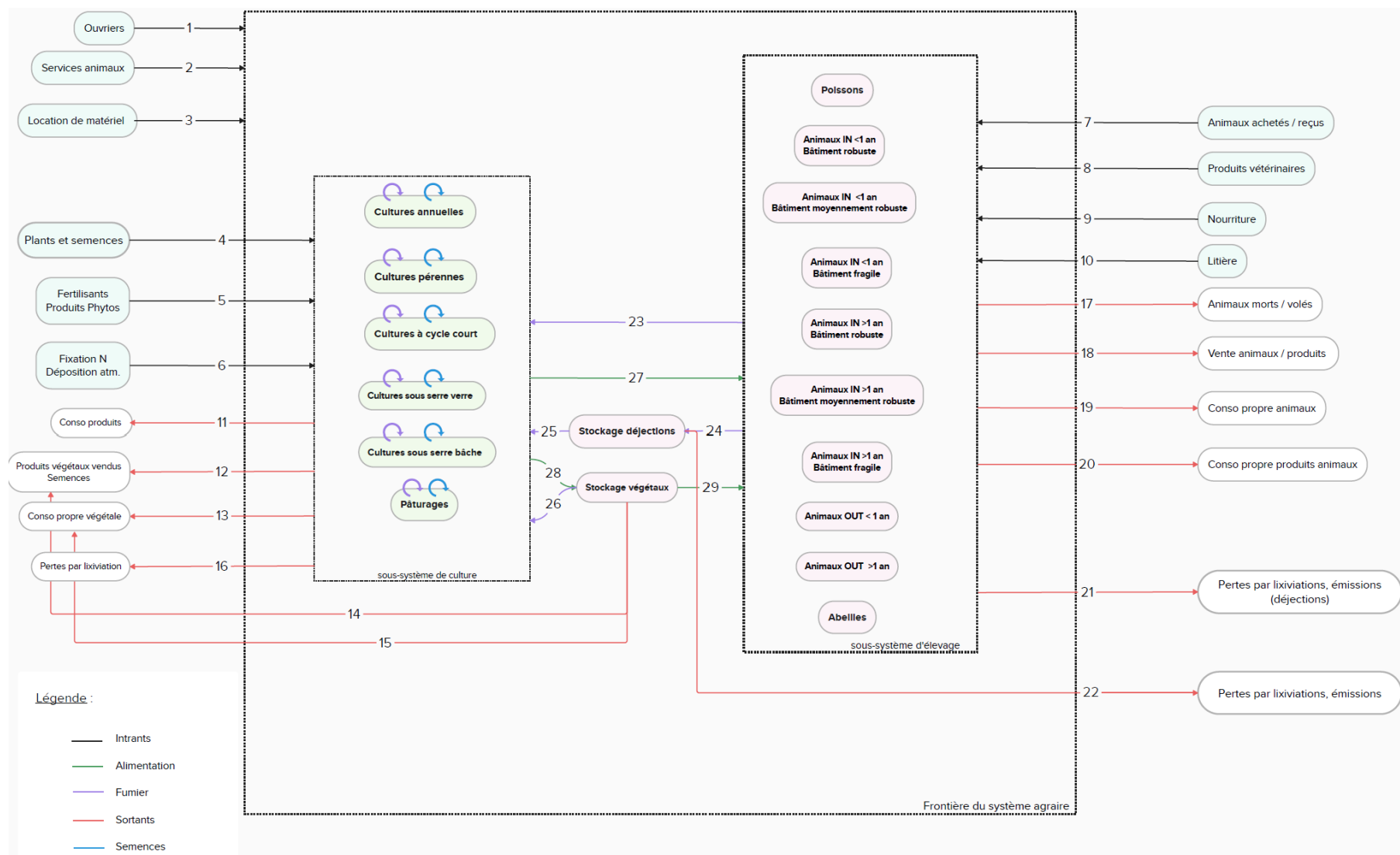


Figure 16 - Modèle conceptuel général d'exploitations agricoles

3.2. Analyse visuelle sous forme de réseaux

Le logiciel Gephi a été utilisé pour la visualisation et l'analyse de réseaux, offrant de nombreuses fonctionnalités pour explorer les interactions complexes entre les éléments d'un système (Grandjean, 2015). Avec ses différentes versions, Gephi permet de représenter graphiquement les composants d'un réseau sous forme de nœuds et les relations entre eux sous forme de liens, facilitant une analyse qualitative (Figure. 17). Ces représentations peuvent être personnalisées selon divers critères tels que la taille, la couleur et la forme des nœuds, ainsi que la direction et l'épaisseur des liens (Decuyper, 2020).

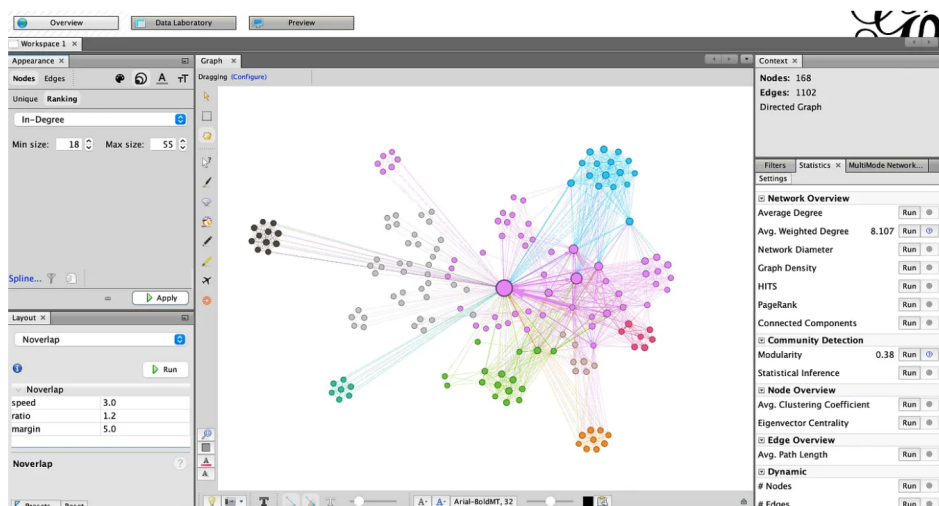


Figure 17 - Interface du logiciel Gephi avec un exemple de réseau établi (Zonin, 2024)

Ce logiciel a été employé dans cette étude pour visualiser l'importance relative de chaque composant de l'exploitation agricole, ainsi que la force et la quantité des liens qui les unissent. Cette approche permet de représenter la complexité de l'exploitation en tant que système intégré, mettant en évidence l'intérêt d'aborder l'exploitation dans son ensemble plutôt que de se concentrer sur des éléments isolés (Jacomy et al., 2014).

Dans cette étude, chaque nœud représente un élément de l'exploitation, comme les cultures, l'élevage, les intrants, les productions destinées à la vente ou à la consommation personnelle, etc. La taille des nœuds est proportionnelle à leur niveau de connexion, tandis que leur couleur correspond à leur classification. Quant aux liens, leur épaisseur varie en fonction de la valeur du flux généré par la production qu'ils relient.

4. Analyse quantitative

4.1. Analyse économique dans un contexte hors éruption volcanique

Une analyse économique a été réalisée pour évaluer la situation économique des cinq exploitations agricoles étudiées, au cours de l'année 2023, sur une période d'un an. Cette évaluation s'appuie sur les données économiques recueillies lors d'entretiens sur le terrain. L'analyse a nécessité plusieurs calculs clés pour évaluer la situation économique liée aux activités agricoles des exploitations, permettant ainsi de comprendre leur situation financière en dehors de périodes d'éruptions majeures.

Tout d'abord, la *valeur annuelle brute* a été déterminée. Elle représente la valeur monétaire totale, en dollar américain, de la production générée par les cultures et l'élevage au sein de chaque

exploitation pendant l'année. Cela comprend la valeur de chaque récolte de culture, des naissances animales, des productions telles que les œufs, le lait ou la laine, ainsi que la valeur économique des animaux adultes.

Ensuite, les *coûts annuels* ont été évalués. Il s'agit de toutes les dépenses nécessaires à la réalisation des productions agricoles, comme l'achat d'aliments pour les animaux, les soins vétérinaires, les semences, les produits phytopharmaceutiques, les fertilisants ainsi que les frais de main-d'œuvre et de mécanisation.

Sur la base de ces données, la *valeur annuelle nette* a été calculée, représentant la valeur brute annuelle moins les coûts engendrés par l'activité agricole.

Parallèlement, le *revenu annuel brut* a été déterminé, correspondant au montant réellement gagné grâce à la vente des produits agricoles. En effet, les exploitations étudiées servent également à la subsistance directe de la cellule familiale, ce qui implique qu'une partie des récoltes n'est jamais effectivement vendue. D'autre part, outre la réserve de récolte pour la consommation personnelle, une partie peut être conservée comme moyen d'échange, par exemple pour rémunérer des travailleurs, ou réservée aux besoins de l'exploitation, tels que la rétention d'une partie des cultures végétales pour le semis de la prochaine saison.

Enfin, le *revenu annuel net* a été calculé en soustrayant les coûts associés aux productions agricoles du revenu brut.

4.2. Analyse du fonctionnement global d'une exploitation agricole

La diversification des activités agricoles peut aider à stabiliser les revenus des ménages à faibles revenus en réduisant les risques associés aux ressources, notamment grâce à des pratiques comme le polyculture-élevage. De plus, l'intégration des différentes activités agricoles, où les produits d'une activité servent d'intrants à une autre, peut diminuer la dépendance aux ressources externes (Dedieu, 2012). Pour évaluer ces aspects, une méthode basée sur l'analyse de réseaux écologiques (ENA) a été adoptée, une approche pour étudier les interactions au sein des systèmes agricoles (Rufino et al., 2009). Cela permet de dégager des propriétés holistiques qui ne sont pas toujours évidentes à partir des simples observations directes.

Cependant, la précision des résultats de l'ENA dépend largement de la qualité des données disponibles (Ulanowicz, 2004; Rufino et al., 2009). Des données supplémentaires provenant de la littérature ont été nécessaires pour quantifier certains flux de matière.

La première étape dans la création d'un réseau écologique est d'identifier et de délimiter l'écosystème en question selon un modèle conceptuel préétabli (Figure. 16). Ensuite, vient la seconde étape qui consiste à représenter les interactions entre ses différentes composantes sous forme d'une matrice de flux (Figure. 18). Dans cette matrice, les sources des composants sont listées en lignes, les destinations en colonnes, et les valeurs des flux entre ces sources et destinations sont indiquées. Cette dernière renferme toutes les données nécessaires pour appliquer les méthodes de l'ENA et calculer les indicateurs qui s'y rapportent.

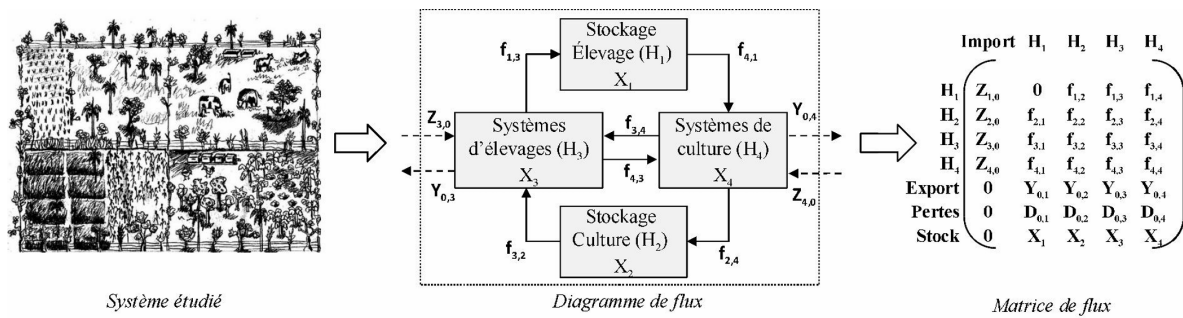


Figure 18 - Représentation des différentes étapes de l'établissement des ENA (Stark, Archimède, et al., 2019)

Pour évaluer les flux, il est nécessaire de les harmoniser sur une échelle temporelle uniforme, qui a été définie comme étant l'année (Stark et al., 2019). Les données pour chaque flux ont été collectées dans leur unité spécifique, qu'il s'agisse du nombre d'animaux, des litres de lait, ou de la quantité de matière fraîche en kilogrammes de cultures. Pour faciliter la comparaison et l'analyse, ces flux ont été convertis dans une unité commune en utilisant des coefficients de conversion établis dans la littérature (Annexe. E.a). Selon la méthodologie établie par (Stark et al., 2019), il a été décidé de baser les modèles sur des flux d'azote et de convertir chaque donnée collectée en kilogrammes d'azote par an, en tenant compte de son rôle central en tant que nutriment essentiel dans les interactions entre l'élevage et les cultures. En outre, comme l'azote est un constituant fondamental des acides aminés et, par extension, des protéines dans les plantes et les animaux, il est relativement aisé de trouver dans la littérature des données permettant de convertir chaque élément en quantité azotée.

Une fois que les flux ont été regroupés sous forme d'une matrice de flux, plusieurs indicateurs ont été dérivés de celle-ci pour caractériser l'intégration de l'agriculture-élevage (IAE) au niveau de l'exploitation et pour évaluer les performances agroécologiques des exploitations (Annexe. E.c).

Les mesures utilisées pour évaluer l'IAE à l'échelle de l'exploitation dans cette étude sont l'activité totale du système et l'intensité de l'IAE. *L'activité globale du système* considère l'intensité de tous les flux circulants, qu'ils soient entre les compartiments internes ou avec l'extérieur. Cela englobe les inflow, outflow et throughflow. *L'intensité de l'IAE* est déterminée en additionnant uniquement les throughflow, c'est-à-dire ceux qui circulent entre les différents compartiments de l'exploitation. Ces indicateurs permettent de savoir dans quelle mesure, la part des flux qui sont internes à l'exploitation participent à son activité globale.

D'autre part, des indicateurs sur les performances de l'exploitation ont été évalués. Ceux-ci concernent la productivité, les niveaux d'intrants, la dépendance, l'efficacité ainsi que la résilience. Leur évaluation permet de comprendre, en partie, dans quelle mesure l'exploitation est dépendante d'intrants externes pour mener à bien son activité, ainsi que sa productivité globale.

La *productivité* est évaluée en calculant la totalité des produits générés, les outflow, (en excluant les pertes par lixiviation, volatilisation et les émissions) et en les rapportant à la surface en hectares, ce qui permet de comparer différents systèmes.

Les *niveaux d'intrants* sont déterminés en totalisant les flux entrants dans le système, les inflow, également rapportés à l'hectare pour permettre les comparaisons entre systèmes.

La *dépendance* représente la proportion des inflow par rapport à l'activité totale de l'exploitation, exprimée en pourcentage.

L'*efficience* est quantifiée par le ratio entre la productivité et la dépendance.

La *résilience* d'un système est évaluée par le ratio Φ/C (overhead/development capacity), inspiré des sciences de l'information et développé en écologie par (Ulanowicz, 2004). Il mesure la capacité de réserve du système en fonction de la configuration et de l'intensité de son réseau de flux. Ce réseau comprend à la fois les flux directs entre les composants et les flux indirects qui influent rétroactivement sur d'autres flux. En d'autres termes, ce ratio représente la capacité du système à s'adapter et à évoluer face aux perturbations. Un ratio proche de 1 indique une capacité de réserve importante, soutenue par un réseau dense de flux indirects (throughflow).

4.3. Évaluation des pertes engendrées par un dépôt de téphra

L'un des objectifs de ce travail est d'estimer semi-quantitativement¹⁰ les pertes de rendements et, de capital en cas d'éruption volcanique engendrant un dépôt de téphra. Pour ce faire, il a été nécessaire de chercher dans la littérature des coefficients de pertes de rendements agricoles en corrélation avec l'intensité de l'éruption, et en particulier l'épaisseur du dépôt de téphra s'ensuivant. Les fonctions de fragilité établies par (Ligot et al., 2023; Wilson & Kaye, 2007; Craig et al., 2021), ont été sélectionnées pour cette analyse (Annexe. D.b). Les coefficients de perte ont été déterminés pour des dépôts de cinq et cinquante millimètres, afin de mieux comprendre l'impact différencié selon le niveau de dépôt, qu'il soit faible ou plus notable. Par ailleurs, ces dépôts sont susceptibles de se produire dans la zone d'étude.

Les fonctions de fragilité établies par Wilson & Kaye, (2007) et Craig et al., (2021) sont principalement conçues pour répondre aux besoins des exploitations agricoles néo-zélandaises, qui se distinguent par leurs opérations et ressources spécifiques. Notamment, les exploitations en Nouvelle-Zélande sont davantage mécanisées que celles en Équateur. De plus, les exploitations agricoles en Équateur sont soumises à des conditions climatiques et topographiques différentes de celles de la Nouvelle-Zélande, avec moins de variations saisonnières dans les Andes équatoriennes que dans les régions néo-zélandaises.

Malgré les différences entre ces différents milieux, ces fonctions ont été utilisées faute de ressources suffisantes dans la littérature. Leur pertinence réside dans le fait qu'elles fournissent un cadre pour évaluer les pertes de production relatives aux exploitations étudiées.

4.3.1. Détermination des coefficients de saisonnalité

4.3.1.1. Cultures

La vulnérabilité des cultures aux dépôts de téphra est spécifique à chaque espèce et varie en fonction de la phénologie. Cette saisonnalité souligne l'importance du moment de l'année où une éruption volcanique se produit dans l'estimation de l'impact sur le secteur agricole. Pour de nombreuses espèces, même une faible accumulation de quelques millimètres de téphra pendant certaines périodes de l'année peut entraîner des pertes économiques significatives. Ainsi, des coefficients de saisonnalité ont été développés par Wilson & Kaye, (2007) pour tenir compte de ces variations.

Ces coefficients ont été regroupés selon les niveaux de vulnérabilité temporelle, à savoir nulle, faible, modérée et élevée des types de cultures (Tableau. 2). Ils se réfèrent au degré de vulnérabilité en fonction du calendrier des activités agricoles, telles que les périodes hors-culture, de semis, de croissance, de floraison, de maturation et de récolte.

¹⁰ Une analyse semi-quantitative intègre à la fois des descriptions qualitatives de l'impact et des données quantitatives.

Pendant la période hors-culture, lorsque les plantes ne sont pas présentes, la vulnérabilité est nulle car il n'y a pas d'exposition. Au stade du semis, la vulnérabilité est modérée car les jeunes plantules sont sensibles, mais cela dépend aussi de la profondeur à laquelle les graines sont enterrées et de la capacité des plantules à émerger à travers un dépôt de téphra. Pendant la croissance des cultures, leur exposition accrue les rend modérément vulnérables. À la floraison, la vulnérabilité est élevée car cette étape est cruciale pour la pollinisation et la formation des fruits (Craig et al., 2016). En revanche, pendant la maturation, la vulnérabilité diminue généralement, bien qu'elle reste modérée, car les cultures ont déjà atteint une certaine maturité et ont pu effectuer la photosynthèse nécessaire à la production de sucres avant l'impact. Enfin, durant la période de récolte, la vulnérabilité reste modérée étant donné que les cultures peuvent subir des dommages, mettant en péril leur récolte, tandis que l'accès à ces cultures peut être entravé.

Tableau 2 - Coefficients de saisonnalité selon le stade phénologique des cultures

<i>Vulnérabilité</i>	<i>Cycle de développement</i>	<i>Coefficients</i>
Nulle	Hors - culture	0
Faible	Maturation	0,25
Modérée	Croissance Récolte	0,75
Élevée	Floraison	1

Pour tenir compte de la saisonnalité, des calendriers de cultures ont été établis (Annexe. D.a). Bien que les cultures cultivées sur ces différentes exploitations soient généralement similaires en raison de leur adaptation aux conditions locales, les cycles de développement peuvent différer d'une exploitation à l'autre en fonction de divers facteurs tels que l'altitude, l'utilisation d'engrais, de produits phytosanitaires ou d'autres pratiques agricoles. Ces calendriers sont basés sur les informations recueillies auprès des exploitants agricoles ainsi que sur la littérature lorsque les informations manquaient.

4.3.1.2. Elevage

Les dépôts de téphra ont un impact significatif sur les animaux d'élevage, selon le stade de développement de l'animal et les activités agricoles en cours au moment de ces événements. Par exemple, lors de la chute de téphra dans la région de Hudson au Chili en 1991, les bovins et les ovins étaient en phase finale de gestation, augmentant ainsi leurs besoins énergétiques et les rendant plus vulnérables à une éventuelle pénurie alimentaire (Craig et al., 2016e). Cependant, en raison du manque d'informations sur la saisonnalité, un coefficient de 1 sera appliqué pour représenter ce facteur, traduisant une vulnérabilité élevée. En raison de l'incertitude entourant les dates de naissance, d'acquisition et de vente des animaux, qui peuvent varier d'une année à l'autre et d'un animal à l'autre, il est complexe d'intégrer de manière précise leur cycle de développement dans le traitement des données. Ainsi, chaque animal est considéré comme vulnérable dès qu'il est présent au sein l'exploitation et ne l'est plus une fois qu'il en est retiré, ne représentant alors plus de perte pour l'exploitant agricole.

4.3.2. *Détermination des coefficients de pertes pour les cultures*

Wilson & Kaye, (2007) ont divisé l'agriculture néo-zélandaise en différentes catégories pour évaluer plus efficacement les pertes potentielles de production dues aux risques associés aux dépôts de téphra. Ces catégories sont sélectionnées en fonction des dommages similaires, selon eux, provoqués par les dépôts de téphra. Selon leur classification, elles représentent les cultures de légumes à racines comme les pommes de terre et les carottes, les légumes à feuilles tels que la laitue, les épinards ainsi que les légumes à fruits comprenant le brocoli, les pois et les fraises. Les arbres fruitiers regroupent des fruits tels que les pommes, les fruits à noyau et les agrumes. Les vignes ont également été considérées.

Craig et al., (2021) ont également mis au point des fonctions de fragilité quantitatives afin d'évaluer la probabilité de pertes de divers groupes de cultures. Ces catégories englobent les cultures fruitières non arboricoles, les cultures arboricoles, les légumes à feuilles, les céréales, les légumes racines, la viticulture et la culture du riz. De cette manière, il devient possible de quantifier les pertes de types de cultures qui n'étaient pas incluses dans l'étude de Wilson & Kaye, (2007), comme les cultures céréalières, par exemple.

Ligot et al., (2023) ont élaboré un protocole expérimental pour appliquer des cendres sur divers types de cultures, notamment la laitue, le chou, l'oignon et la carotte, à différents stades de croissance. Grâce à cette méthode, des données ont été collectées pour développer des fonctions de fragilité, en particulier pour les oignons, ce qui a permis une quantification de pertes plus précise par rapport aux deux études précédemment décrites. Cependant, ces fonctions ne couvrent pas les dépôts jusqu'à cinquante millimètres et ne seront utilisées que pour déterminer les coefficients correspondant à un dépôt de cinq millimètres d'épaisseur (Figure. 46). De plus, cette recherche met en évidence l'importance de cultiver les oignons séparément des autres légumes-racines tels que les pommes de terre et les carottes, en raison des variations significatives de rendement dues à leurs morphologies distinctes.

Les coefficients assignés aux différentes cultures dans le cadre de ce travail de fin d'études sont tirés des données fournies par ces trois études, en fonction du niveau de précision qu'elles offrent chacune.

Les recherches menées par Wilson & Kaye, (2007) et Craig et al., (2021) fournissent des fonctions de fragilité qui illustrent le pourcentage de pertes en fonction du dépôt de téphra en millimètres. Cependant, dans l'étude de Ligot et al., (2023), le dépôt est exprimé en kg/m^2 , où chaque kilogramme par mètre carré équivaut à un millimètre de dépôt. Cette conversion facilite la comparaison entre les différentes unités de mesure.

Par ailleurs, Wilson & Kaye, (2007) différencient les pertes de rendement liées au dépôt de téphra des pertes causées par la saisonnalité. En contraste, Ligot et al., (2023) ont développé des fonctions de fragilité qui intègrent sur un même graphique les pertes dues à la charge de téphra, différenciées selon les stades phénologiques incluant la croissance, la floraison, la maturation et la récolte. Par conséquent, deux tableaux sont présentés (Tableau 3 ; 4). L'un ne répertorie que les pertes dues à l'épaisseur de téphra (Tableau. 3), tandis que l'autre prend en compte à la fois la saisonnalité et l'épaisseur du dépôt (Tableau. 4).

Tableau 3 - Coefficients de pertes de productions selon l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson & Kaye, 2007)
(Craig et al., 2021)

Classification selon la littérature	Type de production	5 mm	50 mm	Références
Légumes à feuilles	Petits Pois Fève	0,8	1	(Wilson & Kaye, 2007)
Céréales	Blé Orge Maïs	*	0,9	(Craig et al., 2021)
Cultures Racines	Pommes de terre Carottes Ail	*	0,35	(Wilson & Kaye, 2007)
Cultures Racines - Oignons	Oignon	*	0,35	(Wilson & Kaye, 2007)
Prairie	Prairie	0,2	0,65	(Wild et al., 2019)

* Ces coefficients de pertes proviennent de l'étude de (Ligot et al., 2023), qui intègre directement la saisonnalité dans les fonctions de fragilité. Ils sont donc détaillés séparément (Tableau. 4) et sont employés pour estimer les pertes pour un dépôt de cinq millimètres.

Tableau 4 - Coefficients de pertes de production pour une épaisseur de cinq millimètres incluant la saisonnalité (Ligot et al., 2023)

Classification	Type de production	Hors-Culture	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte	Référence
Céréales	Blé Orge Maïs	0	0,6	0,8	0,7	0,5	(Ligot et al., 2023)
Cultures - Racines	Pommes de terre Carottes	0	0,75	0,7	0,65	0,5	(Ligot et al., 2023)
Oignons	Oignons	0	0,49	0	0,3	0,23	(Ligot et al., 2023)

4.3.3. Détermination des coefficients de pertes pour l'élevage

Wilson & Kaye, (2007) et Craig et al., (2021) ont identifié différentes catégories de vulnérabilité pour les animaux d'élevage. Ils ont souligné que les exploitations laitières présentent des besoins énergétiques élevés et une forte dépendance à l'eau propre en raison de leur production laitière intensive. En cas de chute de téphra, ces exploitations sont plus susceptibles de subir une réduction de la traite en raison de la diminution des zones de pâture et des contraintes physiologiques sur le troupeau. Cette situation entraîne des impacts économiques immédiats et prolongés (Pandey & Upadhyay, 2022). En revanche, les exploitations d'élevage de bovins viandeux, de moutons et de cerfs sont moins susceptibles d'être affectées par la perte d'électricité, étant donné qu'elles n'ont pas besoin de machines pour maintenir leur production. Cependant, toutes ces exploitations peuvent être impactées par une diminution de l'approvisionnement en eau propre et en nourriture.

Dans le cadre de cette étude, les animaux des exploitations étudiées ont été classés selon les catégories établies dans la littérature (Tableau. 5). Des décisions ont parfois dû être prises pour inclure dans ces catégories des types d'animaux n'ayant pas fait l'objet d'études de vulnérabilité au

dépôt de téphra jusqu'à présent. Ainsi, les équidés ont été regroupés avec les bovins en raison de leur dépendance similaire au pâturage et à une faible consommation d'aliments externes.

De même, les volailles, ainsi que leurs productions associées, sont classés dans la catégorie *moutons-cerfs*. Certaines fermes alimentent leurs volailles avec du maïs acheté, réduisant ainsi leur vulnérabilité par rapport à celles se nourrissant exclusivement des ressources de l'exploitation. Cependant, en étant à l'extérieur, elles sont davantage exposées aux dépôts de cendres et à l'exposition directe, ce qui peut compromettre leurs voies respiratoires et entraîner une diminution de la production d'œufs due au stress. En raison du manque d'études spécifiques sur ce sujet, le coefficient associé à la production d'œufs a dû être ajusté en utilisant celui des pertes de volailles.

Les coefficients attribués aux cobayes et aux léporidés ont été établis sur la base des informations recueillies lors des enquêtes sur le terrain. Tant les lapins que les cobayes se nourrissent principalement d'herbe provenant des prairies. La réduction du nombre de cobayes est corrélée à la diminution de la surface des pâturages, car ces animaux se nourrissent uniquement du fourrage provenant de la prairie dans cette situation particulière. Ainsi, la diminution de la prairie entraînera également la disparition des cobayes survivants, car ils ne seront plus alimentés, ou du moins de manière considérablement réduite. Des pertes totales ont été rapportées dans certains cas, justifiant l'utilisation de moyennes pour obtenir des coefficients représentatifs.

Tableau 5 - Coefficients de perte animale selon l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson & Kaye, 2007; Craig et al., 2021)

Classification selon la littérature	Types d'animaux d'élevage sur les exploitations	5 mm	50 mm	Références
Bovins laitiers	Vaches laitières Lait	0,2	0,7	(Wilson & Kaye, 2007)
Bovins	Bovins Équidés	0,1	0,57	(Wilson & Kaye, 2007)
Moutons – Cerfs	Ovins Laine Volailles Œufs	0,05	0,63	(Wilson & Kaye, 2007)
/	Cobayes Léporidés	0,05	0,63	(Wild et al., 2019), Interview exploitation n°5

4.3.4. Évaluation des pertes économiques potentielles sur la production agricole dues aux dépôts de téphra

Suite à l'analyse de la situation économique des exploitations en conditions hors-éruptives, une contrainte fictive a été appliquée pour estimer les pertes économiques qu'une éruption volcanique pourrait occasionner. Les contraintes sont caractérisées par deux niveaux d'épaisseur de téphra, auxquels sont associés des coefficients de perte de rendement et des variations saisonnières spécifiques à différentes cultures agricoles, dans le but d'évaluer les impacts économiques ((1), (2), (3), (4), (5)). Les données ont été traitées dans *Excel*, et les graphiques résultants ont été générés à partir de *Power BI*.

$$\text{Pertes de production (kg/an)} = \text{Production (kg/an)} \times \text{Coeff. Perte (/)} \times \text{Coeff. Saisonnalité (/)} \quad (1)$$

$$\text{Pertes de valeur brute (\$/an)} = \text{Valeur brute (\$/an)} \times \text{Coeff. Perte (/)} \times \text{Coeff. Saisonnalité (/)} \quad (2)$$

$$\text{Pertes de revenus bruts (\$/an)} = \text{Revenus bruts (\$/an)} \times \text{Coeff. Perte (/)} \times \text{Coeff. Saisonnalité (/)} \quad (3)$$

$$\text{Pertes de valeur nette (\$/an)} = \text{Valeur nette (\$/an)} \times \text{Coeff. Perte (/)} \times \text{Coeff. Saisonnalité (/)} \quad (4)$$

$$\text{Pertes de revenus nets (\$/an)} = \text{Revenus nets (\$/an)} \times \text{Coeff. Perte (/)} \times \text{Coeff. Saisonnalité (/)} \quad (5)$$

Il n'est pas nécessaire de tenir compte du coefficient de saisonnalité si celui-ci est déjà inclus dans la valeur finale du coefficient de perte, comme c'est le cas pour les coefficients résultant des fonctions de fragilité réalisées par (Ligot et al., 2023).

D'autre part, chacune de ces valeurs est évaluée pour chaque sous-système, à savoir les cultures et l'élevage, pris de manière indépendante. Ensuite, elles ont également été évaluées au niveau global de l'exploitation.

Pour estimer les pertes, différentes hypothèses ont été prises en compte, incluant la possibilité d'une éruption de survenir à n'importe quel moment de l'année. Par conséquent, une estimation de pertes est effectuée pour chaque mois de l'année afin d'estimer les répercussions économiques annuelles en fonction du mois potentiel d'occurrence.

Toutes les opérations agricoles coûteuses, telles que la fertilisation, l'utilisation de produits phytosanitaires et les interventions vétérinaires, sont présumées avoir été effectuées jusqu'à la fin du mois précédant l'éruption. De même, les activités génératrices de revenus potentielles, comme la récolte ou la vente d'animaux, ne sont pas considérées comme réalisées si elles ont lieu pendant le mois de l'éruption.

En ce qui concerne les cultures, si la récolte est prévue le mois de l'éruption, elle est considérée comme non réalisée au moment où l'éruption survient. Après une perte de production, la priorité est accordée aux besoins essentiels comme l'alimentation, puis au fourrage, au semis suivant, et enfin à la vente.

Pour l'élevage, les naissances d'une même espèce sont considérées comme ayant lieu simultanément en raison du manque d'information à ce sujet. Si des naissances sont prévues pour le mois de l'éruption, elles sont traitées comme étant survenues avant cet événement. Les ventes d'animaux sont considérées comme ayant lieu après l'éruption, tandis que les productions animales sont affectées à partir du mois où l'éruption a lieu.

Après la perte d'animaux vivants ou de produits animaux, la répartition des jeunes animaux se fait en fonction de diverses finalités telles que la vente, la consommation personnelle, la conservation pour le capital ou l'échange. Les traitements vétérinaires sont maintenus pour tous les animaux survivants après l'éruption.

4.3.5. *Évaluation des pertes de flux d'azote potentielles de la production agricole dues aux dépôts de téphra*

La première étape a consisté à convertir chaque flux de matière en flux d'azote. Chaque flux, initialement exprimé en unités brutes telles que des kilogrammes, des millilitres, ou des unités d'animaux, a été converti en équivalent azote. De nombreuses sources ont été consultées pour

établir les coefficients de conversion, lesquels expriment les kilogrammes d'azote par kilogramme de matière (Annexe E.a). La plupart des coefficients d'azote trouvés dans la littérature comptabilise la quantité d'azote présente dans la matière sèche. Ainsi, la plupart des cultures, initialement exprimées en unité de matière fraîche, ont d'abord été converties en flux de matière sèche, puis multipliées par le coefficient d'azote pour obtenir la conversion des flux de matière brute en flux de matière azotée (6).

$$\text{Valeur de production (kg N/an)} = \text{Production (kg / an)} * (\text{Proportion de matière sèche (/)}) * \text{Coeff. N (/)} \quad (6)$$

De manière analogue à la simulation des pertes économiques, les pertes de flux d'azote sont évaluées en utilisant les coefficients de pertes de rendements et les coefficients de saisonnalité précédemment déterminés (Tableau 3 ; 4 ; 5). Cependant, l'objectif n'est pas de refléter une perte de valeur économique, mais plutôt une diminution de la valeur du flux de matière selon l'épaisseur du dépôt de téphra. Ainsi, les pertes de production en termes de valeur de flux de matière ont été évaluées pour chaque mois, afin de représenter la perte de valeur azotée sur la production totale en cas d'éruption à différents moments de l'année. Ces pertes de production sont calculées pour les cultures et les animaux. Les productions animales incluent des produits tels que la viande, le lait et les œufs, ainsi que les pertes d'animaux qui ne peuvent pas être conservés pour continuer le cycle de production.

De nouveau, les pertes ont été calculées pour chaque sous-système individuellement, puis agrégées au niveau global de l'exploitation (7).

$$\text{Perte de production (kg N/an)} = \text{Productions (kg N/an)} \times \text{Coeff. Pertes (/)} \times \text{Coeff. Saisonnalité (/)} \quad (7)$$

V. Résultats

1. Description générale de la conduite agricole des exploitations étudiées

Cette section comporte une brève description des diverses exploitations du canton de Guamote dans lesquelles les interviews ont été menées (Tableau. 6).

Chaque exploitation agricole combine des activités de production végétale et d'élevage. Toutes cultivent des cultures racines, principalement des pommes de terre, et la plupart incluent des légumineuses comme les fèves et les petits pois. L'exploitation n°2 cultive également des fruits, notamment des fraises. En ce qui concerne l'élevage, toutes possèdent des bovins et des cochons d'Inde. Les bovins sont principalement destinés à la production laitière, tandis que les cochons d'Inde servent pour l'autoconsommation de viande. Des ovins, léporidés, volailles, porcins, poissons et des camélidés sont également élevés selon les exploitations. Tous ces animaux sont destinés à la production de viande. En outre, les ovins et les camélidés sont élevés pour leur laine, tandis que les volailles sont élevées aussi pour la production d'œufs.

Chaque exploitation utilise les déjections animales comme retour de matière organique au champ. Cependant, seule l'exploitation n°4 stocke également des résidus de cultures pour enrichir le sol. Les superficies totales des exploitations varient entre 3 et 16 hectares, indiquant des exploitations familiales de petite taille, avec des surfaces variables dédiées au pâturage des animaux. Par ailleurs, le pourcentage des surfaces consacrées au pâturage varie de 15 % à 67 % de la surface agricole totale des différentes exploitations.

L'effectif animal est exprimé en unités de bétail tropical (TLU), une mesure utilisée pour comparer les différentes exploitations en standardisant le nombre d'animaux dans une unité commune. Cet indice donne une indication sur la taille du cheptel animal. Par exemple, l'exploitation n°4 possède le plus grand nombre d'animaux, avec un total de 19,9 TLU, tandis que l'exploitation n°5 a le plus faible effectif animal parmi les cinq exploitations, avec seulement 4,1 TLU.

Tableau 6 - Caractéristiques générales des cinq exploitations de la région de Guamote

	<i>Exploitation 1</i>	<i>Exploitation 2</i>	<i>Exploitation 3</i>	<i>Exploitation 4</i>	<i>Exploitation 5</i>
<i>Cultures</i>	L, CR	L, CR, F	L, CR, C	CR	L, CR, F
<i>Elevage</i>	B, L, O, V, P, Po	B, C, Co, L, O, V	B, Co, L, O, V	B, Co, O, P, V	P, B, V, Co
<i>Stockage</i>	Sa	Sa, Sc	Sa	Sa, Sc	Sa
<i>Surface totale (ha)</i>	6	16	3	/	3
<i>Pâturage (%)</i>	15	25	67	/	29
<i>Effectif animal (TLU)</i>	14,5	15,9	8,1	19,9	4,1

Cultures L : Légumineuses, CR : Cultures Racines, F : Fruits, C : Céréales

Elevage B : Bovins, L : Léporidés, O : Ovins, V : Volailles, P : Porcins, Po : Poissons, C : Camélidés, Co : Cobayes

Stockage Sa : Déjection animale, Sc : Cultures et résidus de cultures

2. Situation économique des diverses exploitations – *hors-éruption*

La situation économique de chaque exploitation a été évaluée dans un contexte d'équilibre, en dehors de tout événement éruptif. Les résultats sont basés sur la collecte de données effectuée au moment de l'interview et ne prennent pas en considération les variations économiques potentielles, telles que la baisse des prix de certains produits ou autres facteurs. Par ailleurs, ces résultats ne tiennent compte que des valeurs des activités agricoles et ne prennent donc pas en considération les charges associées à l'exploitation.

Les données fournies exposent les performances économiques des cinq exploitations agricoles, chacune ayant ses propres chiffres pour les recettes annuelles brutes, les revenus annuels bruts, les dépenses annuelles, les valeurs annuelles nettes et les revenus annuels nets (Tableau. 7). Ces données fluctuent d'une exploitation à l'autre, illustrant la diversité des activités économiques et des résultats financiers dans le contexte agricole local.

Les exploitations n°2 et n°4 affichent les plus hautes valeurs annuelles brutes, avec respectivement 27 713 \$/an et 35 435 \$/an. En termes de revenu annuel brut, l'exploitation n°2 domine avec 9 588 \$/an, suivie par l'exploitation n°3 avec 6 813 \$/an. Cependant, en ce qui concerne la valeur annuelle nette, l'exploitation 2 reste en tête avec 22 052 \$/an, tandis que l'exploitation n°5 affiche la plus basse valeur nette de 3 339 \$/an.

Tableau 7 - Résumé économique des cinq exploitations - Hors-éruption

	<i>Exploitation 1</i>	<i>Exploitation 2</i>	<i>Exploitation 3</i>	<i>Exploitation 4</i>	<i>Exploitation 5</i>
<i>Valeur annuelle brute (\$/an)</i>	14 327	27 713	14 115	35 435	6 378
<i>Revenu annuel brut (\$/an)</i>	2 361	9 588	6 813	6 810	4 295
<i>Coûts annuels (\$/an)</i>	1 120	5 360	744	3 232	2 724
<i>Valeur annuelle nette (\$/an)</i>	13 207	22 052	13 371	31 393	3 339
<i>Revenu annuel net (\$/an)</i>	1 240	4 227	6 068	3 578	1 571

En outre, la répartition des revenus annuels bruts entre la production végétale et animale dans chaque exploitation souligne la diversité des parts de revenu observée au sein des différentes exploitations localisées dans une même région (Figure. 19). De manière générale, la plupart des exploitations tirent leur profit principalement de l'élevage. Par exemple, l'exploitation n°1 ne génère aucun revenu provenant des cultures, mais uniquement de la partie élevage. En revanche, l'exploitation n°4 se démarque en obtenant une part significative de ses revenus annuels bruts à partir des cultures.

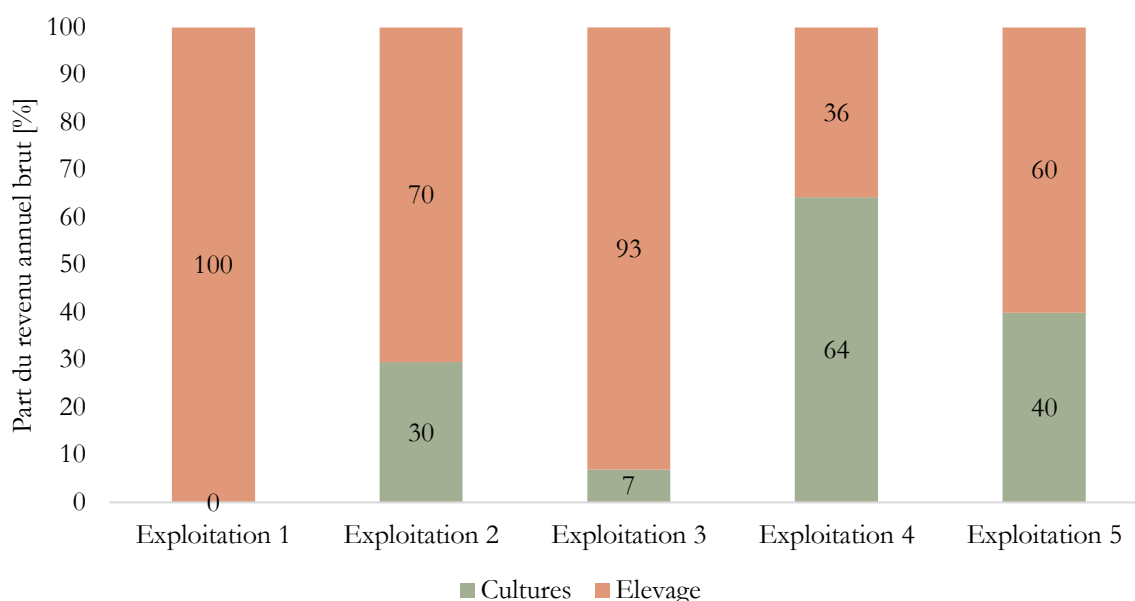


Figure 19 - Part du revenu annuel brut issu de la production végétale et animale par exploitation (%)

3. Description détaillée de la conduite agricole de l'exploitation n°3

Pour approfondir l'analyse de la gestion agricole et décrire la vulnérabilité aux retombées de téphra, il a été décidé de se concentrer exclusivement sur l'exploitation n°3. Cette exploitation intègre des sous-systèmes de cultures et d'élevage et possède un ensemble de données plus complet, permettant ainsi de déployer la méthode et de la tester de la manière la plus robuste possible.

3.1. Analyse descriptive de la conduite agricole

Au sein de l'exploitation n°3, une variété d'animaux et de cultures coexistent, illustrant l'interconnexion entre ses sous-systèmes de cultures et d'élevage, où chaque composant contribue au bon fonctionnement du système agricole (Figure. 20).

Plusieurs cultures sont produites. Des légumineuses telles que les petits pois et les fèves sont cultivées sur des superficies de 0,02 hectare chacune. Les trois céréales principales (blé, maïs et orge) occupent chacune 0,01 hectare. Enfin, des cultures à cycle court, notamment les pommes de terre, les oignons et l'ail, sont produites sur des superficies allant de 0,005 à 0,025 hectare.

L'élevage d'animaux, qu'ils soient à cycle long comme les bovins et les ovins ou à cycle court comme les cobayes, les léporidés et les volailles, favorise le retour de matière organique aux cultures. L'exploitation comprend à la fois des bovins, notamment des vaches laitières et des veaux pour la viande, et des ovins élevés pour leur laine et leur viande. Les lapins et les cochons d'Inde sont élevés pour répondre aux besoins de l'autoconsommation familiale en viande, tandis que les équidés, représentés par un âne, participent aux travaux dans les champs.

Une prairie permanente de deux hectares fournit un espace de pâturage pour les bovins, les ovins et les équidés, garantissant un approvisionnement régulier en nourriture pour ces animaux, sous réserve de conditions stables, excluant les événements tels qu'une éruption volcanique ou toute autre perturbation.



(1)



(2)



(3)



(4)

Figure 20 - Photos illustrant la conduite agricole de l'exploitation n°3 – (1) Prairie permanente et Luzerne, (2) Oignons en phase expérimentale, (3) Cochons d'Inde, (4) Maïs

Le fonctionnement de l'exploitation agricole se caractérise par l'utilisation d'intrants externes et internes au système (Figure. 21). Les intrants externes incluent les produits phytopharmaceutiques et les engrais destinés au sous-système de cultures, ainsi que les soins vétérinaires et l'alimentation pour le sous-système d'élevage. La visualisation des interactions au sein de l'exploitation agricole sous forme de réseau (Figure. 21) offre une perspective plus détaillée qu'un modèle conceptuel (Figure. 34). Cela permet de voir, par exemple, que plusieurs produits phytopharmaceutiques peuvent être utilisés pour une même culture. De plus, cela met en lumière les interactions entre les sous-systèmes, comme le stockage de déjections animales utilisées pour fertiliser les cultures, constituant des intrants internes. D'autre part, la représentation permet de mettre en valeur l'importance des différents éléments du système. Les cultures annuelles, telles que les légumineuses et les céréales, sont largement représentées dans le sous-système de cultures, tandis que les bovins prédominent dans le sous-système d'élevage, ce qui est illustré par la taille des cercles dans le réseau présenté. La luzerne est particulièrement importante pour les cobayes et les léporidés, tandis que la prairie permanente est essentielle pour les ovins et les bovins, qui exercent une forte demande sur cette ressource. En termes d'achats d'animaux, l'achat d'ovins est plus fréquent que celui d'autres espèces.

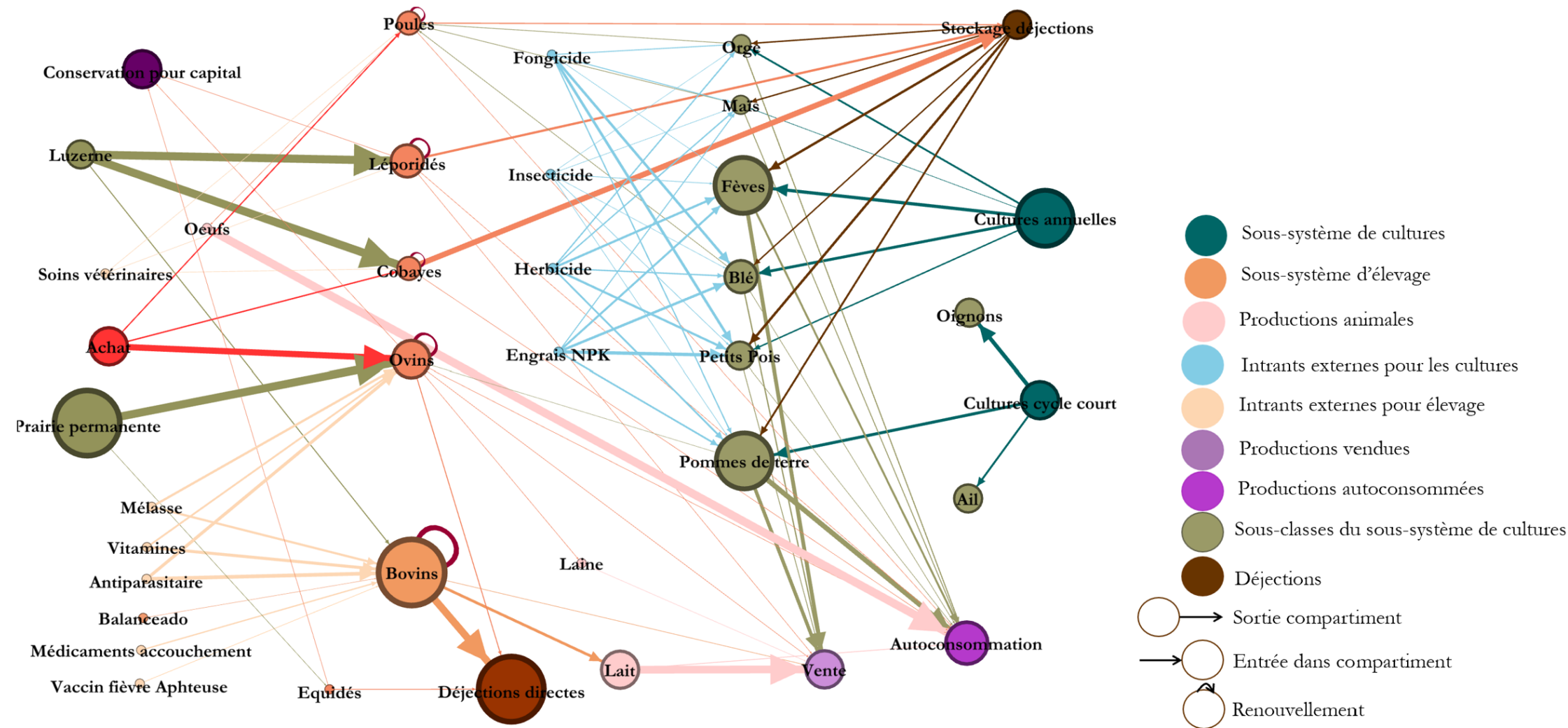


Figure 21 -Représentation visuelle interconnexions entre les divers constituants de l'exploitation n°3. La taille des cercles et des flèches dans le réseau indique respectivement l'importance des différents éléments du système et des flux d'interactions

3.2. Analyse du fonctionnement global de l'exploitation par une méthode d'analyse de réseaux écologiques

Le diagramme de flux de l'exploitation (Figure. 34) permet d'identifier les flux de matière entrant (*inflow*), sortant (*outflow*) et circulant au sein de l'exploitation (*throughflow*) prise comme système, établissant ainsi les interconnexions entre les compartiments de celle-ci. La conversion de ces flux de matière en flux d'azote autorise ensuite la création d'une matrice de flux reprenant les inflow, throughflow et outflow du système (Tableau. 8). La matrice ainsi constituée permet une analyse quantitative et de calculer des indicateurs fournissant des informations sur la structure, le fonctionnement et la performance du système (Tableau. 9). Les colonnes représentent les sources et les lignes les destinations.

Tableau 8 - Matrice de flux de l'exploitation n°3

Exploitation n°3	<i>Inflow</i>	<i>Bovins</i>	<i>Cobayes</i>	<i>Léporidés</i>	<i>Ovins</i>	<i>Volailles</i>	<i>Légumineuses</i>	<i>Cultures - Racines</i>	<i>Céréales</i>	<i>Prairie</i>	<i>Stockage déjection</i>
<i>Bovins</i>	4,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	166,51	0,00
<i>Cobayes</i>	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,49	0,00
<i>Léporidés</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00
<i>Ovins</i>	4,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,43	0,00
<i>Volailles</i>	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
<i>Légumineuses</i>	13,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36
<i>Cultures - racines</i>	4,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96
<i>Céréales</i>	7,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,93
<i>Prairie</i>	0,00	112,80	0,00	0,00	58,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,16
<i>Stockage déjection</i>	0,00	0,00	9,89	0,94	0,00	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Outflow</i>	0,00	91,09	0,36	0,40	5,80	0,49	32,30	0,56	3,89	0,00	0,00
<i>Pertes</i>	0,00	16,35	4,87	0,46	5,34	0,60	1,27	0,48	0,95	1,54	0,20

Pour évaluer la structure de l'exploitation, plusieurs éléments sont pris en compte, notamment l'activité totale, l'effectif animal et la surface agricole. L'activité totale du système (TST) mesure l'intensité des flux totaux, incluant ceux qui circulent entre les compartiments et ceux qui interagissent avec l'extérieur du système. Cette valeur, rapportée à l'hectare, est de 206 kg N/an*ha. L'effectif animal, qui donne une idée de la taille du cheptel, est de 8,1 TLU. La surface agricole totale, incluant la prairie temporaire, est de trois hectares.

Ensuite, des indicateurs d'intégration entre l'agriculture et l'élevage sont calculés pour fournir des informations sur le fonctionnement de l'exploitation agricole. L'intensité de cette intégration (TT) est de 150,6 kg d'azote par hectare et par an. Cette valeur permet de déterminer la part de l'activité du système agricole liée à cette intégration. Pour ce faire, le rapport entre TT et TST est calculé, révélant que 72 % de l'activité de l'exploitation agricole est liée à l'intégration de l'agriculture et de l'élevage.

Par ailleurs, les performances agroécologiques ont été évaluées. La productivité, qui correspond à l'ensemble des sorties, est de 45 kg N/an*ha. Les niveaux d'intrants, représentant la somme des entrées dans le système, s'élèvent à 11 kg N/an*ha. À partir de ces intrants, il est possible de définir une valeur qui décrit la dépendance du système, c'est-à-dire dans quelle mesure l'activité du système

dépend des intrants extérieurs. La dépendance, qui représente la part des entrées dans l'activité globale du système, est de 6 %. D'autre part, les pertes liées au système sont également prises en compte, totalisant 11 kg N/an*ha. L'efficacité, quant à elle, est définie comme la somme des sorties divisée par la somme des entrées, et elle s'élève à 391 %. En ce qui concerne la résilience, elle est évaluée à 0,6.

*Tableau 9 - Identification des indicateurs de structure - fonctionnement - performance de l'exploitation 3.
IAE : Intégration agriculture-élevage*

Structure	
Activité totale (kg N/an*ha)	206
Effectif animal (TLU)	8,1
Surface totale (ha)	3
Fonctionnement – Indicateurs d'intégration agriculture-élevage	
Intensité de l'IAE (kg N/an*ha)	150,6
Part de l'activité liée à l'IAE (%)	72
Indicateurs de performances agroécologiques	
Productivité (kg N/an*ha)	45
Niveau d'intrants (kg N/an*ha)	12
Dépendance (%)	6
Niveau de perte (kg N/an*ha)	11
Efficacité (%)	391
Résilience (/)	0,6

D'autre part, les contributions de l'élevage et des cultures aux différents indicateurs ont été définies (Tableau. 10). Il apparaît que l'élevage contribue à 34 % de la part de l'activité liée à l'intégration de l'agriculture et de l'élevage (IAE), tandis que les cultures y contribuent à hauteur de 38 %. En ce qui concerne la productivité du système, 73 % en est attribuable aux cultures et 27 % à l'élevage. Au niveau des intrants, la part la plus importante destinée au sous-système de cultures, avec 73 %, contre 27 % pour le sous-système d'élevage. Il en résulte que le sous-système de cultures présente une plus grande dépendance aux intrants externes que le sous-système d'élevage, avec respectivement 8 % et 3 %. Par ailleurs, la plus grande part des pertes est occasionnée par le sous-système d'élevage, avec 86 % des pertes qui lui sont associées, principalement en raison de la part importante des émissions azotées liées aux déjections.

Tableau 10 - Contribution des sous-systèmes d'élevage et de cultures aux divers indicateurs de fonctionnement et de performance

<i>Contribution des sous-systèmes</i>	<i>Élevage</i>	<i>Cultures</i>
<i>Part de l'activité liée à l'IAE (%)</i>	34	38
<i>Productivité (%)</i>	73	27
<i>Niveau d'intrants (%)</i>	27	73
<i>Dépendance (%)</i>	3	8
<i>Niveau de pertes (%)</i>	86	13

4. Quantification de la vulnérabilité - *Analyse économique*

4.1. Analyse détaillée de la situation économique de l'exploitation n°3 *bors-éruption*

Une analyse économique, en condition hors-éruption, a été effectuée pour décrire les valeurs des sous-systèmes de cultures et d'élevage (Tableau. 11), en différenciant celles des cultures annuelles et à cycle court, ainsi que de chaque espèce animale.

L'examen des données économiques met en lumière divers aspects de l'exploitation agricole, fournissant des informations sur sa performance financière et ses différents aspects économiques (Tableau. 11). Tout d'abord, en ce qui concerne les cultures annuelles, les chiffres montrent un revenu net négatif, ce qui indique que cette partie de l'activité agricole génère des pertes. Les coûts annuels associés aux cultures annuelles dépassent largement les revenus bruts. Par exemple, pour les cultures annuelles, les coûts annuels nets dépassent les revenus annuels bruts, ce qui entraîne un revenu net négatif.

Bien que la valeur annuelle nette des cultures à cycle court soit positive, cette estimation repose sur des données incomplètes, ce qui pourrait biaiser les résultats. En effet, les données disponibles pour certaines cultures, telles que les oignons et l'ail, sont limitées car ces cultures ont été plantées pour la première fois cette année et sont encore en phase d'expérimentation. Cela a rendu la collecte d'informations incomplète pour ces cultures. Par conséquent, la proportion des ventes ainsi que les coûts des produits phytosanitaires et des fertilisants ne sont pas connus.

Tableau 11 - *Détail économique des différentes composantes de l'exploitation 3*

<i>Type de productions</i>	<i>Production annuelles (kg/an)</i>	<i>Valeur annuelle brute (\$/an)</i>	<i>Revenu annuel brut (\$/an)</i>	<i>Coûts annuels (\$/an)</i>	<i>Valeur annuelle nette (\$/an)</i>	<i>Revenu annuel net (\$/an)</i>
Cultures						
<i>Annuelle</i>	1 462	332	221	378	-46	-157
<i>Cycle Court</i>	1 952	1 360	249	114	1 248	135
Élevage						
<i>Bovins</i>	16 869	10 718	6 236	192	10 526	6 044
<i>Ovins</i>	314	1 111	95	30	1 081	64
<i>Léporidé</i>	30	45	12	0.2	45	12
<i>Volaille</i>	191	65	0	13.1	52	-13
<i>Cobaye</i>	18	184	0	16.6	167	0
<i>Équidés</i>	0	300	0	0	300	0

De manière générale, les cultures annuelles et à cycle court représentent une petite fraction du revenu annuel brut de l'exploitation, soit respectivement 3,2 % et 3,6 % du revenu brut. (Figure. 22).

L'élevage bovin se démarque comme la principale source de revenu de l'exploitation agricole, générant un revenu net annuel substantiel. La production annuelle de bovins atteint 16 869 kg, incluant à la fois la production laitière et la vente de bovins. L'élevage bovin représente ainsi 91,5 % du revenu brut total de l'exploitation (Figure . 22). De plus, une analyse plus approfondie révèle que les ventes directes d'animaux contribuent à 5 % du revenu brut total généré par l'élevage bovin, tandis que la production laitière en constitue la majeure partie avec 95 %.

Les ovins et les léporidés apportent une contribution positive, bien que plus modeste, au revenu annuel net. Malgré leur contribution relativement faible au revenu brut annuel de l'exploitation, ils participent à la diversification des activités de l'exploitation, avec respectivement 1,4 % et 0,2 %. En revanche, la volaille et les cobayes ne sont pas pris en compte dans le revenu brut, étant donné qu'ils sont destinés à la consommation familiale et ne génèrent donc pas de revenus supplémentaires.

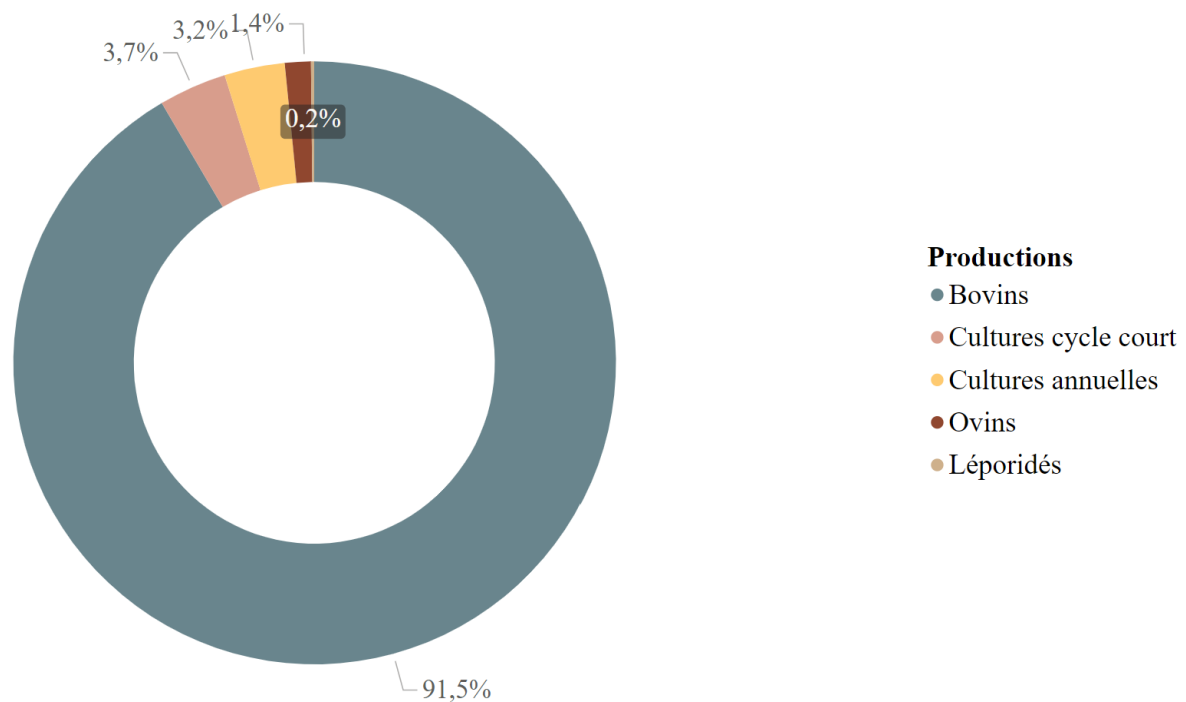


Figure 22 - Proportion des revenus annuels bruts de l'exploitation n°3 - Hors éruption

Un récapitulatif économique annuel a été réalisé (Tableau. 12), offrant un aperçu de la performance financière agricole de l'exploitation. Avec une valeur annuelle brute de 14 116 \$, cette mesure englobe la valeur monétaire de toutes les productions de l'exploitation, qu'il s'agisse de l'élevage ou des cultures.

Les revenus annuels bruts, s'élevant à 6 813 \$, représentent les revenus générés par la vente des productions animales et végétales. Cependant, cette exploitation supporte également des coûts annuels de 744 \$, englobant diverses dépenses telles que les soins aux animaux, l'alimentation animale, les produits phytosanitaires, les fertilisants, et la main-d'œuvre. Le revenu annuel net, qui représente la somme restante après la déduction des coûts, s'élève à 6 069 \$. Cette valeur nette reflète la rentabilité effective de l'exploitation après avoir pris en compte les dépenses nécessaires à son fonctionnement.

Tableau 12 - Récapitulatif économique exploitation n°3

Récapitulatif économique de l'exploitation n°3 (\$/an)	
<i>Valeur annuelle brute</i>	14 116
<i>Revenu annuel brut</i>	6 813
<i>Coûts annuels</i>	744
<i>Valeur annuelle nette</i>	13 372
<i>Revenu annuel net</i>	6 069

4.2. Analyse économique de l'exploitation n°3 en contexte éruptif

Cette section vise à estimer les pertes économiques potentielles qu'une éruption pourrait entraîner, en évaluant l'impact de dépôts de téphra de cinq et cinquante millimètres sur les productions agricoles. En estimant les pertes de production, tant végétales qu'animales, il est possible de projeter les pertes économiques subies par l'exploitation. L'estimation des pertes a été effectuée mois par mois tout au long de l'année, en tenant compte des deux épaisseurs de dépôts de téphra susmentionnés, afin de déterminer les pertes sur le revenu annuel brut en cas d'éruption au cours de l'année considérée. Cette analyse considère, par exemple, le temps de renouvellement en cas de cultures pérennes, mais ne tient pas compte des éventuelles remobilisations de téphra par les vents, qui pourraient avoir un impact à un autre moment que le mois de l'éruption considéré.

Il a été décidé de se concentrer sur les revenus bruts, en excluant à la fois les coûts potentiels liés aux cultures et ceux liés à l'élevage. Bien qu'il soit possible de calculer une diminution des coûts si une culture est détruite, entraînant une réduction des besoins en fertilisants, ou des besoins en soins vétérinaires si des animaux périssent par exemple, les coûts supplémentaires pour remplacer une culture, racheter des animaux, de la nourriture, ou des soins vétérinaires supplémentaires ne peuvent être calculés. Cette incertitude ne permet pas d'obtenir une valeur fiable des revenus annuels nets. Par conséquent, il a été préféré de se concentrer sur la valeur des revenus bruts qui ne prend pas en compte les coûts. Les revenus ont été privilégiés par rapport aux valeurs brutes, car ils reflètent directement les entrées d'argent pour l'exploitation, contrairement aux valeurs brutes qui incluent également les productions destinées à la consommation familiale.

Les pertes mensuelles calculées indiquent le pourcentage de perte par rapport au revenu annuel brut en situation d'équilibre, en cas de survenue d'un aléa lors d'un mois donné. En effet, en fonction du mois auquel survient l'éruption, les cultures et l'élevage ne seront pas impactés de la même manière. Ainsi, l'impact sur le revenu annuel total variera en fonction de ces fluctuations, ce qui nécessite une analyse détaillée mois par mois pour évaluer les pertes de manière appropriée.

Les pertes de revenus bruts annuels ont été évaluées en fonction de la contribution respective de la production végétale et de la production animale à la génération des revenus bruts totaux.

4.2.1. Pertes de revenus annuels bruts pour un dépôt de téphra de cinq millimètres d'épaisseur

Les pertes liées aux cultures fluctuent entre 1 et 3 % selon les mois, tandis que celles liées à l'élevage varient entre 0 et 15 % (Figure. 23). Les mois de janvier et février enregistrent les pertes les plus élevées, représentant respectivement 17 % et 15 % des pertes totales de revenus, principalement attribuables à l'élevage. En avril, les pertes liées aux cultures atteignent leur maximum, s'élevant à 3 % du revenu brut total. Globalement, les pertes de revenus annuels bruts varient entre 1 et 17 % selon le mois d'occurrence potentielle d'une éruption.

Type de productions ● Cultures - 5 mm ● Elevage - 5mm

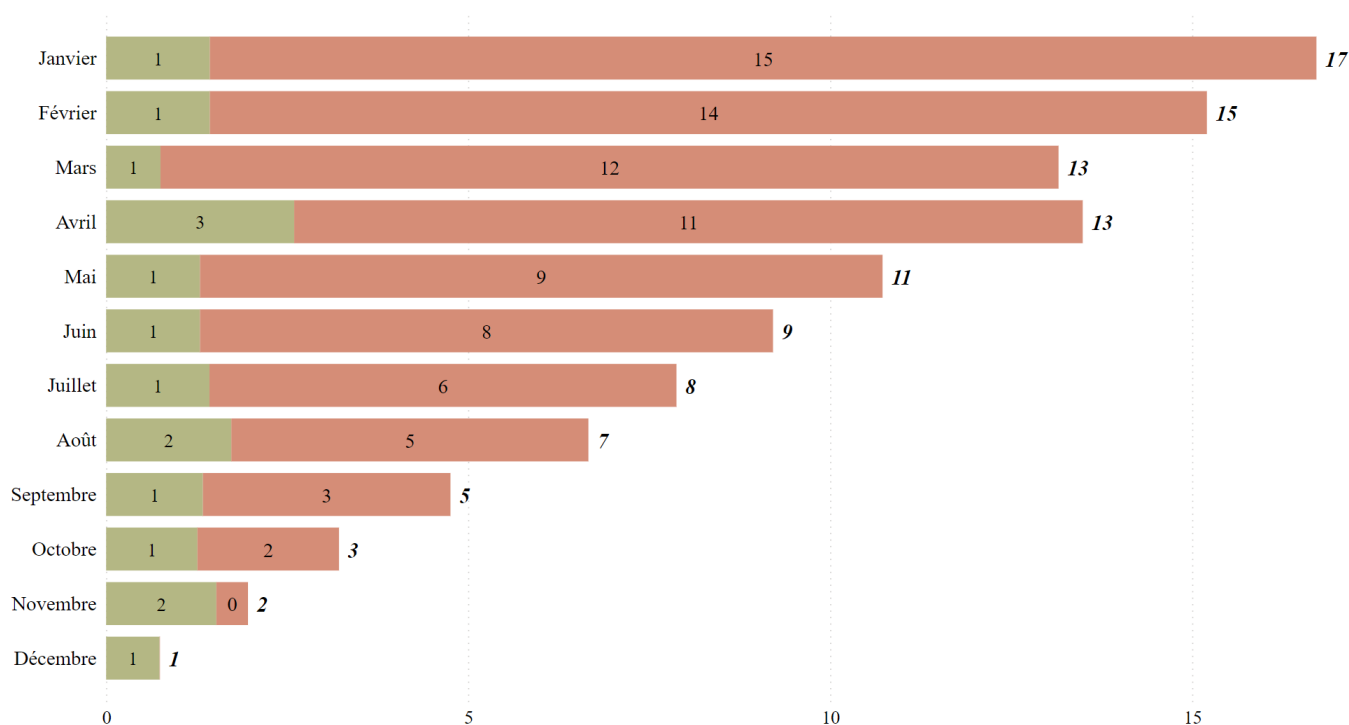


Figure 23 - Pertes de revenus bruts annuels différenciées selon la perte liée à la production végétale et animale pour un dépôt de 5 mm (%)

4.2.2. Pertes de revenus annuels bruts pour un dépôt de téphra de cinquante millimètres d'épaisseur

Les pertes de revenus annuels bruts totales varient de 5 à 71 % en cas de dépôt de 50 millimètres de téphra (Figure. 24). En janvier, mois le plus impacté en cas d'éruption, les pertes atteignent 71 %, avec 69 % pour l'élevage et 2 % pour les cultures. En avril, les pertes liées aux cultures sont les plus importantes, représentant 3 % des revenus bruts totaux, proportionnellement à la part des cultures dans ces revenus. Les pertes sur les revenus des cultures varient de 1 à 3 % selon le mois de l'éruption, avec décembre présentant les pertes les moins importantes. Pour l'élevage, les pertes peuvent aller de 4 à 69 %.

Type de production ● Cultures - 50 mm ● Elevage - 50 mm

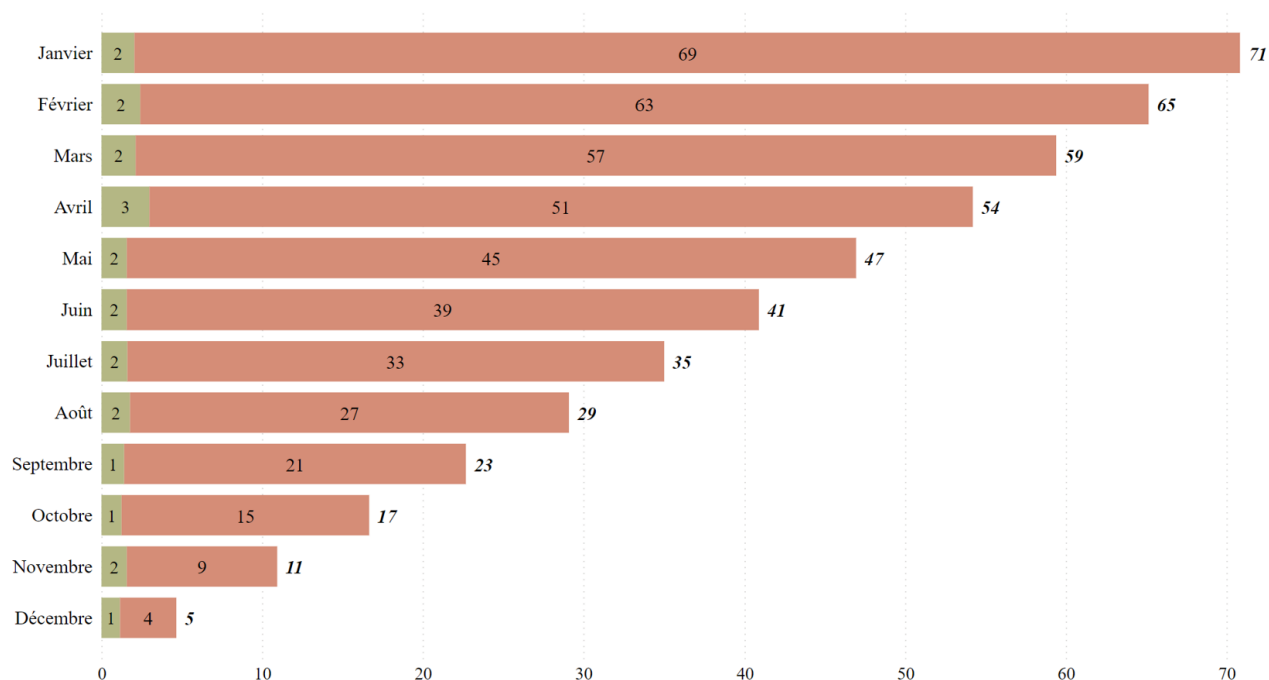


Figure 24 - Pertes de revenus bruts annuels différenciées selon la perte liée à la production végétale et animale pour un dépôt de 50 mm (%)

4.3. Analyse des pertes de productions végétales

Pour chaque mois, la proportion de perte pour chaque culture a été calculée afin de prendre en compte la saisonnalité. Cette approche permet de mettre en évidence les espèces les plus vulnérables et de souligner la possibilité de diversifier les cultures en évitant de planter des espèces sensibles au même moment. Cette analyse a été rendue possible grâce à la disponibilité de données mensuelles spécifiques à chaque culture, basées sur un calendrier de cultures établi à partir des données de terrain et de la littérature agronomique (Annexe. D.a).

4.3.1. Pertes de productions végétales pour un dépôt de téphra de cinq millimètres d'épaisseur

Les mois les plus critiques sont avril et mai, avec mai subissant les pertes les plus importantes en raison de l'impact sur diverses cultures (Figure. 25). En cas d'éruption en mai, les petits pois et les fèves subissent une perte de rendement de 60 %, tandis que le blé et l'orge enregistrent une perte de 75 % chacun. De plus, le maïs perd 49 % de son rendement, et l'ail et les oignons chacun 26 %. En janvier et février, les cultures de fèves et de maïs sont particulièrement vulnérables, avec une perte de rendement potentielle de 80 % pour chacune. En revanche, décembre semble être le mois avec le moins de pertes pour la production végétale en cas d'éruption. Pour un dépôt de cinq millimètres, aucune perte n'est observée pour les tubercules tels que les pommes de terre, contrairement aux légumineuses et aux céréales, qui subissent des pertes de 20 à 80 %.

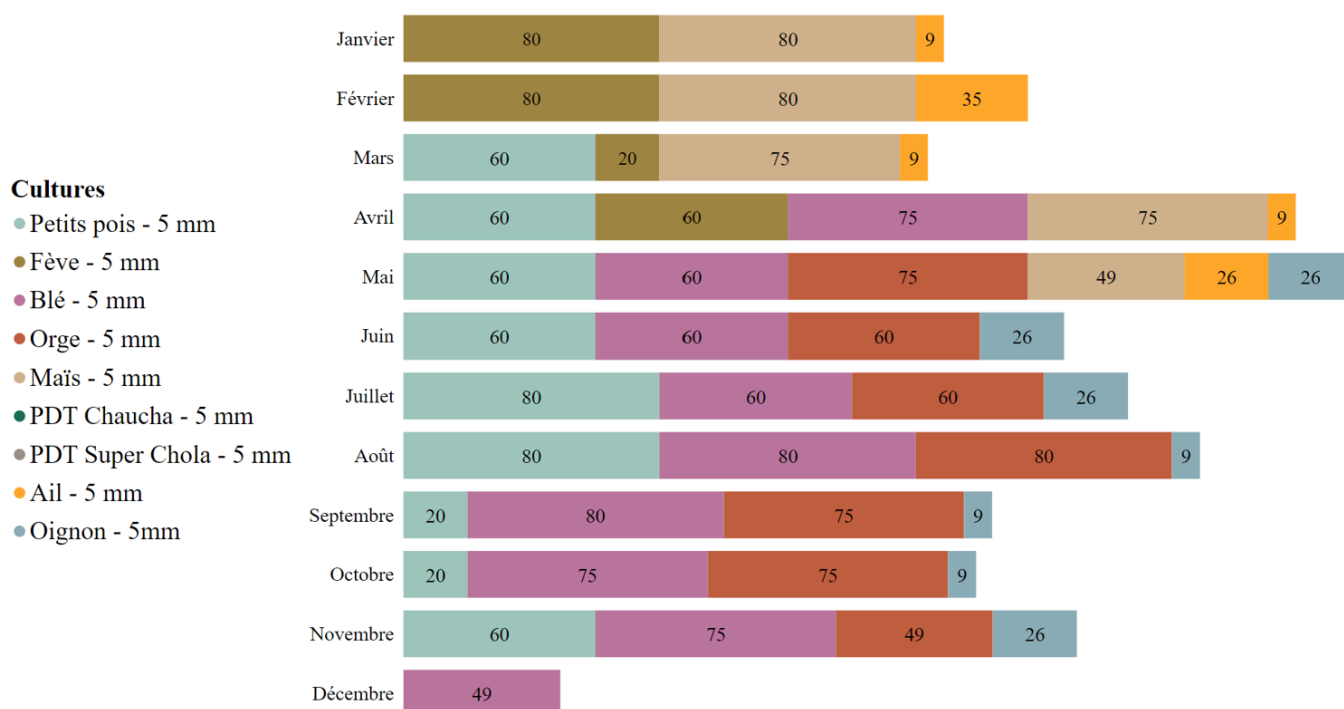


Figure 25 - Pertes de productions végétales annuelles pour un dépôt de 5 mm (%)

4.3.2. Pertes de productions végétales pour un dépôt de téphra de cinquante millimètres d'épaisseur

Des pertes totales des cultures de fèves pourraient se produire en cas d'éruption en janvier ou février, et la culture du maïs pourrait subir une perte potentielle de 90 % (Figure. 26). Pour ce dépôt, des pertes sont également observées pour les pommes de terre, bien que ces pertes soient bien plus faibles que celles des légumineuses et des céréales. Les pertes pour les pommes de terre varient de 9 à 26 %, tandis que les légumineuses et les céréales peuvent subir des pertes allant de 25 à 100 % selon le mois de l'impact. L'activité culturale en mai est particulièrement sensible, avec des pertes importantes pour diverses cultures en cas d'éruption. Les pertes atteignent 26 % pour l'ail et les oignons, 72 % pour le blé, 75 % pour les petits pois et 77 % pour l'orge et le maïs. En revanche, une éruption en décembre entraînerait une perte de 77 % pour le blé, sans affecter les autres cultures pour l'année considérée.

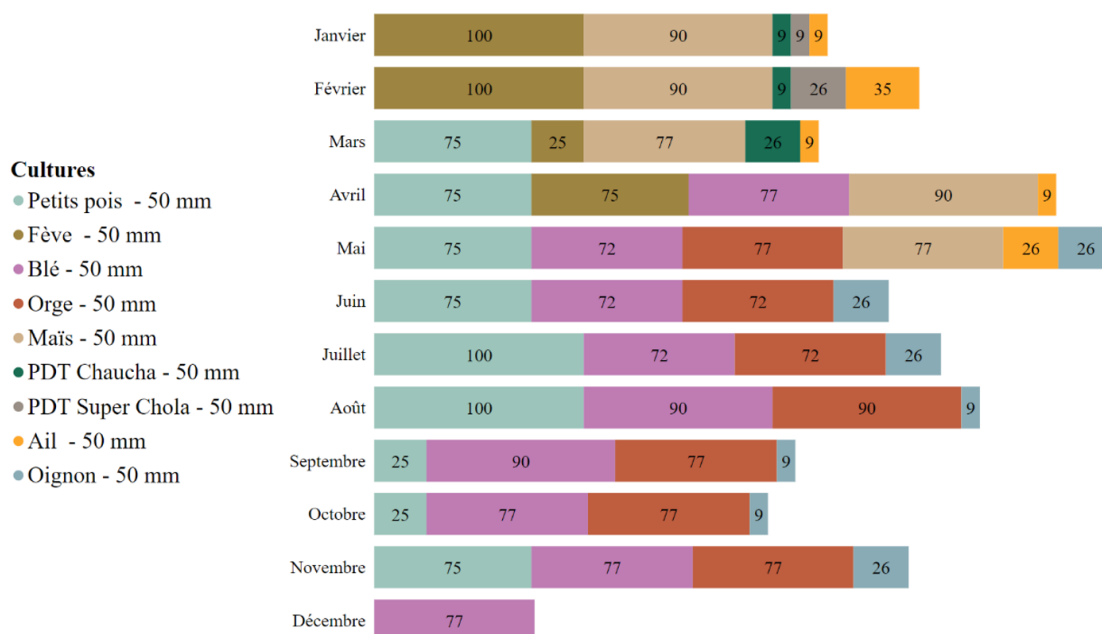


Figure 26 - Pertes de productions végétales annuelles pour un dépôt de 50 mm (%)

5. Quantification de la vulnérabilité - *Analyse de flux de matière en contexte éruptif*

Cette section du travail se focalise principalement sur la quantification des pertes globales sur l'exploitation, en considérant celle-ci comme un système dans son ensemble, y compris les pertes qui ne peuvent pas être facilement évaluées d'un point de vue strictement économique. Par exemple, les pertes liées aux déjections et à la détérioration des prairies utilisées pour le pâturage des animaux n'ont pas été prises en compte auparavant, mais seront désormais intégrées à l'analyse.

Premièrement, les pertes globales de chaque sous-système ont été calculées sur la base de leur production annuelle totale. En effet, si une éruption se produit, cela aura un impact sur les cultures implantées à ce moment-là de l'année et, dès lors, une répercussion sur la production totale annuelle.

5.1. Sous-système de cultures

Tout d'abord, une évaluation des pertes de flux d'azote sur la production totale des cultures a été réalisée pour estimer la quantité d'azote perdue en cas d'éruption à un mois donné pour ce sous-système. Ces pourcentages de pertes ne tiennent pas compte des proportions spécifiques de chaque espèce culturale, mais reflètent plutôt une perte globale de la valeur azotée de l'ensemble des productions végétales permises par ces espèces.

Les productions issues du sous-système de cultures sont classées en quatre catégories incluant la vente, l'autoconsommation, la quantité destinée au fourrage animal, ainsi que celle réservée au retour au champ pour le semis, représentant respectivement 78 %, 1 %, 18 %, et 3 % du flux d'azote de la production végétale totale. Ensuite, les pertes ont été différenciées par mois en fonction des proportions attribuées à chaque catégorie de destination des récoltes.

5.1.1. *Pertes pour un dépôt de téphra cinq millimètres d'épaisseur*

Les pertes globales des productions végétales varient considérablement, allant de 4 % à 66 % en fonction du mois d'occurrence d'une éruption (Figure. 27). Les mois de janvier, février et avril sont les plus touchés, avec des pertes respectives de 64 %, 66 % et 59 %. En revanche, décembre est le mois qui subit le moins de pertes en cas d'éruption, pour l'année étudiée, avec une perte de 4 % de la totalité de la production. Pour les mois de mai à novembre, les pertes oscillent entre 10 % et 15 %.

La plus grande part des pertes sur la production totale provient des ventes avec des pertes allant de 4 % à 62 %. Les pertes sur l'autoconsommation sont plus faibles, variant de 0 % à 2 %. Concernant le fourrage, les pertes se situent entre 0 % et 1%. En ce qui concerne le flux de semences, les pertes demeurent marginales, avec des valeurs négligeables tout au long de l'année, peu importe le mois auquel se produirait une éruption.

Destination des récoltes ● Ventes - 5 mm ● Autoconsommation - 5 mm ● Fourrages - 5 mm ● Semences - 5 mm

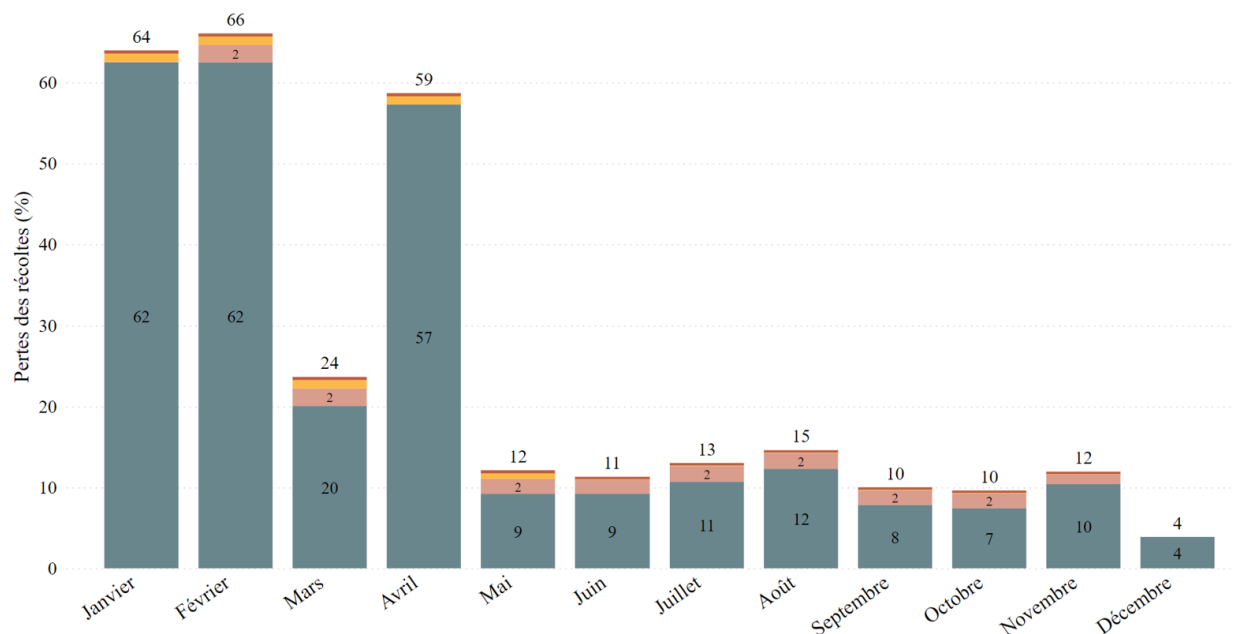


Figure 27 - Pertes de flux d'azote pour l'ensemble du sous-système de production selon le mois d'éruption sous 5 mm de téphra (%)

5.1.1.1. Pertes pour un dépôt de téphra cinquante millimètres d'épaisseur

Les mois de janvier et février se distinguent par les pertes projetées les plus élevées sur la production annuelle totale, avec une perte atteignant 80 % et 77 % chacun (Figure. 28). En avril, les pertes sont également significatives, atteignant 73 % de pertes sur la production totale. En revanche, les mois d'octobre, novembre et décembre enregistrent les pertes les plus basses, représentant respectivement 10 %, 14 % et 6 % de la production annuelle totale en fonction du mois d'éruption.

Une perte significative est observée pour la part de la production destinée à la vente, oscillant entre 6 % et 64 % de la perte totale de la production. En contraste, les pertes les moins importantes sont associées à l'autoconsommation, au fourrage et au semis, variant de 0 % à 13 % de la perte globale de la production. Les pertes de fourrage se situent entre 0 % et 1 %, celles liées à l'autoconsommation varient de 0 % à 13 %, et les pertes de semences représentent entre 0 % et 2 % de la perte totale de la production.

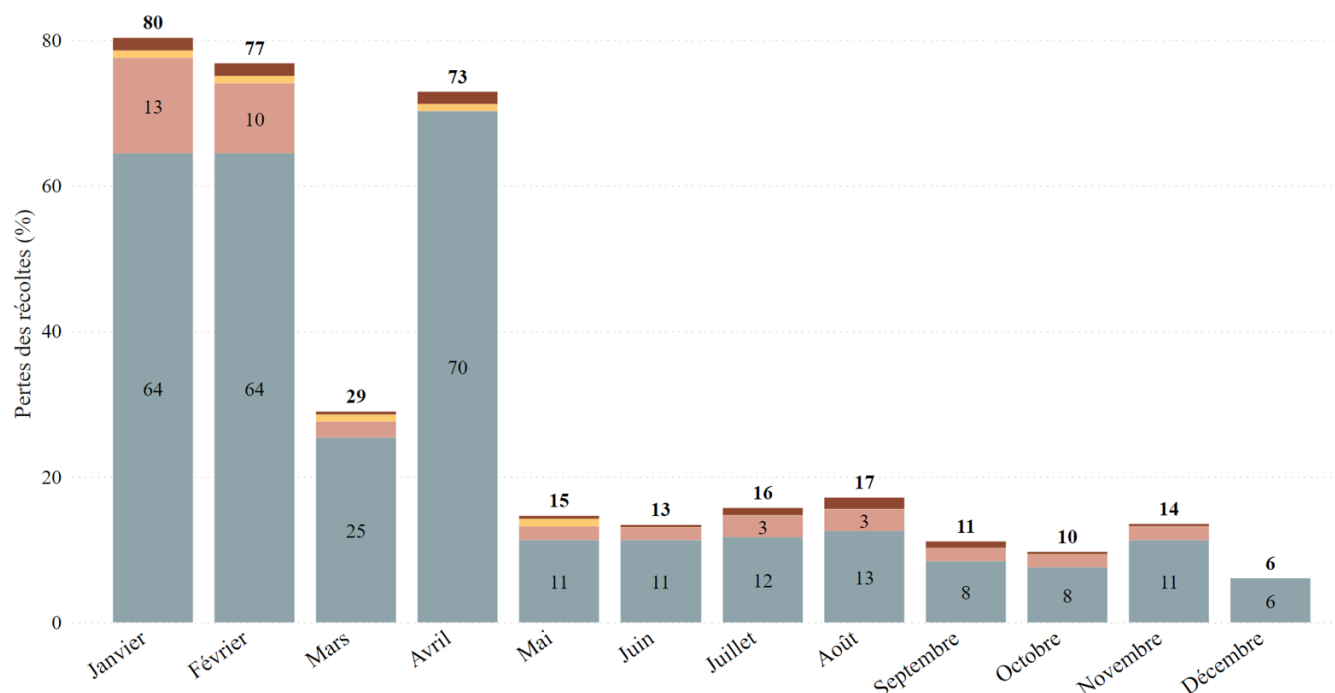


Figure 28 - Pertes de flux d'azote pour l'ensemble du sous-système de production selon le mois d'éruption sous 50 mm de téphra (%)

5.2. Sous-système d'élevage

Le sous-système d'élevage se compose d'animaux destinés à la reproduction, dont les petits sont ensuite engraisés pour la production de viande, tant pour la consommation domestique que pour la vente. Une partie de ces animaux est également conservée comme capital pour agrandir le cheptel et, ou participer au cycle de reproduction. De plus, des animaux tels que les vaches laitières et les volailles contribuent à la production de lait et d'œufs, destinés à la fois à la consommation familiale et à la vente. L'évaluation des pertes totales de production de viande et de produits animaux a été effectuée pour chaque mois de l'année. De plus, les proportions de pertes destinées à la vente et à l'autoconsommation ont été différenciées dans cette analyse.

Comme pour le sous-système de cultures, les pertes sont évaluées pour l'ensemble des productions animales, sans tenir compte des proportions individuelles de chaque espèce animale ni de la part de la production de lait et d'œufs.

5.2.1. Pertes des naissances

Pour un dépôt de téphra de cinq millimètres d'épaisseur, les pertes de petits varient entre 15 et 17 % (Figure. 29). En revanche, avec une épaisseur de cinquante millimètres, ces pertes augmentent considérablement, se situant entre 71 et 86 %. En temps normal, en dehors des éruptions, l'exploitation enregistre environ trois naissances de veaux, douze de cochons d'Inde, six de lapereaux, trois d'agneaux et trois de poussins. Les pertes mentionnées concernent l'ensemble des espèces, représentant un flux commun d'azote, sans prendre en compte la proportion que représente chacune de ces espèces.

Les petits nés au sein de l'exploitation sont destinés à différentes finalités telles que la vente, la conservation des animaux, et la consommation au sein de la cellule familiale. Ces trois destinations représentent respectivement 3 %, 10 % et 87 % de l'ensemble du flux de naissances. Les pertes pour chaque destination ont été décrites, sans être prises proportionnelles à l'ensemble du flux, afin de mieux refléter la variation des pertes selon le mois d'occurrence éruptif (Figure. 30; 31).

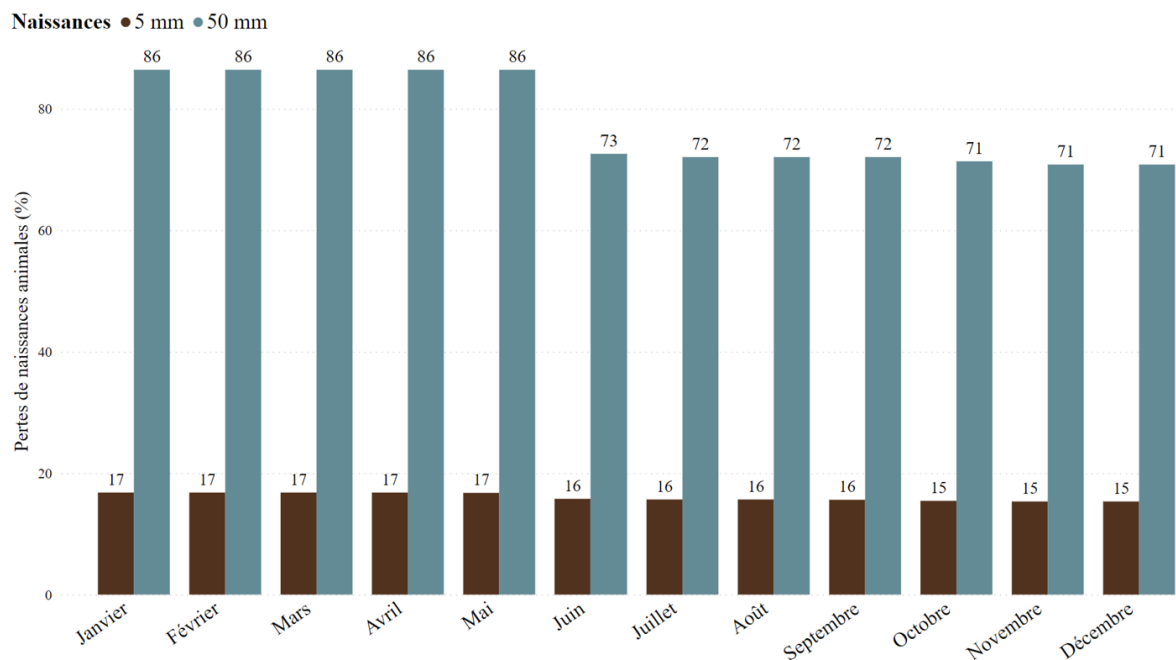


Figure 29 - Pertes des naissances animales selon le mois d'éruption (%)

5.2.1.1. Pertes pour un dépôt de téphra de cinq millimètres d'épaisseur

Les pertes pour chaque destination des naissances animales ont été estimées (Figure. 30). Il est notable que les pertes les plus importantes concernent la part destinée à la vente, de janvier à octobre, avec des pourcentages variant de 13 à 20 %, tandis que pour les mois de novembre et décembre, les pertes sont de 7 %. En revanche, les pertes pour la conservation du capital restent relativement stables tout au long de l'année, oscillant entre 12 et 13 %. Les pertes les moins significatives sont observées pour la consommation au sein de la cellule familiale, avec des pertes variant de 1 à 9 %.

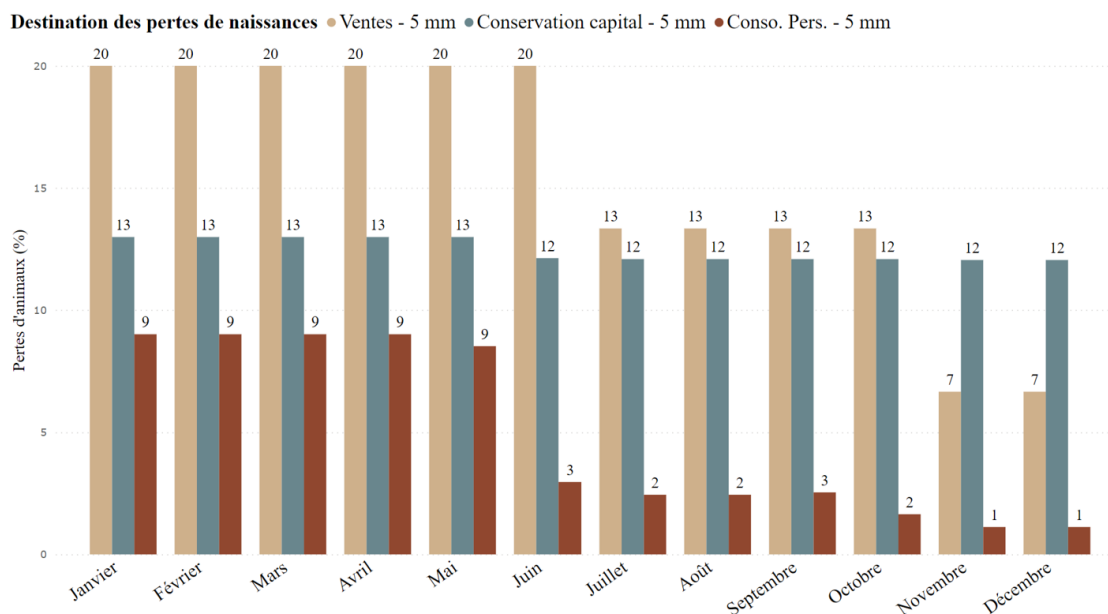


Figure 30 - Pertes selon les différentes finalités des petits nés au sein de l'exploitation - 5 mm (%)

La perte de production de produits animaux varie entre 2 % et 19 % pour l'ensemble de la production de lait et d'œufs (Figure . 31). La part des pertes destinées à la vente varie de 0 % à 16 %, tandis que la part des pertes à destination de l'autoconsommation oscille entre 2 % et 3 % selon le mois d'occurrence.

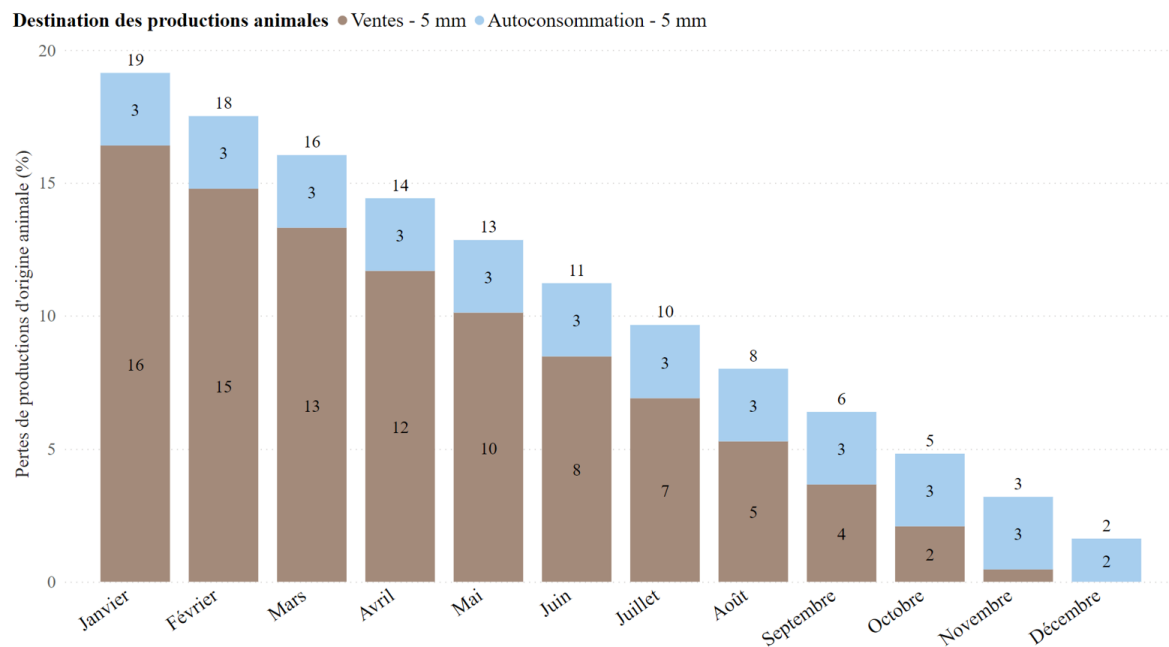


Figure 31 - Pertes de produits animaux différenciées selon la part des ventes et de l'autoconsommation - 5 mm (%)

5.2.1.2. Pertes pour un dépôt de téphra de cinquante millimètres d'épaisseur

Les pertes les plus importantes concernent les ventes, qui subissent une perte totale entre janvier et juin (Figure. 32). Les pertes pour la conservation des animaux en vue d'agrandir ou de renouveler le cheptel oscillent entre 72 et 86 %. En ce qui concerne la part destinée à la consommation familiale, les pertes varient de 1 à 69 % selon le mois de survenue de l'éruption volcanique.

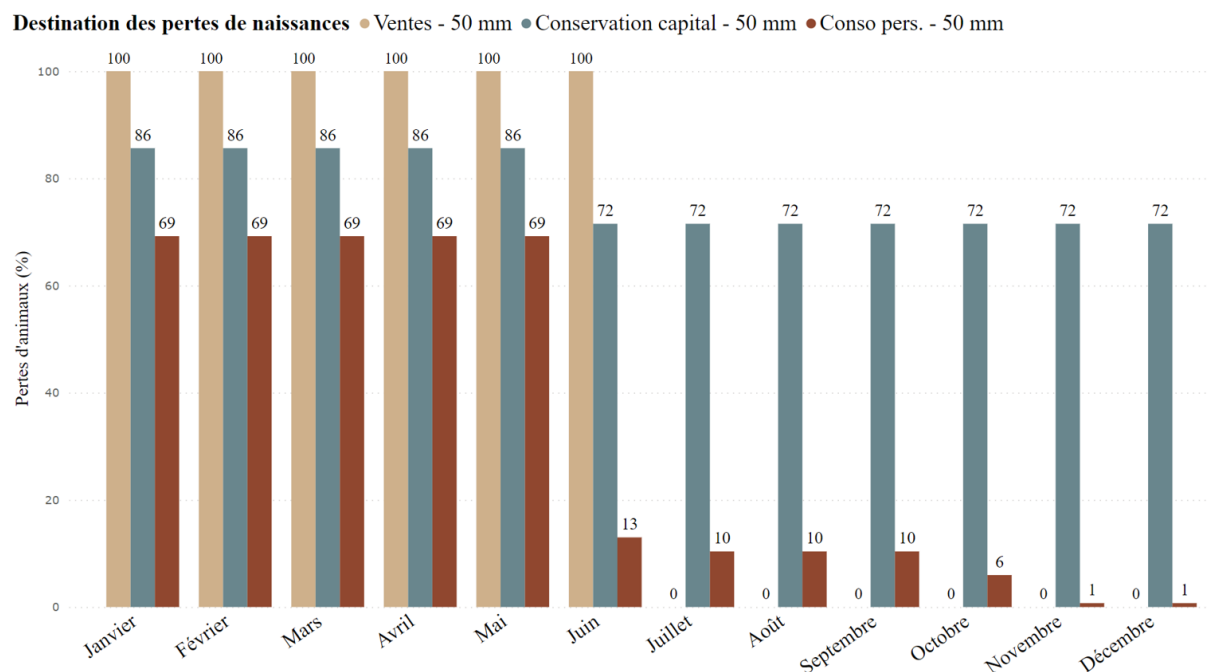


Figure 32 - Pertes selon les différentes finalités des petits nés au sein de l'exploitation - 5 mm (%)

La production de lait et d'œufs, la perte globale de la production totale varie entre 7 % et 79 % (Figure. 33). La part des pertes destinées à la vente fluctue entre 6 % et 73 %, tandis que celle destinée à l'autoconsommation varie entre 0 % et 6 %.

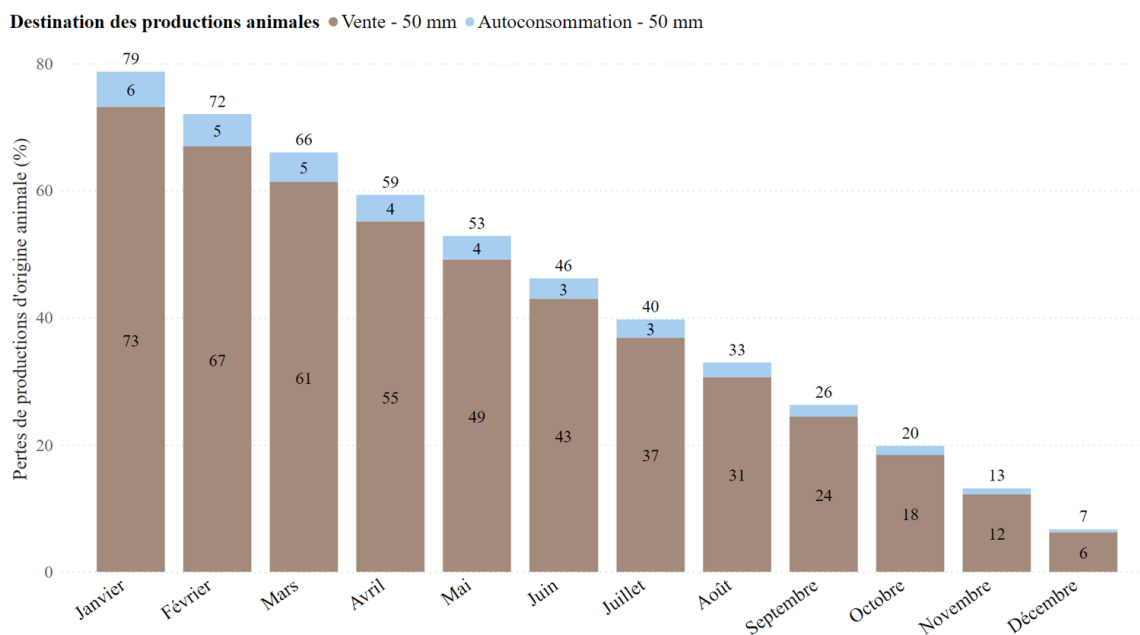


Figure 33 - Pertes de produits animaux différenciées selon la part des ventes et de l'autoconsommation - 5 mm (%)

5.3. Projection des pertes au niveau global du système

Dans cette section, les pertes sont quantifiées pour l'ensemble des inflow, outflow, throughflow et selfflow, afin d'examiner les pertes subies par le système dans son ensemble et leur impact sur les différents éléments. Les pertes globales des flux sont reportées en annexe (Annexe. E.g.v ; vi), ici, l'accent est mis sur certains flux plus spécifiques.

Les throughflow ont été analysés car leurs pertes peuvent entraîner une réaction en cascade sur d'autres éléments du système. Effectivement, ces flux circulent au sein du système d'un sous-compartiment à un autre.

La quantification de la perte de fourrage provenant du sous-système de culture vers le sous-système d'élevage a été effectuée, notamment en examinant le flux représenté par la flèche n°15 (Figure. 34).

Une attention particulière a également été accordée aux déjections, dont la perte réduit la source de fertilité pour le sous-système de cultures, comprenant les cultures et la prairie permanente. Les déjections sont représentées par les flèches n°12 et 13, réparties selon qu'elles sont destinées au stockage ou utilisées directement (Figure. 34). Celles destinées au stockage, provenant des volailles, des cobayes et des léporidés, servent à fertiliser les cultures de l'exploitation. En revanche, les déjections directes, émanant des bovins et des ovins, fertilisent directement la prairie.

La perte de prairie permanente est également à prendre en considération, car elle constitue la principale source de nourriture pour l'ensemble des animaux d'élevage (environ 93% de la totalité), et sa perte entraîne un effet délétère sur le sous-compartiment d'élevage. La prairie permanente destinée au pâturage des animaux est représentée par la flèche n°19 (Figure. 34). Elle représente la perte sur l'ensemble de la prairie, impactant principalement les bovins et les ovins qui vont au pâturage. Elle ne prend pas considération la partie de la prairie fauchée à destination du stockage de fourrage des animaux.

Deux méthodes distinctes ont été utilisées. La première analyse les pertes de chaque flux indépendamment, mettant en lumière les pertes individuelles sans considérer leur proportion dans le système. La seconde méthode pondère les pertes en fonction de la proportion de chaque flux dans le système, ce qui permet d'identifier ceux qui sont les plus affectés relativement à l'ensemble des flux. Cette approche permet de déterminer les compartiments et les flux qui subissent les pertes les plus importantes proportionnellement au système.

Cette analyse systémique repose sur le modèle conceptuel général établi précédemment dans la section « *matériels et méthodes* ». Néanmoins, le modèle a été simplifié pour s'adapter aux caractéristiques spécifiques de l'exploitation agricole étudiée et pour faciliter la représentation des flux de matière. Ainsi, par exemple, des éléments tels que la main-d'œuvre et la location de matériel, bien que pertinents économiquement, ne sont pas quantifiés dans cette version simplifiée (Figure. 34).

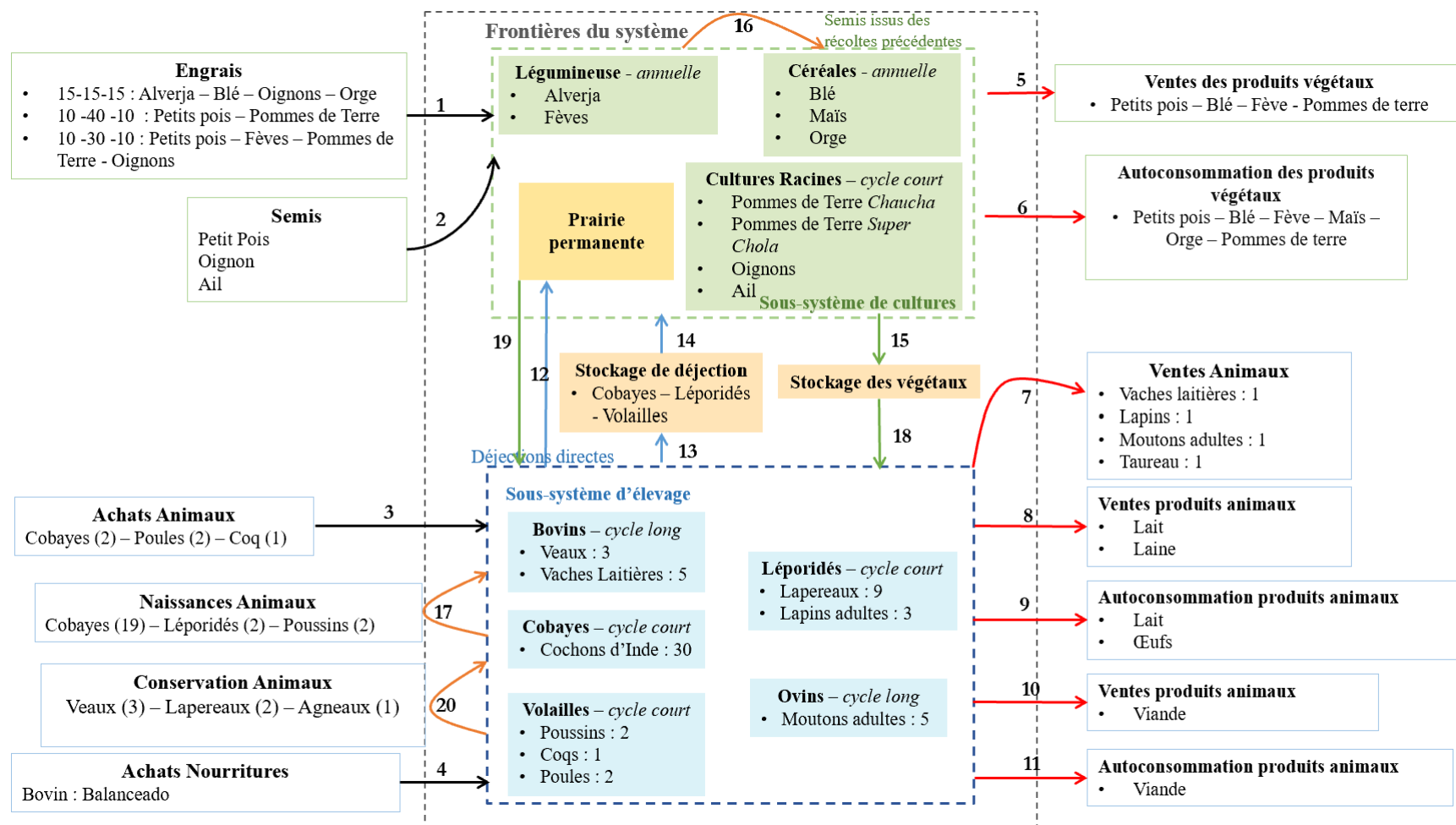


Figure 34 - Modèle conceptuel adapté à l'exploitation n°3 - Hors-éruption

- Inflow
- Selfflow
- Throughflow : sous-système élevage vers cultures
- Throughflow : sous-système cultures vers élevage
- Outflow

5.3.1. Pertes pour un dépôt de téphra de cinq millimètres d'épaisseur

De manière isolée par rapport aux autres flux, les pertes de fourrage varient considérablement selon la période de l'année envisagée. De janvier à avril, ces pertes sont particulièrement élevées, atteignant 92 % chacun. En revanche, en décembre, les pertes sont négligeables, moins de 1 %. Une éruption en mai entraîne une perte de 62 %, tandis que de juin à novembre, les pertes sont de l'ordre de 4 % en cas d'éruption. Malgré ces fluctuations, ce flux représente une fraction minime du système global, seulement 0,02 % du total. Ainsi, à l'échelle globale, les pertes demeurent faibles, variant entre 0,001 % et 0,01 % du total des flux.

Au niveau individuel, les pertes de déjections directes varient de 1 à 10 %, tandis que celles des déjections destinées au stockage vont de 3 à 38 %. Cependant, à l'échelle globale du système, les pertes de déjections directes sont plus significatives, représentant une proportion notable de 33 % de l'ensemble des flux. En revanche, les déjections destinées au stockage ne constituent que 1,5 % du total des flux. Ainsi, dans l'ensemble du système, les pertes liées aux déjections directes vont de 0,5 % à 3,3 %, tandis que celles des déjections stockées varient de 0,0 % à 0,5 %.

La prairie permanente subit une perte de 20 % quel que soit le mois d'occurrence d'une éruption. La proportion du flux concernant la prairie représente 52 % de la totalité des flux, et la perte, rapportée à l'ensemble des flux, équivaut à 10 % pour chaque mois.

En comparant les pertes de chaque flux proportionnellement à leur part dans l'ensemble du système, il est observé que le plus impacté est le flux d'azote associé à la prairie permanente, avec une perte pouvant atteindre 10 %. Ensuite, les flux d'azote provenant des déjections directes subissent des pertes potentielles allant jusqu'à 3,3 % selon le mois de l'événement. Pour le flux d'azote destiné à l'autoconsommation des productions végétales, les pertes peuvent atteindre jusqu'à 92 % lorsqu'elles sont considérées individuellement. Cependant, proportionnellement à sa part dans le système, la perte n'atteint que 0,3 %. En ce qui concerne le flux de vente des produits végétaux, les pertes individuelles varient de 4 à 64 %, ce qui est inférieur aux pertes pour l'autoconsommation. Cependant, lorsqu'elles sont considérées proportionnellement, les pertes peuvent atteindre jusqu'à 0,8 %, un chiffre plus élevé que celui observé pour l'autoconsommation, en raison de son flux plus important.

5.3.2. Pertes pour un dépôt de téphra de cinquante millimètres d'épaisseur

Les pertes liées au fourrage varient de manière significative, allant de 0 % à 95 % pour le flux pris indépendamment des autres flux. Le mois de mai enregistre les pertes les plus importantes, atteignant 95 %, tandis que décembre ne présente pas de pertes pour l'année en cours. En cas d'éruption survenant à un mois donné entre janvier et mai oscillent entre 88 et 95 %. Si l'éruption a lieu entre juin et novembre, les pertes s'élèvent à 4 % pour chaque mois. Malgré ces variations, au niveau du système dans son ensemble, les pertes restent proches de 0 % quel que soit le mois de l'éruption, en raison de la faible proportion de ce flux par rapport à l'intégralité du système.

Au niveau des déjections, les pertes varient allant de 2 % à 80 % pour les déjections directes et de 33 à 91 % pour celles destinées au stockage. Toutefois, au niveau du système, les pertes concernant les déjections destinées au stockage sont moins importantes que celles des déjections directes. Pour les déjections destinées au stockage, les pertes se situent entre 0,4 % et 1,2 %, tandis que pour les déjections directes, elles vont de 0,6 % à 27,1 %. Dans chaque scénario, les pertes sont les plus élevées en janvier.

Peu importe le mois de l'année où survient l'éruption, la prairie permanente subit une perte de 65%. Du fait de sa proportion significative dans le système, représentant environ 52% des flux totaux, ces pertes constituent une part importante, atteignant 24% au niveau global du système.

5.4. Impacts sur les différentes catégories de flux

Enfin, pour une vision globale synthétique des flux, il a été décidé de regrouper tous les flux du système selon leur catégorie (outflow, throughflow, selfflow) sous forme d'histogrammes. Les inflow ne sont pas inclus car ils ne représentent pas une perte directe de flux d'azote, mais plutôt une réduction des intrants. Par exemple, dans le cas d'une culture détruite, elle n'aurait plus besoin d'une part des fertilisants précédemment utilisés. De même, la perte d'animaux entraînerait une diminution de nourriture, car ces animaux ne nécessiteraient plus d'alimentation.

Premièrement, la proportion de chaque type de flux au sein du système est représentée (Figure. 35). Il en ressort que les throughflow représentent la plus grande part des flux constituant le système, avec une proportion de 88,1 %. Leur forte proportion est due à la quantité importante de déjections et au flux important de prairies disponibles pour le pâturage des animaux. Le flux représentant la plus faible intensité est celui des inflow, avec un pourcentage de 1,3 %. Par ailleurs, les selfflow et outflow représentent des proportions similaires, avec des valeurs de 5,2 % et 5,3 % respectivement.

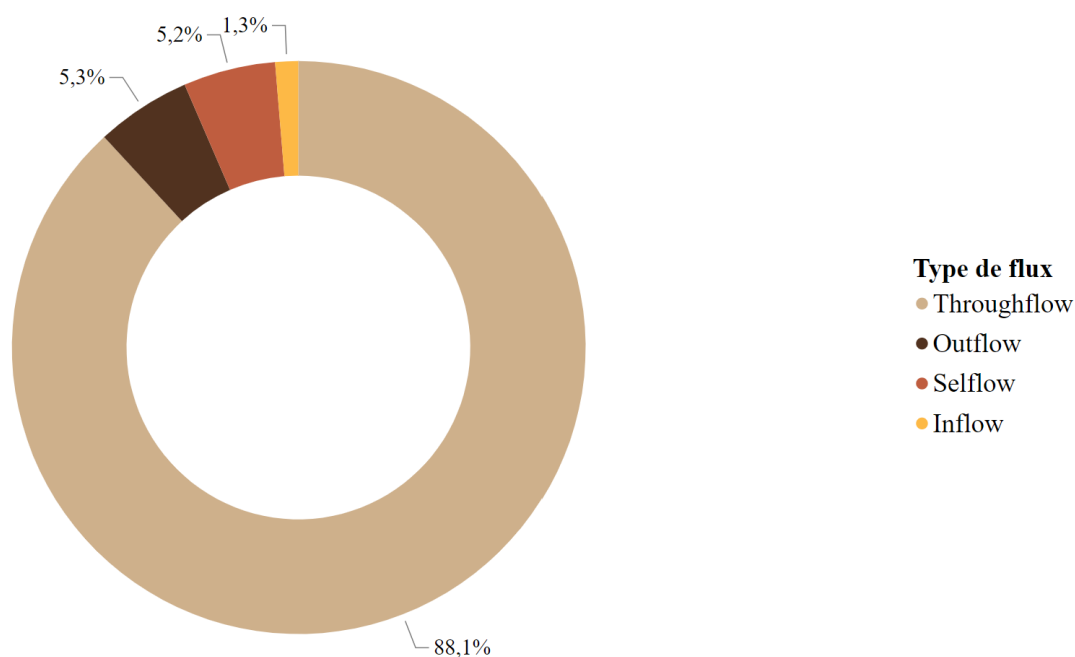


Figure 35 - Contributions relatives des différents types de flux de l'exploitation n°3 - Hors-éruption

Pour les outflow, la valeur totale diminue de façon plus prononcée pour un dépôt de cinquante millimètres, avec des valeurs de flux totaux variant entre 38 et 128 kg N/an, contre 83 à 135 kg N/an pour un dépôt de cinq millimètres (Figure. 36). La valeur la plus faible est observée en janvier pour les deux dépôts, avec des flux d'azote de 83 kg N/an pour cinq millimètres et 38 kg N/an pour cinquante millimètres. Le mois de décembre présente les valeurs de flux d'azote les plus proches des conditions hors éruptive, avec 135 kg N/an pour un dépôt de cinq millimètres et 128 kg N/an pour un dépôt de cinquante millimètres, comparées à la valeur en situation d'équilibre de 137 kg N/an.

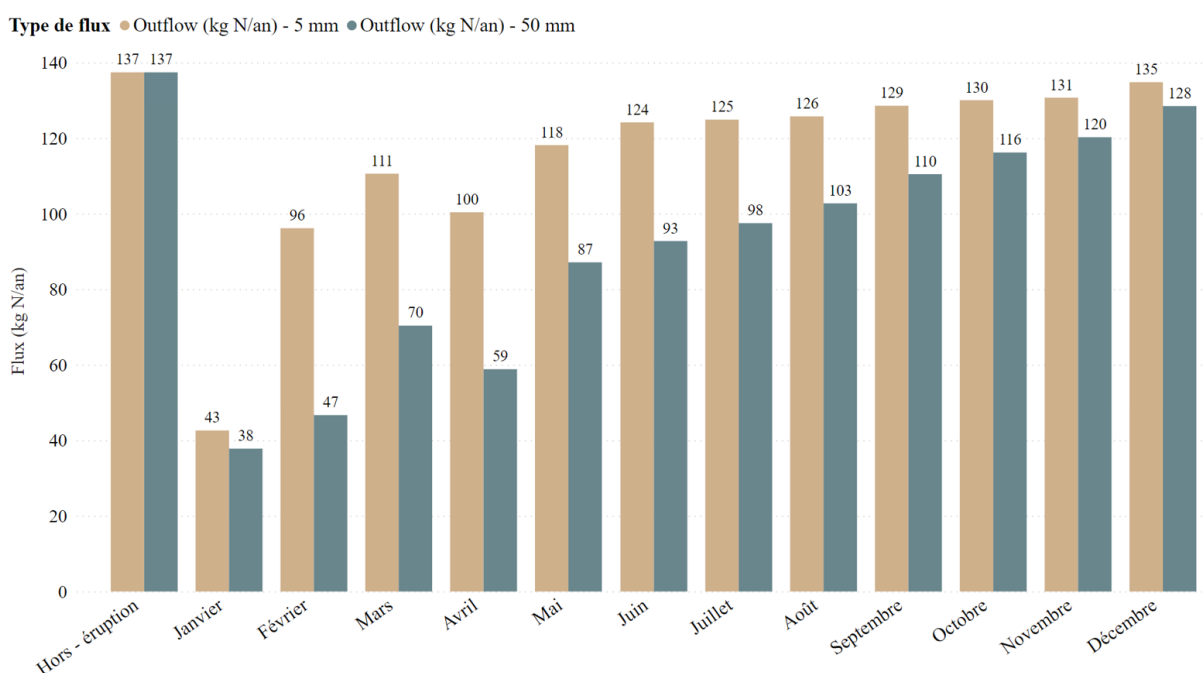


Figure 36 - Valeur des outflow totaux selon le mois d'éruption (kg N/an)

Les throughflow présentent une diminution moins marquée pour un dépôt de cinq millimètres que pour un dépôt de cinquante millimètres (Figure. 37). Les valeurs les plus faibles sont observées si l'éruption se produit en janvier, avec 1890 kg N/an pour cinq millimètres et 640 kg N/an pour cinquante millimètres. Si l'éruption se produit en décembre, les valeurs des throughflow totaux annuels sont de 1985 kg N/an pour un dépôt de cinq millimètres et de 1308 kg N/an pour un dépôt de cinquante millimètres. En comparaison, la valeur du flux en l'absence d'éruption est de 2265 kg N/an.

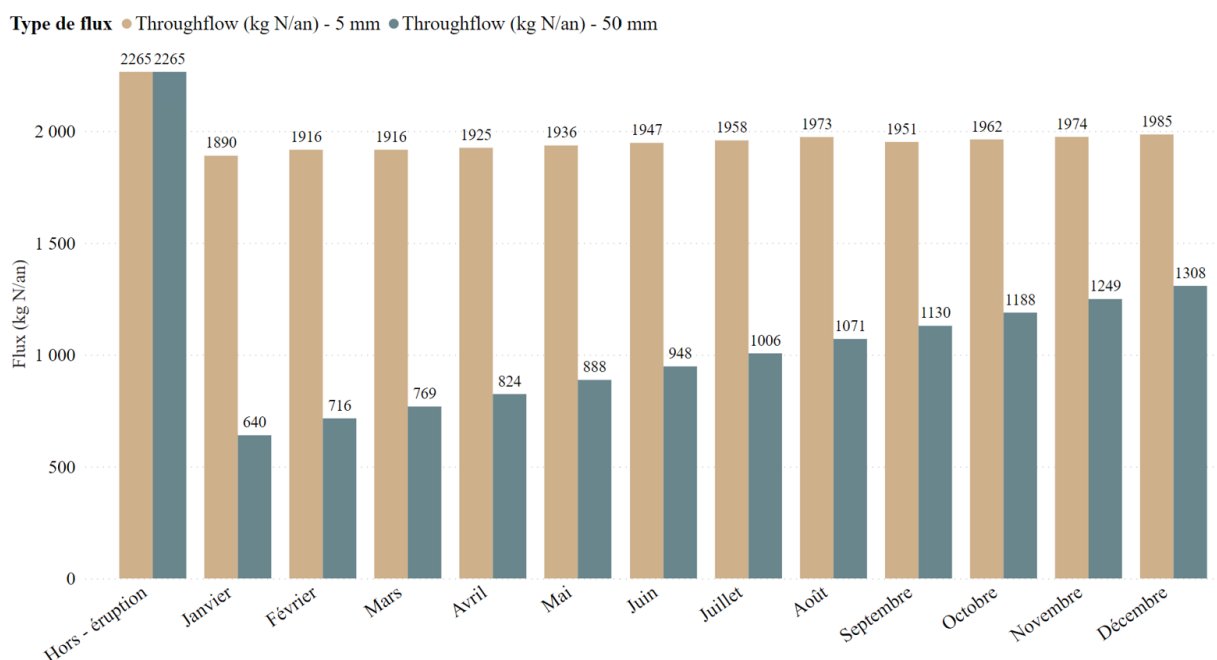


Figure 37 - Valeur des throughflow totaux selon le mois d'éruption (kg N/an)

La répartition des flux d'azote selon les mois pour les selfflow montre de faibles variations (Figure. 38). De janvier à juin, les valeurs restent relativement constantes à environ 112 kg N/an pour un dépôt de cinquante millimètres et entre 36 et 37 kg N/an pour un dépôt de cinq millimètres. De juillet à décembre, les valeurs augmentent à 113 kg N/an pour un dépôt de cinquante millimètres et à 43 kg N/an pour un dépôt de cinq millimètres. Ces flux incluent la naissance des animaux, la conservation des animaux, ainsi que la part des cultures retournant aux champs pour un nouveau semis. Il s'agit donc de flux provenant d'un compartiment et retournant au même compartiment pour son activité.

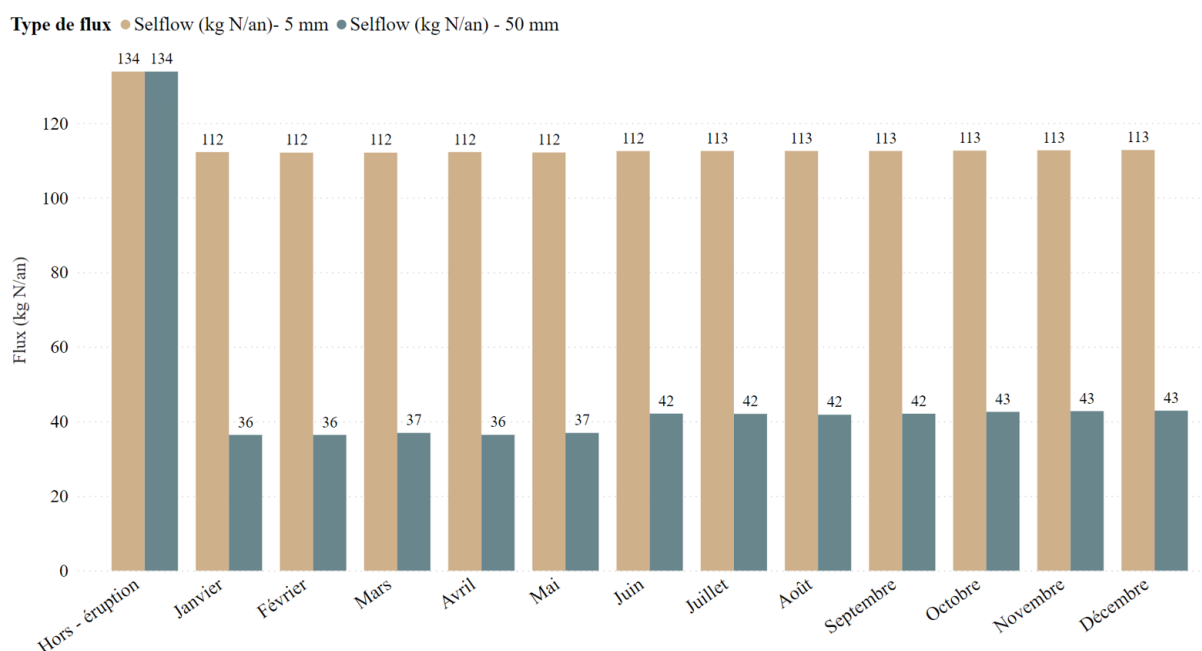


Figure 38 - Valeur des selfflow totaux selon le mois d'éruption (kg N/an)

VI. Discussion

1. Analyse de la structure, du fonctionnement et des performances agroécologiques de l'exploitation n°3

L'exploitation agricole n°3 étudiée, qui combine à la fois l'agriculture et l'élevage, se distingue par une interdépendance étroite entre ses différents sous-systèmes de production, formant ainsi une pratique de polyculture-élevage. Les sous-systèmes de cultures et d'élevage sont interdépendants, se complétant mutuellement pour assurer le bon fonctionnement des activités de chacun. Cependant, ils requièrent tous deux des intrants externes pour leur fonctionnement optimal. Pour évaluer la structure, le fonctionnement et les performances agroécologiques de cette exploitation, plusieurs indicateurs ont été évalués (Tableau. 9).

L'activité totale du système est un indicateur de la structure de l'exploitation. L'indice reflète le niveau d'activité en mesurant la circulation globale de l'azote à travers le système tant entre ses compartiments qu'avec l'extérieur. Il inclut donc la quantité totale d'azote provenant des apports externes (inflow), ceux générés entre les compartiments internes (throughflow) et les sorties (outflow) (Stark et al., 2019). *L'activité totale du système* de l'exploitation équivaut à 206 kg N/an*ha.

Le fonctionnement de l'exploitation est décrit par deux indicateurs : *l'intensité de l'IAE* et la *part de l'activité liée à l'IAE*. L'intensité de l'IAE représente les flux circulants uniquement entre les compartiments, c'est-à-dire la somme des throughflow du système de production, sans tenir compte ni des inflow ni des outflow. Ceci reflète les interconnexions au sein du système, évaluant ainsi la contribution des interactions entre cultures et élevage à l'activité totale du système. La part de l'activité liée à l'IAE indique la proportion de l'activité totale permise par ces throughflow. *L'intensité de l'IAE* a été calculée à 150,6 kg N/an*ha, avec une *part de l'activité liée à l'IAE* de 72 %. Le pourcentage élevé indique qu'une part importante de l'activité totale du système est liée aux throughflow.

Les indicateurs de performances agroécologiques permettent de mesurer, entre autres, la *productivité* de l'exploitation. Celle-ci est évaluée par la quantité totale des outflow, atteignant 45 kg N/an*ha. La *dépendance* représente la proportion des inflow par rapport à l'ensemble des flux décrivant l'activité globale du système. Dans ce cas, la dépendance est de 6 %, indiquant dans quelle mesure l'activité totale du système est très tributaire des inflow. L'*efficacité*, c'est-à-dire le rapport entre la production et la dépendance du système, est de 390%, mettant en évidence une productivité significative par rapport à la dépendance. Enfin, la résilience a été évaluée, montrant que 60% de l'activité du système est soutenue par des flux redondants, c'est-à-dire par les throughflow.

La contribution des sous-systèmes d'élevage et de cultures aux différents indicateurs a également été analysée. Dans un contexte éruptif, il est pertinent d'examiner dans quelle mesure les sous-systèmes de l'exploitation dépendent des éléments externes au système. Par exemple, les cultures détruites peuvent compromettre la capacité à nourrir les animaux, tandis qu'une dépendance aux intrants externes peut offrir une certaine stabilité alimentaire. Les aliments commerciaux, habituellement entreposés dans des sacs, sont moins vulnérables aux retombées de téphra, étant protégés et moins exposés que les cultures en plein air. A priori, cette pratique permettrait de continuer à nourrir les animaux, sous réserve que l'agriculteur ait déjà acheté la nourriture ou que les routes soient praticables pour les approvisionnements.

L'analyse révèle que la dépendance du sous-système d'élevage aux intrants extérieurs, principalement de la nourriture pour les bovins allaitants, est de 3 %. Les soins vétérinaires ne sont

pas pris en compte dans cette évaluation en raison de leur contenu négligeable en azote, ce qui les rend peu représentatifs dans l'évaluation des flux d'azote. La majorité de la nourriture provient de l'exploitation elle-même, principalement de la prairie permanente (93 %) et des résidus de cultures, notamment des céréales. Cela suggère qu'en cas d'éruption volcanique, la vulnérabilité du sous-système d'élevage dépendra largement de la sensibilité du sous-système de cultures face aux chutes de téphra, en particulier de la sensibilité de la prairie permanente, compte tenu de la faible dépendance de ce sous-système à l'égard de la nourriture provenant de l'extérieur de l'exploitation. Les vaches laitières sont les seules à recevoir des compléments alimentaires provenant de l'extérieur de l'exploitation. En revanche, toutes les autres espèces dépendent entièrement de la nourriture produite au sein de l'exploitation.

Quant aux cultures, leur dépendance inflow, tels que les engrais chimiques NPK, est évaluée à 8 %. Cette analyse n'a pas pris en compte les produits phytopharmaceutiques en raison de leur faible teneur en azote. Bien que le sous-système de cultures dépende davantage d'inflow que celui de l'élevage, il demeure étroitement lié aux throughflow pour la réalisation de son activité, notamment aux déjections animales qui contribuent à enrichir la fertilité des sols cultivés. En cas d'éruption, une perte d'animaux conduit à une diminution de fumure destinée à enrichir les cultures. Cependant, certaines cultures pourraient être détruites, ce qui réduirait les besoins en fertilisation pour la culture concernée.

La productivité est significativement plus élevée pour le sous-système d'élevage, représentant 73 % de la productivité totale du système, que celle liée au sous-système de culture et qui vaut 27 %. Cette productivité accrue dans ce sous-système est principalement attribuable à la production laitière. Par ailleurs, l'intensité de l'IAE, déterminée par les pratiques agricoles mises en œuvre, est de 34 % pour le sous-système d'élevage et de 38 % pour le sous-système de cultures.

Les niveaux de pertes concernent les déperditions d'azote en dehors du contexte éruptif, comme celles dues à la volatilisation, à la lixiviation, ou à l'azote non valorisé par les animaux. L'efficacité azotée d'un animal, qui mesure sa capacité à convertir l'azote de son alimentation en produits d'origine animale, varie selon divers facteurs tels que le stade de croissance, les caractéristiques individuelles et la composition du régime alimentaire. Les animaux ne parviennent pas toujours à utiliser efficacement l'azote qu'ils ingèrent, ce qui entraîne une déperdition significative de ce nutriment (Peyraud et al., 2012).

Les indicateurs calculés sont spécifiques à l'exploitation étudiée et ne suffisent pas à tirer des conclusions définitives sur sa conduite agricole ainsi que sur ses performances agroécologiques. Une approche plus exhaustive nécessiterait l'analyse de plusieurs exploitations afin de comparer les différents paramètres et d'évaluer la représentativité et l'importance de ces valeurs. Toutefois, l'exploitation montre une faible dépendance aux inflow, son activité étant principalement soutenue par les throughflow.

2. Analyse économique de l'exploitation n°3 hors éruption

En situation d'équilibre, en dehors des périodes d'éruption, il est observé que les cultures annuelles comme les légumineuses et les céréales génèrent des pertes pour l'exploitation. Ces cultures engendrent davantage de coûts que de revenus. De même, l'élevage de volailles entraîne des pertes pour l'exploitation. L'impact d'une éruption accentuera encore davantage ces pertes économiques. Une portion de cette production est utilisée pour la consommation familiale, ce qui ne contribue pas directement à la génération de revenus. Cependant, en considérant la valeur nette, qui intègre la valeur économique de la part de production conservée au sein de l'exploitation, celle-ci reste

déficitaire. En d'autres termes, les coûts excèdent les bénéfices, même en prenant en compte la part de production consommée par l'exploitant agricole. Cette portion consommée représente néanmoins une économie pour l'exploitant agricole, car elle constitue une part de nourriture qu'il n'aura pas à acheter. En considérant l'ensemble des activités économiques, l'exploitation est économiquement viable en absence d'une éruption volcanique. Évaluer sa capacité à faire face aux chocs et à investir dans des pratiques de restauration en cas d'éruption reste cependant une tâche complexe, nécessitant une analyse économique plus approfondie et une meilleure compréhension de l'économie locale.

3. Quantification de la vulnérabilité de l'exploitation n°3 face aux dépôts de téphra

3.1. Pertes économiques

Les pertes économiques annuelles brutes ont été estimées pour deux épaisseurs de dépôts de téphra (5 et 50 mm). Les pertes ont été évaluées pour chaque mois de l'année afin d'illustrer la variabilité temporelle des impacts potentiels liés à l'éruption. Les pertes mensuelles correspondent à la diminution du revenu brut annuel total si une éruption se produit durant un mois donné de l'année. Ces pertes ont été estimées séparément pour les sous-systèmes de culture et d'élevage, puis ajustées de manière proportionnelle selon leur importance économique au sein de l'exploitation, afin d'obtenir une estimation différenciée des pertes globales selon les cultures et l'élevage.

3.1.1. *Dépôt d'une épaisseur cinq millimètres de téphra*

Les pertes de revenus annuels bruts sont plus marquées en janvier, représentant 15 % pour l'élevage et 1 % pour les cultures sur un total de 17 % (Figure. 23). En ce qui concerne les pertes de revenus bruts liées à l'élevage, une diminution progressive est observée de janvier à décembre. La tendance décroissante des pertes observée au fil des mois peut être expliquée en partie par l'une des hypothèses de base utilisée pour établir le modèle d'estimation des pertes, selon laquelle toutes les naissances d'une espèce animale donnée ont lieu simultanément, c'est-à-dire en janvier pour une portée. Cependant, si un animal donne naissance à plusieurs portées, la première naîtra en janvier et les suivantes se produiront dans les mois suivants, en fonction du cycle de gestation de l'espèce animale. Cette hypothèse découle du manque de données sur le développement individuel des animaux au fil des mois et de la variabilité d'une année à l'autre. Les naissances d'animaux ne se produisent pas à des moments précis et ne suivent pas un calendrier strict de croissance. Cependant, en examinant cette exploitation, il apparaît que la seule vente annuelle moyenne, pour l'élevage, concerne un lapereau, tandis que les autres petits issus des portées sont destinés à la consommation familiale ou à la conservation pour usage ultérieur, ce qui n'affecte pas le revenu brut annuel. La principale raison de la baisse des pertes réside dans la perte de production de lait, qui constitue une part significative des revenus, représentant environ 86 % du total des revenus bruts annuels de l'exploitation. En effet, le modèle d'estimation de pertes prend en compte le moment où l'éruption se produit, en maintenant la production normale pour tous les mois précédant l'éruption et en réduisant la production pour les mois restants. Par conséquent, plus l'éruption survient tard dans l'année, plus la production de lait annuelle est élevée, car un grand volume aura déjà été produit avant l'éruption. En réalité, la perte de production de lait reste constante au fil des mois, mais elle s'étend sur l'année suivante. Cette analyse ne prend en compte que l'année en cours, ce qui explique la tendance décroissante apparente des pertes au fil des mois, car les pertes de l'année suivante ne sont pas incluses.

Pour les cultures, la disponibilité de données mensuelles sur les différents stades phénologiques permet une estimation plus précise des pertes par rapport aux pertes totales de revenus bruts. Ainsi, les résultats montrent que le mois d'avril entraînerait les pertes économiques les plus importantes (Figure. 23). L'analyse des pertes de production (Figure. 25) révèle que ce mois engendrerait des pertes pour les petits pois, les fèves, le blé, le maïs et dans une moindre mesure pour l'ail. Parmi ces cultures, les petits pois, les fèves et le blé contribuent respectivement à 8 %, 21 % et 18 % du revenu annuel brut généré par les cultures, totalisant ensemble 47 %. La culture de maïs et d'ail ne contribuent pas aux revenus de l'exploitation car elles sont destinées à la consommation familiale. Les pertes de rendement agricole pour ces cultures sont estimées à 60 % pour les petits pois, 60 % pour les fèves et 75 % pour le blé. En ne prenant en compte que la perte de revenus des cultures, sans considérer sa proportion dans la part des revenus bruts totaux, cette perte est estimée à 38 % pour le mois d'avril.

Les revenus en situation hors-éruption atteignent 6 813 \$. En tenant compte des pertes dues à un dépôt de cinq millimètres, les revenus bruts annuels du sous-système de cultures et d'élevage varient entre 5 674 et 6 762 \$, soit une diminution de 1 à 17 %.

3.1.2. Dépôts d'une épaisseur cinquante millimètres de téphra

Les pertes de production sont nettement plus importantes après un dépôt de cinquante millimètres comparé à un dépôt de cinq millimètres, avec des pertes économiques allant jusqu'à 71 % dans ce scénario, contre seulement 17 % pour un dépôt de cinq millimètres (Figure. 24).

En janvier, une diminution de 69 % des revenus provenant de l'élevage animal peut être observée. De manière indépendante, cela équivaut à une diminution de 74 % des revenus annuels bruts générés par le sous-système d'élevage. La principale raison de la baisse significative des revenus réside toujours dans la diminution de la production laitière, qui est vulnérable aux chutes de téphra. Cette vulnérabilité se manifeste par un coefficient de perte de 70 % des rendements de production laitière, comparativement à seulement 20 % pour un dépôt de cinq millimètres (Tableau. 5). La présence de téphra peut induire un stress chez les animaux, tandis qu'un déséquilibre dans leur alimentation peut également entraîner des problèmes métaboliques, réduisant ainsi la production de lait (Leduc et al., 2021).

En revanche, le taux de pertes pour le mois le plus critique, avril, demeure constant à 3 % pour les cultures. Cependant, en isolant uniquement les pertes de cultures, celles-ci s'élèvent à 43 % contre 38 % précédemment. Contrairement au sous-système animal, la perte n'a pas connu une augmentation significative. En réalité, les pertes de cultures pour un dépôt de cinq millimètres étaient déjà très importantes, donc bien que le taux de perte ait augmenté, cette augmentation n'est pas très marquée. Ainsi, les pertes pour les petits pois, les fèves et le blé ont respectivement augmenté à 75 %, 75 % et 77 %, pour le mois d'avril, sans être fortement marquées.

Les revenus annuels bruts, en fonction du mois d'éruption, pour un dépôt de cinquante millimètres, varient de 1986 \$ à 6495 \$ selon le mois considéré, soit une diminution allant de 5 % à 71 %.

L'analyse économique révèle que la variation des pertes de revenus annuels bruts entre un dépôt de cinq et de cinquante millimètres est principalement attribuable au sous-système d'élevage, notamment en raison d'une diminution plus significative de la production laitière. Cette dernière revêt une importance économique majeure au sein de l'exploitation et présente des coefficients de pertes contrastés pour les deux niveaux de dépôt considérés. Les cultures, notamment les céréales et les légumineuses, sont déjà sensibles aux dépôts minimes, ce qui entraîne des pertes

substantielles même pour une accumulation de seulement cinq millimètres. Par conséquent, la part de perte pour un dépôt plus important est moins marquée car une grande partie des rendements est déjà compromise avec seulement cinq millimètres de dépôt. En revanche, les cultures moins sensibles, comme les pommes de terre, ne subissent aucune perte notable avec un dépôt de cinq millimètres, et même avec cinquante millimètres, les pertes restent relativement faibles, ce qui justifie la faible variation de perte des revenus dû aux cultures.

3.2. Pertes de productions végétales

L'évaluation des pertes de productions végétales peut être réalisée pour chaque mois, car il est plus facile d'obtenir des données sur l'évolution mensuelle des stades phénologiques des plantes que sur le cycle de développement des animaux. D'autre part, étant donné que l'exploitation suit une rotation spécifique, il y a moins de variabilité d'une année sur l'autre, contrairement aux animaux d'élevage qui ne suivent pas un calendrier de croissance. De plus, représenter les pertes de rendement annuel en tenant compte de la temporalité d'une potentielle éruption pourrait donner des indications sur les rotations culturales à privilégier pour minimiser les pertes annuelles. Cette évaluation n'a pas pour objectif de fournir une estimation précise des pertes, mais de donner une tendance générale basée sur les informations disponibles dans la littérature scientifique et technique, ainsi que sur les données recueillies sur le terrain spécifiques à l'exploitation étudiée.

Les pertes de rendements annuels prises en compte ne concernent que celles de l'année en cours, sans considérer celles qui pourraient survenir l'année suivante. Par exemple, si une éruption se produit après un semis durant l'année considérée, mais que la récolte n'a lieu que l'année suivante, la perte n'est pas prise en compte dans l'analyse. À titre d'illustration, le calendrier agricole établi (Annexe. D.a) montre que le maïs est semé en septembre et récolté en mai de l'année suivante. Ainsi, toute perte due à une éruption survenant en octobre, novembre ou décembre ne figure pas sur le graphique (Figures 25 ; 26), car son impact concerne la récolte de l'année suivante, laquelle n'est pas incluse dans cette étude, qui se limite à une période calendrier.

Pour un dépôt de cinq millimètres, les espèces végétales correspondant principalement aux céréales, telles que le maïs, le blé et l'orge, subissent de grandes pertes. Pour ce niveau de dépôt et ces espèces culturales, des pertes allant de 49 à 80 % sont déjà observées. Les légumineuses représentent la deuxième catégorie la plus affectée, avec des pertes allant de 20 à 80 %. Les cultures comme les oignons et l'ail subissent moins de pertes, et les tubercules tels que les pommes de terre ne subissent aucune perte à ce niveau de dépôt (Figure. 26).

Selon des études menées par Ligot et al., (2023) et Craig et al., (2021), il ressort que les cultures en phase de floraison sont particulièrement vulnérables aux dépôts de téphra. Quelques millimètres de téphra suffisent à détruire les récoltes. Les exceptions sont l'oignon et la pomme de terre, car la formation des bulbes et des tubercules n'exige pas de pollinisation. La sensibilité des plantes aux dépôts de téphra dépend de leur morphologie et de leur stade de développement. Par exemple, les oignons, avec leurs feuilles dressées, sont moins affectés car les particules de téphra y adhèrent moins que sur un feuillage étalé. Cela limite l'impact du dépôt sur l'activité photosynthétique de la plante. En revanche, les légumineuses et les céréales, sont plus vulnérables pendant la floraison car, la présence de téphra sur les organes reproducteurs peut dessécher les stigmates, entravant ainsi la pollinisation et la formation des grains. De plus, les céréales ont tendance à retenir le téphra sur leurs épis, ce qui peut réduire leur croissance et provoquer leur versement. Les caractéristiques morphologiques des plantes, telles que la rugosité et la pilosité des feuilles, influencent la rétention des particules de téphra (Ligot, 2022).

Pour un dépôt de cinquante millimètres, le mois d'août pourrait entraîner la perte totale des rendements annuels des petits pois ainsi que 90 % des rendements de blé et d'orge chacun. En janvier, par exemple, des pertes de 100 % des rendements de fèves et de 90 % de ceux du maïs sont prédites. Cependant, seules 9 % des récoltes de pommes de terre et d'ail seraient perdues, garantissant ainsi une source de rendement et évitant une perte totale de culture. De plus, les autres cultures ne sont pas encore implantées en janvier, ce qui signifie qu'elles ne seraient pas impactées et pourraient donner un rendement annuel sans pertes. Toutefois, ce résultat doit être nuancé en tenant compte de la magnitude de l'éruption et du temps nécessaire à la réhabilitation des sols, et donc à la possibilité de semer.

L'analyse des pertes de rendement des productions végétales effectuées mois par mois permet d'évaluer, en se basant sur les ressources disponibles dans la littérature et les données recueillies sur le terrain, le potentiel de pertes en fonction de la rotation culturale adoptée par l'exploitant agricole. Bien que l'étude ne vise pas spécifiquement à revoir la succession des cultures, elle suggère qu'il serait judicieux d'éviter de planter simultanément plusieurs espèces de légumineuses, et/ ou de céréales, particulièrement sensibles aux retombées de téphra. Il serait recommandé de combiner des espèces vulnérables avec d'autres plus résilientes pour garantir des rendements plus stables, bénéfiques à la fois sur le plan financier et alimentaire.

Il s'agit également de choisir judicieusement le moment d'implantation des diverses cultures pour éviter que plusieurs espèces ne se retrouvent au même moment à un stade phénologique particulièrement sensible, comme la floraison. Par exemple, il a été projeté que le mois d'août présente de grandes pertes car trois espèces sensibles, telles que les petits pois, les fèves et l'orge, sont en floraison à cette période, entraînant des pertes de 80 % chacune pour une épaisseur de cinq millimètres. Dans les Andes équatoriennes, caractérisées par des saisons peu marquées, la flexibilité pour modifier les rotations des cultures est accrue. En revanche, dans les régions où la variation saisonnière est plus prononcée, cette adaptation peut être difficile en raison des exigences spécifiques de chaque culture en matière de phytotechnie et du nombre de degrés-jour nécessaires pour compléter leur cycle de développement. Ces considérations sont étroitement liées aux conditions climatiques propres à chaque type de culture.

3.3. Pertes de flux d'azote

La production des sous-systèmes des cultures et de l'élevage a été décrite en termes de flux d'azote, dans le but de prendre en compte l'ensemble de la production, sans se limiter à la seule partie génératrice de revenus. Cette méthode offre également une meilleure compréhension des interactions entre les divers éléments de l'exploitation agricole, considérée comme un système intégré. En conséquence, les mois qui étaient auparavant les plus vulnérables dans la simulation économique ne sont plus les plus sensibles dans cette analyse. Cela résulte de la prise en compte de divers facteurs tels que la part des cultures destinées à la consommation familiale, au fourrage animal, au retour des cultures dans les champs, ainsi qu'à l'autoconsommation des animaux nés et des produits animaux, entre autres.

3.3.1. *Sous-système de cultures*

Pour le sous-système de culture, la perte de production végétale annuelle est la plus élevée si l'éruption se produit en février, atteignant 66 % (Figure. 27). Ce mois peut entraîner des pertes annuelles de rendements de 80 % pour les fèves, 80 % pour le maïs et 35 % pour l'ail. Les fèves représentent 29 % de la production totale, le maïs 2 % et l'ail 6 %. La plus grande part des pertes concerne la production destinée à la vente, conformément à l'hypothèse de base de ce modèle. Selon cette hypothèse, après une perte de production, la répartition des cultures se fait selon les

priorités suivantes : d'abord la consommation personnelle de la famille, ensuite le fourrage, puis les semis suivants, et enfin la vente.

Ainsi, une grande part de la production destinée à la vente peut être perdue. En revanche, la majeure partie des récoltes restantes serait destinée à la consommation de la famille, ce qui entraînerait des pertes minimales, environ 2 %, en termes de consommation familiale. Par rapport à la perte globale, la quantité destinée au fourrage diminuerait au maximum de 1 %, tandis que la part des récoltes destinée à retourner au champ pour une mise en culture ne subirait aucune diminution.

Les pertes sont exprimées en pourcentages de pertes de flux d'azote. Dans ce cas, les cultures ayant une teneur plus élevée en azote sont majoritairement représentées. Ainsi, les légumineuses contribuent davantage aux pertes que les tubercules, qui sont principalement composés de glucides et contiennent moins d'azote. Cela influence la distribution des pertes, car les pommes de terre, en plus d'être moins sensibles, présentent une teneur en azote plus faible, ce qui réduit d'autant plus leur contribution aux pertes.

En outre, l'allure générale du graphique (Figure. 27) montre des disparités significatives dans la répartition des pertes. En effet, si une éruption se produit en janvier, février ou avril, les pertes varieront de 59 à 66 %, tandis qu'elles ne seraient que de 4 % pour le mois de décembre. Cela suggère la nécessité d'ajuster le calendrier des cultures pour mieux anticiper la vulnérabilité et réduire les risques de pertes potentielles pour l'année considérée. Cependant, le modèle prend en compte les pertes pour une année donnée. Par exemple, en décembre, seules les pertes de blé sont comptabilisées, car il est récolté ce mois-là, tandis que les pertes des autres cultures ne sont pas prises en compte, car leurs récoltes auront lieu l'année suivante. Pourtant, en décembre, de nombreuses cultures, comme le maïs en floraison et d'autres en croissance, subiront des pertes notables pour les rendements de l'année suivante si une éruption se produit en décembre.

La tendance générale pour un dépôt de cinquante millimètres est similaire à celle observée pour un dépôt de cinq millimètres, avec des pourcentages de pertes plus élevés en raison de l'épaisseur accrue de téphra, entraînant ainsi davantage de dommages aux cultures. Ainsi les pertes pour la consommation de la cellule familiale atteignent maintenant 13 % (contre 3 % pour le dépôt de cinq millimètres). Les pertes relatives au fourrage et à la prise de semences pour replanter les cultures sont négligeables par rapport aux pertes globales.

Les valeurs de pertes illustrées (Figure. 28) représentent les pertes prises proportionnellement en fonction de l'importance de chaque destination des cultures dans la quantité totale des récoltes.

Lorsque les pertes sont évaluées en tenant compte des flux propres aux destinations spécifiques des cultures plutôt que de leur proportion dans la production globale, leur importance devient bien plus significative. La perte de fourrage, pour un dépôt de cinq millimètres, oscille entre 0 et 92 % selon le mois d'occurrence de l'éruption, et peut atteindre 95 % pour un dépôt de cinquante millimètres (Annexe. E.g). En janvier, février, mars et avril, les pertes de fourrage sont de 92 % en cas d'éruption, car le fourrage repose principalement sur les céréales, une espèce présentant une grande sensibilité. De telles pertes de fourrage animal pourraient nécessiter l'achat de nourriture provenant de sources extérieures pour alimenter les animaux.

Quant aux pertes liées aux semences, un dépôt de cinq millimètres peut entraîner des pertes de 0 à 12 %, tandis qu'un dépôt de cinquante millimètres peut causer des pertes de 0 à 55 %. Ces pertes peuvent compromettre la capacité de replanter diverses cultures (Annexe. E.g). Cependant, le gouvernement peut intervenir en fournissant des intrants agricoles, y compris des semences, ou en

apportant un soutien financier pour compenser les pertes. Alternativement, les agriculteurs peuvent s'entraider en échangeant des semences en fonction de leurs stocks respectifs.

3.3.2. *Sous-système d'élevage*

L'hypothèse selon laquelle les animaux naissent en janvier pour la première portée, puis les naissances suivent le cycle de gestation propre à chaque espèce à partir de ce mois, influence les résultats obtenus pour le sous-système d'élevage. Ainsi, si une éruption se produit en décembre, le nombre de naissances annuel sera moins affecté, car la plupart des naissances auront eu lieu avant l'éruption.

À partir de juin, les pertes de naissances diminuent par rapport aux mois précédents, car des portées auront déjà vu le jour avant l'éruption et ne seront donc pas affectées par une éruption à ce moment-là (Figure. 29). Ainsi, plus l'éruption survient tard dans l'année, moins les portées sont affectées, ce qui réduit les pertes dans ce flux.

Les tendances des pertes destinées à la vente, à l'autoconsommation et à la conservation pour le capital suivent les mêmes schémas que les pertes de naissances, car il s'agit des destinations finales des animaux nés au sein de l'exploitation (Figure. 30 ; 32).

Une des hypothèses émise pour établir le modèle d'estimation des pertes est que après une perte de la production d'animaux vivants, notamment les naissances, les survivants sont d'abord destinés à la vente, puis à la consommation personnelle et enfin à la conservation pour le capital. Les pertes concernant la vente paraissent significatives (Figure. 30 ; 32) car les flux sont analysés individuellement, sans considérer leur proportion. De plus, la vente d'animaux n'est pas l'activité principale de l'exploitation, la plupart des animaux étant destinés à la consommation familiale. Par exemple, selon les données collectées, seul un lapereau est destiné à la vente annuelle, tandis que les autres petits sont destinés à la consommation directe de viande ou à la conservation pour renouveler et élargir le cheptel. Ainsi, la perte d'un seul lapereau entraîne une perte totale pour ce flux. Pour un dépôt de cinquante millimètres, une perte du petit est observée de janvier à juin, car la portée est décimée par l'éruption si elle se produit durant cette période, sans qu'il y ait eu le temps pour une seconde portée, entraînant une perte totale. En revanche, le flux de consommation personnelle est celui qui subit le moins de pertes.

De manière générale, la fluctuation des pertes est due aux animaux ayant plusieurs portées par an, ce qui permet à certaines portées de ne pas être affectées. Plus l'année avance, plus il y a de chances d'avoir des portées non affectées. En revanche, si une éruption se produit en début d'année, les portées seront beaucoup plus affectées, avec des répercussions sur l'ensemble de l'année si les parents périssent.

En ce qui concerne la production de produits animaux (Figure. 31), l'allure générale du graphique est principalement dictée par la production laitière, représentant 96 % des productions, tandis que les 4 % restants concernent la production d'œufs. Une baisse significative des pertes est observée au fil de l'année. Une production normale est considérée pour tous les mois précédant l'éruption, et une production réduite pour les mois suivants. En janvier, les pertes atteignent leur maximum. Si l'éruption se produit plus tard dans l'année, cela laisse plus de mois non affectés, ce qui permet de maintenir un flux de production normal, du moins pour l'année en cours prise en compte. En effet, la diminution de la production laitière aura des répercussions sur l'année suivante, ce qui n'est pas pris en compte dans cette analyse, expliquant ainsi la diminution des pertes vers la fin de l'année. En revanche, en début d'année, la production est immédiatement impactée, et si les

animaux décèdent, la production sera affectée sur plusieurs mois, à moins qu'il n'y ait un achat de nouveaux animaux. Ainsi, les pertes sont plus importantes pour un dépôt de cinquante millimètres, car l'équivalent de la perte de trois vaches laitières est enregistré, contre une seule pour un dépôt de cinq millimètres.

3.3.3. Exploitation prise comme un système

En considérant le système dans sa globalité, il est possible de déterminer quels flux seraient les plus impactés selon le mois d'occurrence d'une éruption. Cette méthode permet d'évaluer, entre autres, l'impact sur chaque flux d'un sous-système et, par extension, les répercussions de cette perte sur d'autres compartiments. En ciblant les flux les plus affectés, il serait envisageable de prioriser les recherches futures afin de mieux contraindre les pertes engendrés par l'exposition à des chutes de téphra. Les données disponibles aujourd'hui restent insuffisantes.

En considérant la proportionnalité des flux dans l'ensemble du système, il est observé que le flux le plus impacté est celui de la prairie permanente destinée au pâturage et au fourrage des animaux, représentant plus de la moitié des flux totaux (52 %). Ce flux subit une perte constante tout au long de l'année, indépendamment du mois de l'éruption. Ensuite, le flux des déjections, constituant environ 33 % des flux totaux, est le second flux le plus touché. Ces deux flux, en tant que throughflow, n'affectent pas seulement un sous-système mais impactent également ceux qui en dépendent pour leurs activités, influençant ainsi la production globale de l'exploitation.

Ce résultat souligne l'importance de prendre en compte les interactions au sein de l'exploitation pour comprendre les enjeux et les pertes indirectes, car la défaillance d'un élément peut en entraîner une autre, créant ainsi un effet en cascade. Par exemple, les cochons d'Inde, selon les informations recueillies lors des entretiens, sont exclusivement nourris avec du fourrage provenant de la prairie permanente. En fonction de l'ampleur de l'éruption, il peut y avoir plus ou moins de pertes dans l'effectif des cochons d'Inde. Cependant, les animaux survivants doivent être alimentés. Si une perte significative de la prairie est observée, cela pourrait conduire à la perte des animaux survivants, faute de source de nourriture. À moins que la prairie ne soit fauchée et stockée dans un endroit hermétique, auquel cas les animaux pourraient être nourris pendant une période déterminée par la quantité de fourrage ainsi stockée. De même pour les bovins, notamment les bovins allaitants, pour lesquels la principale source d'alimentation provient du pâturage. Ainsi, toute réduction de celui-ci entraîne un déséquilibre au niveau de la ration alimentaire, pouvant potentiellement diminuer la production laitière.

De manière similaire, les déjections représentent une perte pour le sous-système d'élevage et une diminution de la source de fertilité pour le sous-système de cultures. Selon les informations recueillies, la prairie est exclusivement fertilisée par les déjections directes des animaux. De plus, bien que des fertilisants chimiques soient également utilisés, environ 41 % de la fertilisation destinée aux cultures provient des déjections animales stockées. Ainsi, une perte d'animaux entraîne une diminution des déjections et donc une baisse du retour de matière organique aux champ. Cela pourrait entraîner une fertilisation moins efficace et donc une possible réduction du rendement final, à moins que la culture ne soit détruite. Dans ce cas, elle ne nécessiterait plus de fertilisation et subirait une perte de rendement indépendamment de la baisse de fertilisation.

Les pertes de déjections destinées au stockage seront plus importantes que celles des déjections directes, en considérant ce flux indépendamment des autres. En effet, elles proviennent d'animaux plus vulnérables et de petite taille, tels que les cochons d'Inde, les léporidés et les volailles. Cependant, étant donné qu'il s'agit de stockage, il est possible que l'exploitant dispose d'un stock

important au moment de l'éruption et ne ressent pas immédiatement les effets de cette perte d'animaux sur la fertilité de ses cultures. D'autre part, la baisse de la fertilité des sols due à la réduction du retour des éléments nutritif peut être contrebalancée par l'emploi d'engrais commerciaux.

3.3.4. *Implication des différents types de flux*

L'importance relative de chaque type de flux dépend de sa proportion au sein de l'exploitation agricole. Il est observé que les throughflow représentent la plus grande part des flux totaux, avec une part de 88,1 % (Figure. 35). Ainsi, toute perturbation de ces flux aura un impact plus significatif sur le système, comme précédemment décrit. Les inflow ne sont pas affectés par une éruption car ils ne font pas partie intégrante de l'exploitation, mais proviennent de l'extérieur de celle-ci. Une diminution de ces besoins peut être calculée en fonction des pertes de cultures et d'élevage, mais cela ne révèle rien sur l'impact de ces flux. Une réduction des besoins en engrais chimiques, en alimentation ou en soins vétérinaires peut être évaluée en fonction des pertes subies par les cultures ou les animaux. Les outflow et les selfflow représentent respectivement 5,4 % et 5,2 % des flux, ce qui indique que leur impact global sera moindre en comparaison aux throughflow.

Afin de représenter l'implication des différents types de flux, les valeurs sont exprimées en kilogrammes d'azote par an plutôt qu'en pourcentage (Figure. 36 ; 37 ; 38). Cela permet de refléter avec précision les quantités d'azote et l'importance de chaque type de flux. Pour la représentation graphique, les différents flux ont été regroupés par catégorie (inflow, outflow, throughflow) et la valeur totale en azote de chacune de ces catégories a été représentée, sans tenir compte de la proportion des différents types de flux constituant chaque catégorie.

L'intérêt de ceci réside dans le potentiel des valeurs exprimées en kilogrammes d'azote par an à être utilisées dans des travaux futurs pour reconstituer des matrices de flux nécessaires à l'évaluation des différents indicateurs. Cela permettrait de calculer des indicateurs de structure, de fonctionnement et de performance agroécologique selon les deux épaisseurs de dépôts de téphra considérées, et d'observer l'évolution de ces indicateurs au cours d'une année calendrier.

Les throughflow sont d'un intérêt particulier en raison de leur importance dans la répartition des flux et de leur impact sur les différents sous-compartiments du système. Ces flux sont principalement influencés par les flux de déjections directes et de pâturage, représentant respectivement 38 % et 59 % du total des throughflow. Lorsque les valeurs azotées de ces flux sont examinées selon la temporalité d'occurrence d'une éruption, une différence marquée est observée entre un dépôt de cinq millimètres et cinquante millimètres. La majeure partie des variations entre les différents mois d'impact est principalement attribuable aux fluctuations dans les déjections, qui représentent une part importante de cette catégorie. En revanche, la prairie permanente subit des pertes constantes tout au long de l'année, car elle est affectée de la même manière quel que soit le mois de survenue d'une éruption, en raison de son stade phénologique constant tout au long de l'année et donc de sa vulnérabilité stable. Des variations plus minimes sont engendrées par les fourrages issus des résidus de culture servant à l'alimentation du bétail.

Cette observation permet de mettre en évidence la perte potentielle d'IAE. *L'intensité des flux d'IAE* fait référence à la quantité de ressources recyclées, en l'occurrence l'azote. Cette part représente l'activité du système permise uniquement par les throughflow. Étant donné que les pertes varient selon le dépôt de téphra, une partie des throughflow devra être remplacée par des inflow pour compenser les pertes, que ce soit pour l'alimentation des animaux ou pour les engrais nécessaires à la fertilisation des cultures. Cela se traduit par une diminution de la part de l'activité globale de

l'exploitation agricole soutenue par les throughflow, ce qui pourrait entraîner une dépendance potentielle accrue.

Il a été démontré précédemment que les sous-systèmes des cultures et de l'élevage dépendent faiblement des inflow, à hauteur de 8 % et 3 % respectivement, soulignant une forte dépendance aux throughflow. D'un point de vue agroécologique, une faible dépendance aux ressources externes est généralement bénéfique. En effet, cela montre une synergie au sein de l'exploitation, où chaque élément est recyclé et les pertes sont minimisées (Altieri et al., 2015). Cependant, en cas d'éruption, les throughflow sont directement exposées et peuvent être perdus, rendant l'exploitation vulnérable, car la majorité des ressources nécessaires à son bon fonctionnement proviennent de l'intérieur et subissent des pertes variables en fonction de l'importance du dépôt de téphra. Cela met en évidence l'importance de ce flux par rapport à l'ensemble des flux régissant le fonctionnement de l'exploitation. De plus, il souligne la nécessité de prendre en compte les interactions entre les différents éléments au sein d'une exploitation, car ces interactions déterminent finalement la productivité globale du système.

Les résultats des flux pour les throughflow indiquent une perte significative en janvier, notamment en cas de dépôt de cinquante millimètres, avec une diminution d'environ 60 % par rapport à la situation initiale en équilibre. Des pertes plus minimes sont observées pour un dépôt de cinq millimètres. Cela affectera les éléments dépendant de la disponibilité de ce flux. Cependant, il faut nuancer ce constat, car bien que cela représente une perte d'intrants pour certains éléments, les éléments dépendant de ces flux subissent également des pertes, réduisant ainsi la nécessité de ces flux comme intrants. Cela dépendra de la proportion dans laquelle les éléments subissent des pertes, de la proportion dans laquelle ces flux sont réduits, et de la proportion de ces flux dont les éléments ont besoin pour fonctionner efficacement.

Les outflow résultent des valeurs azotées provenant des productions végétales et animales. Ces valeurs représentent la quantité totale d'azote générée annuellement lors d'une éruption survenant à un mois donné. Les tendances sont principalement influencées par les productions animales, qui constituent une part significative de ces valeurs azotées, 72 % des valeurs correspondent au sous-système d'élevage.

Les selfflow montre une valeur azotée relativement constante peu importe le mois auquel se produirait une éruption et peu importe le niveau de dépôt de téphra. Ces flux reprennent la part des cultures qui est destinée au semis des cultures suivantes, la naissance d'animaux ainsi que la conservation d'animaux soit comme capital ou pour entrer dans le cycle de reproduction. Ces flux représentent chacun une proportion de 1 %, 71 % et 28 %. La principale source de variation est donc attribuable aux naissances d'animaux.

4. Obstacles à la diversifications des cultures

L'exploitation agricole examinée dans cette étude adopte un modèle de polyculture-élevage. Elle associe différentes cultures annuelles et à cycle court avec l'élevage de divers types d'animaux. Les cultures et l'élevage ne sont pas séparés mais plutôt interconnectés. Les cultures fournissent une alimentation pour les animaux, tandis que les déjections animales retournent au sol pour enrichir les cultures (Martin et al., 2016).

La diversification des cultures présente plusieurs avantages, notamment en favorisant une sensibilité culturelle variée et en offrant des sources de revenus multiples. Cette approche permettrait également de réduire les risques de pertes économiques. Cependant, dans les hauts plateaux andins, les conditions climatiques spécifiques posent des défis à cette diversification. Les

saisons sèches et froides de mai à septembre, suivies par des saisons chaudes et humides de novembre à mars, ainsi que les températures moyennes basses et des phénomènes comme le gel et la sécheresse, limitent les options de cultures viables, ce qui complique la diversification agricole dans cette région (Aguayo & Suárez-Duque, 2020).

De plus, les analyses menées ont révélé que les céréales et légumineuses sont vulnérables et peuvent subir des dommages significatifs en cas de dépôts de téphra, entraînant ainsi des pertes économiques et une diminution de la valeur alimentaire tant pour les familles que pour les animaux d'élevage. Une suggestion serait de les remplacer par des cultures plus résistantes à l'impact d'une éruption ou de les associer avec des cultures plus résilientes. Toutefois, comme indiqué précédemment, les conditions climatiques rendent difficile, voire restreignent, les possibilités d'adaptation (Ray et al., 2015).

D'autre part, l'analyse réalisée met en lumière une baisse significative de la quantité de déjections utilisées pour fertiliser les champs selon les différentes épaisseurs de téphra. Cette diminution aggrave le manque de nutriments déjà présent dans la région de Guamate, accentuant ainsi les défis auxquels sont confrontées les exploitants agricoles. La dégradation des sols, résultant de l'érosion et de la perte de nutriments, combinée aux risques liés à l'activité volcanique régionale, représente des menaces majeures pour ces exploitants agricoles (Baker et al., 2023).

5. Contextualisation des craintes des exploitants agricoles de la région de *Guamate*

Au cours des entretiens réalisés, une attention particulière a été accordée à la manière dont les agriculteurs expriment leurs craintes pour l'avenir dans le secteur agricole.

Tout d'abord, la contrainte majeure qui pèse sur leurs activités est le manque d'eau. Cette pénurie affecte non seulement la quantité de cultures qu'ils peuvent produire, mais également la santé et le bien-être de leurs animaux. Selon les exploitants, l'irrigation pourrait révolutionner leurs pratiques agricoles, mais le coût financier est un obstacle de taille. Sans accès suffisant à l'eau, ils se retrouvent pris au piège d'un cycle d'incertitude quant à la viabilité de leur ferme.

En outre, le marché agricole instable amplifie leurs inquiétudes. Les prix fluctuants et souvent injustes pour leurs produits limitent leurs possibilités d'investissement et d'expansion. Cette instabilité économique ajoute une couche supplémentaire d'incertitude à un environnement déjà précaire, les laissant chercher désespérément des solutions pour assurer la pérennité de leurs exploitations.

En ce qui concerne les contraintes opérationnelles, les exploitants doivent faire face à des défis logistiques et de protection de leurs cultures et animaux. Le téphra constitue un danger pour leurs récoltes et leur bétail, nécessitant un nettoyage constant et entraînant une baisse de la productivité.

Face à ces contraintes et craintes, les agriculteurs de cette région cherchent des moyens de s'adapter et de prospérer malgré les obstacles. Certains envisagent de diversifier leurs activités en ajoutant de nouvelles cultures ou en augmentant leur cheptel, tandis que d'autres explorent des options telles que l'irrigation et l'investissement dans des technologies agricoles innovantes.

Ainsi, il est observé qu'en situation normale, hors-éruption, de nombreux obstacles sont déjà en place, et une activité volcanique ne ferait qu'aggraver une situation déjà précaire en ajoutant un stress supplémentaire. Cela met en évidence l'importance d'une caractérisation approfondie de la

vulnérabilité des exploitations agricoles aux retombées de téphra, afin de déterminer quelles activités agricoles sont les plus susceptibles d'être affectées.

Par ailleurs, la pénurie d'eau a été identifiée comme un souci majeur. Or, l'eau joue un rôle crucial dans les stratégies visant à atténuer les dommages causés par les chutes de téphra (Wilson et al., 2010). En effet, elle est utilisée pour laver les différentes cultures afin d'éliminer le téphra. Dans cette région, l'absence de système d'irrigation conduit au stockage de l'eau dans des réservoirs, souvent non couverts, ce qui les rend plus vulnérables à la contamination par les retombées de téphra. Cette situation affecte à la fois les cultures et l'élevage. En effet, le stockage de l'eau dans des réservoirs limite l'accessibilité à celle-ci pour les cultures par rapport à l'utilisation de systèmes d'irrigation, et la contamination facilitée par le téphra a un impact négatif sur le bétail, qui consomme cette eau contaminée, nuisant ainsi à leur santé.

6. Limitations de l'étude

L'approche systémique adoptée dans cette étude pour évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles aux dépôts de téphra repose sur l'estimation des pertes dans les sous-systèmes d'élevage et de culture. Ces pertes sont principalement évaluées en utilisant des coefficients dérivés des recherches de Wilson & Kaye, (2007), et elles conditionnent l'évaluation globale de l'exploitation, considérée comme un système intégré. Toutefois, il convient de noter que ces coefficients sont fondés sur un nombre limité d'études d'impact menées sur le terrain à la suite d'éruptions volcaniques. Cette approche simplifiée ne prend pas suffisamment en compte les spécificités des plantes et le contexte environnemental, ce qui peut influencer l'impact réel. De plus, les fonctions de fragilité, desquelles découlent les coefficients utilisés, ne prennent en compte que l'accumulation de téphra au sol comme facteur d'impact principal, négligeant d'autres variables telles que la taille des grains de téphra, leur composition de surface, les conditions environnementales et les caractéristiques des cultures (Ligot, 2022).

Les fonctions de fragilité de Wilson & Kaye, (2007) ont été conçues pour évaluer la vulnérabilité de l'agriculture en Nouvelle-Zélande. Elles ont été développées à travers une revue de la littérature, des consultations avec des experts locaux, des observations sur le terrain après l'éruption du volcan Merapi en 2006 en Indonésie, et des essais sur les impacts des cendres volcaniques sur les pâturages (Wilson et Kaye, 2007). L'utilisation de ces coefficients néglige dès lors les facteurs pédoclimatiques et socio-économiques. Sur le plan pédoclimatique, les caractéristiques du sol et du climat influencent l'interaction des dépôts de téphras avec l'environnement agricole. Sur le plan socio-économique, des facteurs comme la structure foncière, les pratiques agricoles traditionnelles et la résilience économique des communautés agricoles jouent un rôle crucial dans la capacité des exploitations à réagir aux dépôts de téphras.

La disponibilité des coefficients pour chaque sous-classe du système de culture et d'élevage est limitée, ce qui a nécessité des regroupements basés sur des hypothèses préalables. Cette approche a pu introduire des biais dans les résultats, notamment en regroupant des animaux qui pourtant sont soumis à des modes de conduite différents. De même, la variabilité phénotypique des cultures n'a pas été pleinement prise en compte, et à nouveau des regroupements parfois grossiers ont dû être réalisés.

Pour différencier les pertes en fonction du mois d'occurrence d'une éruption, il a été nécessaire de prendre en compte la saisonnalité. Pour cela, des coefficients de saisonnalité spécifiques à chaque mois de l'année ont été appliqués, selon un calendrier cultural établi à partir d'informations recueillies lors d'entretiens sur le terrain. Ainsi, des données sur les périodes de semis, de

croissance, de floraison, de maturation et de récolte ont été requises. Les mois qui ne correspondaient pas aux périodes de récolte et de semis ont dû être interprétés en se basant sur la littérature agronomique. Cependant, les données disponibles se concentraient principalement sur les cycles de croissance adaptés aux régions de climat tempéré, ce qui n'est pas directement applicable aux conditions climatiques de l'Équateur. Contrairement aux climats tempérés, caractérisés par des saisons distinctes avec des températures modérées et des précipitations réparties tout au long de l'année, les Andes équatoriennes affichent des variations significatives en fonction de l'altitude et des saisons peu marquées (Emck et al., 2020; Lumni, 2023). Cependant, le développement des cultures est étroitement lié à la température et à l'insolation, variables selon l'altitude. En moyenne, la température diminue d'environ 0,65°C pour chaque élévation de 100 mètres (Bertin, 2023). Cette relation entraîne un allongement de la durée du cycle de développement et une réduction du nombre de cycles par an par rapport aux systèmes de cultures situés à des altitudes plus basses. Par conséquent, le calendrier de cultures établi peut comporter des erreurs, avec des mois associés à des stades phénologiques incorrects. Cela peut entraîner des biais dans l'analyse, où un coefficient de saisonnalité peut avoir été appliqué à un certain mois alors que le cycle de développement associé était erroné, ce qui fausse les estimations de production finales et leur interprétation.

Concernant l'analyse économique des exploitations et la quantification des flux azotés, elles reposent sur des données recueillies lors d'entretiens avec les exploitants agricoles. Cependant, ces résultats peuvent être biaisés, sous-estimés ou surestimés, en raison de diverses hypothèses nécessaires à leur traitement. Parfois, les données sur l'alimentation animale se limitent à des mesures standardisées, comme le nombre de sacs, qui peuvent ne pas toujours être précises. En effet, ces mesures ne prennent pas en compte la densité des différents composants des sacs, ce qui peut ne pas refléter avec précision le poids réel des produits qu'ils contiennent. En parallèle, il arrive que des informations sur les intrants agricoles soient absentes.

Pour l'analyse des flux d'azote, des bilans ont été établis pour chaque type d'espèce végétale et animale afin d'évaluer la cohérence des inflow et outflow (Annexes. E.d). Il semble que certaines valeurs aient été surestimées par les exploitants, notamment celles relatives aux déjections. Cependant, ces surestimations concernaient principalement les cobayes et les léporidés, dont les flux ne représentent pas une proportion notable dans le système. Cela n'entraîne pas de modifications majeures des résultats présentés. Par ailleurs, la conversion des flux de matière brute en valeurs azotées a nécessité d'estimer la teneur en azote de chaque espèce animale, végétale et des produits qui en résultent. Malheureusement, certaines valeurs étaient parfois manquantes, obligeant à utiliser le coefficient d'une espèce similaire pour effectuer cette conversion.

Les pertes dues aux émissions azotées, telles que la lixiviation et la volatilisation, ont été estimées de manière approximative pour s'aligner au mieux sur la méthodologie développée par Stark et al. (2019), et ainsi calculer des indicateurs de façon aussi fiable que possible. Cependant, ces estimations manquent de précision en raison du déficit d'informations pour les évaluer de manière plus précise.

Enfin, le modèle établi pour estimer les pertes économiques ainsi que les pertes de flux de matières, considère une éruption se produisant à un moment précis de l'année, sans prendre en compte les remobilisations de cendres qui peuvent causer des dommages sur une période plus étendue. Bien que les éruptions volcaniques soient brèves dans l'histoire d'un volcan, la grande quantité de matériaux pyroclastiques produits, combinée aux processus éoliens, peut entraîner une remobilisation continue et durable (Dominguez et al., 2020). En outre, les évacuations potentielles

des populations n'ont pas été prises en compte. Or, l'évacuation des agriculteurs après une éruption, selon sa durée, peut affecter la reprise normale de l'activité agricole.

7. Perspectives

L'approche adoptée dans cette étude combine une analyse économique, permettant d'estimer les pertes financières subies par un exploitant agricole, et une analyse des flux de matière, considérant l'exploitation agricole comme un système intégré et permettant une estimation des pertes de chacun de ses éléments constitutifs. Cette méthode offre des perspectives prometteuses pour une application à plusieurs exploitations dans une même région agricole. Elle constitue une porte d'entrée pour améliorer la compréhension de la vulnérabilité du secteur agricole face aux aléas volcaniques, en particulier les retombées de téphra.

Dans ce travail, seule une exploitation a été analysée, ce qui limite la possibilité de comparer les résultats avec ceux d'autres exploitations. Il serait pertinent de poursuivre cette analyse en l'appliquant à d'autres exploitations, afin de permettre une évaluation et une comparaison de la vulnérabilité potentielle des exploitations individuelles ainsi que de la zone agricole dans son ensemble. Ce point est particulièrement valable pour les indicateurs qui caractérisent la structure, le fonctionnement et les performances agroécologiques de l'exploitation. Pris isolément, ces indicateurs ne fournissent pas beaucoup d'informations. Il serait nécessaire de les comparer pour évaluer leur signification réelle et leur implication à l'échelle de l'exploitation. Avec une base comparative, il serait possible de mieux juger les performances de l'exploitation. Sans comparaison, il est difficile d'évaluer l'IAE au sein de l'exploitation.

La résilience, définie comme la capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser et à continuer de fonctionner tout en conservant sa fonction, sa structure et son identité (Walker et al., 2004), pourrait être mesurée plus précisément en calculant l'indice de résilience pour chaque scénario éruptif en fonction de chaque mois d'impact. Cela permettrait de suivre l'évolution de cet indicateur en fonction des épaisseurs de téphra et des différentes périodes de l'année.

Il serait également nécessaire de calculer l'intensité de l'IAE pour chaque scénario éruptif afin de représenter la part des throughflow dans l'activité totale du système. Cela permettrait de déterminer la proportion de l'activité totale permise par les flux internes au système. Mesurer le pourcentage de dépendance du système en fonction de chaque scénario serait intéressant pour observer l'évolution de cette dépendance aux inflow, comparée à la diminution potentielle des throughflow dans la contribution à l'activité globale du système. De plus, l'efficacité du système pourrait également être établie pour chaque scénario d'éruption.

Chaque indicateur étant interdépendant dans cette problématique, une réduction des throughflow affecte la dépendance du système. Moins d'intrants internes disponibles entraînent une plus grande dépendance aux intrants externes, ce qui diminue l'intensité de l'IAE et augmente la part de dépendance de l'exploitation à des ressources extérieures. Par conséquent, l'efficacité du système variera également en fonction de l'intensité de l'éruption, puisque la dépendance aux inflow augmente. Ainsi, ces différents indicateurs doivent être calculés pour chaque scénario éruptif, en prenant en compte la temporalité d'un événement volcanique, afin de mettre en évidence les changements de fonctionnement et de performance au niveau de l'exploitation.

Tout ceci repose sur une reconstruction de la matrice de flux. Chaque valeur pour chaque flux a été calculée en tenant compte des coefficients de pertes associés à chaque production, ce qui a donné de nouvelles valeurs azotées. À partir de ces valeurs, il est possible de construire la matrice

de flux pour chaque mois d'impact potentiel et pour chacune des deux épaisseurs de dépôts. Cela permet de calculer les différents indicateurs susmentionnés et d'établir une comparaison entre les différents scénarios éruptifs.

D'autre part, le modèle d'estimation de pertes établi pour ce travail considère les pertes de production pour une année donnée. En ce qui concerne les cultures, il serait judicieux de déterminer les pertes sur l'ensemble du cycle de culture plutôt que sur une seule année. En effet, comme mentionné précédemment, si une récolte a lieu l'année suivant celle considérée, le modèle ne prendra pas en compte les pertes survenues entre la récolte précédente et la récolte de l'année suivante. Cependant, un des intérêts du développement de cette méthodologie pour la quantification de la vulnérabilité des exploitations agricoles face aux chutes de téphra pourrait être de fournir une estimation des pertes que pourrait subir un agriculteur en fonction de la rotation culturale mise en œuvre. Ainsi, en prenant en compte les pertes sur l'année suivante de celle considérée, il serait possible d'appréhender les pertes de rendement sur l'ensemble du cycle de culture.

Dans cette étude, il est possible d'évaluer la diminution des coûts liés à l'achat d'intrants externes en raison des pertes d'animaux ou de cultures. Cependant, des achats supplémentaires doivent être pris en compte, tels que ceux nécessaires à la récupération des sols ou à la nutrition des animaux. Par exemple, la mélasse est souvent achetée après des épisodes éruptifs comme source d'énergie rapide pour les animaux. Il serait intéressant de connaître les coûts supplémentaires engendrés par une éruption, basés sur les témoignages de personnes ayant déjà subi un épisode éruptif. Cela serait particulièrement utile pour l'analyse économique, car les pertes de revenus liées à la baisse de production ont été analysées, mais les coûts associés aux stratégies de gestion post-éruptive n'ont pas été pris en compte.

VII. Conclusion

Le principal objectif de ce travail de fin d'études était de décrire de manière semi-quantitative la vulnérabilité des exploitations agricoles soumises aux chutes de téphra dans le canton de Guamate, en Équateur, exposé au volcan Sangay. Cette vulnérabilité a été décrite en termes de pertes économiques et de pertes de flux de matière, en se concentrant sur une année calendrier. Pour atteindre cet objectif, une approche économique a été adoptée, complétée par une méthode d'analyse de réseaux écologiques.

Le fonctionnement global de l'exploitation agricole étudiée, ainsi que sa structure et ses performances agroécologiques, ont été caractérisés dans le but de définir le mode de gestion global en dehors des périodes éruptives. Il s'agit d'un système de polyculture-élevage, intégrant à la fois des cultures et de l'élevage, ce qui permet de générer des revenus issus des deux activités. La principale activité économique de cette exploitation est la production de lait.

L'analyse révèle que cette exploitation repose davantage sur ses propres ressources internes que sur des intrants externes pour maintenir son activité globale. Cela souligne l'importance des interactions au sein du système pour assurer sa durabilité et sa productivité. Il est important de décrire la vulnérabilité en estimant les pertes pour chaque activité agricole, afin d'obtenir une vision holistique. Cela permet d'éviter de se concentrer uniquement sur les pertes d'un type de production spécifique, mais de prendre en compte leurs interconnexions.

La situation financière de l'exploitation en contexte hors éruptif et éruptif a été analysée afin d'évaluer les pertes économiques que pourrait occasionner une éruption volcanique pour l'exploitant agricole. Une estimation des impacts sur les différentes composantes de l'exploitation a été réalisée pour en évaluer les pertes en fonction de la magnitude de l'éruption. Cette analyse a été effectuée en prenant en compte une exposition fictive de l'exploitation à des dépôts de téphra de cinq et cinquante millimètres d'épaisseur. L'estimation a été effectuée pour chaque mois de l'année afin de prendre en considération la temporalité de l'impact volcanique. Cette approche est particulièrement pertinente pour les cultures, car leur réponse à l'aléa volcanique est influencée par leur stade phénologique, lequel évolue au fil du cycle de développement et donc selon les mois.

Les résultats de l'analyse suggèrent que l'exploitation en activité est plus vulnérable en janvier, période où les pertes financières sont estimées comme étant les plus importantes. Ceci est principalement dû à la perte significative de lait, pour les deux épaisseurs de téphra considérées. Étant donné que le lait constitue la principale source de revenus de l'exploitation, cela entraîne d'importantes pertes de revenus pour l'exploitant agricole.

En ce qui concerne les cultures, il apparaît que les mois d'avril et de mai enregistrent les pertes les plus importantes. À cette période de l'année, les céréales et les légumineuses sont particulièrement sensibles en raison de leurs stades phénologiques. En revanche, les tubercules ne subissent pas de pertes notables, quel que soit leur stade phénologique. Cela donne une indication sur les pertes encourues pour la rotation donnée et pourrait suggérer des adaptations de celle-ci. Par exemple, il serait possible de combiner des espèces considérées comme sensibles avec des espèces non sensibles, ou d'ajuster les calendriers de semis pour éviter que des stades phénologiques sensibles ne se chevauchent. Cette approche permettrait de garantir un certain niveau de rendement, crucial pour la subsistance de la famille et l'alimentation du bétail, tout en assurant un revenu stable pour l'exploitant.

Enfin, la vulnérabilité des différentes composantes du système a été décrite en se basant sur la perte de flux de matières, en l'occurrence les flux d'azote. Cette approche permet de décrire les pertes qui n'avaient pas pu être quantifiées économiquement, en plus de celles pour lesquelles cela avait été possible. Elle permet de prendre en compte les liens entre les différents éléments de l'exploitation considérée comme un système, soulignant ainsi l'importance des interactions au sein de l'exploitation. Il est apparu que les flux les plus critiques sont ceux qui circulent entre plusieurs compartiments du système, tels que ceux impliquant la prairie permanente et les déjections animales.

Ces deux aspects revêtent une grande importance, car leur diminution affecte significativement d'autres composantes du système. Par exemple, la réduction de la surface en prairie entraîne une baisse notable de la disponibilité de fourrage pour les animaux et limite le pâturage direct des ruminants, ce qui peut induire des stress supplémentaires, en plus des conséquences déjà engendrées par l'éruption elle-même, sur la production animale et la production de produits dérivés. D'autre part, la diminution du nombre d'animaux entraîne une chute significative des déjections, qui ne peuvent plus être répandues dans les champs pour assurer la fertilisation habituelle des cultures.

Le modèle établi dans ce travail de fin d'études, qui a permis l'estimation semi-quantitative des pertes économiques et de flux de matière, pourrait être amélioré. Une suggestion serait de prendre en compte les pertes sur l'ensemble d'un cycle cultural plutôt que de se limiter à une année calendrier. Cette approche permettrait une évaluation plus précise des pertes et faciliterait la planification d'une rotation de cultures adaptée pour renforcer la résilience du système agricole face aux retombées de téphra. De plus, ajuster les hypothèses sur lesquelles se base le modèle en fonction des données de terrain disponibles serait bénéfique. Enfin, inclure une diversité d'exploitations dans l'étude, avec différents modes de conduite, permettrait de mieux comprendre les impacts de l'intégration culture-élevage sur la résilience des exploitations agricoles face à cet aléa.

Cependant, cette étude permet désormais d'estimer les pertes pour chacune des composantes d'une exploitation agricole exposée à des retombées de téphra, ce qui n'avait pas été réalisé jusqu'à présent. En adoptant une méthode d'analyse de réseaux écologiques, il a été possible de considérer l'exploitation comme un système et de mettre en évidence les possibles effets en cascade que la perte d'un élément, impliqué dans l'activité d'autres composantes du système, peut engendrer. Jusqu'à présent, les pertes étaient évaluées individuellement pour chaque élément du système, sans tenir compte de leurs interactions potentielles. Ceci vient compléter l'estimation des pertes économiques auxquelles pourrait faire face un exploitant agricole. Des analyses économiques réalisées seules dans des travaux antérieurs souffraient de limitations, car certains aspects ne pouvaient être évalués de manière économique, ce qui entravait une compréhension globale du système. L'approche basée sur les flux de matière permet de contourner cette limitation. La considération de l'exploitation comme un système ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure description et compréhension de la vulnérabilité des exploitations agricoles exposées aux retombées de téphra.

VIII. Références bibliographiques

- 18_Teneur_Azote_tab.pdf. (n.d.). Retrieved May 21, 2024, from https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/18_Teneur_Azote_tab.pdf
- Abdellatif, M., & Valdenebro, E. (2016). *Storm-water Management: Evapo-transpiration & Cooling with Water*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24862.23360>
- Agripac. (2024). MixPac Papa Siembra. *Agripac*. <https://agripac.com.ec/productos/papa-siembra/>
- Agrivivos. (n.d.). *Alga 600 – AGRIVIVOS l Produit agricole l Amendements organiques l Maraîchage l Pesticides l Biostimulants*. Retrieved May 21, 2024, from <https://agrivos.com/biostimulants/alga-600/>
- Aguayo, V. S. E., & Suárez-Duque, D. (2020). Factores socioambientales que favorecen la conservación in situ de tubérculos alto andinos nativos en los cantones de Colta y Guamote en Chimborazo, Ecuador. *Sociedad y Ambiente*, 22, 72–96.
- Ágústssdóttir, A. M. (2015a). Ecosystem approach for natural hazard mitigation of volcanic tephra in Iceland: Building resilience and sustainability. *Natural Hazards*, 78(3), 1669–1691. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1795-6>
- Ágústssdóttir, A. M. (2015b). Ecosystem approach for natural hazard mitigation of volcanic tephra in Iceland: Building resilience and sustainability. *Natural Hazards*, 78(3), 1669–1691. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1795-6>
- Ágústssdóttir, A. M. (2015c). Ecosystem approach for natural hazard mitigation of volcanic tephra in Iceland: Building resilience and sustainability. *Natural Hazards*, 78(3), 1669–1691. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1795-6>
- Aitsi-Selmi, A., Murray, V., Wannous, C., Dickinson, C., Johnston, D., Kawasaki, A., Stevance, A.-S., & Yeung, T. (2016). Reflections on a Science and Technology Agenda for 21st Century Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7(1), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0081-x>
- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P., & Scandone, R. (2002). A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1), 63–78. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00211-1)
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Analyse-systemique.pdf. (n.d.). Retrieved May 21, 2024, from <https://ecoges.ensfea.fr/wp-content/uploads/sites/17/2018/04/Analyse-systemique.pdf>
- Antos, J. A., & Zobel, D. B. (1985). Plant form, developmental plasticity, and survival following burial by volcanic tephra. *Canadian Journal of Botany*, 63(12), 2083–2090. <https://doi.org/10.1139/b85-293>
- Araya, O., Wittwer, F., & Villa, A. (1993). Evolution of fluoride concentrations in cattle and grass following a volcanic eruption. *Veterinary and Human Toxicology*, 35(5), 437–440.
- Armienta, M. A., De la Cruz-Reyna, S., Morton, O., Cruz, O., & Cenicerros, N. (2002). Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113(1), 61–80. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00251-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00251-7)
- Arnalds, O. (2013). Chapter Six—The Influence of Volcanic Tephra (Ash) on Ecosystems. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 121, pp. 331–380). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407685-3.00006-2>
- Ayris, P. M., & Delmelle, P. (2012). The immediate environmental effects of tephra emission. *Bulletin of Volcanology*, 74(9), 1905–1936. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0654-5>

- Baker, E., Bezner Kerr, R., Deryng, D., Farrell, A., Gurney-Smith, H., & Thornton, P. (2023). Mixed farming systems: Potentials and barriers for climate change adaptation in food systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 62, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101270>
- Bardintzeff, J.-M. (2021). *Volcanologie* (6e éd). Dunod.
- Becerra-Sanabria, L. A., Mosquera, S. L. N., & Núñez-López, C. E. (2007). Efecto de niveles de fósforo y potasio sobre el rendimiento del cultivar ‘Criolla Guaneña’ en el departamento de Nariño. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.37066/ralap.v14i1.144>
- Bertin. (2023).
- Bias, S., Delmelle, P., Ligot, N., & Poulidis, A. (2023). *Tephra fallout impact on vegetation and crops: Bridging field-based with remote sensing observations*.
- Biomentos. (2024). Biomentos | alimento balanceado para ganado vacuno en Ecuador. *Biomentos*. <https://biomentos.com.ec/balanceado-para-bovinos/>
- Bitschene, P. R., Fernandez, M., Arias, N., Arizmendi, A., Grizinik, M., & Nillni, A. (1994). Volcanology and environmental impact of the August 1991 eruption of the Hudson volcano (Patagonia Andes, Chile). *Zentralblatt Für Geologie Und Paläontologie. Teil 1, Allgemeine, Angewandte, Regionale Und Historische Geologie*, 1993, 165–177.
- Blong, R. J. (1996). Volcanic Hazards Risk Assessment. In R. Scarpa & R. I. Tilling (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards* (pp. 675–698). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_20
- Blong, R. J. (Russell J.). (1984). *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Sydney ; Orlando, Fla. : Academic Press. <http://archive.org/details/volcanichazardss0000blon>
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., & Hincks, T. K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3). <https://doi.org/10.1029/2003JB002896>
- Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A., & Koyaguchi, T. (2015). Chapter 33—Tephra Dispersal and Sedimentation. In H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 587–597). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00033-X>
- Bonadonna, C., Folch, A., Loughlin, S., & Puempel, H. (2012). Future developments in modelling and monitoring of volcanic ash clouds: Outcomes from the first IAVCEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation. *Bulletin of Volcanology*, 74(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0508-6>
- Bréda, N. J. J. (2008). Leaf Area Index. In S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of Ecology* (pp. 2148–2154). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00849-1>
- Brown, S., Auken, M. R., & Sparks, R. S. J. (2015). Populations around Holocene volcanoes and development of a Population Exposure Index. In *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 223–232). <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.006>
- Brown, S. K., Jenkins, S. F., Sparks, R. S. J., Odbert, H., & Auken, M. R. (2017). Volcanic fatalities database: Analysis of volcanic threat with distance and victim classification. *Journal of Applied Volcanology*, 6(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0067-4>
- Buhk, C., Meyn, A., & Jentsch, A. (2007). The challenge of plant regeneration after fire in the Mediterranean Basin: Scientific gaps in our knowledge on plant strategies and evolution of traits. *Plant Ecology*, 192(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9224-2>
- Burylo, M., Rey, F., & Dutoit, T. (2012). Responses of five woody species to burial by marly sediment: The role of biomass allocation pattern flexibility. *Journal of Plant Ecology*, 5(3), 287–293. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr030>
- Carrot roots, fresh | Feedipedia. (n.d.). Retrieved May 21, 2024, from <https://www.feedipedia.org/node/11940>

- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I., & Williams, G. J. (1981a). Impact on agriculture of the mount st. Helens eruptions. *Science (New York, N.Y.)*, 211(4477), 16–22. <https://doi.org/10.1126/science.211.4477.16>
- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I., & Williams, G. J. (1981b). Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions. *Science*, 211(4477), 16–22. <https://doi.org/10.1126/science.211.4477.16>
- Craig, H. (2016). Impacts to agriculture and critical infrastructure in Argentina after ashfall from the 2011 eruption of the Cordón Caulle volcanic complex: An assessment of published damage and function thresholds. *Journal of Applied Volcanology*, 5. <https://doi.org/10.1186/s13617-016-0046-1>
- Craig, H., Wilson, T., Magill, C., Stewart, C., & Wild, A. J. (2021). Agriculture and forestry impact assessment for tephra fall hazard: Fragility function development and New Zealand scenario application. *Volcanica*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.30909/vol.04.02.345367>
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016a). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167–1229. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2240-1>
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016b). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167–1229. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2240-1>
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016c). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167–1229. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2240-1>
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016d). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167–1229. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2240-1>
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016e). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167–1229. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2240-1>
- Crisp, J. A. (1984). Rates of magma emplacement and volcanic output. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20(3), 177–211. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Cuchiye, M., & Mishell, T. (2021). *Análisis comparativo de las cenizas volcánicas provenientes de los volcanes Cotopaxi, Pululahua, Chalupas, Guagua Pichincha y Tungurahua para su uso en la fabricación de concreto*. [bachelorThesis, Quito, 2021]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21675>
- David Salazar, Maritza Cuichán, Mario Suárez, & Walter Villafuerte. (2013). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC-2013* | <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-espac-2013/>
- Decuyper, M. (2020). Visual Network Analysis: A qualitative method for researching sociomaterial practice. *Qualitative Research*, 20(1), 73–90. <https://doi.org/10.1177/1468794118816613>
- Dedieu, B. (2012). *Apprendre l'autonomie dans les systèmes de polyculture élevage laitier*. https://www.academia.edu/119721159/Apprendre_l'autonomie_dans_les_syst%C3%A8mes_de_polyculture_elevage_laitier
- Deligne, N. I., Jenkins, S. F., Meredith, E. S., Williams, G. T., Leonard, G. S., Stewart, C., Wilson, T. M., Biass, S., Blake, D. M., Blong, R. J., Bonadonna, C., Calderon B., R., Hayes, J. L., Johnston, D. M., Kennedy, B. M., Magill, C. R., Spence, R., Wallace, K. L., Wardman, J.,

- ... Zuccaro, G. (2021). From anecdotes to quantification: Advances in characterizing volcanic eruption impacts on the built environment. *Bulletin of Volcanology*, 84(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01506-8>
- Delmelle, P. (2003). Environmental impacts of tropospheric volcanic gas plumes. *Geological Society, London, Special Publications*, 213, 381–399. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.213.01.23>
- Denevan, W. M. (1995). 2 Prehistoric agricultural methods as models for sustainability. In J. H. Andrews & I. C. Tommerup (Eds.), *Advances in Plant Pathology* (Vol. 11, pp. 21–43). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0736-4539\(06\)80004-8](https://doi.org/10.1016/S0736-4539(06)80004-8)
- Díaz, S., & Malhi, Y. (2022). Biodiversity: Concepts, Patterns, Trends, and Perspectives. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(Volume 47, 2022), 31–63. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120120-054300>
- Dominguez, L., Bonadonna, C., Forte, P., Jarvis, P. A., Cioni, R., Mingari, L., Bran, D., & Panebianco, J. E. (2020). Aeolian Remobilisation of the 2011-Cordón Caulle Tephra-Fallout Deposit: Example of an Important Process in the Life Cycle of Volcanic Ash. *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00343>
- Durand, D. (2017). *La systématique*. Humensis.
- EFEverde, R. (2014, February 5). *Los animales y los cultivos, teñidos por la ceniza del Tungurahua ecuatoriano*. EFEverde. <https://efeverde.com/los-animales-y-los-cultivos-tenidos-por-la-ceniza-del-tungurahua-ecuadoriano/>
- Eley, T. (2014). *Volcanoes of the World*. <https://doi.org/10.4135/9781483351384.n88>
- Emck, P., Moreira-Muñoz, A., & Richter, M. (2020). *El clima y sus efectos en la vegetación*.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., & Reich, P. (1993). Organic Carbon in Soils of the World. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 192–194. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010034x>
- Étienne, S., & André, M.-F. (2003). La variabilité de la hiérarchie des processus de météorisation à travers les bilans météoriques de divers milieux périglaciaires nord-atlantiques (Islande, Labrador, Laponie, Spitsberg) / Variability in the hierarchy of weathering processes detected through weathering budgets of several North-Atlantic periglacial environments (Iceland, Labrador, Lapland, Spitsbergen). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 9(3), 177–189. <https://doi.org/10.3406/morfo.2003.1178>
- FAO. (n.d.). Overview | Agroecology Knowledge Hub | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Agroecology Knowledge Hub. Retrieved March 24, 2024, from <http://www.fao.org/agroecology/overview/en/>
- FAO. (2022). *STATISTICAL YEARBOOK WORLD FOOD AND AGRICULTURE 2022*. <https://doi.org/10.4060/CC2211EN>
- FAO. (2024a). *Livestock Evacuation Saves Humans from the Impacts of Volcanic Disasters* | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Livestock Evacuation Saves Humans from the Impacts of Volcanic Disasters. <https://www.fao.org/indonesia/news/detail-events/en/c/1506495/>
- FAO. (2024b). *Plateforme des connaissances sur l'agroécologie* | Plateforme des connaissances sur l'agroécologie | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <http://www.fao.org/agroecology/home/fr/>
- Fisher, R. V., & Schmincke, H.-U. (1984). Pyroclastic Fragments and Deposits. In R. V. Fisher & H.-U. Schmincke (Eds.), *Pyroclastic Rocks* (pp. 89–124). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6_5
- Folch, A. (2012). A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status, and future perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 235–236, 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.05.020>
- Fournier d'Albe, E. M. (1979). Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society*, 136(3), 321–326. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0321>

- Fowler, A. C., Scheu, B., Lee, W. T., & McGuinness, M. J. (2009). A theoretical model of the explosive fragmentation of vesicular magma. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2115), 731–752. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0382>
- fraises—Besoin physiologique.pdf. (n.d.). Retrieved May 21, 2024, from <https://www.agrireseau.net/petitsfruits/Documents/fraises%20-%20besoin%20physiologique.PDF>
- Gasparini, P., & Garcia-Aristizabal, A. (2021). Seismic Risk Assessment, Cascading Effects. In M. Beer, I. A. Kougioumtzoglou, E. Patelli, & I. S.-K. Au (Eds.), *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_260-1
- Gertisser, R., Troll, V. R., Walter, T. R., Nandaka, I. G. M. A., & Ratdomopurbo, A. (Eds.). (2023). *Merapi Volcano: Geology, Eruptive Activity, and Monitoring of a High-Risk Volcano*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-15040-1>
- Gill, P., Stewart, K., Treasure, E., & Chadwick, B. (2008). Methods of data collection in qualitative research: Interviews and focus groups. *British Dental Journal*, 204(6), 291–295. <https://doi.org/10.1038/bdj.2008.192>
- Grandjean, M. (2015). *Gephi introduction*. *Guide-pratique-paturage_ca11-2018.pdf*. (n.d.). Retrieved May 21, 2024, from https://aude.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Productions_techniques/guide-pratique-paturage_ca11-2018.pdf
- Harris, E., Mack, R. N., & Ku, M. S. B. (1987). Death of Steppe Cryptogams Under the Ash from Mount St. Helens. *American Journal of Botany*, 74(8), 1249–1253. <https://doi.org/10.2307/2444160>
- Hayes, J. L., Fitzgerald, R. H., Wilson, T. M., Weir, A., Williams, J., & Leonard, G. (2024). Linking hazard intensity to impact severity: Mini review of vulnerability models for volcanic impact and risk assessment. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2023.1278283>
- Hidalgo, S., Bernard, B., Mothes, P., Ramos, C., Aguilar, J., Andrade, D., Samaniego, P., Yepes, H., Hall, M., Alvarado, A., Segovia, M., Ruiz, M., Ramón, P., Vaca, M., & IG-EPN staff. (2023). Hazard assessment and monitoring of Ecuadorian volcanoes: Challenges and progresses during four decades since IG-EPN foundation. *Bulletin of Volcanology*, 86(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01685-6>
- Hidalgo, S., Vasconez, F. J., Battaglia, J., Bernard, B., Espín, P., Valade, S., Naranjo, M.-F., Campion, R., Salgado, J., Córdova, M., Almeida, M., Hernández, S., Pino, G., Gaunt, E., Bell, A., Mothes, P., & Ruiz, M. (2022). Sangay volcano (Ecuador): The opening of two new vents, a drumbeat seismic sequence and a new lava flow in late 2021. *Volcanica*, 5(2), 295–311. <https://doi.org/10.30909/vol.05.02.295311>
- Hm, C., Tm, W., C, M., C, S., & Aj, W. (2021). *Agriculture and forestry impact assessment for tephra fall hazard: Fragility function development and New Zealand scenario application*. <http://hdl.handle.net/10179/19910>
- IFAD. (2023). *Ecuador*. IFAD. <https://www.ifad.org/en/web/operations/w/country/ecuador>
- Ilbay-Yupa, M., Lavado-Casimiro, W., Rau, P., Zubieta, R., & Castellón, F. (2021). Updating regionalization of precipitation in Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3), 1513–1528. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03476-x>
- Inbar, M., Ostera, H. A., Parica, C. A., Remesal, M. B., & Salani, F. M. (1995). Environmental assessment of 1991 Hudson volcano eruption ashfall effects on southern Patagonia region, Argentina. *Environmental Geology*, 25(2), 119–125. <https://doi.org/10.1007/BF00767868>
- Jacomy, M., Venturini, T., Heymann, S., & Bastian, M. (2014). ForceAtlas2, a Continuous Graph Layout Algorithm for Handy Network Visualization Designed for the Gephi Software. *PLoS ONE*, 9(6), e98679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098679>

- Kandasamy, S. (2013). *Suivi de l'indice foliaire (LAI) à l'échelle globale: Amélioration de la définition, de la continuité et de la cohérence des estimations de LAI à partir d'observations satellitaires kilométriques* [Phdthesis, Université d'Avignon]. <https://theses.hal.science/tel-00967319>
- Kennedy. (2023). UCx: *Volcanology field science and society*. edX. <https://www.edx.org/learn/volcanoes/university-of-canterbury-volcanology-field-science-and-society>
- Larousse, É. (n.d.). *Définitions: Thixotropie - Dictionnaire de français Larousse*. Retrieved April 3, 2024, from <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/thixotropie/77906>
- Lasso, L., & Espinosa, J. (2018). Soils from the Galapagos Islands. In J. Espinosa, J. Moreno, & G. Bernal (Eds.), *The Soils of Ecuador* (pp. 139–150). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_5
- Leavesley, G. H., LUSBY, G. C., & LICHTY, R. W. (1989). Infiltration and erosion characteristics of selected tephra deposits from the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington, USA. *Hydrological Sciences Journal*, 34(3), 339–353. <https://doi.org/10.1080/02626668909491338>
- Lebon, S. L. G. (2009). *Volcanic activity and environment*:
- Leduc, A., Souchet, S., Gelé, M., Le Provost, F., & Boutinaud, M. (2021). Effect of feed restriction on dairy cow milk production: A review. *Journal of Animal Science*, 99(7), skab130. <https://doi.org/10.1093/jas/skab130>
- Leonard, G. S., Johnston, D. M., Williams, S., Cole, J. W., Finnis, K., & Barnard, S. (2005). *Impacts and management of recent volcanic eruptions in Ecuador: Lessons for New Zealand*.
- Ligot. (2022). (PDF) *Crop vulnerability to tephra fall in volcanic regions: Field, experimental and modelling approaches*. https://www.researchgate.net/publication/366029865_Crop_vulnerability_to_tephra_fall_in_volcanic_regions_field_experimental_and_modelling_approaches
- Ligot, N., Bogaert, P., Biass, S., Lobet, G., & Delmelle, P. (2023). Grain size modulates volcanic ash retention on crop foliage and potential yield loss. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(4), 1355–1369. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1355-2023>
- Ligot, N., Viera, W., Peñaherrera, D., Bernard, B., Bogaert, P., & Delmelle, P. (2023a). *A quantitative assessment of crop vulnerability to tephra hazard at Tungurahua volcano, Ecuador: Understanding the effect of volcanic and biological factors*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2915673/v1>
- Ligot, N., Viera, W., Peñaherrera, D., Bernard, B., Bogaert, P., & Delmelle, P. (2023b). *A quantitative assessment of crop vulnerability to tephra hazard at Tungurahua volcano, Ecuador: Understanding the effect of volcanic and biological factors*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2915673/v1>
- Ligot, N., Viera, W., Peñaherrera, D., Bernard, B., Bogaert, P., & Delmelle, P. (2024). A quantitative assessment of crop vulnerability to tephra hazard at Tungurahua volcano, Ecuador: Understanding the effect of volcanic and biological factors. *Bulletin of Volcanology*, 86(4), 28. <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01710-2>
- Lumni. (2023). *Les climats de la Terre*. Lumni. <https://www.lumni.fr/article/les-climats-de-la-terre>
- Maeda, T., Takenaka, H., & Warkentin, B. P. (1977). Physical Properties of Allophane Soils. In N. C. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 29, pp. 229–264). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60220-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60220-5)
- Mani, L., Tzachor, A., & Cole, P. (2021). Global catastrophic risk from lower magnitude volcanic eruptions. *Nature Communications*, 12(1), 4756. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25021-8>
- Martin, G. G., Choisis, J.-P., Ryschawy, J., & Magne, M.-A. (2016). *Polyculture-élevage*. <https://doi.org/10.17180/9fny-q253>
- Menéndez. (2020, September 23). *La erupción del volcán Sangay*. euronews. <https://es.euronews.com/2020/09/23/la-erupcion-del-volcan-sangay-provoca-graves-danos-en-ecuador>

- Michaud-Dubuy, A. (2019a). *Dynamics of Plinian eruptions: Re-assessment of volcanic hazard in Martinique*.
- Michaud-Dubuy, A. (2019b). *Dynamics of Plinian eruptions: Re-assessment of volcanic hazard in Martinique*.
- Neild, J., O'Flaherty, P., Hedley, P., Underwood, R., Johnston, D., & Christenson, B. (1998). *Impact of a Volcanic Eruption on Agriculture and Forestry in New Zealand*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-a-Volcanic-Eruption-on-Agriculture-and-in-Neild-O'Flaherty/7020fd92da6dd24c0efeb5b65a636f83f922a652>
- Neumann, K. (1996). *Rabaul: Yu Swit Moa Yet: Surviving the 1994 Volcanic Eruption*. Oxford University Press.
- Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2), 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Newhall, C., & Hoblitt, R. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 64(1), 3–20. <https://doi.org/10.1007/s004450100173>
- Ortiz, H. D., Matoza, R. S., Garapaty, C., Rose, K., Ramón, P., & Ruiz, M. C. (2021). Multi-year regional infrasound detection of Tungurahua, El Reventador, and Sangay volcanoes in Ecuador from 2006 to 2013. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 41(1), 022003. <https://doi.org/10.1121/2.0001362>
- Osty, P.-L. (1978). L'exploitation agricole vue comme un système. Diffusion de l'innovation et contribution au développement. *Bulletin Technique d'information Du Ministère de l'Agriculture*, 326, 43–49.
- Pandey, H. O., & Upadhyay, D. (2022). Chapter Three - Global livestock production systems: Classification, status, and future trends. In S. Mondal & R. L. Singh (Eds.), *Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production* (pp. 47–70). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822265-2.00017-X>
- Pardo, N., Wilson, H., Procter, J. N., Lattughi, E., & Black, T. (2015). Bridging Māori indigenous knowledge and western geosciences to reduce social vulnerability in active volcanic regions. *Journal of Applied Volcanology*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s13617-014-0019-1>
- Paredes-Mariño, J., Forte, P., Alois, S., Chan, K. L., Cigala, V., Mueller, S. B., Poret, M., Spanu, A., Tomašek, I., Tournigand, P.-Y., Perugini, D., & Kueppers, U. (2022a). The lifecycle of volcanic ash: Advances and ongoing challenges. *Bulletin of Volcanology*, 84(5), 51. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01557-5>
- Paredes-Mariño, J., Forte, P., Alois, S., Chan, K. L., Cigala, V., Mueller, S. B., Poret, M., Spanu, A., Tomašek, I., Tournigand, P.-Y., Perugini, D., & Kueppers, U. (2022b). The lifecycle of volcanic ash: Advances and ongoing challenges. *Bulletin of Volcanology*, 84(5), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01557-5>
- Parsons, I., & Brown, W. L. (1991). Mechanisms and Kinetics of Exsolution—Structural Control of Diffusion and Phase Behavior in Alkali Feldspars. In J. Ganguly (Ed.), *Diffusion, Atomic Ordering, and Mass Transport: Selected Topics in Geochemistry* (pp. 304–344). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9019-0_10
- Pérez, L., Fernández-Figares, I., Nieto, R., Aguilera, J. F., & Prieto, C. (1993). Amino acid ileal digestibility of some grain legume seeds in growing chickens. *Animal Science*, 56(2), 261–267. <https://doi.org/10.1017/S0003356100021346>
- Peyraud, Cellier, & Donnars. (2012). *Les flux d'azote liés aux élevages: Réduire les pertes, rétablir les équilibres*.
- Portillo. (2023). *Paramo: Définition, caractéristiques, flore et faune*. projetecolo.com. <https://www.projetecolo.com/paramo-definition-caracteristiques-flore-et-faune-1345.html>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6(1), 5989. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>

- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2011). Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*, 99(2), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.018>
- Rothery, D. A., Glaze, L. S., & Wilson, L. (2022). 4 - Explosive volcanism: Observations and processes. In T. K. P. Gregg, R. M. C. Lopes, & S. A. Fagents (Eds.), *Planetary Volcanism across the Solar System* (Vol. 1, pp. 115–160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813987-5.00004-3>
- Rufino, M. C., Hengsdijk, H., & Verhagen, A. (2009). Analysing integration and diversity in agroecosystems by using indicators of network analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84(3), 229–247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>
- S, T. A., c, o, t, t, N, e, u, m, a, & n. (2020, January 13). Volcanic Eruption In Philippines Causes Thousands To Flee. NPR. <https://www.npr.org/2020/01/13/795815351/volcanic-eruption-in-philippines-causes-thousands-to-flee>
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H. M., Gawronska, H., & Gawronski, S. W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment*, 427–428, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>
- Saputra, D. D., Sari, R. R., Hairiah, K., Widiyanto, Suprayogo, D., & van Noordwijk, M. (2022). Recovery after volcanic ash deposition: Vegetation effects on soil organic carbon, soil structure and infiltration rates. *Plant and Soil*, 474(1), 163–179. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05322-7>
- Sari, R. R., Priyadarshini, R., Rozendaal, D. M. A., Saputra, D. D., Hairiah, K., & van Noordwijk, M. (2023). Tree diversity and social–ecological resilience of agroforestry after volcanic ash deposition in Indonesia. *Sustainability Science*, 18(6), 2735–2753. <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01400-6>
- Scandone, R., Bartolini, S., & Martí, J. (2015). A scale for ranking volcanoes by risk. *Bulletin of Volcanology*, 78(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0995-y>
- Scasso, R. A., Corbella, H., & Tiberi, P. (1994). Sedimentological analysis of the tephra from the 12–15 August 1991 eruption of Hudson volcano. *Bulletin of Volcanology*, 56(2), 121–132. <https://doi.org/10.1007/BF00304107>
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nat*, 413, 591.
- Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G. H. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513(7516), 45–53. <https://doi.org/10.1038/nature13636>
- Seymour, V. A., Hinckley, T. M., Morikawa, Y., & Franklin, J. F. (1983). Foliage damage in coniferous trees following volcanic ashfall from Mt. St. Helens. *Oecologia*, 59(2–3), 339–343. <https://doi.org/10.1007/BF00378859>
- Shindo, J., Okamoto, K., & Kawashima, H. (2003). A model-based estimation of nitrogen flow in the food production–supply system and its environmental effects in East Asia. *Ecological Modelling*, 169(1), 197–212. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00270-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00270-9)
- Shoji, S., Dahlgren, R., & Nanzyo, M. (1993). Chapter 3 Genesis of Volcanic Ash Soils. In *Developments in Soil Science* (Vol. 21, pp. 37–71). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70264-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70264-2)
- Small, C., & Cohen, J. E. (2004). Continental Physiography, Climate, and the Global Distribution of Human Population. *Current Anthropology*, 45(2), 269–277. <https://doi.org/10.1086/382255>
- Small, C., & Naumann, T. (2001a). The global distribution of human population and recent volcanism. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 3(3), 93–109. [https://doi.org/10.1016/S1464-2867\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2867(02)00002-5)
- Small, C., & Naumann, T. (2001b). The global distribution of human population and recent volcanism. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 3(3), 93–109. [https://doi.org/10.1016/S1464-2867\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2867(02)00002-5)

- Smith, W. H., & Staskawicz, B. J. (1977). Removal of atmospheric particles by leaves and twigs of urban trees: Some preliminary observations and assessment of research needs. *Environmental Management*, 1(4), 317–330. <https://doi.org/10.1007/BF01865859>
- Sparks, R. S. J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48(1), 3–15. <https://doi.org/10.1007/BF01073509>
- Stark, F., Archimède, H., González-García, E., Pocard-Chapuis, R., Fanchone, A., & Moulin, C. H. (2019). *Evaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide: Application de l'analyse de réseaux écologiques*. *Innovations Agronomiques* 72, 1-14. <https://doi.org/10.15454/L1W6US>
- Stark, F., González-García, E., Navegantes, L., Miranda, T., Pocard-Chapuis, R., Archimède, H., & Moulin, C.-H. (2017). Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>
- Stark, F., González-García, E., René, P.-C., Fanchone, A., & Moulin, C.-H. (2019). *Evaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide: Application de l'analyse de réseaux écologiques*. 79, 1–14.
- Steinfeld, H., Gerber, P. J., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & De haan, C. (2006). Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Vol. 24).
- Stewart, C., Johnston, D. M., Leonard, G. S., Horwell, C. J., Thordarson, T., & Cronin, S. J. (2006a). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3), 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
- Stewart, C., Johnston, D. M., Leonard, G. S., Horwell, C. J., Thordarson, T., & Cronin, S. J. (2006b). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3), 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
- Sultan, S. E. (2000). Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. *Trends in Plant Science*, 5(12), 537–542. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01797-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01797-0)
- Tabor, D. (1977). Surface Forces and Surface Interactions. In M. Kerker, A. C. Zettlemoyer, & R. L. Rowell (Eds.), *Plenary and Invited Lectures* (pp. 3–14). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404501-9.50009-2>
- Takahashi, T., & Shoji, S. (2001). Distribution and classification of volcanic ash soil. *Global Environ Res*, 6.
- Tanveer, M., Mahmood, A., Sarfraz, B., Zia, M. A., Javaid, M. M., Bibi, S., Naqve, M., Nadeem, M. A., Azeem, M., & Jabbar, A. (2023). Mechanism and Approaches to Enhancing Heat Stress Tolerance in Crop Plants. In M. Hasanuzzaman (Ed.), *Climate-Resilient Agriculture, Vol 2: Agro-Biotechnological Advancement for Crop Production* (pp. 499–520). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37428-9_22
- Tarr, S. A. J. (1972). The entry of pathogens into plants. In S. A. J. Tarr (Ed.), *Principles of Plant Pathology* (pp. 138–169). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-00355-6_10
- Thompson, M. A., Lindsay, J. M., Wilson, T. M., Biass, S., & Sandri, L. (2017). Quantifying risk to agriculture from volcanic ashfall: A case study from the Bay of Plenty, New Zealand. *Natural Hazards*, 86(1), 31–56. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2672-7>
- Thorarinsson, S. (1979). 5—On the Damage Caused by Volcanic Eruptions with Special Reference to Tephra and Gases. In P. D. Sheets & D. K. Grayson (Eds.), *Volcanic Activity and Human Ecology* (pp. 125–159). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-639120-6.50010-8>

- Titus, J. H., & Tsuyuzaki, S. (2003). Distribution of plants in relation to microsites on recent volcanic substrates on Mount Koma, Hokkaido, Japan. *Ecological Research*, 18(1), 91–98. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2003.00536.x>
- Tonini, R., Sandri, L., & Anne Thompson, M. (2015). PyBetVH: A Python tool for probabilistic volcanic hazard assessment and for generation of Bayesian hazard curves and maps. *Computers & Geosciences*, 79, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.017>
- Ugolini, F., & Dahlgren, R. (2002). Soil development in volcanic ash. *Global Environ. Res. Engl. Ed.*, 6.
- Ugrin, E. (2015, November 20). *Thick layer of ash blankets local communities as Tungurahua erupts again, Ecuador*. The Watchers. <https://watchers.news/2015/11/20/thick-layer-of-ash-blankets-local-communities-as-tungurahua-erupts-again-ecuador/>
- Ulanowicz. (2004). Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, 28(5–6), 321–339. <https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2004.09.001>
- Vacchi, M., Marriner, N., Morhange, C., Spada, G., Fontana, A., & Rovere, A. (2016). Multiproxy assessment of Holocene relative sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of the isostatic signal. *Earth-Science Reviews*, 155, 172–197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.02.002>
- Van den Bosch, H., Gitari, J. N., Ogaro, V. N., Maobe, S., & Vlaming, J. (1998). Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON):. III. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 71(1), 63–80. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00132-7)
- Vasconez, F. J., Hidalgo, S., Battaglia, J., Hernandez, S., Bernard, B., Coppola, D., Valade, S., Ramón, P., Arellano, S., Liorzou, C., Almeida, M., Ortiz, M., Córdova, J., & Vásconez Müller, A. (2022). Linking ground-based data and satellite monitoring to understand the last two decades of eruptive activity at Sangay volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 84(5), 49. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01560-w>
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. P. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2), art5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Wild, A. J., Wilson, T. M., Bebbington, M. S., Cole, J. W., & Craig, H. M. (2019). Probabilistic volcanic impact assessment and cost-benefit analysis on network infrastructure for secondary evacuation of farm livestock: A case study from the dairy industry, Taranaki, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 387, 106670. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106670>
- Wilson & Kaye. (2007a). *Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards*.
- Wilson & Kaye. (2007b). *Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards in SearchWorks catalog*. <https://searchworks.stanford.edu/view/7595288>
- Wilson, L., Sparks, R. S. J., & Walker, G. P. L. (1980). Explosive volcanic eruptions—IV. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behaviour. *Geophysical Journal International*, 63(1), 117–148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02613.x>
- Wilson, Stewart, Sword-Daniels, & Leonard. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 45–46, 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>
- Wilson, T., Cole, J., Cronin, S., Stewart, C., & Johnston, D. (2011). Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia: Lessons for recovery. *Natural Hazards*, 57(2), 185–212. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9604-8>
- Wilson, T., Cole, J., Johnston, D., Cronin, S., Stewart, C., & Dantas, A. (2012). Short- and long-term evacuation of people and livestock during a volcanic crisis: Lessons from the 1991 eruption of Volcán Hudson, Chile. *Journal of Applied Volcanology*, 1(1), 2. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-1-2>

- Wilson, T., Dantas, A., & Cole, J. (2009). Modelling livestock evacuation following a volcanic eruption: An example from Taranaki volcano, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(1), 99–110. <https://doi.org/10.1080/00288230909510493>
- Wilson, T. M., Cole, J. W., Stewart, C., Cronin, S. J., & Johnston, D. M. (2011). Ash storms: Impacts of wind-remobilised volcanic ash on rural communities and agriculture following the 1991 Hudson eruption, southern Patagonia, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 73(3), 223–239. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0396-1>
- Wilson, T. M., & Kaye, G. D. (2007). *Agricultural Fragility Estimates for Volcanic Ash Fall Hazards*. GNS Science.
- Wilson, T. M., Stewart, C., Wardman, J. B., Wilson, G., Johnston, D. M., Hill, D., Hampton, S. J., Villemure, M., McBride, S., Leonard, G., Daly, M., Deligne, N., & Roberts, L. (2014). Volcanic ashfall preparedness poster series: A collaborative process for reducing the vulnerability of critical infrastructure. *Journal of Applied Volcanology*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13617-014-0010-x>
- Wilson, T., Stewart, C., Cole, J., Johnston, D., & Cronin, S. (2010). Vulnerability of farm water supply systems to volcanic ash fall. *Environmental Earth Sciences*, 61(4), 675–688. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0380-2>
- Wisner, P. B., Terry Cannon, Ian Davis, Ben. (2014). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203714775>
- Witham, C. S., Oppenheimer, C., & Horwell, C. J. (2005). Volcanic ash-leachates: A review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141(3), 299–326. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.11.010>
- World Bank Open data. (2022). *World Bank Open Data*. World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org>
- WWAP. (2003). *UnescoPhysicalDocument*. WWAP (2003) Water for people, water for life. The United Nations World Water Development Report, World Water Assessment Programme. Available from. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556>
- Xie, C., Guo, J., Yan, L., Jiang, R., Liang, A., & Che, S. (2022). The influence of plant morphological structure characteristics on PM2.5 retention of leaves under different wind speeds. *Urban Forestry & Urban Greening*, 71, 127556. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127556>
- Zonin. (2024, March 5). Gephi: A deep dive into Network Analysis and Visualization. *Digital Data Stories*. <https://digitaldatastories.it/2024/03/05/gephi-a-deep-dive-into-network-analysis-and-visualization/>

VII. Annexes

A. Questionnaire d'entretien de terrain

Questionnaire for farm n°

Contact information and generalities

Contact information

First name	
Last name	
Date of birth	
Residence address	
Phone number	
If more information is needed, I can be contacted by:	Mail - phone - WhatsApp - Other:

Farm – Generalities

Address:

Total surface area of the farm (taking into account all crop fields, buildings and/or plots dedicated to livestock, and infrastructures):

Make sure that the farmer gives correct units, such as square kilometers or hectares, and that the information is trustworthy, or give a reliability index on a scale of 1 (least reliable) to 5.

Type of production *(select all that apply):*

apiary – crops – flower – hay – rice – orchard – vineyard

Livestock raising: poultry – cows – pigs – goats; meat – eggs – dairy

Other:

Type of income source *(select all that apply):*

commercial – cooperative – subsistence farm

Additional information:

Landscape

Please use the provided page of the questionnaire to sketch the farm and the locations of its elements, including fields, farmhouse, and other buildings such as animal housings or garages. Give the approximate distances between the different farm's elements and indicate the presence of key landscape features around the farm, for example, a river, a lake, a spring, a valley, a ridge, a hill, a forest, a mountain, a volcano, a large industrial complex, a highway...

Additional information:

We will ask questions about how your farm works, the types of animals you raise, the types of crops you grow, and so on. We would like you to provide information about your farm as it is today, and the time period considered is one year. For example, when reporting the number of animals you sell, indicates the number per year.

Livestock system

Description of the livestock system

What are the types of farm animals that you raise, and how many of each type? (*example: three goats and five pigs*)

Are the animals kept outside or inside, and for how long during an average year?

If animals are kept inside a building, what do you with the dejections?

If the dejections are stored:

In which form(s)?

For how long?

For what purposes?

If the dejections are not stored or used:

What is the reason for not keeping or using them?

Animals

How many animals did you buy or receive this year (as opposed to those born in your farm)? Is that usual or was this year different from a typical year (and why)?

When did you buy or receive each animal?

How much did each animal cost?

For what purpose do you raise your animals (reproduction, meat production, milk production, other)?

Livestock food

Do you grow food in your farm to feed the animals?

If so, what types of crops do you grow and for which animal(s) specifically? What is the daily quantity of crop (specify which one) used to feed each animal? *(clarify the estimate if the amount varies with the season)?*

Do you use crop residues to feed your farm animals?

If so which crop residue(s) and for which animal(s)? What is the daily quantity of crop residue (specify which one) used to feed each animal? *(clarify the estimate if the amount varies with the season)?*

What types of animal food come from fodder storage (do you store crop residue, do you store crops that you grow specifically for your animals, do you store hay)? In what quantities?

What types of animal food do you have to get from outside your farm (market, neighbors...)? What is the daily quantity of crop residue (specify which one) used to feed each animal? *(clarify the estimate if the amount varies with the season)?*

How much animal food do you buy? How much does the animal food cost? *(make sure that units are specified, for example kg per month, bag per month; then pesos per kg, pesos per bag, (what is bag weigh?))*

Under which circumstances do you have to purchase food for your animals? Provide details for the different food types given *(example: I buy fodder for the cow during two months in the dry season. Make sure to specify time periods for each special circumstance).*

Livestock grazing

Do you let your animals graze?

If so, please fill in the table below, indicating which animals are allowed to graze, on what type of land, the surface of that land, and how long each type of animal is allowed to graze in that spot.

Type of land	Surface	Type and number of animals	Time period
Crop plots (in between crops, for example after harvesting rice and before sowing eggplants)			
Pasture (plots where you don't grow crops, only grass for pasture)			
Other type of land (please specify the type; for example, the side of a road, or any type of land that is not one of your farm plots)			

Veterinary products (medicine or vaccine) given to animals

For each animal type you own and for which you use veterinary products, please fill in the table below:

Type of animal	Type of veterinary product <i>(vaccine, medicine, vitamins...)</i> <i>and purpose (sickness, prevention, fattening...)</i>	Frequency of use <i>(once a day, once a month...)</i>	Quantity <i>(make sure to specify the unit, how much does a tablet weigh, how much does a syringe contain...)</i>

How much does each veterinary product you use cost? *(make sure to clarify units: pesos per injection, pesos per vial (and how long can you use one vial), pesos per month...)*

Livestock outflow

What types of animals do you sell and how many did you sell this year? Is that usual or is this year different from a typical year (and why)?

At what age is an animal sold *(provide details by animal type)?* *(for example, do you sell piglets when they are two months old, or do you fatten them and sell them when they are six months old?)*

For what purpose do you sell your animals *(provide details by animal type)?* *(example: for butchering, for someone else to raise...)*

How much do you sell the animal for *(provide estimate for each animal type)?*

Are any animals kept for the farm household self-consumption?

If so, which animals and in how many? *(clarify units, for example, one pig/year)*

Are any animal products sold?

If so, which ones and in what quantity *(clarify units, for example, kg/year)*

How much do you sell your animal products for? *(clarify units, for example, pesos per kg, pesos per liter, pesos per bag (what is bag weigh?))*

Are any animal products kept for the farm household self-consumption?

If so, which ones and in what quantity? *(clarify units, for example, kg/year)*

Cropping system

Please keep in mind that even though we want information about the farm for a year, it is important for us to know if the farmer grows different crops on different years, in a crop cycle (for example, corn on year 1, then eggplants on year 2, then corn again on year 3). This is why some of the questions here will have a “*crop cycle*” sub-question, in case the farmer does use an interannual crop rotation (which is the first question).

Description of the crops

Do you always plant the same crops every year, or are there crops that you only grow every two years (or more)? Answer is “yes” if the same crop is grown every year and “no” if a different crop is grown every year or every few years. *(If answer is “no”, ask all the “crop cycle” sub-questions below. If answer is “yes”, then the “crop cycle” sub-questions can be skipped).*

What are the crops that you cultivate in your farm? What is the surface area allocated to each crop? *Please refer to the farm sketch to locate the different fields but remember to also write down every surface area on the questionnaire to make sure they are correct and don’t rely on the sketch’s scale, which might not be correct.*

Crop cycle: give details for each separate year. (example, one hectare of corn on year 1, then one hectare of eggplants on year 2).

Do you always grow the same crops on the same plots? *(example, a farmer has 1.5 ha of land, divided into 1 ha and 0.5 ha; does he/she grow corn on the 1 ha plot and eggplant on the 0.5 ha plot every time, or corn on the 1 ha plot and eggplant on the 0.5 ha plot one year, then corn on the 0.5 ha plot and eggplant on the 1 ha plot the next year?).*

If not, what is your crop rotation?

Note that this is not the same as the crop cycle; here a farmer grows the same thing every year, but not on the same farm plots.

When do you sow and harvest each crop? Please fill in the calendar attached to the questionnaire *(it will also be used for documenting the use of fertilizers, phytosanitary products, and working forces. Use one calendar per year if the farm has a crop cycle).*

Cropping system: seeds/plants

Do you buy the seeds/seedlings to grow your crops, or do you produce them from your own farm with the previous harvest (provide details by crop type)?

Crop cycle: give details for each separate year

What amount of seeds (weight) or seedlings (number) do you use per unit of surface area? *(clarify units for each crop type).*

Crop cycle: give details for each separate year

How much do the seeds/seedlings you buy cost (provide details by crop type)? *(clarify units, for example pesos per bag (what is bag weigh?), pesos per plant...)*

Crop cycle: give details for each separate year

Are the seeds you use chemically treated (for instance, to prevent fungal diseases)?

Crop cycle: give details for each separate year

Cropping system: fertilizers

Do you use composted crops as fertilizer?

If so, which crops are composted and how much composted crops do you apply and how often? At what time of the year (before sowing, a month after...)? Provide details for each crop you grow. Please fill in the calendar.

Do you use animal manure as fertilizer?

If so, from which animals?

Do the animals graze and fertilize the grazing plot, or are they kept inside?

If they are kept inside, how is the manure collected and stored?

How long are the animals kept inside during the year, and how many animals? *(example, two cows inside for three months, one mother pig inside all year and five piglets inside for two months every year. Keep in mind that each type of animal produces a different quantity of manure, and we want the best estimate possible. This question allows us to cross reference the amount given previously).*

How much manure do you apply to your crops and how often? At what time of the year (before sowing, a month after...)? Provide details for each crop you grow. Please fill in the calendar.

Do you purchase fertilizer?

If so, what type of fertilizer do you purchase?

How much of the purchased fertilizer do you apply and how often? At what time of the year (before sowing, a month after...)? Provide details for each crop you grow. Please fill in the calendar.

How much does the fertilizer cost? *(clarify units, for example pesos per kg, pesos per bag (what is bag weigh?)).*

Do you apply fertilizer systematically, or in a particular situation? If so, in which situation? *Crop cycle: give details for each separate year.*

Cropping system: phytosanitary/protection products

Crop type	Type of phytosanitary product (fungicide, pesticide...) and purpose (sickness, prevention...)	Frequency of use (once a month, once before sowing...) <i>If the use is systematic for a given crop, please fill in the calendar to indicate when you use them.</i>	Quantity used per surface area

How much does each of the phytosanitary product you use cost? *(clarify units, for example pesos per kg, pesos per bag (what is bag weigh?))*

Cropping system outflows

What crops do you sell and in what quantity? Provide quantity for each crop you grow.
Crop cycle: give details for each separate year.

How much do you sell your crops for? Provide details for each crop you grow. *(make sure to clarify the units, for example pesos per kg, pesos per bag (what is bag weigh?))*

Crop cycle: give details for each separate year.

What do you keep for personal consumption and in what quantity? Provide quantity for each crop you grow.

Crop cycle: give details for each separate year.

What amount of fodder is stored?

Working forces

Generalities

How many people work daily on the farm?

How much do you pay your workers *(example: how much pesos per hour, pesos per harvest...)?*

Do you share facilities and/or equipment with your neighbors?

If so, which ones, and how does everyone pay to use them?

What is the farm's main activity and what is the average income generated yearly for this activity?

Cropping system

Please fill in the calendar to specify the hours of work and number of workers you need for every operation regarding the cropping system. *(For example, if the farmer harvests coconuts in February for 8 hours a day, for four days, with three seasonal workers, use the February/Harvest slot to write "Coconut, 8h, 4 days, 3 workers")*

Additional information:

Livestock system

How many working hours do you need to tend to each type of your animals?

Do you need workers to tend to your animals?

If so, for which animals, and how many workers and hours per day?

Additional information:

Expenses and income

Note that, here, we want to make a recap of all the data collected so far. We have already asked about individual expenses, but here is an opportunity not only to have all the information in the same place but also to make sure the first information was correct.

Generalities

What is the total income of your farm per year on average?

What are the total expenses of your farm per year on average?

Do you have other sources of income besides your farming activity? If so, what are these activities and how much income do they generate?

Cropping system and livestock system

Please fill in the summary table at the end of the questionnaire of all expenses and incomes linked to every type of animal and crop the farmer has.

Additional information:

Concerns and fears

What is the major constraint on the farm's activities? Please explain in detail.

Are you facing other constraints or problems on a regular basis?

What are your main concerns and fears regarding the future as a farmer in this region?

What are your future plans for your farm?

Additional information

The volcano and volcanic ashfall

What did bring you here (i.e. to farm in an area that may be affected by an eruption from Mayon volcano)?

In your opinion, what is the main risk that the volcano poses to your farming activities?

Is volcanic ash fall bad or good to farming? Is it always good or always bad? Can you elaborate?

Are you alerted of an impending volcanic eruption and how (siren sound, TV/radio news, text message)?

What do you do in priority to protect your farm assets (crops, livestock, infrastructure) when you have to evacuate due to an impending eruption?

After an ash fall event, do you clean crop plants that have received ash? Do you clean the soil? Do you clean water reservoirs where the livestock animals drink? How do you do that?

Are there other operations you need to do after a volcanic ashfall affected your farm?

How frequent are volcanic ash deposits on your farm? Do you consider having ash on your farm to be a “normal” situation, or something unusual?

If dealing with ash on your farm is not “normal”, how much time does it usually take to come back to a “normal” situation after a volcanic ash deposit, with no consequences from ashfall?

In your experience with previous ashfall from volcanic eruptions, what are the factors that have helped you go back to that “normal” situation?

What do you think should be done (by yourself, your community, the authorities...) to allow you to go back to a “normal” situation after a volcanic ashfall, regarding your farming activities?

Please fill in the table below, evaluating the volcanic impact on each of your farm elements, and give us some details as to why you characterize the impact this way. For example, “Element 1: bananas, impact of 1 because I lost a small portion of the harvest after the eruption” or “Good 2: pineapple, impact of 3 because the whole harvest was lost and I had to replant the whole field”. The impact can be negative (-3 to -1), neutral (0, no impact) or positive (+1 to +3). 1 is a slight impact, 2 is moderate and 3 is important.

	Farm element (crop, animal...)		Additional information
How do you evaluate the economic impact of volcanic ash fall on these elements of your farm and why? (0 no impact; 5 strongest impact)		-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Permanent grassland	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Stored manure	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Fodder	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
How do you evaluate the impact of volcanic ash fall on crop yield of these elements of your farm		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	

and why? (0 no impact; 5 strongest impact)		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Permanent grassland	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Stored manure	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Fodder	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
How do you evaluate the impact of volcanic ash fall on infrastructures (buildings, water supplies, ...) of these elements and why? (0 no impact; 5 strongest impact)		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	

		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
		3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Permanent grassland	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Stored manure	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	
	Fodder	3 -2 -1 0 +1 +2 +3	

Please specify which farm good you are referring to. For example, coconut; banana; cows...

Do volcanic eruptions affect the people around you (your family, your neighbors, the people in the Barangay)? If so, in what way?

B. Modèles conceptuels relatifs aux différentes exploitations

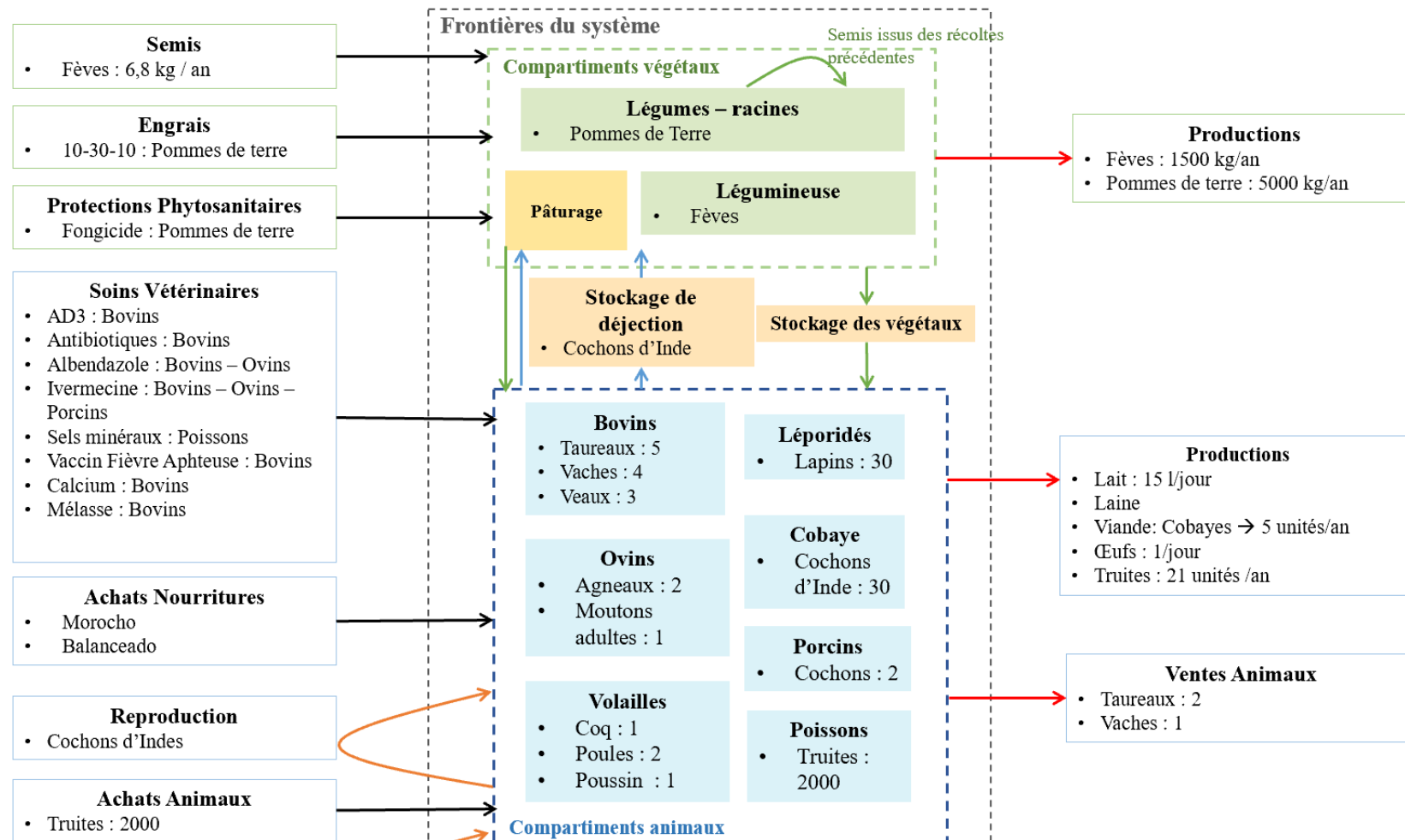


Figure 39 - Modèle conceptuel - exploitation n°1

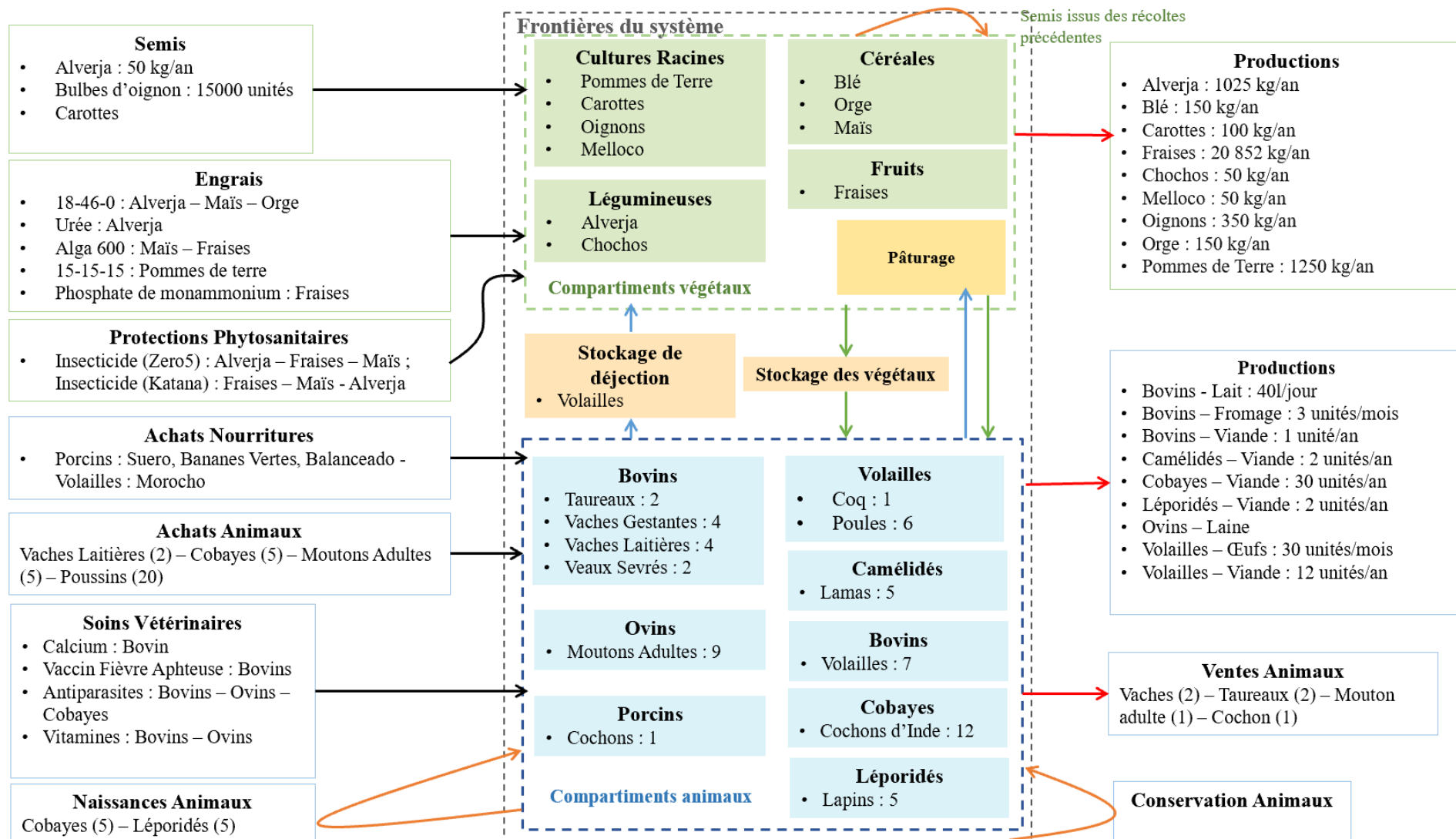


Figure 40 - Modèle conceptuel - exploitation n°2

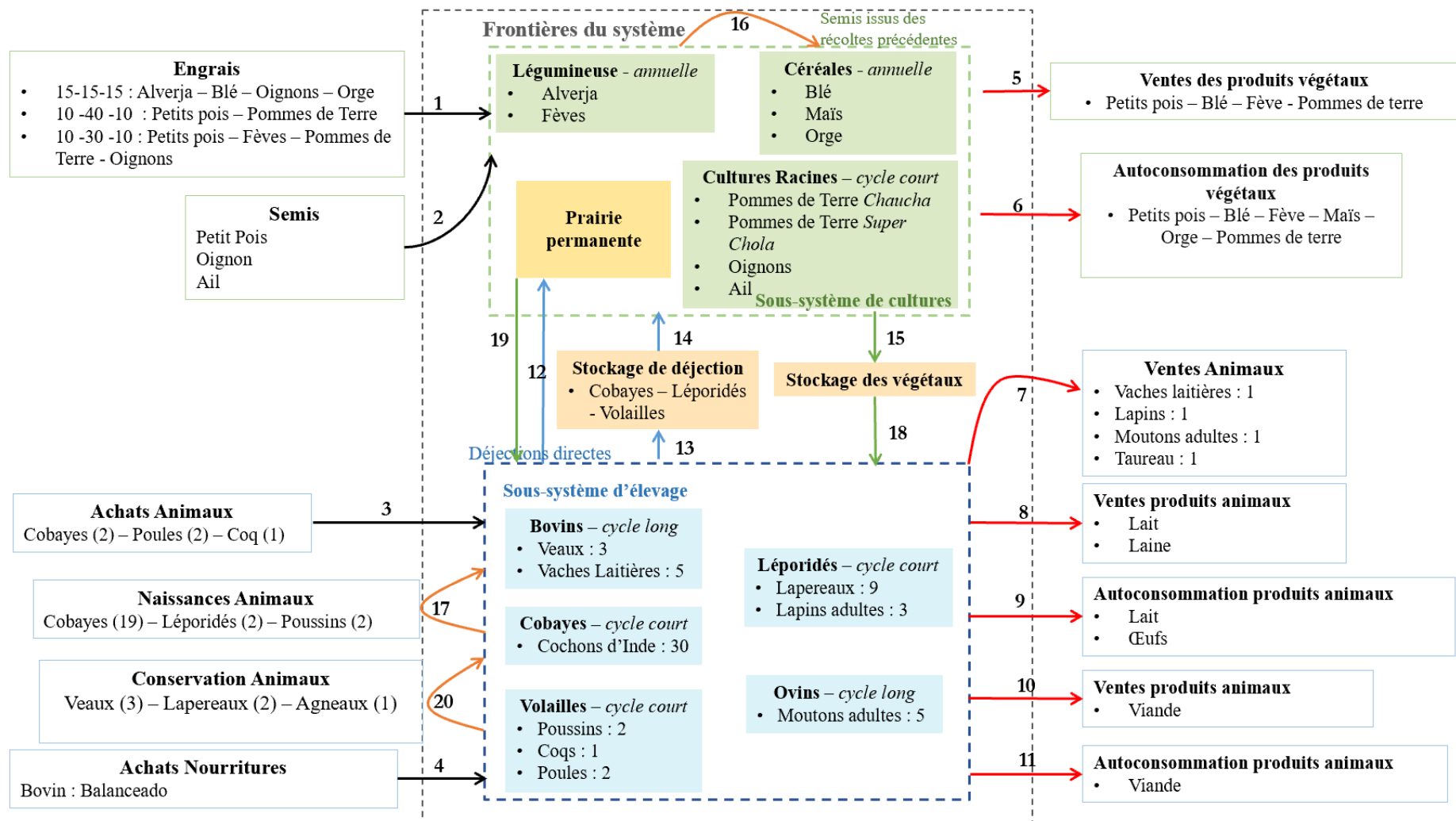


Figure 41 - Modèle conceptuel - exploitation n°3

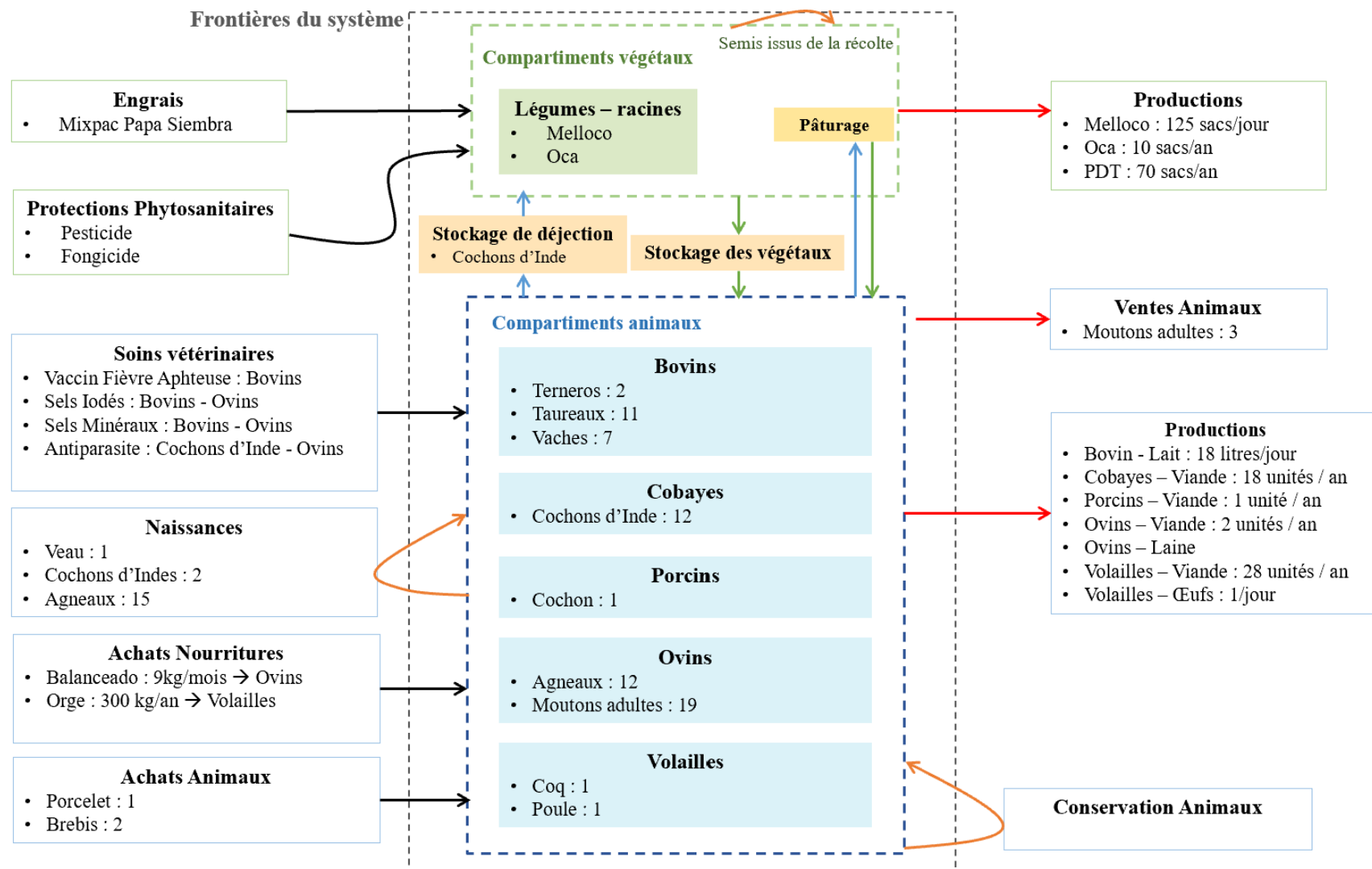


Figure 42 - Modèle conceptuel - exploitation n°4

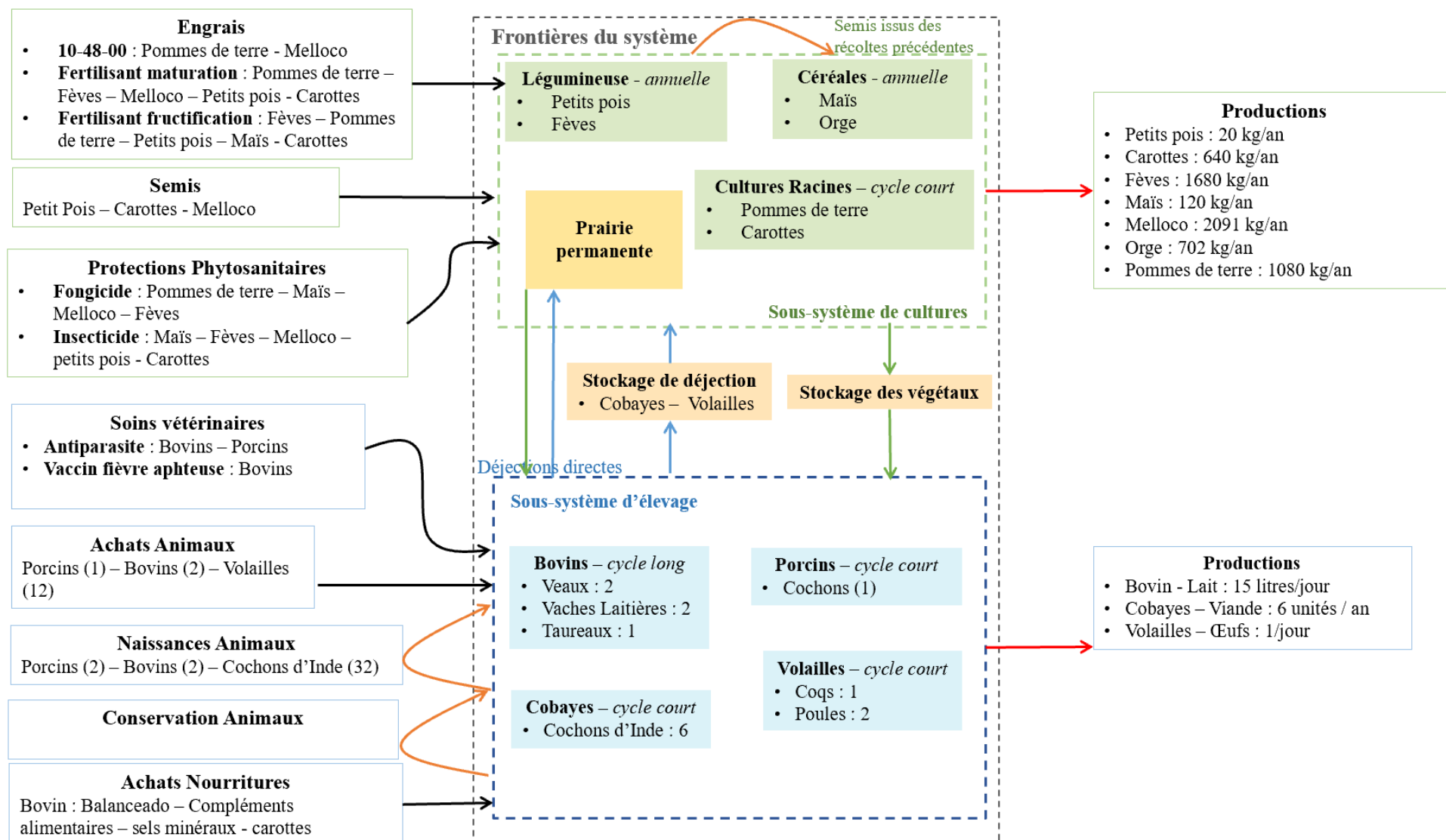


Figure 43 - modèle conceptuel - exploitation n°5

C. Évaluation de la situation économique des différentes exploitations – *hors-éruption*

Exploitation n°1

Tableau 13 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°1

Type de production	Valeur annuelle brute produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel brut de l'espèce (\$/an)	Coûts annuels de production de l'espèce (\$/an)	Valeur annuelle nette produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel net de l'espèce (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Bovin	6661	2219	335	6326	1884	46	94	30	152
Ovin	4200	140	87	4113	53	29	6	8	4
Caprin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Léporidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volaille	130	0	33	97	-33	1	0	3	-3
Poisson	230	2	376	-146	-374	2	0	34	-30
Cobaye	464	0	0	464	0	3	0	0	0
Equidé	130	0	0	130	0	1	0	0	0
Camélidé	130	0	0	130	0	1	0	0	0
Porcin	320	0	178	142	-178	2	0	16	-14
Total	12265	2361	1010	11256	1352	86	100	90	109

Tableau 14 - Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°1

Type de production	Production annuelle (kg/an)	Valeur annuelle brute (\$/an)	Revenu annuel brut (\$/an)	Coûts annuels (\$/an)	Valeur annuelle nette (\$/an)	Revenu annuel net (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Pérenne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annuelle	6500	2063	0	111	1951	-111	14	0	10	-9
Cycle Court	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prairie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	6500	2063	0	111	1951	-111	14	0	10	-9

Tableau 15 – résumé économique global – exploitation n°1

Exploitation	
Valeur annuelle brute (\$/an)	14 328
Revenu annuel brut (\$/an)	2 361
Coûts annuels (\$/an)	1 121
Valeur annuelle nette (\$/an)	13 207
Revenu annuel net (\$/an)	1 240

Exploitation n°2

Tableau 16 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°2

Type de production	Valeur annuelle brute produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel brut de l'espèce (\$/an)	Coûts annuels de production de l'espèce (\$/an)	Valeur annuelle nette produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel net de l'espèce (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Bovin	14748	6343	1247	13501	5096	53	66	23	121
Ovin	1550	80	790	760	-710	6	1	15	-17
Caprin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Léporidé	55	0	0	55	0	0	0	0	0
Volaille	1266	300	62	904	238	5	3	1	6
Poisson	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cobaye	220	0	29	191	-29	1	0	1	-1
Equidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Camélidé	650	0	0	650	0	2	0	0	0
Porcin	100	33	468	-368	-434	0	0	9	-10
Total	18589	6756	2594	15694	4162	67	70	48	98

Tableau 17 - Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°2

Type de production	Production annuelle (kg/an)	Valeur annuelle brute (\$/an)	Revenu annuel brut (\$/an)	Coûts annuels (\$/an)	Valeur annuelle nette (\$/an)	Revenu annuel net (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Pérenne	20852	1043	1040	1779	-737	-739	4	11	33	-17
Annuelle	903	542	150	65	477	85	2	2	1	2
Cycle Court	19017	7540	1642	922	6618	720	27	17	17	17
Prairie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	40772	9124	2832	2766	6358	66	33	30	52	2

Tableau 18- Résumé économique global – exploitation n°2

Exploitation	
Valeur annuelle brute (\$/an)	27 713
Revenu annuel brut (\$/an)	9 588
Coûts annuels (\$/an)	5 361
Valeur annuelle nette (\$/an)	22 052
Revenu annuel net (\$/an)	4 227

Exploitation n°3

Tableau 19 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°3

Type de production	Valeur annuelle brute produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel brut de l'espèce (\$/an)	Coûts annuels de production de l'espèce (\$/an)	Valeur annuelle nette produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel net de l'espèce (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Bovin	10718	6236	193	10526	6044	76	92	26	100
Ovin	1111	95	30	1081	64	8	1	4	1
Caprin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Léporidé	45	12	0	45	12	0	0	0	0
Volaille	65	0	13	52	-13	0	0	2	0
Poisson	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cobaye	184	0	17	167	-17	1	0	2	0
Equidé	300	0	0	300	0	2	0	0	0
Camélidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porcin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	12424	6343	253	12171	6090	88	93	34	100

Tableau 20 - évaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°3

Type de production	Production annuelle (kg/an)	Valeur annuelle brute (\$/an)	Revenu annuel brut (\$/an)	Coûts annuels (\$/an)	Valeur annuelle nette (\$/an)	Revenu annuel net (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Pérenne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annuelle	1462	332	221	378	-46	-157	2	3	51	-3
Cycle Court	1952	1360	249	114	1247	135	10	4	15	2
Prairie	63333	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	66747	1692	470	491	1201	-21	12	7	66	0

Tableau 21 - Résumé économique global – exploitation n°3

Exploitation	
Valeur annuelle brute (\$/an)	14 116
Revenu annuel brut (\$/an)	6 813
Coûts annuels (\$/an)	744
Valeur annuelle nette (\$/an)	13 372
Revenu annuel net (\$/an)	6 069

Exploitation n°4

Tableau 22 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°4

Type de production	Valeur annuelle brute produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel brut de l'espèce (\$/an)	Coûts annuels de production de l'espèce (\$/an)	Valeur annuelle nette produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel net de l'espèce (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Bovin	20426	2431	845	19581	1586	58	36	26	44
Ovin	6381	5	694	5327	-689	18	0	21	-19
Caprin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Léporidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volaille	523	0	319	-247	-319	1	0	10	-9
Poisson	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cobaye	256	0	34	222	-34	1	0	1	-1
Equidé	300	0	0	300	0	1	0	0	0
Camélidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porcin	200	0	60	140	-60	1	0	2	-2
Total	28086	2435	1952	25323	483	79	36	60	13

Tableau 23- Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°4

Type de production	Production annuelle (kg/an)	Valeur annuelle brute (\$/an)	Revenu annuel brut (\$/an)	Coûts annuels (\$/an)	Valeur annuelle nette (\$/an)	Revenu annuel net (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Pérenne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annuelle	10500	7350	4375	1280	6070	3095	21	64	40	87
Cycle Court	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prairie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	10500	7350	4375	1280	6070	3095	21	64	40	87

Tableau 24 - Résumé économique global – exploitation n°4

Exploitation	
Valeur annuelle brute (\$/an)	35 436
Revenu annuel brut (\$/an)	6 810
Coûts annuels (\$/an)	3 232
Valeur annuelle nette (\$/an)	31 393
Revenu annuel net (\$/an)	3 578

Exploitation n°5

Tableau 25 - Evaluation économique du sous-système d'élevage – exploitation n°5

Type de production	Valeur annuelle brute produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel brut de l'espèce (\$/an)	Coûts annuels de production de l'espèce (\$/an)	Valeur annuelle nette produite de l'espèce (\$/an)	Revenu annuel net de l'espèce (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Bovin	3775	2416	2102	1422	314	59	56	77	20
Ovin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caprin	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Léporidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volaille	40	18	198	-158	-181	1	0	7	-12
Poisson	130	0	0	65	0	2	0	0	0
Cobaye	176	48	0	176	48	3	1	0	3
Equidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Camélidé	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porcin	150	100	32	118	68	2	2	1	4
Total	4271	2582	2333	1623	249	67	60	86	16

Tableau 26 - Evaluation économique du sous-système de cultures – exploitation n°5

Type de production	Production annuelle (kg/an)	Valeur annuelle brute (\$/an)	Revenu annuel brut (\$/an)	Coûts annuels (\$/an)	Valeur annuelle nette (\$/an)	Revenu annuel net (\$/an)	% De la valeur brute de l'exploitation	% Du revenu brut de l'exploitation	% Des coûts de l'exploitation	% Du revenu net de l'exploitation
Pérenne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annuelle	2522	723	484	193	530	291	11	11	7	19
Cycle Court	3811	1385	1230	199	1186	1031	22	29	7	66
Prairie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	6333	2107	1714	391	1716	1322	33	40	14	84

Tableau 27 - Résumé économique global – exploitation n°5

Exploitation	
Valeur annuelle brute (\$/an)	6 379
Revenu annuel brut (\$/an)	4 295
Coûts annuels (\$/an)	2 724
Valeur annuelle nette (\$/an)	3 339
Revenu annuel net (\$/an)	1 571

D. Évaluation économique en contexte éruptif - *exploitation n°3*

a. Calendrier cultural – *exploitation n°3*

Tableau 3 - Calendrier cultural

	<i>Petit pois</i>	<i>Fève</i>	<i>Blé</i>	<i>Maïs</i>	<i>Orge</i>	<i>PDT Super Chola</i>	<i>PDT Chaucha</i>	<i>Oignon</i>	<i>Ail</i>
Janvier	×	✿	×	✿	×			×	
Février	×	✿	×	✿	×			×	
Mars			×		×	×		×	
Avril					×	×	×	×	
Mai		×				×	×		
Juin		×				×	×		×
Juillet	✿	×				×	×		×
Août	✿	×	✿		✿	×	×		×
Septembre			✿						
Octobre									
Novembre				✿		✿	✿		
Décembre	×			✿	×	✿	✿	×	

×	Hors culture	✿	Floraison
	Semis		Maturation
	Croissance		Récolte

b. Détermination des coefficients de pertes – *Fonctions de fragilité*

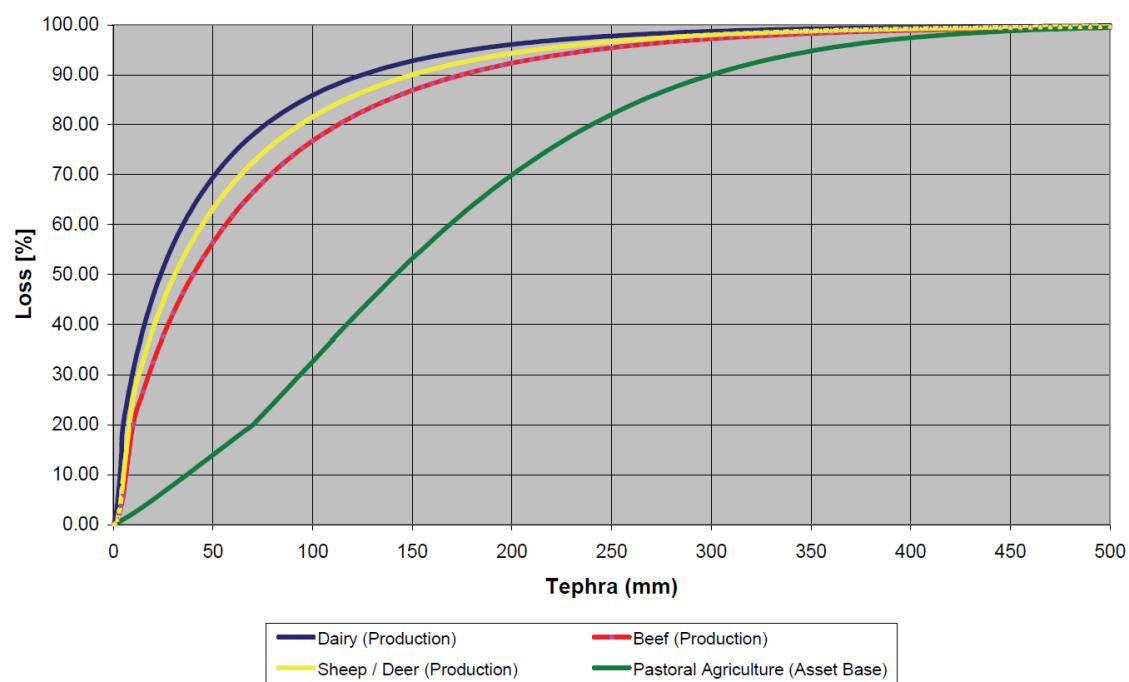


Figure 44 – Fonction de fragilité pour les animaux d'élevage (Wilson & Kaye, 2007)

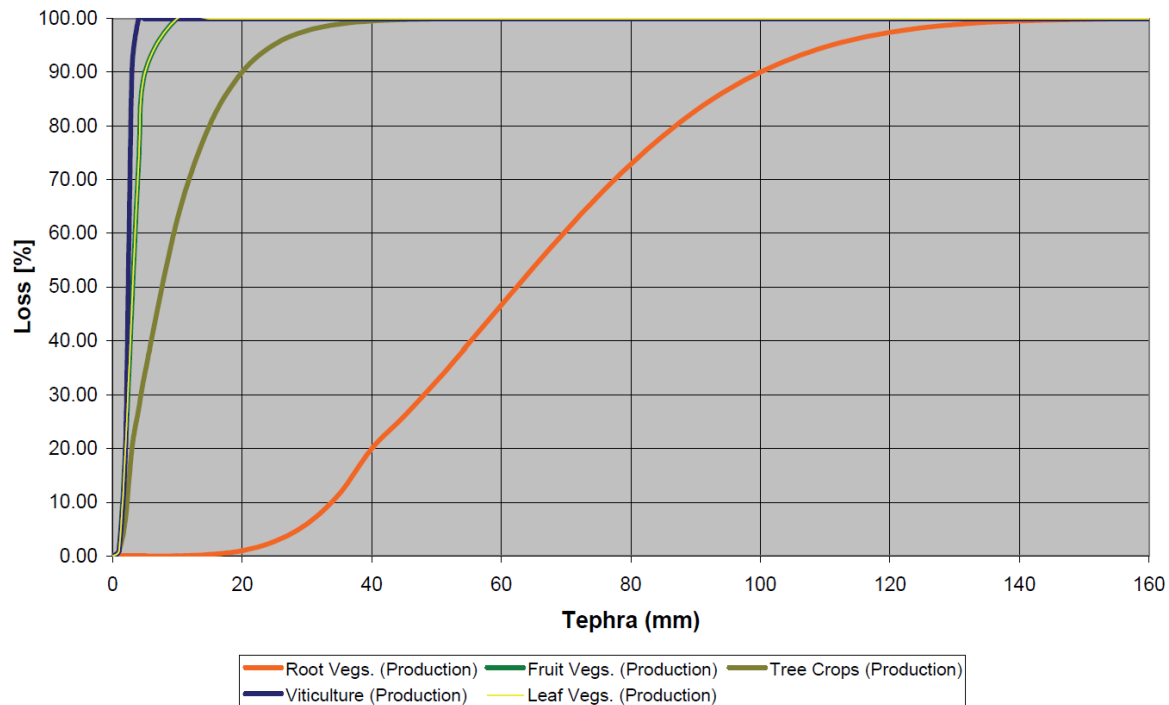


Figure 45 - Fonction de fragilité pour les cultures horticoles (Wilson & Kaye, 2007)

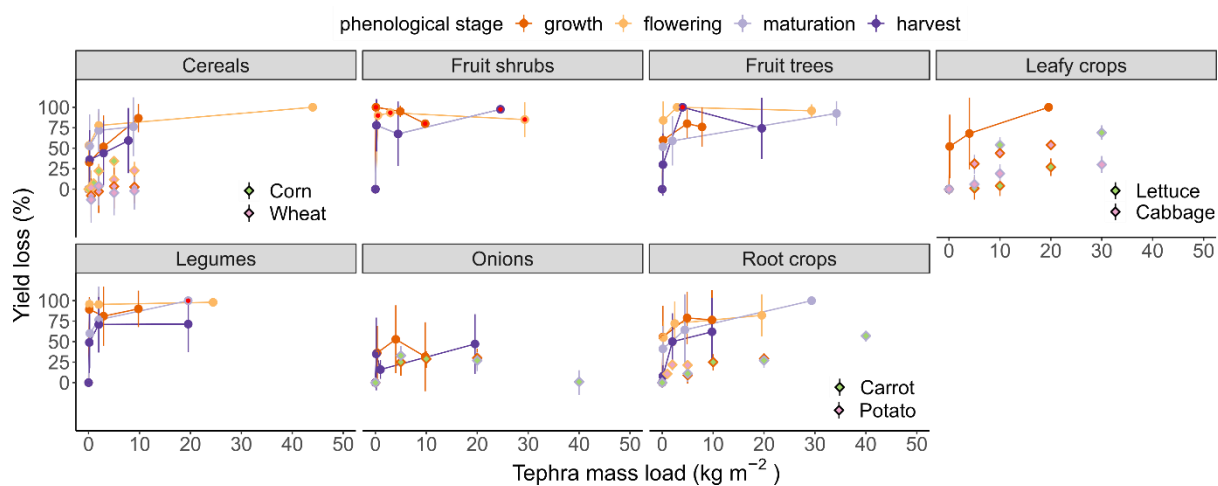


Figure 46 - Fonctions de fragilité pour des cultures spécifiques (Ligot et al., 2023)

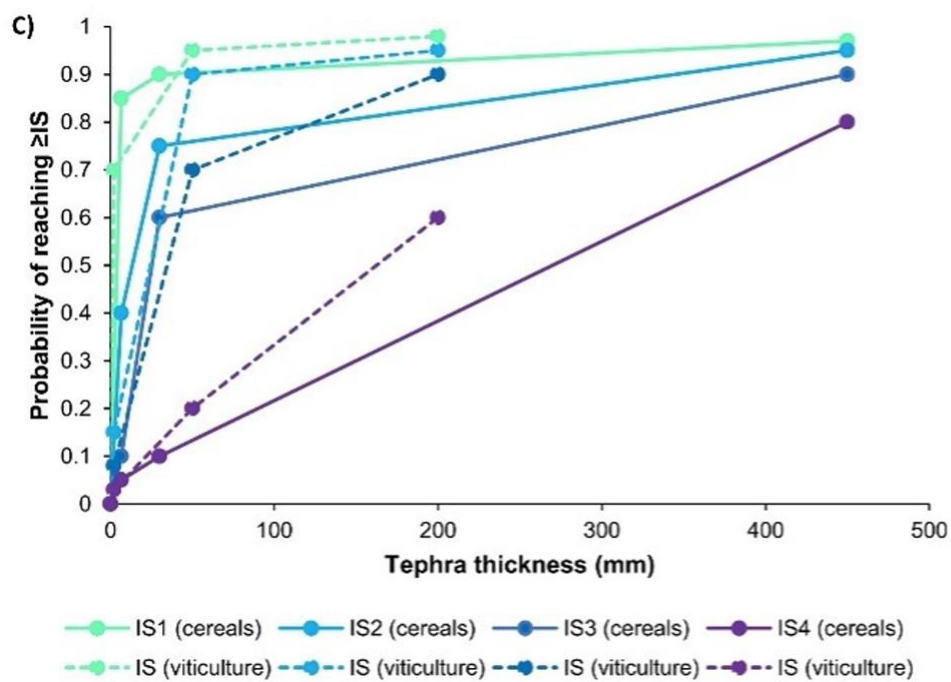


Figure 47 - Fonction de fragilité pour les céréales et la viticulture (Hm et al., 2021)

c. Revenus annuels bruts (\$/an) selon un dépôt de cinq ou cinquante millimètres d'épaisseur

i) *Sous-système élevage*

Tableau 28 – *Sous-système d'élevage - revenus annuels bruts pour un dépôt d'une épaisseur de 5 mm- 50 mm et hors-éruption : exploitation n°3*

Mois	Revenu annuel brut [\$ / an] - 5mm	Revenu annuel brut [\$ / an] - 50mm	Revenu annuel brut [\$ / an]
Hors-Eruption			6813
Janvier	5303	1656	
Février	5406	2069	
Mars	5499	2441	
Avril	5602	2853	
Mai	5701	3253	
Juin	5804	3665	
Juillet	5904	4069	
Août	6007	4481	
Septembre	6110	4894	
Octobre	6210	5293	
Novembre	6313	5705	
Décembre	6343	6104	

ii) Sous-système de cultures

Tableau 29 - Sous-système de cultures - revenus annuels bruts pour un dépôt d'une épaisseur de 5 mm- 50 mm et hors-éruption : exploitation n°3

Mois	Revenu annuel brut [\$ / an] - 5mm	Revenu annuel brut [\$ / an] - 50mm	Revenu annuel brut [\$ / an]
Hors-Eruption			470
Janvier	372	331	
Février	372	306	
Mars	419	325	
Avril	293	267	
Mai	382	363	
Juin	382	363	
Juillet	373	360	
Août	352	349	
Septembre	379	374	
Octobre	384	385	
Novembre	366	363	
Décembre	420	391	

E. Analyse des flux de matière sous forme de flux d'azote

a) Établissement des coefficients de conversion de matière en matière azotée

Tableau 30- Coefficients de conversion en azote

<i>Constituants du système</i>	<i>Type_Flux</i>	<i>Coefficient [N]/unité</i>	<i>Références</i>
<i>Bovins</i>	Fumier	0,008	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>Bovins</i>	Bovin	0,03	(Van den Bosch et al., 1998)
<i>Bovins</i>	Lait	0,005	(Van den Bosch et al., 1998)
<i>Bovins</i>	Balanceado	0,02	(Biomentos, 2024)
<i>Ovins</i>	Fumier	0,007	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>Ovins</i>	Ovin	0,03	(Van den Bosch et al., 1998)
<i>Volailles</i>	Volailles	0,03	(Van den Bosch et al., 1998)
<i>Volailles</i>	Fumier	0,03	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>Volailles</i>	Oeufs	0,02	(Shindo et al., 2003)
<i>Cobayes</i>	Cobayes	0,02	
<i>Cobayes</i>	Déjections	0,007	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>Léporidés</i>	Léporidés	0,02	(Van den Bosch et al., 1998)
<i>Léporidés</i>	Déjections	0,007	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>équidés</i>	âne	0,03	(Van den Bosch et al., 1998)
<i>équidés</i>	Cheveaux	0,03	
<i>équidés</i>	Déjections - âne	0,008	
<i>équidés</i>	Déjections - Cheveaux	0,008	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>Camélidés</i>	Déjections - Alpaga	0,008	
<i>Camélidés</i>	Déjections - Lama	0,008	
<i>Poissons</i>	Truites	0,17	
<i>Porcins</i>	Porcins	0,01	(Van den Bosch et al., 1998)

<i>Porcins</i>	Déjections - Porcins	0,004	(18_Teneur_Azote_tab.Pdf, n.d.)
<i>Engrais</i>	18-46-0	0,18	
<i>Engrais</i>	15-15-15	0,15	
<i>Engrais</i>	30_10_10	0,3	
<i>Engrais</i>	18-56-0	0,18	
<i>Engrais</i>	10-30-10	0,1	
<i>Engrais</i>	Phosphate de monammonium	0,126	
<i>Engrais</i>	MIXPAC PAPA SIEMBRA	0,12	(Agripac, 2024)
<i>Engrais</i>	Alga 600	0,5000	(Agrivivos, n.d.)
<i>Engrais</i>	Urée	0,47	
<i>Légumineuses</i>	Petits pois - partie aérienne	0,059	<u>Common vetch (Vicia sativa) Feedipedia</u>
<i>Légumineuses</i>	Petits pois - grain	0,12	<u>Common vetch (Vicia sativa) Feedipedia</u>
<i>Légumineuses</i>	Fèves		<u>Faba bean (Vicia faba) Feedipedia</u>
<i>Légumineuses</i>	Fèves - grain	0,13	
<i>Légumineuses</i>	Luzerne	0,12	<u>Alfalfa (Medicago sativa) Feedipedia</u>
<i>Légumineuses</i>	Luzerne - grain		
<i>Céréales</i>	Blé	0,02	(Pérez et al., 1993)
<i>Céréales</i>	Blé - grain	0,12	(Pérez et al., 1993)
<i>Céréales</i>	Orge - partie fraîche	0,089	<u>Barley forage Feedipedia</u>
<i>Céréales</i>	Orge - grain	0,121	<u>Barley grain Feedipedia</u>
<i>Céréales</i>	Maïs - feuille	0,078	<u>Maize green forage Feedipedia</u>
<i>Céréales</i>	Maïs - grain	0,127	<u>Maize grain Feedipedia</u>
<i>Cultures racines</i>	Pommes de terre	0,003	(Shindo et al., 2003)
<i>Cultures racines</i>	Carottes - racines	0,114	(Carrot Roots, Fresh Feedipedia, n.d.)
<i>Cultures racines</i>	Oignons	0,005	
<i>Cultures racines</i>	Oignons - bulbe	0,005	(Shindo et al., 2003)

<i>Cultures racines</i>	Ail	0,005	
<i>Cultures racines</i>	Ail - bulbe	0,005	(Shindo et al., 2003)
<i>Plantes herbacées</i>	Fraises	0,001	(<i>Fraises - Besoin Physiologique.Pdf</i> , n.d.)
<i>Herbacées</i>	Herbes de pâture	0,167	(<i>Guide-Pratique-Paturage_ca11-2018.Pdf</i> , n.d.)

b) Coefficients *tropical livestock unit*

Tableau 31 - Tropical livestock unit

Type animal	TLU
<i>Veaux</i>	0,4
<i>Vaches laitières</i>	1
<i>Taureaux</i>	0,8
<i>Lapin</i>	0,01
<i>Volaille</i>	0,01
<i>Moutons</i>	0,1

[Glossary: Livestock unit \(LSU\) - Statistics Explained \(europa.eu\)](#)

c) Équations des divers indicateurs de *structure – fonctionnement – performances*

Tableau 32 – Formules mathématiques des différents indicateurs nécessaire à l'évaluation de la performance et du fonctionnement des exploitations agricoles (Stark et al., 2019)

Indicateurs de caractérisation de l'IAE		Indicateurs de performances	
Activité totale du système	$TST = \sum_{i=1}^n T_i$	Productivité	$\sum_{j=1}^n Y_{0j}$
Flux circulant	$T_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} + Z_{i0} - (\dot{x}_i)$	Dépendance	$\sum_{i=1}^n Z_{i0}$
Intensité de l'IAE	$TT = \sum_{i=1}^{j=n} f_{ij}$	Efficience	$\sum_{j=1}^n Y_{0j} / \sum_{i=1}^n Z_{i0}$
Average mutual information	$AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}}$	Overhead	$\phi = - \sum_{i,j} T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}^2}{T_{i.} T_{.j}} \right)$
Statistical uncertainty	$H_r = - \sum_{j=0}^n \frac{T_{.j}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{.j}}{T_{..}}$	Development capacity	$C = - \sum_{i,j} T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}}{T_{..}} \right)$
Organisation du réseau de flux	AMI / H_r	Résilience	ϕ / C

d) Bilan des différents flux selon les espèces animales et culturales

Tableau 33 – Ensembles des flux comptabilisés pour les bovins

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur - matière fraîche (kg)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Bovins	Alimentation	Balanceado	Inflow	Distribution	Bovins	225,00	225,00	0,02	4,85
Bovins	Naissance	Veaux	Selflow	Sous-système élevage	Sous -système élevage	3,00	900,00	0,03	27,00
Bovins	Production	Lait	Outflow	Bovins	Cellule familiale	456,25	456,25	0,01	2,28
Bovins	Production	Lait	Outflow	Bovins	Distribution	15512,50	15512,50	0,01	77,56
Bovins	Vente	Taureaux	Outflow	Bovins	Distribution	0,50	325,00	0,03	9,75
Bovins	Vente	Vache laitière	Outflow	Bovins	Distribution	0,11	50,00	0,03	1,50
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Bovins	Pâturage	14100,00	14100,00	0,01	112,80
Bovins	Alimentation	Pâturage	Throughflow	Prairie	Bovins	20531,00	682,66	0,17	114,00
Bovins	Alimentation	Pâturage	Throughflow	Prairie	Bovins	7267,50	241,64	0,17	40,35
Bovins	Alimentation	Luzerne	Throughflow	Sous-Système cultures	Bovins	2053,13	68,27	0,12	7,93
Bovins	Alimentation	Luzerne	Throughflow	Sous-Système cultures	Bovins	1090,13	36,25	0,12	4,21
Bovins	Alimentation	Maïs	Throughflow	Sous-Système cultures	Bovins	6976,80	154,12	0,08	12,07
Bovins	Alimentation	Maïs	Throughflow	Sous-Système cultures	Bovins	13140,00	290,26	0,13	36,84
Bovins	Alimentation	Résidus PDT Super Chola	Throughflow	Sous-Système cultures	Bovins	1,85	1,85	/	0,00

Tableau 34 – Bilan entrées – sorties pour les bovins

Inflow	Outflow	Déjections	Pertes	Outflow/Inflow
220,26	91,09	112,80	16,37	0,42

Tableau 35 - Ensembles des flux comptabilisés pour les ovins

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur - matière fraîche (kg - unité)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Ovins	Naissance	Agneaux	Selflow	Sous-système élevage	Sous-système élevage	3,00	13,00	0,030	0,39
Ovins	Achat	Mouton adulte	Inflow	Distribution	Ovins	1,00	140,00	0,030	4,20
Ovins	Production	Conso viande	Outflow	Ovins	Cellule familiale	1,00	140,00	0,030	4,20
Ovins	Production	Mouton adulte	Outflow	Ovins	Distribution	0,67	93,33	0,030	2,80
Ovins	Alimentation	Pâturage	Throughflow	Prairie	Ovins	10566,25	361,87	0,167	60,43
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Ovins	Prairie	8750,00	8750,00	0,007	58,63

Tableau 36 - Bilan entrées – sorties pour les ovins

Inflow	Outflow	Déjections	Pertes	Outflow/Inflow
64,63	7,00	53,3	5,4	0,11

Tableau 37 - Ensembles des flux comptabilisés pour les volailles

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur (unité animale)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Volailles	Achat	Coq	Inflow	Distribution	Volailles	1	3,00	0,03	0,09
Volailles	Achat	Poules	Inflow	Distribution	Volailles	2	6,00	0,03	0,18
Volailles	Naissance	Poussins	Selflow	Sous-système élevage	Sous-système élevage	3	0,12	0,03	0,00
Volailles	Production	Œufs	Outflow	Volailles	Cellule familiale	182,5	10,95	0,02	0,22
Volailles	Production	viande	Outflow	Volailles	Cellule familiale	3	9,00	0,03	0,27
Volailles	Alimentation	Mais-Blé-Orge	Throughflow	Sous-système cultures	Volailles		0,62	0,12	0,07
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Volaille	Stockage déjections		91,25	0,02	1,83

Tableau 38 - Bilan entrées – sorties pour les volailles

Inflow	Outflow	Déjections	Pertes	Outflow/Inflow
0,34	0,49	1,22	0,61	1,42

Tableau 39 - Ensembles des flux comptabilisés pour les léporidés

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur (unité animale)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Léporidés	Naissance	Lapereaux	Selfow	Sous-système élevage	Sous-système élevage	6,00	0,15	0,02	0,00
Léporidés	Production	Viande	Outflow	Léporidés	Cellule familiale	3,00	15,00	0,02	0,30
Léporidés	Production	Lapins adultes	Outflow	Léporidés	Distribution	1,00	5,00	0,02	0,10
Léporidés	Alimentation	Luzerne	Throughflow	Sous-système cultures	Léporidés	388,13	12,91	0,12	1,50
Déjections	Production	Déjection	Outflow	Léporidés	Stockage déjection		201,00	0,01	1,41

Tableau 40 - Bilan entrées – sorties pour les volailles

Inflow	Outflow	Déjections	Pertes	Outflow/Inflow
1,50	0,40	0,94	0,46	0,27

Tableau 41 - Ensembles des flux comptabilisés pour les volailles

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur (unité animale)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Cobayes	Achat	Cochons d'Inde	Inflow	Distribution	Cobayes	2	2,80	0,02	0,06
Cobayes	Naissance	Cochons d'Inde	Selfflow	Sous-système élevage	Sous-système élevage	12	9,60	0,02	0,19
Cobayes	Production	Viande	Outflow	Cobayes	Distribution	1	1,40	0,02	0,03
Cobayes	Production	Viande	Outflow	Cobayes	Cellule familiale	12	16,80	0,02	0,34
Cobayes	Alimentation	Luzerne	Throughflow	Sous-système cultures	Cobayes	1679	55,83	0,12	6,49
Déjections	Production	Déjection	Outflow	Cobayes	Stockage djection	/	738,00	0,02	14,76

Tableau 42 - Bilan entrées – sorties pour les volailles

Inflow	Outflow	Déjections	Pertes	Outflow/Inflow
6,57	0,36	9,89	4,87	0,055

Tableau 43 - Ensembles des flux comptabilisés pour les légumineuses

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur - matière fraîche (kg)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Légumineuses - Alveja	Plantation	Semences petits pois	Inflow	Distribution	Petits Pois	9	2,28	0,12	0,27
Légumineuses - Alveja	Engrais	15-15-15	Inflow	Distribution	Petits Pois		53,33	0,15	8,00
Légumineuses - Alveja	Engrais	30_10_10	Inflow	Distribution	Petits Pois		2,00	0,30	0,60
Légumineuses - Alveja	Engrais	10-40-10	Inflow	Distribution	Petits Pois		1,00	0,10	0,10
Légumineuses - Fèves	Engrais	18-46-0	Inflow	Distribution	Fèves		22,49	0,18	4,05
Légumineuses - Fèves	Engrais	30_10_10	Inflow	Distribution	Fèves		2,00	0,30	0,60
Légumineuses - Alveja	Production	Petits pois	Outflow	Petits Pois	Cellule familiale	10,9	2,76	0,12	0,33
Légumineuses - Alveja	Production	Petits pois	Outflow	Petits Pois	Distribution	80	20,23	0,12	2,41
Légumineuses - Fèves	Production	Fèves	Outflow	Fèves	Cellule familiale	120	30,35	0,13	3,91
Légumineuses - Fèves	Production	Fèves	Outflow	Fèves	Distribution	800	199,52	0,13	25,70
Légumineuses - Alveja	Plantation	Semences petits pois	Selflow	Sous-système culture	Sous-système culture	9	2,28	0,12	0,27
Légumineuses - Fèves	Plantation	Fèves	Selflow	Sous-système culture	Sous-système culture	40	9,98	0,13	1,28
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	Petits Pois		274,29	0,01	1,92
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	Fèves	274,29	274,29	0,01	1,92

Tableau 44- Bilan entrées – sorties pour les légumineuses

Inflow	Outflow	Pertes	Outflow/Inflow
17,46	32,35	1,27	1,852

Tableau 45 - Ensembles des flux comptabilisés pour les cultures racines

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur - matière fraîche (kg)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Cultures racines	Plantation	Bulbe d'oignons	Inflow	Distribution	Oignons		14,00	0,00	0,00
Cultures racines	Engrais	18-46-0	Inflow	Distribution	PDT Super chola		8,00	0,18	1,44
Cultures racines	Engrais	10-40-10	Inflow	Distribution	PDT Super chola		0,20	0,10	0,02
Cultures racines	Engrais	18-46-0	Inflow	Distribution	PDT Chaucha		16,00	0,18	2,88
Cultures racines	Engrais	10-40-10	Inflow	Distribution	PDT Chaucha		0,33	0,10	0,03
Cultures racines	Alimentation	PDT Chaucha	Outflow	PDT chaucha	Cellule familiale	240	48,00	0,00	0,12
Cultures racines	Alimentation	PDT Chaucha	Outflow	PDT chaucha	Distribution	480	96,00	0,00	0,25
Cultures racines	Alimentation	PDT Super Chola	Outflow	PDT Super Chola	Cellule familiale	136	27,20	0,00	0,07
Cultures racines	Alimentation	PDT Super Chola	Outflow	PDT Super Chola	Cellule familiale	240	48,00	0,00	0,12
Cultures racines	Plantation	Tubercules de PDT - Super Chola	Selflow	Sous-système culture	PDT Super chola	80	16,00	0,00	0,04

Cultures racines	Plantation	Tubercules de PDT - Chaucha	Selflow	Sous-système culture	PDT Chaucha	80	16,00	0,00	0,04
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	PDT - Super Chola		68,57	0,01	0,48
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	PDT - Chaucha		137,14	0,01	0,96
Cultures racines	Production	Oignons	outflow	Oignons	Cellule familiale	450	54,00	0,00	0,26

Tableau 46 - Bilan entrées – sorties pour les cultures racines

Inflow	Outflow	Pertes	Outflow/Inflow
5,89	0,82	0,47	0,14

Tableau 47 - Ensembles des flux comptabilisés pour les céréales

<i>Espèces</i>	<i>Opération technique</i>	<i>Détail flux</i>	<i>Type flux</i>	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	<i>Valeur - matière fraîche (kg)</i>	<i>Valeur – matière sèche (kg)</i>	<i>Coefficient azote</i>	<i>Flux azote (kg N/an)</i>
Céréales - Blé	Engrais	15-15-15	Inflow	Distribution	Blé		16,00	0,15	2,40
Céréales - Maïs	Plantation	Semences maïs	Inflow	Distribution	Maïs	11,30	0,92	0,13	0,12
Céréales - Maïs	Engrais	15-15-15	Inflow	Distribution	Maïs		15,00	0,15	2,25
Céréales - Orge	Engrais	15-15-15	Inflow	Distribution	Orge		16,00	0,15	2,40
Céréales - Blé	Alimentation	Blé	Outflow	Blé	Cellule familiale	20	2,19	0,12	0,26
Céréales - Blé	Alimentation	Blé	Outflow	Blé	Distribution	200	21,90	0,12	2,63

Céréales - Maïs	Alimentation	Grains de maïs	Outflow	Maïs	Cellule familiale	41,2	3,34	0,13	0,42
Céréales - Orge	Alimentation	Orge	Outflow	Orge	Cellule familiale	70	7,20	0,12	0,88
Céréales - Blé	Plantation	Semences blé	Selfflow	Sous-système cultures	Blé	20	2,19	0,12	0,26
Céréales - Maïs	Plantation	Semences maïs	Selfflow	Sous-système cultures	Maïs	11,3	0,92	0,13	0,12
Céréales - Orge	Plantation	Semences orge	Selfflow	Sous-système cultures	Orge	10	1,03	0,12	0,13
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	Blé		137,14	0,01	0,96
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	Maïs		137,14	0,01	0,96
Déjections	Production	Déjection	Throughflow	Stockage déjections	Orge		137,14	0,01	0,96

Tableau 48 - Bilan entrées – sorties pour les cultures racines

Inflow	Outflow	Pertes	Outflow/Inflow
10,10	4,20	0,95	0,42

e) Proportions relatives de matière sèche et matière fraîche dans les cultures

Type de cultures	Matière sèche	Matière fraîche
<i>Luzerne</i>	0,17	0,83
<i>Maïs</i>	0,24	0,76
<i>Blé</i>	0,87	0,13
<i>Orge</i>	0,87	0,13
<i>Petits pois</i>	0,87	0,13
<i>Fèves</i>	0,86	0,14
<i>Pomme de terre</i>	0,2	0,8

Tableau 49 – Proportion de matière fraîche et de matière sèche dans les diverses cultures

f) Proportions relatives de protéines brutes dans les cultures

Tableau 50 - Proportion de protéines brutes dans les diverses cultures

Type de culture	Protéines brutes
<i>Luzerne</i>	0,21
<i>Maïs</i>	0,094
<i>Blé</i>	0,126
<i>Orge</i>	0,118
<i>Fève</i>	0,29
<i>Oignons</i>	0,12

g) Pertes de flux d'azote (%) – contexte éruptif – cinq millimètres

i) Sous-système de cultures

Tableau 51 – Pertes de flux d'azote du sous-système de cultures selon les différentes destinations des productions culturales (%) – 5 mm

<i>Mois</i>	<i>Flux N (Kg N/an) - Hors éruption</i>	<i>Récoltes (%)</i>	<i>Fourrage (%)</i>	<i>Autoconsommation (%)</i>	<i>Semences (%)</i>	<i>Vente (%)</i>
Janvier	16	64	92	0	12	81
Février	16	64	92	12	12	81
Mars	16	21	92	12	12	26
Avril	16	58	92	0	12	74
Mai	16	12	62	10	12	12
Juin	16	11	4	10	10	12
Juillet	16	13	4	11	10	14
Août	16	15	4	11	10	16
Septembre	16	10	4	10	10	10
Octobre	16	9	4	10	10	10
Novembre	16	12	4	7	10	13
Décembre	16	4	0	0	0	5

ii) Sous-système d'élevage – Naissances

Tableau 52 - Pertes de flux d'azote du sous-système d'élevage selon les différentes destinations des naissances (%) – 5 mm

<i>Mois</i>	<i>Naissances (%)</i>	<i>Ventes (%)</i>	<i>Conso personnelle (%)</i>	<i>Conservation capital(%)</i>
Janvier	17	20	9	13
Février	17	20	9	13
Mars	17	20	9	13
Avril	17	20	9	13
Mai	17	20	9	13
Juin	16	20	3	12
Juillet	16	13	2	12
Août	16	13	2	12
Septembre	16	13	3	12
Octobre	15	13	2	12
Novembre	15	7	1	12
Décembre	15	7	1	12

iii) Sous-système d'élevage – Productions animales

Tableau 53 - Pertes de flux d'azote du sous-système d'élevage selon les différentes destinations de productions animales(%) – 5 mm

Mois	Production (%)	Vente (%)	Conso personnelle (%)
Janvier	19	18	39
Février	18	16	39
Mars	16	14	39
Avril	14	13	39
Mai	13	11	39
Juin	11	9	39
Juillet	10	7	39
Août	8	6	39
Septembre	6	4	39
Octobre	5	2	39
Novembre	3	0	39
Décembre	2	0	23

iv) Sous-système d'élevage – Déjections

Tableau 54 - Pertes de flux d'azote du sous-système d'élevage selon les différentes destinations des déjections (%) – 5 mm

Mois	Déjection totale (%)	Directe (%)	Stockage (%)
Janvier	10	9	38
Février	9	8	37
Mars	8	6	36
Avril	6	5	35
Mai	5	4	34
Juin	4	3	33
Juillet	3	1	33
Août	1	0	20
Septembre	5	5	6
Octobre	4	4	5
Novembre	3	3	4
Décembre	1	1	3

v) *Système pris dans sa globalité – Flux individuels*

Tableau 55 – Pertes de flux d'azote selon les différents flux du système (%) – pris individuellement – 5 mm

N° Flèche	Type Flux	Entrée	Sortie	Flux N (kg N/an)- Hors éruption	Proportionnalité des flux (%)	J.	F.	M.	Av.	Mai	Juin	Juil.	Août	S.	O.	N.	D.
1	Inflow	Engrais	Sous-système de cultures	25	0,97	25	25	10	17	20	20	19	19	0	0	0	0
2	Inflow	Semis	Sous-systèmes de cultures	0	0,01	12	12	0	12	12	10	10	10	10	10	10	0
3	Inflow	Achats animaux	Sous-système d'élevage	3	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Inflow	Achats nourritures	Sous-système d'élevage	5	0,19	16	15	13	12	10	8	7	5	4	2	0	0
5	Outflow	Stockage végétaux	Vente	31	1,21	64	64	21	58	12	11	13	15	10	9	12	4
6	Outflow	Stockage végétaux	Autoconsommation	7	0,28	92	92	92	92	62	4	4	4	4	4	4	0
7	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes animaux	12	0,46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes <i>produits animaux</i>	78	3,02	18	16	14	13	11	9	7	6	4	2	0	0
9	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation <i>produits animaux</i>	6	0,23	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	23
10	Outflow	Sous-système d'élevage	Vente <i>viande</i>	0	0,00	20	20	20	20	20	20	13	13	13	13	7	7
11	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation <i>viande</i>	4	0,15	12	12	12	12	12	3	2	2	3	2	1	1

16	Selfflow	Sous-système de cultures	Sous-système de cultures	1	0,05	0	12	12	0	10	10	11	11	10	10	7	0
17	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	37	1,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	95	3,71	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
12	Throughflow	Sous-système d'élevage	Prairie permanente	859	33,45	10	9	8	6	5	4	3	1	5	4	3	1
13	Throughflow	Sous-système d'élevage	Stockage déjections	33	1,29	38	37	36	35	34	33	33	20	6	5	4	3
14	Throughflow	Stockage déjections	Sous-système de cultures	36	1,39	25	25	10	17	20	20	19	19	0	0	0	0
15	Throughflow	Sous-système de cultures	Stockage végétaux	0	0,02	92	92	92	92	62	4	4	4	4	4	4	0
18	Throughflow	Stockage végétaux	Sous-système d'élevage	0	0,00	10	10	9	8	7	6	5	4	3	3	2	1
19	Throughflow	Prairie permanente	Sous-système d'élevage	1336	52,00	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

vi) *Système pris dans sa globalité – Flux pris proportionnellement par rapport à l'ensemble des flux*

Tableau 56 – Pertes de flux d'azote selon les différents flux du système (%) – pris proportionnellement – 5 mm

N° Flèche	Type Flux	Entrée	Sortie	Flux N (kg N/an)- Hors éruption	Proportionnalité des flux (%)	J.	F.	M.	Av.	Mai	Juin	Juil.	Août	S.	O.	N.	D.
1	Inflow	Engrais	Sous-système de cultures	25	0,97	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2
2	Inflow	Semis	Sous-systèmes de cultures	0	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Inflow	Achats animaux	Sous-système d'élevage	3	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Inflow	Achats nourritures	Sous-système d'élevage	5	0,19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	Outflow	Stockage végétaux	Vente	31	1,21	0,8	0,8	0,3	0,7	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,8
6	Outflow	Stockage végétaux	Autoconsommation	7	0,28	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
7	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes animaux	12	0,46	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes produits animaux	78	3,02	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
9	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation produits animaux	6	0,23	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

10	Outflow	Sous-système d'élevage	Vente <i>viande</i>	0	0,00												
11	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation <i>viande</i>	4	0,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	Selfflow	Sous-système de cultures	Sous-système de cultures	1	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	37	1,45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	95	3,71	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
12	Throughflow	Sous-système d'élevage	Prairie permanente	859	33,45	3,3	2,9	2,5	2,1	1,7	1,3	0,8	0,4	1,7	0,9	0,5	3,3
13	Throughflow	Sous-système d'élevage	Stockage déjections	33	1,29	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,0	0,0	0,5
14	Throughflow	Stockage déjections	Sous-système de cultures	36	1,39	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3
15	Throughflow	Sous-système de cultures	Stockage végétaux	0	0,02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	Throughflow	Stockage végétaux	Sous-système d'élevage	0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	Throughflow	Prairie permanente	Sous-système d'élevage	1336	52,00	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4

b) Pertes de flux d'azote (%) – contexte éruptif – cinquante millimètres

i) Sous-système de cultures

Tableau 57 – Pertes de flux d'azote du sous-système de cultures selon les différentes destinations des productions culturales (%) – 50 mm

<i>Mois</i>	<i>Récoltes (%)</i>	<i>Ventes (%)</i>	<i>Fourrages (%)</i>	<i>Autoconsommation (%)</i>	<i>Semences (%)</i>
Janvier	80	83	92	74	55
Février	80	83	92	55	55
Mars	26	33	88	12	12
Avril	71	91	88	0	53
Mai	15	15	95	11	12
Juin	13	15	4	10	10
Juillet	16	15	4	17	31
Août	17	16	4	17	49
Septembre	11	11	4	10	28
Octobre	9	10	4	10	10
Novembre	13	15	4	11	10
Décembre	6	8	0	0	0

ii) Sous-système d'élevage - naissances

Tableau 58 - Pertes de flux d'azote du sous-système d'élevage selon les différentes destinations des naissances (%) – 50 mm

<i>Mois</i>	<i>Naissances (%)</i>	<i>Ventes (%)</i>	<i>Conso personnelle (%)</i>	<i>Conservation capital (%)</i>
Janvier	86	100	69	86
Février	86	100	69	86
Mars	86	100	69	86
Avril	86	100	69	86
Mai	86	100	69	86
Juin	73	100	13	72
Juillet	72	0	10	72
Août	72	0	10	72
Septembre	72	0	10	72
Octobre	71	0	6	72
Novembre	71	0	1	72
Décembre	71	0	1	72

iii) Sous-système d'élevage – productions animales

Tableau - Pertes de flux d'azote du sous-système d'élevage selon les différentes destinations de productions animales(%) – 50 mm

Mois	Production (%)	Ventes (%)	Conso personnelle (%)
Janvier	79	79	69
Février	72	72	67
Mars	66	66	64
Avril	59	59	62
Mai	53	52	59
Juin	46	45	57
Juillet	40	39	54
Août	33	32	52
Septembre	26	25	49
Octobre	20	18	47
Novembre	13	11	44
Décembre	7	4	41

iv) Sous-système d'élevage – déjections

Tableau 59 - Pertes de flux d'azote du sous-système d'élevage selon les différentes destinations des déjections (%) – 50 mm

Mois	Déjections totales (%)	Directes (%)	Stockages (%)
Janvier	80	80	91
Février	73	72	85
Mars	66	65	80
Avril	59	58	75
Mai	52	51	70
Juin	44	44	64
Juillet	37	37	59
Août	30	29	52
Septembre	23	22	49
Octobre	16	15	43
Novembre	9	8	38
Décembre	2	0	33

v) *Système pris dans sa globalité – Flux individuels*

Tableau 60 – Pertes de flux d'azote selon les différents flux du système (%) – pris individuellement – 50 mm

N° Flèche	Type Flux	Entrée	Sortie	Flux N (kg N/an)- Hors éruption	Proportionnalité des flux (%)	J.	F.	M.	Av.	Mai	Juin	Juil.	Août	S.	O.	N.	D.
1	Inflow	Engrais	Sous-système de cultures	25	0,97	25	25	10	17	20	20	19	19	0	0	0	0
2	Inflow	Semis	Sous-systèmes de cultures	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Inflow	Achats animaux	Sous-système d'élevage	3	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Inflow	Achats nourritures	Sous-système d'élevage	5	0,19	80	73	67	60	54	47	40	34	27	20	13	7
5	Outflow	Stockage végétaux	Vente	31	1,21	83	83	33	91	15	15	15	16	11	10	15	8
6	Outflow	Stockage végétaux	Autoconsommation	7	0,28	74	55	12	0	11	10	17	17	10	10	11	0
7	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes animaux	12	0,46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes <i>produits animaux</i>	78	3,02	79	72	66	59	52	45	39	32	25	18	11	4
9	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation <i>produits animaux</i>	6	0,23	69	67	64	62	59	57	54	52	49	47	44	41
10	Outflow	Sous-système d'élevage	Vente <i>viande</i>	0	0,00	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

11	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation viande	4	0,15												
16	Selfflow	Sous-système de cultures	Sous-système de cultures	1	0,05	71	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
17	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	9	1,45	55	55	12	53	12	10	31	49	28	10	10	0
20	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	95	3,71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Throughflow	Sous-système d'élevage	Prairie permanente	859	33,45	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
13	Throughflow	Sous-système d'élevage	Stockage déjections	33	1,29	82	73	67	60	54	47	41	34	27	21	14	7
14	Throughflow	Stockage déjections	Sous-système de cultures	36	1,39	90	82	79	74	69	63	56	37	44	36	29	21
15	Throughflow	Sous-système de cultures	Stockage végétaux	0	0,02	63	68	68	78	61	61	61	61	52	52	52	52
18	Throughflow	Stockage végétaux	Sous-système d'élevage	0	0,00	92	92	88	88	95	4	4	4	4	4	4	0
19	Throughflow	Prairie permanente	Sous-système d'élevage	0		71	51	47	42	37	33	28	23	19	14	9	5
				1336	52,00	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65

vi) *Système pris dans sa globalité – Flux pris proportionnellement par rapport à l'ensemble des flux*

Tableau 61 – Pertes de flux d'azote selon les différents flux du système (%) – pris proportionnellement – 50 mm

N° Flèche	Type Flux	Entrée	Sortie	Flux N (kg N/an)- Hors éruption	Proportionnalité des flux (%)	J.	F.	M.	Av.	Mai	Juin	Juil.	Août	S.	O.	N.	D.
1	Inflow	Engrais	Sous-système de cultures	25	0,97	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2	Inflow	Semis	Sous-systèmes de cultures	0	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Inflow	Achats animaux	Sous-système d'élevage	3	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Inflow	Achats nourritures	Sous-système d'élevage	5	0,19	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
5	Outflow	Stockage végétaux	Vente	31	1,21	1,0	1,0	0,4	1,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
6	Outflow	Stockage végétaux	Autoconsommation	7	0,28	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes animaux	12	0,46	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	Outflow	Sous-système d'élevage	Ventes produits animaux	78	3,02	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1
9	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation produits animaux	6	0,23	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	Outflow	Sous-système d'élevage	Vente viande	0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

11	Outflow	Sous-système d'élevage	Autoconsommation viande	4	0,15												
16	Selfflow	Sous-système de cultures	Sous-système de cultures	1	0,05	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	9	1,45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	Selfflow	Sous-système d'élevage	Sous-système d'élevage	95	3,71	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	Throughflow	Sous-système d'élevage	Prairie permanente	859	33,45	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
13	Throughflow	Sous-système d'élevage	Stockage déjections	33	1,29	27,3	24,4	22,4	20,1	18,0	15,7	13,6	11,3	9,1	6,9	4,6	2,4
14	Throughflow	Stockage déjections	Sous-système de cultures	36	1,39	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,6	0,5	0,4	0,3
15	Throughflow	Sous-système de cultures	Stockage végétaux	0	0,02	0,9	0,9	0,9	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
18	Throughflow	Stockage végétaux	Sous-système d'élevage	0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	Throughflow	Prairie permanente	Sous-système d'élevage	0		1,0	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
				1336	52,00	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7

Environ 14 % de la population mondiale est exposée au risque volcanique, un chiffre qui devrait augmenter dans les années à venir en raison de l'urbanisation croissante et de l'augmentation de la population. La plupart des régions à proximité des volcans sont densément peuplées, notamment en raison de la fertilité des sols formés sur les matériaux volcaniques, principalement les dépôts de téphra. Bien que l'activité volcanique puisse bénéficier à l'agriculture en fournissant des sols fertiles, elle peut également entraîner des pertes, pour le secteur agricole, lors d'éruptions. Les pratiques agricoles, qu'il s'agisse de cultures ou d'élevage, présentent des vulnérabilités propres à leurs caractéristiques spécifiques. Les risques pour les exploitations sont évalués en considérant qu'ils sont le résultat de la combinaison d'un danger, d'une exposition et d'une vulnérabilité. Alors que les deux premiers termes sont généralement bien documentés, la vulnérabilité reste encore mal comprise. La plupart des études qui quantifient la vulnérabilité se concentrent principalement sur des éléments des exploitations agricoles pris indépendamment les uns des autres. Néanmoins, il est essentiel de considérer une exploitation agricole comme un système intégrant des interactions entre ses différents composants. Dans cette étude, ces interactions entre les éléments d'une exploitation agricole ont été identifiées en utilisant les flux de matière comme moyen d'analyse.

L'objectif principal de cette recherche est décrire de manière semi-quantitative la vulnérabilité des exploitations agricoles face aux retombées de téphra. Les objectifs spécifiques sont : (i) Caractériser le fonctionnement global, la structure et les performances agroécologiques des exploitations agricoles en période hors éruption. (ii) Évaluer la situation économique des exploitations agricoles en période hors éruption et en période éruptive, en tenant compte de la temporalité de l'événement volcanique pour identifier les pertes économiques des différentes activités agricoles du système. (iii) Évaluer la vulnérabilité des éléments non mesurables sur le plan économique, en plus de ceux mesurables, en tenant compte de divers scénarios éruptifs et de la période d'éruption. La région choisie pour cette étude est la région de Guamote, en Équateur, principalement affectée par l'activité du volcan Sangay.

Pour atteindre ces objectifs, la conduite agricole générale de l'exploitation étudiée a été caractérisée selon divers indicateurs de structure, de fonctionnement et de performance agroécologique. Sa vulnérabilité a été évaluée à la fois sur le plan économique et à travers des flux de matière, afin de saisir la complexité d'une exploitation agricole envisagée comme un système. Cela implique une estimation de pertes pour chaque mois de l'année, afin de tenir compte de la temporalité de l'éruption, suite à des dépôts de téphra de cinq et cinquante millimètres d'épaisseur, représentant deux niveaux d'intensité éruptive.

Les résultats obtenus soulignent l'importance de traiter les exploitations agricoles dans leur globalité en tant que systèmes, et de prendre en considération la dimension temporelle des éruptions lors de l'analyse. Les pertes ne se restreignent pas à un élément spécifique de l'exploitation : la perte d'un élément d'un sous-système peut avoir un impact significatif sur d'autres composantes du système lorsqu'ils sont interdépendants. L'approche adoptée dans cette étude, qui considère l'exploitation agricole comme un système, offre de nouvelles perspectives pour mieux décrire et comprendre la vulnérabilité des exploitations agricoles face aux retombées de téphra.