

Faculté des bioingénieurs

Évaluation de la vulnérabilité des systèmes agraires soumis aux retombées de cendres volcaniques

Cas d'étude : volcan Taal, Philippines

Auteur

Marine Donfut

Promoteurs

Pierre Delmelle (SST/ELI/ELIE)

Noa Ligot (SST/ELI/ELIE)

Lecteurs

Pierre Bertin (SST/ELI/ELIA)

Guillaume Lobet (SST/ELI/ELIA)

Année Académique 2021 - 2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

J'adresse tous mes remerciements aux personnes qui m'ont suivie et épaulée tout au long de ce mémoire.

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs, le Professeur Pierre Delmelle et Noa Ligot, de m'avoir orientée vers un sujet aussi intéressant, de m'avoir accordé leur confiance et une partie de leur temps pour m'avoir guidée dans ce travail.

Je souhaite remercier en particulier Sophie Malherbe pour son aide, ses précieux conseils, ses réponses à mes innombrables questions, ses nombreuses relectures et corrections enrichissantes, sa disponibilité et également ses encouragements tout au long de l'année.

Je remercie également le Professeur Fabien Stark, de m'avoir fourni de judicieux outils et des pistes de réflexion et de m'avoir partagé son expérience personnelle.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui m'ont permis, de près ou de loin, de réaliser des enquêtes sur le terrain, et sans lesquelles ce travail n'aurait pas été possible. Merci au staff philippin de Solidagro/Viva Salud (Suyn et Jhana) et du CCNCI (Climate Change Network for Community-based Initiatives; Anya et Jean) pour leur aide précieuse.

Merci aux Professeurs Pierre Bertin et Guillaume Lobet d'avoir accepté de faire partie de mon jury en tant que lecteurs.

Enfin, je remercie ma famille et mes proches pour leur présence, leur soutien, leurs encouragements et les distractions qu'ils m'ont apportées.

Table des matières

Remerciements	I
Liste des Figures	V
Liste des Tables	VI
1 Introduction	1
2 État de l’art	2
2.1 Le volcanisme	2
2.1.1 Les éruptions volcaniques	2
2.1.2 Le téphra	4
2.1.2.1 Les propriétés physico-chimiques du téphra	4
2.1.2.2 La dispersion et les dépôts de téphra	5
2.2 Les régions volcaniques et l’agriculture	6
2.2.1 La fertilité des sols volcaniques	6
2.2.2 La densité de population dans les régions volcaniques	7
2.2.3 L’impact des retombées de téphra sur les systèmes agraires	8
2.2.3.1 Les systèmes agraires et leur classification	8
2.2.3.2 L’impact du téphra sur les cultures	9
2.2.3.3 L’impact du téphra sur le bétail	12
2.3 Les concepts de risque, de vulnérabilité et résilience	13
2.3.1 L’évaluation du risque	13
2.3.2 L’évaluation de la vulnérabilité	14
2.3.3 Les fonctions de fragilité	15
2.3.4 La résilience d’un système	17
3 Objectif du travail	18
4 Matériels et méthodes	19
4.1 Analyse qualitative	19
4.1.1 Analyse des réseaux écologiques	19
4.1.2 Analyse visuelle des réseaux - Gephi	22
4.2 Analyse quantitative	22
4.3 Recherche d’informations	23
4.3.1 Description générale	23
4.3.2 Région du Taal, Philippines	24
4.4 Traitement de données	25
4.4.1 Analyse qualitative	25
4.4.2 Analyse quantitative - scénarios éruptifs	26
4.4.2.1 Détermination des pourcentages de perte	26
4.4.2.2 Calculs des pertes de production	27

4.4.2.3	Calculs des pertes sur les actifs	28
5	Résultats	29
5.1	Description des systèmes agraires	29
5.1.1	Exploitation n°1 : système agraire composé de sous-systèmes de culture et d'élevage sans interaction entre les sous-systèmes	29
5.1.2	Exploitation n°5 : système agraire composé de sous-systèmes de culture et d'élevage avec interactions entre les sous-systèmes	31
5.1.3	Comparaison générale des sept exploitations	35
5.2	Quantification de la vulnérabilité	37
5.2.1	Détermination des pourcentages de pertes après un dépôt de téphra	37
5.2.2	Représentation des scénarios de retombées de téphra sur les systèmes agraires	39
5.2.2.1	Exploitation n°1	40
5.2.2.2	Exploitation n°5	43
5.2.3	Quantification des pertes sur les productions et sur les actifs	49
5.2.3.1	Exploitation n°1	50
5.2.3.2	Exploitation n°5	52
6	Discussion	53
6.1	Évaluation de la vulnérabilité de l'exploitation n°1	53
6.1.1	Pertes sur les productions	54
6.1.2	Pertes sur les actifs	55
6.1.3	Comparaison avec la réalité de terrain	55
6.2	Évaluation de la vulnérabilité de l'exploitation n°5	56
6.2.1	Pertes directes sur les productions	57
6.2.2	Pertes indirectes sur les productions	59
6.2.3	Pertes sur les actifs	60
6.2.4	Comparaison avec la réalité du terrain	61
6.3	Relation entre la vulnérabilité et la complexité des systèmes agraires	62
6.4	Pistes d'améliorations et perspectives	63
7	Conclusion	65
	Références	66
	Annexes	76
A	Questionnaire d'enquête sur le terrain	76
B	Tables et fonctions de fragilité créés par Wilson et al. (2007) évaluant les dégâts dans le secteur de l'agriculture en fonction de l'épaisseur de téphra	95
B.1	Agriculture pastorale	95
B.2	Horticulture	98

C	Évaluation des pertes de production pour différents types d'agriculture pour différents dépôts et tables des impacts potentiels par secteur selon l'épaisseur des dépôts de téphra (S. Jenkins et al., 2015)	102
D	Coordonnées GPS des sept fermes étudiées	107
E	Modèles conceptuels des exploitations agricoles	107
F	Descriptions des systèmes agraires non analysés quantitativement	115
F.1	Système agraire uniquement composé d'un système de culture	115
F.2	Système agraire composé d'un système de culture et d'élevage sans interaction entre les systèmes	117
F.3	Système agraire composé d'un système de culture et d'élevage avec interactions entre les systèmes	118
F.4	Détails sur la Table comparative des sept exploitations (Table 5)	123
G	Unité tropicale d'élevage (Livestock Tropical Unit, TLU)	125

Liste des Figures

1	Schématisation d'une éruption explosive (gauche) et effusive (droite) (L'Esprit Sorcier, 2020)	3
2	Ascension verticale et expansion latérale de la colonne éruptive lors d'une éruption volcanique explosive pour un panache fort et faible (Bonadonna et al., 2015)	6
3	Carte d'isopaques et d'épaisseurs de cendres réalisée suite à l'éruption du 12 janvier 2020 du volcan Taal aux Philippines (Balangue-Tarriela et al., 2022)	7
4	Distribution des volcans de l'Holocène et de la population à travers le monde (échelle logarithmique ; Small and Naumann, 2001)	8
5	Répartition des huit catégories de systèmes agraires suivant l'accès aux services agricoles et à la dotation en ressources des ménages (adaptation de Dixon et al., 2001)	9
6	Cultures affectées par les dépôts de téphra suite à une éruption volcanique	10
7	Dommmages probables des aérosols acides sur les plants de piments rouges observés à Petung (Indonésie), où les dépôts de 20 mm de tephra ont causé la perte de toute la production du district (T. Wilson et al., 2007)	11
8	Carte des classes de risque des zones bâties dans la région du Vésuve (Italie) (adaptation de Lirer and Vitelli (1998))	14
9	Courbes de fragilités de cultures horticoles suivant quatre niveaux d'état d'impact; IS1, IS2, IS3, IS4 (adaptation de Craig et al. (2021))	16
10	Illustration de la définition du concept de résilience sur base d'un rétablissement lent et rapide des performances et de l'état d'équilibre d'un système (adaptation de Proag (2014))	17
11	Système agricole fictif représentant toutes les composantes et les liens envisageables en son sein ainsi qu'entre le système et son environnement	21
12	Exemple d'application du logiciel Gephi dans le domaine médical. Représentation du cerveau moyen d'un groupe homogène d'individus atteints du syndrome de la délétion 22q11.2 (sous-type génétique de la schizophrénie), (adaptation de Ottet et al. (2013))	22
13	Localisation des sept enquêtes réalisées dans la région du volcan Taal, Philippines	24
14	Description visuelle des paysages bordant l'exploitation n°1	30
15	Exemples de cultures de l'exploitation n°5	32
16	Système d'élevage de l'exploitation n°5	33
17	Modèle du système agricole de l'exploitation n°1 en absence de dépôt de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi	41
18	Modèle du système agricole de l'exploitation n°1 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinq millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi	42
19	Modèle du système agricole de l'exploitation n°1 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinquante millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi	43
20	Modèle du système agricole de l'exploitation n°5 en absence de dépôt de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi	44

21	Mise en évidence des éléments du sous-système de culture du modèle de l'exploitation n°5, comprenant des cultures à cycle court (a), annuelle (b) et pérennes (c), et de leurs interactions directes au sein du système agraire réalisé avec Gephi	45
22	Mise en évidence des sous-systèmes de stockage du modèle de l'exploitation n°5, comprenant la production d'ensilage (a) et le stockage de fumier (b), et de leurs interactions directes au sein du système agraire réalisé avec Gephi	45
23	Mise en évidence des éléments du sous-système d'élevage du modèle de l'exploitation n°5, comprenant des cochons (a) et des poules (b), et de leurs interactions directes au sein du système agraire, réalisé avec Gephi	46
24	Mise en évidence des productions végétales et animales du modèle de l'exploitation n°5, destinées à la consommation personnelle (a) et à la vente (b), réalisé avec Gephi	47
25	Modèle du système agraire de l'exploitation n°5 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinq millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi	48
26	Modèle du système agraire de l'exploitation n°5 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinquante millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi	49
27	Pertes de revenus bruts annuels par production de l'exploitation n°5 suite à un dépôt de 5 (a) et 50 mm de téphra (b)	58
28	Fonctions de fragilité pour l'agriculture pastorale	97
29	Fonctions de fragilité pour l'agriculture horticole (perte de production)	101
30	Fonctions de fragilité pour l'agriculture horticole (perte d'actifs)	101
31	Évaluation des pertes de production de différents types d'agriculture suivant l'épaisseur du dépôt de téphra. Les valeurs données correspondent aux valeurs médianes et aux interdéciles des épaisseurs de téphra sec approximées.	102
32	Légende des modèles conceptuels	107
33	Modèle conceptuel de l'exploitation n°1	108
34	Modèle conceptuel de l'exploitation n°2	109
35	Modèle conceptuel de l'exploitation n°3	110
36	Modèle conceptuel de l'exploitation n°4	111
37	Modèle conceptuel de l'exploitation n°5	112
38	Modèle conceptuel de l'exploitation n°6	113
39	Modèle conceptuel de l'exploitation n°7	114
40	Culture d'ananas de l'exploitation n°6	116
41	Description visuelle de l'exploitation n°2	118
42	Mode de gestion des animaux de l'exploitation n°3	119
43	Description visuelle de l'exploitation n°7	122

Liste des Tables

1	Échelle d'explosivité des éruptions volcaniques. Les éruptions sont classées sur base d'un indice d'explosivité volcanique (Newhall & Self, 1982)	3
2	Coefficients de vulnérabilité, table traduite de Wilson et al. (2007)	27
3	Résumé des productions et revenus annuels de l'exploitation n°1	31
4	Résumé des productions et revenus annuels de l'exploitation n°5	34
5	Comparaison des actifs, des productions et des revenus des sept exploitations étudiées	35
6	Estimation des pourcentages de perte associés aux productions de l'exploitation n°1. La colonne "Référence" correspond à la classification des productions décrites par Wilson et al. (2007).	37
7	Estimation des pourcentages de perte associés aux actifs de l'exploitation n°1. La colonne "Référence" correspond à la classification des actifs décrite par Wilson et al. (2007).	38
8	Estimation des pourcentages de pertes associés aux productions de l'exploitation n°5. La colonne "Référence" correspond à la classification des productions décrite par Wilson et al. (2007).	39
9	Estimation des pourcentages de pertes associés aux actifs de l'exploitation n°5. La colonne "Référence" correspond à la classification des actifs décrite par Wilson et al. (2007).	39
10	Quantification des pertes directes sur les productions de l'exploitation n°1 suite à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm	51
11	Pertes d'actifs sur les cultures pérennes de l'exploitation n°1 suite à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm	51
12	Quantification des pertes directes sur les productions de l'exploitation n°5 suite à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm	52
13	Pertes d'actifs sur les cultures pérennes de l'exploitation n°5	53
14	Volet 1 du questionnaire d'enquête de terrain : Contact	76
15	Volet 2 du questionnaire d'enquête de terrain : Système d'élevage	78
16	Volet 3 du questionnaire d'enquête de terrain : Système de culture	82
17	Volet 4 du questionnaire d'enquête de terrain : Économie	86
18	Volet 5 du questionnaire d'enquête de terrain : Main d'œuvre	88
19	Volet 6 du questionnaire d'enquête de terrain : Inquiétudes et craintes	90
20	Volet 7 du questionnaire d'enquête de terrain : Retombées de téphra	92
21	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production laitière	95
22	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de bétail bovin (viande)	95
23	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de moutons et de cerfs	96
24	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs agricoles liés à la production animale	96

25	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs agricoles	97
26	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de légumes à feuilles	98
27	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de légumes-fruits	98
28	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de légumes-racines	98
29	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de cultures arboricoles	99
30	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de raisins pour le vin	99
31	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs de cultures saisonnières	99
32	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs de cultures permanentes	100
33	Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs viticoles	100
34	Impacts potentiels d'une épaisseur de dépôt de téphra de 1 à 10 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages	103
35	Impacts potentiels d'une épaisseur de dépôt de téphra de 10 à 100 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages	104
36	Impacts potentiels d'une épaisseur de dépôt de téphra de 100 à 1000 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages	105
37	Impacts potentiels d'une épaisseur de dépôt de téphra supérieure à 1000 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages	106
38	Coordonnées GPS (latitudes et longitudes) des sept fermes étudiées	107
39	Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°4	116
40	Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°6	117
41	Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°2	118
42	Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°3	121
43	Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°7	123
44	Facteurs de conversion de TLU pour différentes espèces d'élevage (FAO, 1979)	125

1 Introduction

Près d'un milliard de personnes vivent à moins de 100 km d'un volcan qui a été actif durant l'Holocène (Freire et al., 2019) et ce nombre ne cesse d'augmenter en raison d'une démographie croissante (Siebert et al., 2010). L'attraction pour ces régions réside dans la fertilité naturelle des sols volcaniques, conférant un potentiel agronomique élevé. En effet, bien que ces sols représentent moins de 1% des terres émergées, leur exploitation permet de nourrir environ 10% de la population mondiale (Delmelle et al., 2015).

Néanmoins, la proximité des volcans potentiellement actifs expose fortement le secteur agricole et les populations qui en dépendent aux chutes de téphra. Le téphra est le matériau volcanique majoritairement produit par les éruptions explosives. Ce sont des particules éjectées et dispersées dans l'atmosphère et qui après sédimentation forment des dépôts susceptibles de recouvrir soudainement de grandes superficies. Ainsi, les téphras émis par les éruptions volcaniques les plus violentes peuvent affecter des dizaines, voire des centaines de milliers de km². Il en résulte souvent des impacts importants pour la société et l'environnement. On sait aujourd'hui qu'un secteur particulièrement vulnérable aux dépôts de téphra est le secteur de l'agriculture (T. M. Wilson et al., 2012). Des pertes considérables de production sont souvent enregistrées, mettant en péril la subsistance des agriculteurs et parfois, menaçant la sécurité alimentaire aux échelles locale et régionale. Néanmoins, l'agriculture est aussi le premier secteur d'activités qui permettra aux communautés d'une région dévastée par une éruption de rebondir et de redémarrer.

L'exposition de l'agriculture à l'aléa volcanique continue à s'aggraver, cela en raison de l'expansion de la population et de sa dépendance à l'agriculture. Le problème est particulièrement prégnant dans les régions volcaniques des pays économiquement moins développés ou en plein essor économique (par exemple, l'Indonésie, les Philippines, les pays Andins). En vue de développer des stratégies efficaces de réduction du risque volcanique pour l'agriculture, il est primordial de décrire les impacts des retombées de téphra sur les systèmes agraires et de quantifier la vulnérabilité de ceux-ci et les facteurs qui la contrôlent. Si des avancées significatives ont été réalisées quant à la prédiction de l'aléa volcanique et de la distribution spatiale de dépôts de téphra lors d'une éruption, un nombre très limité d'études se penchent sur les risques encourus par l'agriculture soumises à ces dépôts. Il y a un manque de connaissances flagrant sur les impacts des téphra sur les cultures et l'élevage. De plus, les données existantes font référence à des segments de l'agriculture pris isolément ; elles traitent spécifiquement de telle ou telle culture, ou d'un type de bétail en particulier mais ne considèrent pas le système agraire (et les interactions qui le régissent) dans son ensemble. Ainsi, il n'est aujourd'hui pas possible, pour une région volcanique donnée, d'évaluer correctement la vulnérabilité de son secteur agricole.

La recherche menée dans ce mémoire vise à générer de nouvelles connaissances qui contribueront à améliorer notre compréhension des risques encourus par l'agriculture au pied des volcans. Pour ce faire, nous espérons démontrer la pertinence d'aborder la problématique en adoptant une approche systémique qui se démarque des études précédentes. L'étude porte sur la région agricole située dans les environs du volcan Taal, aux Philippines, dont la dernière éruption a eu lieu en janvier 2020. Les pertes économiques liées aux destructions de l'agriculture par les chutes de téphra ont été chiffrées à

3,06 milliards de pesos philippins, soit 54,46 millions d'euros.

2 État de l'art

2.1 Le volcanisme

2.1.1 Les éruptions volcaniques

Les éruptions volcaniques sont une des manifestations de l'activité volcanique. Elles résultent de l'arrivée de magma en provenance de la croûte continentale (ou océanique dans le cas des éruptions sous-marines) et/ou du manteau jusqu'à la surface de la Terre. Le magma est de la roche en fusion (état liquide) et contient les éléments majeurs qui composent la croûte terrestre (O, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K) en proportions variables. Il renferme également des gaz dissous (essentiellement de l'eau et du CO_2) en plus ou moins grandes concentrations. En fonction de la composition du magma et de la profondeur à laquelle il réside, la limite de solubilité des gaz peut être franchie, donnant lieu à la formation de bulles de gaz piégées au sein du liquide. Si la viscosité du magma est telle que le gaz ne peut pas s'échapper de manière passive, la pression interne exercée par les bulles de gaz pourra excéder la pression de confinement. C'est la rupture brutale du magma soumis à cette surpression qui est à l'origine des éruptions explosives. Celles-ci sont typiquement accompagnées de l'émission violente dans l'atmosphère d'un mélange à haute température de gaz et de fragments de magma de tailles diverses. Une fois refroidis, ces fragments de magma portent le nom de débris pyroclastiques. Les éruptions qui génèrent des débris pyroclastiques sont appelées "éruptions explosives". Elles sont typiquement associées à des magmas riches en silice ($\text{SiO}_2 > 55\%$ en poids) et dont la température n'excède pas 900-950 °C. Ces éruptions sont les plus fréquentes à la surface de notre planète (Cashman & Scheu, 2015; Keller et al., 2015).

L'activité volcanique peut aussi donner lieu à des éruptions effusives, caractérisées par l'épanchement de lave. Dans ce cas, le gaz contenu dans le magma en route vers la surface a pu s'échapper progressivement, empêchant le développement d'une surpression au sein du liquide. Les éruptions effusives sont généralement observées avec des magmas basaltiques présentant une viscosité faible en raison de leur haute température supérieure à 1000 °C et de leur faible teneur en silice ($\text{SiO}_2 < 45\%$ en poids) (Figure 1) (Bas et al., 1986; Keller et al., 2015; Taddeucci et al., 2015).

La classification des éruptions en deux grandes catégories ne suffit pas pour décrire précisément l'activité éruptive. Il convient alors de classer relativement les éruptions suivant un indice d'explosivité volcanique, nommé *VEI* (Volcanic Explosivity Index), dont l'échelle s'étend de 0 à 8 (Newhall & Self, 1982). Chaque valeur de *VEI* est associée à un volume de tephra éjecté et à une hauteur de colonne éruptive (Table 1). Le téphra, produit volcanique majeur émis lors d'une éruption explosive, désigne un débris pyroclastique dont le diamètre est inférieur à 63 millimètres. La colonne éruptive se rapporte au nuage vertical, ou panache, formé de débris pyroclastiques et de gaz, émis dans l'atmosphère (Bonadonna et al., 2015).

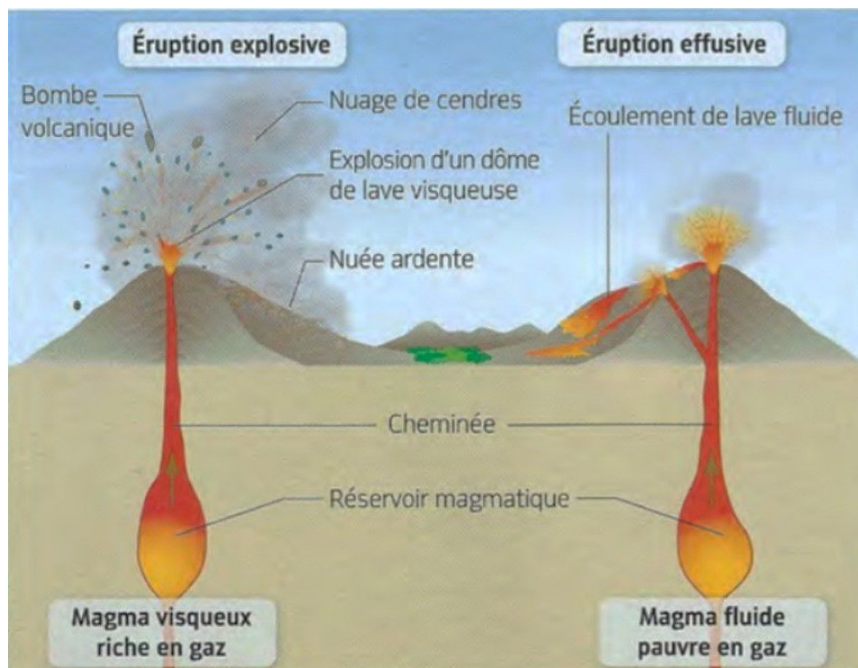
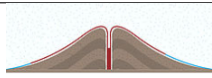


Figure 1 – Schématisation d'une éruption explosive (gauche) et effusive (droite) (L'Esprit Sorcier, 2020)

Table 1 – Échelle d'explosivité des éruptions volcaniques. Les éruptions sont classées sur base d'un indice d'explosivité volcanique (Newhall & Self, 1982)

VEI	Classification	Description	Volume de téphra éjecté (km^3)	Hauteur de la colonne (km)	Fréquence
0	Hawaïenne		<0,0001	<0,1	Fréquent
1	Hawaïenne/ Strombolienne		0,0001 à 0,001	0,1 à 1	Fréquent
2	Strombolienne/ Vulcanienne		0,001 à 0,01	1 à 5	Dizaines par an
3	Vulcanienne/ Pélénienne		0,01 à 0,1	3 à 15	Plusieurs par an
4	Pélénienne/ Plinienne		0,1 à 1	10 à 25	Dizaines par décennie
5	Plinienne		1 à 10	>25	Une par décennie
6	Plinienne/ Ultra-plinienne		10 à 100	>25	Plusieurs par siècle
7	Ultra-plinienne		100 à 1000	>25	Plusieurs par/ millénaire
8	Ultra-plinienne		>1000	>25	Deux par/ 100 000 ans

Un VEI plus élevé correspond à une augmentation du volume de téphra éjecté et de la hauteur de la colonne éruptive. En effet, la puissance de l'explosion est directement proportionnelle à la concentration en gaz dissous contenus dans le magma. Lorsque celle-ci est élevée, la fragmentation du magma plus importante et dès lors, une proportion plus élevée de téphra plus fin est projetée dans l'atmosphère (Zimanowski et al., 2003).

2.1.2 Le téphra

Le téphra est un ensemble de matériaux aluminosilicatés formés lors de la fragmentation du magma refroidi dans l'atmosphère. La dépressurisation soudaine d'un magma est le mécanisme principal qui conduit à la formation de téphra, mais d'autres modes de formation existent. Par exemple, dans certains cas, une explosion résultant du contact du magma avec un réservoir d'eau (sous terrain ou en surface) peut fragmenter la roche solide avoisinante pour produire du téphra. L'érosion des parois du conduit volcanique par le magma ou l'effondrement de l'édifice volcanique peuvent également générer du téphra. Le téphra sera alors dérivé de roches solides, aussi appelées lithiques (Ayrès & Delmelle, 2012).

Le téphra de fraction granulométrique inférieure à 50 μm peut être transporté par les vents sur plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres avant de se déposer sur les surfaces terrestres et/ou océaniques (Ayrès & Delmelle, 2012; Thompson et al., 2017). Les émissions de téphra sont majoritairement responsables des impacts des éruptions volcaniques sur l'agriculture, les infrastructures et la société en général.

2.1.2.1 Les propriétés physico-chimiques du téphra

Les propriétés physico-chimiques principales du téphra qui dictent ses interactions avec l'environnement sont : la taille (et la surface spécifique¹), la densité, la couleur et la composition chimique de surface (Ayrès & Delmelle, 2012).

Le téphra présente des compositions très variées suivant la teneur en silice (SiO_2), allant de mafiques ($\leq 57\%$ de SiO_2) à siliciques ($\geq 77\%$ de SiO_2) (Bas et al., 1986; Le Maitre et al., 2004). En général, les verres volcaniques (aluminosilicates amorphes) dominent, mais des minéraux magmatiques tels que les feldspaths, plagioclases, pyroxènes, olivine, quartz et oxydes de Fe/Ti peuvent aussi être présents dans la composition du téphra (Heiken, 1972; Sigurdsson et al., 2015). Des fragments de roches lithiques peuvent aussi être observés. De plus, des sels de sulfate (typiquement CaSO_4), chlorures de sodium (NaCl) et fluorures (NaF , $(\text{Na,K})_2\text{SiAlF}_6$) sont parfois associés au téphra. Ceux-ci peuvent provenir du système hydrothermal affecté durant l'éruption ou être le produit de réactions à haute température au sein du panache entre les gaz volcaniques et la surface du téphra (Delmelle et al., 2007). L'existence de ces sels influence fortement la réactivité du téphra déposé sur la végétation, les sols et les eaux de surface (Ayrès & Delmelle, 2012; Cronin et al., 2003; Delmelle et al., 2021).

Le temps de résidence² du téphra dans l'atmosphère et dans les eaux, et donc le potentiel de réaction,

1. Surface par unité de masse d'un composé (Ayrès & Delmelle, 2012).

2. Durée pendant laquelle un élément est présent dans un environnement particulier ou plus précisément présent

est contrôlé notamment par la taille des particules. Au plus la magnitude (VEI) de l'éruption est élevée, au plus la fragmentation du magma au cours de l'éruption est importante et plus la granulométrie du téphra sera fine ($< 1 \text{ mm}$) (Zimanowski et al., 2003). En outre, l'interaction entre l'eau et le magma peut également former des particules de téphra de taille plus fine inférieure à $64 \text{ }\mu\text{m}$ (Wohletz, 1986; Zimanowski et al., 2003). La taille des particules est aussi étroitement liée à leur surface spécifique, disponible pour interagir avec l'environnement, et reflète le potentiel de réactivité chimique des particules de téphra. Dès lors, le ratio surface/volume étant plus élevé pour les particules de téphra de plus petites dimensions, leur surface disponible pour interagir avec l'environnement sera plus grande (Ayrès & Delmelle, 2012).

Une autre caractéristique importante du téphra est sa densité qui dicte également le temps de résidence dans l'atmosphère et dans les eaux. La densité des particules de téphra varie selon sa composition, sa cristallinité et sa porosité. Un téphra avec une teneur en Fe/Ti élevée présente une densité plus élevée ($2,400 \text{ à } 3,200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour du téphra basaltique) que celui avec une teneur en Fe/Ti plus faible ($2,150 \text{ à } 2,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour du téphra plus silicique) (Schön, 2011). Des densités plus faibles sont obtenues lorsque les particules de téphra sont non-cristallines ou que leur porosité est plus élevée (Shipley & Sarna-Wojcicki, 1983).

Les propriétés d'absorption des métaux de transition, présents au sein des phases minérales ou des verres volcaniques du téphra, sont responsables de sa couleur. Par exemple, Scholze and Lakin (2011) révèlent que le téphra présentant une forte concentration en Si mais une faible teneur en Fe aura une couleur pâle car ses composants transmettent et reflètent la lumière visible. À l'inverse, celui renfermant un faible taux de Si mais une haute concentration en Fe absorbe le rayonnement lumineux et apparaît brun foncé ou noir. La couleur du téphra dicte ses propriétés radiatives, c'est à dire sa capacité à absorber, transmettre et/ou réfléchir un rayonnement électromagnétique. Généralement, au plus la concentration en Si dans le téphra est élevée, au plus la réflexion du rayonnement solaire sera élevée. Dès lors, l'albédo³ des surfaces recouvertes de téphra peut être plus élevé que celui des sols moyens sans dépôts de téphra présentant un albédo s'étendant typiquement de 0,1 à 0,4 (Burns, 1993).

2.1.2.2 *La dispersion et les dépôts de téphra*

Lors d'une éruption volcanique explosive, des gaz et des débris pyroclastiques sont propulsés dans l'atmosphère au sein d'une colonne éruptive ou panache volcanique. Cette colonne, étant plus chaude que l'atmosphère environnant et donc de plus faible densité, s'élève. Ensuite, la colonne éruptive se refroidit et l'atmosphère se réchauffe jusqu'à atteindre un niveau de flottabilité neutre lorsque les densités du panache volcanique et de l'air sont égales. Une fois ce niveau atteint, la colonne éruptive cesse de monter en altitude et se diffuse latéralement. La Figure 2 présente l'ascension de la colonne éruptive ainsi que son expansion latérale une fois le niveau de flottabilité neutre atteint lors d'un panache fort (Figure 2a) et faible (Figure 2b) (Bonadonna et al., 2015).

dans un des composants d'un système spécifique (Qian et al., 2008).

3. Quantité de rayonnement solaire réfléchi par une surface; au plus la couleur de la surface est claire, au plus elle réfléchit une grande quantité de rayons (Gueymard et al., 2019).

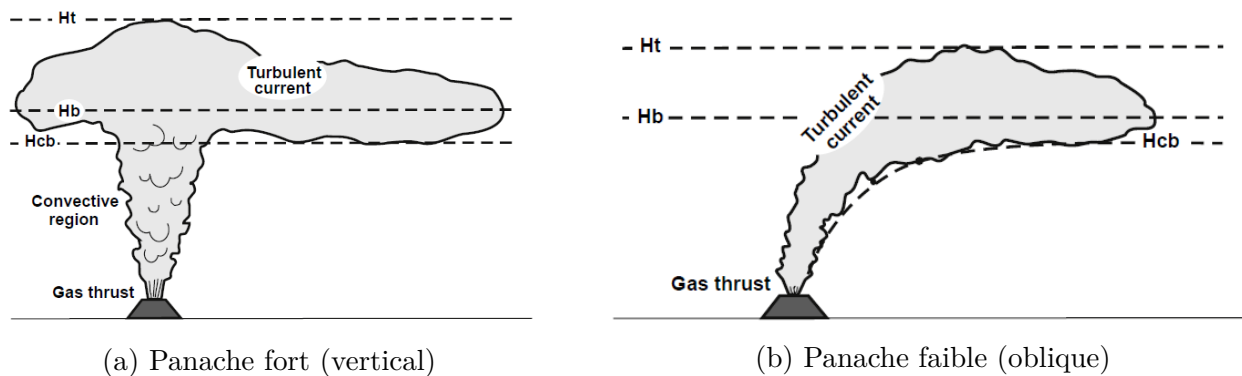


Figure 2 – Ascension verticale et expansion latérale de la colonne éruptive lors d’une éruption volcanique explosive pour un panache fort et faible (Bonadonna et al., 2015)

Le transport du téphra se fait essentiellement par advection par le vent et par des turbulences atmosphériques. Sur base de modèles prenant en compte le vent et les paramètres de la source d’éruption tels que la hauteur de la colonne éruptive, la masse éjectée, le taux d’éruption de masse ainsi que la distribution de la taille du téphra, il est possible de représenter la dispersion atmosphérique et la sédimentation des particules de téphra (Bonadonna et al., 2015). Généralement, l’épaisseur du dépôt de téphra ainsi que la granulométrie des particules diminuent avec la distance au centre éruptif (Pyle, 1989). En effet, les particules de tailles plus fines sédimentent plus lentement que les particules de taille supérieure, pouvant alors être transportées dans l’air sur de plus longues distances (T. Wilson et al., 2011).

La distribution spatiale de l’épaisseur du dépôt de téphra peut être visualisée via des cartes isopaques, chaque isopaque reliant les points d’épaisseur de dépôt égale (Figure 3) (Balangue-Tarriela et al., 2022).

2.2 Les régions volcaniques et l’agriculture

2.2.1 La fertilité des sols volcaniques

Les sols volcaniques désignent des sols formés à partir de débris pyroclastiques ou de coulées de lave. La majorité des sols volcaniques dérive de dépôts de téphra. Au sein des sols volcaniques, les Andisols sont majoritaires. Ces sols possèdent des propriétés chimiques, minéralogiques et physiques uniques. Celles-ci sont notamment dues à la présence de verre volcanique dans le matériau parental. Le verre volcanique s’altère facilement sous l’action des pluies et libère du silicium (Si), de l’aluminium (Al) et du fer (Fe) en solution, quantité d’éléments dissoute directement proportionnelle à la quantité de cet élément dans la phase solide avec laquelle la solution est en contact. Ceci conduit à la saturation rapide de la solution qui percole au travers du dépôt vis-à-vis de phases solides faiblement cristallines comme les allophanes $((\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SiO}_2)_{1,3-2}(\text{H}_2\text{O})_{2,5-3})$, l’imogolite $(\text{Al}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_4)$ (en moindres teneurs) et la ferrihydrite $(\text{Fe}_{10}^{3+}\text{O}_{14}(\text{OH})_2)$ (Dahlgren et al., 2004; Delmelle et al., 2015). Ces composés, en plus d’être pourvus d’une surface de réaction très importante (5 g d’allophanes développent une surface spécifique équivalente à celle d’un terrain de rugby, soit 7000 m^2 (Parfitt, 2009)!), possèdent une charge électrique dont le signe dépendra du pH de la solution du sol. La présence d’allophanes et de

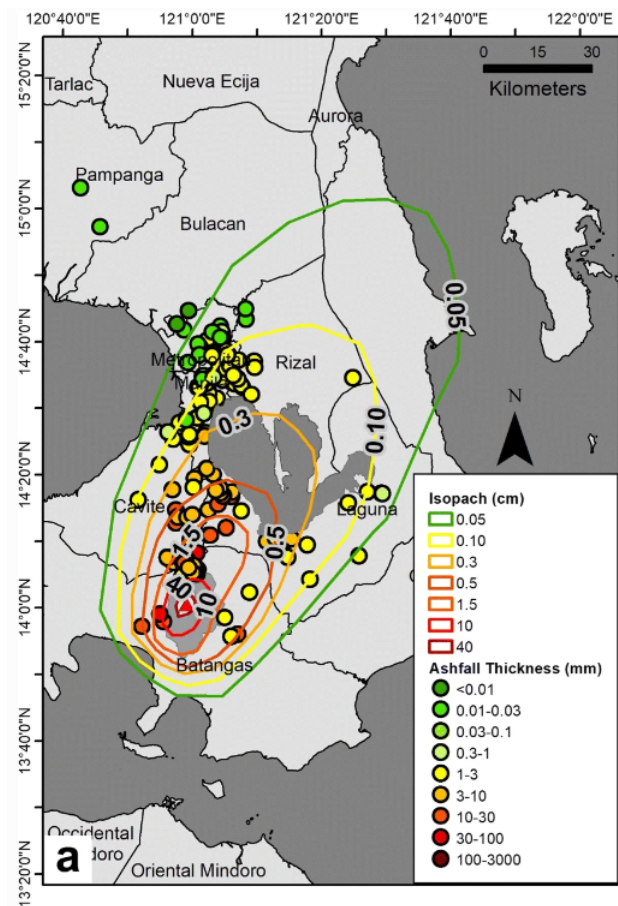


Figure 3 – Carte d'isopaques et d'épaisseurs de cendres réalisée suite à l'éruption du 12 janvier 2020 du volcan Taal aux Philippines (Balangue-Tarriela et al., 2022)

ferrihydrite confère aux Andisols une capacité d'échange cationique ainsi qu'une capacité d'échange anionique, dont les importances relatives varient en fonction du pH.

En plus de retenir des cations ou des anions à leur surface, les phases solides non ou faiblement cristallines assurent aux sols volcaniques une forte rétention en eau et en phosphates, une haute stabilité des agrégats, un ameublissement élevé et une faible densité apparente (en raison de l'accumulation importante de matière organique). De plus, la fertilité des sols volcaniques est étroitement liée à la composition chimique et aux propriétés des dépôts de téphra puisque lors de son altération, le téphra libère différents types de nutriments suivant le type de magma dont ils sont originaires. (Dahlgren et al., 2004).

2.2.2 La densité de population dans les régions volcaniques

D'après une étude menée par Freire et al. (2019), plus de 14% de la population mondiale vivent à moins de 100 kilomètres d'un volcan de l'Holocène⁴ et plus de 8 % à moins de 100 kilomètres d'un volcan qui a connu au moins une éruption significative⁵. Les régions volcaniques sont donc des régions à forte densité de population (Figure 4) (Small & Naumann, 2001) en vertu de la haute fertilité et

4. Ère géologique débutant à la fin de la dernière glaciation (Würm), il y a environ 10 000 ans (Julien, n.d.).

5. Le National Geophysical Data Center (2001) définit une éruption significative comme "une éruption qui répond à au moins un des critères suivants : a causé des décès, a causé des dommages modérés (~1 million de dollars ou plus), a un indice d'explosivité volcanique (VEI) de 6 ou plus, a causé un tsunami ou a été associée à un séisme majeur".

productivité agricole de ces sols (Dahlgren et al., 2004). L'Indonésie, jonchée de volcans, est une des régions les plus densément peuplées au monde (Freire et al., 2019; S. F. Jenkins et al., 2022).

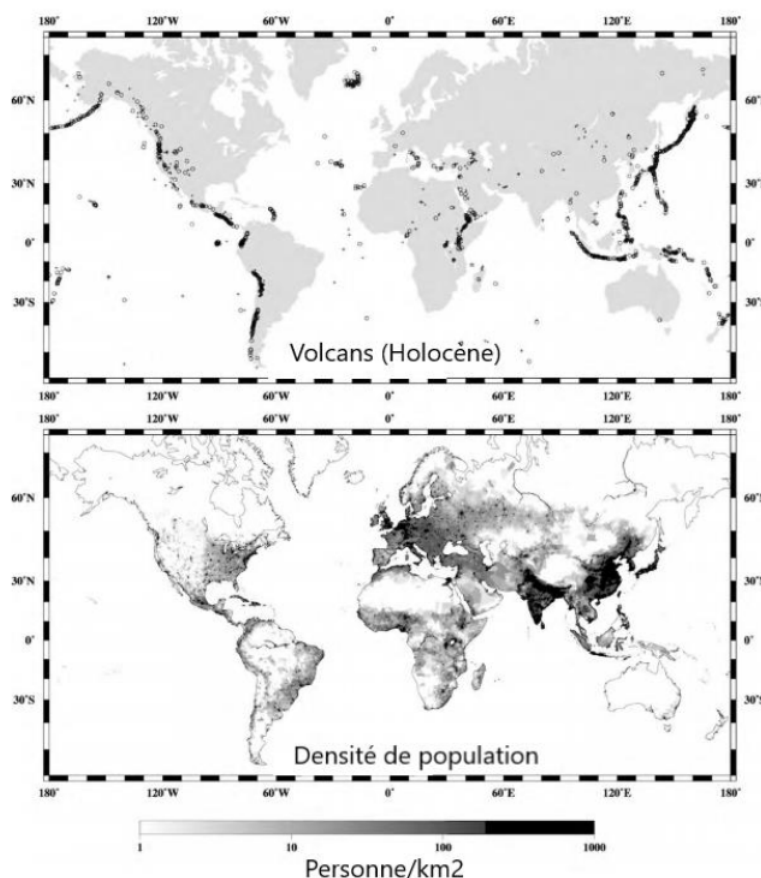


Figure 4 – Distribution des volcans de l'Holocène et de la population à travers le monde (échelle logarithmique ; Small and Naumann, 2001)

2.2.3 L'impact des retombées de téphra sur les systèmes agraires

2.2.3.1 *Les systèmes agraires et leur classification*

L'agriculture est un secteur d'activités multi-disciplinaire essentiel permettant la production de produits végétaux et animaux utiles à l'homme (Larousse, n.d.; Spedding, 1988). Cependant, ce domaine doit faire face aujourd'hui à des enjeux complexes, consistant à produire davantage avec moins de ressources. En effet, selon l'Organisation des Nations Unies, la population mondiale s'élèverait à 9,8 milliards d'individus d'ici 2050 (United Nation, 2017) alors que les ressources naturelles (eau, sols, forêts, combustibles fossiles, minéraux, ...) se raréfient. De plus, l'agriculture doit être capable de s'adapter aux changements rapides encourus par les systèmes environnementaux et humains (Stark et al., 2019).

L'agriculture, regroupant de multiples disciplines (les sciences sociales, la biologie, l'économie ou encore la politique), nécessite d'être considérée, non plus comme un ensemble d'entités uniques fonctionnant de manière isolées les unes des autres mais comme un système, c'est-à-dire un ensemble de composantes interagissant entre elles suivant certaines règles et principes (Spedding, 1988; Wikipédia, 2022). Cette approche systémique de l'agriculture est un élément clé de la compréhension des besoins, des défis

et des opportunités futures auxquelles devront faire face les communautés vivant dans ces systèmes mais également de la mise en place de stratégies d'actions permettant de relever les challenges tels que la pauvreté et la faim (Dixon et al., 2001; Spedding, 1988). Une des diverses définitions du système agraire est donnée par Dixon et al. (2001) qui le définissent comme "une matrice complexe et interdépendante du sol, de plantes, d'animaux, d'outils, d'énergie, de travail, de capital et d'autres intrants contrôlés en partie par les familles d'agriculteurs et influencés à divers degrés par des forces politiques, économiques, institutionnelles et sociales qui opèrent à de nombreux niveaux".

Il existe une grande variété de systèmes agraires. Par exemple, afin de comparer et d'intégrer les priorités individuelles dans leur stratégie de réduction de la pauvreté à travers le monde, l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO - Food and Agriculture Organization) a identifié 72 systèmes agraires regroupés en huit grandes catégories (Figure 5) (Dixon et al., 2001).

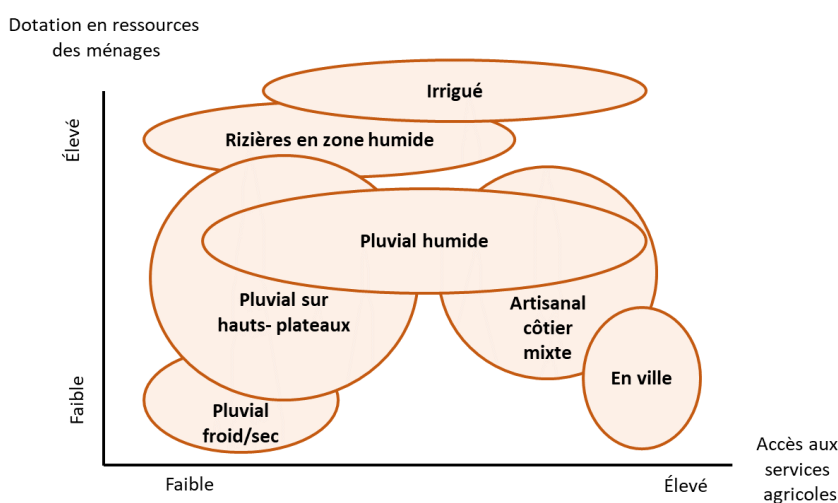


Figure 5 – Répartition des huit catégories de systèmes agraires suivant l'accès aux services agricoles et à la dotation en ressources des ménages (adaptation de Dixon et al., 2001)

2.2.3.2 *L'impact du téphra sur les cultures*

Le téphra peut impacter plus ou moins fortement les plantes de diverses façons, induisant alors des diminutions de rendements pouvant aller jusqu'à la perte totale de la culture dans les cas les plus sévères (Ayris & Delmelle, 2012). L'intensité des impacts est modulée par de nombreux facteurs tels que l'épaisseur des dépôts, la météorologie (vent, précipitations, humidité), le type de plante ainsi que de sa morphologie, son stade phénologique ou encore sa taille (Ayris & Delmelle, 2012; Hotes et al., 2004; Ligot et al., 2022; Zobel & Antos, 1997). Les dégâts sur les espèces végétales peuvent être classés en trois catégories; les impacts physiques directs, les impacts physiologiques et les impacts chimiques (Mack, 1981).

Les dommages physiques, liés à l'accumulation de téphra, provoquent l'étouffement voire l'enfouissement des plantes sous les dépôts et des défaillances structurales pouvant mener à l'abscission précoce des fruits, des feuilles et à la chute des branches (Cook et al., 1981) (Figure 6). Lorsque l'épaisseur du dépôt est supérieure à la hauteur des plantes (mousses, herbes, arbustes), celles-ci se retrouvent enfouies sous la couche de dépôt risquant alors d'y succomber (Dickson, 1965). Cependant, en cas de

conditions humides (humidification par les précipitations ou les rosées), les dépôts peuvent s'encroûter ou se cimenter et empêchent alors la réapparition de la végétation, et ce, même au travers une couche des plus fines. En ce qui concerne les plantes de plus grandes tailles, celles-ci sont moins sujettes à l'enfouissement mais risquent des ruptures de tiges et de branches dues au poids des particules accumulées (Ayrís & Delmelle, 2012; Harris et al., 1987). (Zobel & Antos, 1997). D'après une étude menée par S. Jenkins et al. (2015), les pertes sur les cultures sont totales lors de dépôts de téphra d'une épaisseur d'au moins 100 millimètres sur les cultures au sol et d'au moins 200 millimètres pour les cultures arbustives.



(a) Cultures de légumes à feuilles recouvertes de téphra lors de l'éruption du Taal aux Philippines, 2020 (Thomas, 2020)



(b) Épis de maïs pliés et cassés sous le poids du téphra à Tungurahua en Équateur, 2007 (USGS, 2015)

Figure 6 – Cultures affectées par les dépôts de téphra suite à une éruption volcanique

Ensuite, les dommages physiologiques se marquent par un ralentissement de la croissance végétative induit par une diminution de l'activité photosynthétique. D'une part, cette activité peut être affectée de manière directe par suite à des dégâts mécaniques tels que d'abscission foliaire qui réduit ainsi le nombre de feuilles effectuant la photosynthèse (Mack, 1981; Seymour et al., 1983). D'autre part, elle peut être altérée indirectement via une diminution du flux radiatif capté par les feuilles en raison de leur recouvrement partiel ou total ou via un affaiblissement des échanges gazeux par colmatage des stomates foliaires (Hinckley et al., 1984; Kennedy, 1980).

En outre, des chloroses, des nécroses, des dessèchements, des flétrissements ou encore des brûlures font parties des effets engendrés par des agents chimiques (sels) qui peuvent être présents à la surface du téphra (Figure 7). Ces effets impactent aussi négativement la photosynthèse des plantes. Les études faites par Cook et al. (1981), Le Guern et al. (1980), and Rosen and Eliason (2005) ont démontré que les sels halogénés et l'acide sulfurique présents dans certains types de téphra provoquent des brûlures chimiques sur les feuilles. Ces dommages induisent alors une réduction de la photosynthèse et donc un ralentissement de la croissance végétale. En outre, les acides peuvent également augmenter la vulnérabilité des plantes à la dessiccation et aux nécroses en attaquant la cuticule des feuilles (Percy & Baker, 1988; Shepherd & Wynne Griffiths, 2006).



Figure 7 – Dommages probables des aérosols acides sur les plants de piments rouges observés à Petung (Indonésie), où les dépôts de 20 mm de tephra ont causé la perte de toute la production du district (T. Wilson et al., 2007)

L'acide sulfurique généré par l'oxydation de composés soufrés parfois associés au téphra induit aussi la perte de nutriments clés pour la plante (K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+}) par échanges ioniques s'effectuant entre les lixiviats de téphra et les feuilles (Adams & Hutchinson, 1987). Néanmoins, la surface des fruits ainsi que les feuilles des arbres feuillus semblent plus affaiblies que les épines des conifères par l'effet des sels et de l'acide, indiquant donc une sensibilité variable selon l'espèce (Haines et al., 1985). Des effets positifs des dépôts de téphra ont été aussi répertoriés, notamment pour des épaisseurs inférieures à 1 mm, favorisant l'absorption de nutriments par la plante à partir des lixiviats de téphra (Scherbatskoy & Tyree, 1990).

Le temps de résidence du téphra sur la végétation est un facteur important à considérer puisqu'il est susceptible d'amplifier les dommages. Ce temps dépend de diverses variables physiques souvent spécifiques à l'espèce et aux conditions climatiques. Par exemple, bien que l'érosion par le vent et celle par l'eau soient les deux processus les plus importants dans le retrait du téphra déposé sur les surfaces végétales, la rugosité de la surface des feuilles et des fruits atténue ces effets érosifs, augmentant alors la rétention du téphra (Cook et al., 1981; Ligot et al., 2022).

L'impact du téphra sur la végétation peut aussi être lié à ses interactions avec le sol. En effet, les dépôts de téphra sur les sols altèrent les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols et affectent alors le système sol-plante (Ayrès & Delmelle, 2012; Black & Mack, 1986). La modification de l'albédo des sols couverts de téphra influence la température des sols et donc potentiellement l'activité microbienne qui s'y opère. Par exemple, sur un sol recouvert d'une dizaine de millimètres de téphra, Black and Mack (1986) ont mesuré une température inférieure de 10 °C par rapport à un sol non recouvert de téphra. La diminution de la température a des conséquences négatives sur l'activité microbienne du sol et donc sur le taux de décomposition de la matière organique (Ayrès & Delmelle, 2012). De plus, la couche de téphra perturbe aussi les échanges d'eau et de gaz à l'interface sol/atmosphère. Trois facteurs en sont à l'origine : l'épaisseur, la porosité et la distribution de la

taille des pores du dépôt de téphra (Ayriss & Delmelle, 2012). D'une part, l'infiltration peut être augmentée lorsqu'une couche de téphra très grossier recouvre un sol composé de particules fines ou très fines (Tejedor et al., 2003). D'autre part, le téphra plus fin peut entraîner une diminution du taux d'infiltration de l'eau par blocage de la porosité du sol, augmentant alors le ruissellement de surface et l'érosion des sols. Ce phénomène peut aussi être dû à l'encroûtement et la cimentation de dépôt de téphra à la surface du sol (Cook et al., 1981). Une diminution des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, perturbant l'évaporation et l'aération des sols, est aussi observée lorsqu'un dépôt de téphra recouvre le sol (Ayriss & Delmelle, 2012).

2.2.3.3 *L'impact du téphra sur le bétail*

Les retombées de téphra peuvent également avoir un impact négatif sur le bétail, qu'il soit gardé dans des bâtiments ou laissé en pâture.

Une fois que du téphra est présent sur les sols, les animaux risquent d'en ingérer en plus ou moins grande quantité. Les quantités de téphra ingérées dépendent de l'épaisseur du dépôt mais également du type de gestion des animaux. S. Jenkins et al. (2015) rapportent qu'une faible épaisseur de téphra (entre 1 et 10 mm), n'entraînerait qu'une faible ingestion de particules, peu susceptible de causer des problèmes importants. Cependant, une fois les 10 mm d'épaisseur atteints, les effets négatifs sur le bétail sont plus marqués car ils peuvent provoquer un blocage intestinal, menant parfois à la mort de l'animal par refus de se nourrir (Loughlin et al., 2015; Neild et al., 1998). Les animaux broutant risquent aussi de souffrir d'abrasion dentaire prononcée induisant des difficultés à se nourrir. L'exposition aux téphra peut mener à la mort de l'animal car il ne peut plus s'alimenter correctement (Thompson et al., 2017). Cependant, ces effets peuvent être atténués en augmentant l'apport de nourriture non contaminée. D'autres réactions néfastes telles qu'une irritation des yeux et de la peau, une perte de poids et une augmentation du stress sont aussi observées chez les animaux exposés aux chutes de téphra. Néanmoins, ces dernières sont moins susceptibles de mener à la mort des animaux (Neild et al., 1998; Thompson et al., 2017; T. Wilson et al., 2011).

Lorsque les particules de téphra contiennent de fortes concentrations en fluorures, des cas de fluorose sont reportés, provoquant des lésions dentaires, en calcification des tendons ou encore des anomalies squelettiques (Craig, 2015; Loughlin et al., 2015; Suttle, 2010). Bien que ces cas soient assez rares (Thompson et al., 2017), les problèmes de fluorose peuvent persister en raison de la libération des fluorures pendant des périodes assez longues (Craig, 2015).

Le téphra peut contaminer également les ressources en eau et limite l'accès à l'eau potable. L'eau devenant alors peu appétissante, les animaux refusent de s'altérer, entraînant différents niveaux de déshydratation (Craig, 2015; Loughlin et al., 2015; T. Wilson et al., 2011). De plus, la pression sur la demande en eau de l'agriculture est d'autant plus forte après les retombées de téphra en raison de l'effet hygroscopique⁶ du téphra (T. Wilson, 2009).

Pour des dépôts de téphra de plus de 100 mm d'épaisseur, les effets sur le bétail sont les plus dévastateurs. Dans ce cas, il est impératif d'amener de la nourriture et de l'eau non contaminées ou,

6. Capacité d'un composé à absorber ou adsorber l'humidité présente dans l'air (Hunt, 2006).

éventuellement, de faire évacuer le bétail (Neild et al., 1998; Thompson et al., 2017; T. Wilson & Cole, 2007).

Il est clair que les animaux gardés dans des bâtiments ou nourris à l'aide de fourrage stocké seront moins susceptibles d'être affectés par les effets cités ci-dessus. Cependant, les dépôts de téphra peuvent affecter les infrastructures destinées aux animaux ou au stockage de leur nourriture. En effet, si le poids du téphra accumulé dépasse la charge maximale pouvant être portée par le bâtiment, celui-ci s'écroulera, provoquant ainsi des pertes de nourriture ou des dommages, ou encore la mort des animaux qui y sont gardés (Lirer & Vitelli, 1998; Loughlin et al., 2015).

2.3 Les concepts de risque, de vulnérabilité et résilience

2.3.1 L'évaluation du risque

L'évaluation quantitative du risque d'un impact, décrite par l'équation (1), est fonction de l'aléa, de l'exposition et de la vulnérabilité face au danger (De La Cruz-Reyna, 1996; Lirer & Vitelli, 1998; UNESCO, 2010).

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Exposition} \times \text{Vulnérabilité} \quad (1)$$

où l'aléa est défini comme la probabilité d'occurrence d'un événement dans une zone spécifique durant une période donnée (Totaro et al., 2020), l'exposition réfère aux nombre de vies humaines, à la capacité de production, à la valeur du capital ou tous autres éléments susceptibles de connaître des dommages ou des pertes (Biass et al., 2012; Totaro et al., 2020) et la vulnérabilité est le degré de perte de ces éléments (Varnes, 1984).

Cette évaluation vise à prédire et quantifier les conséquences d'un événement à long terme grâce à l'apport d'informations comparables, pratiques et vérifiables (Craig, 2015; G. Wilson et al., 2014). Ce risque peut aussi être représenté sur des cartes de risque thématiques facilitant alors l'élaboration de politiques de réduction des risques, une meilleure gestion de l'aménagement du territoire et la prise de décisions adaptées en cas d'urgence (Lirer & Vitelli, 1998; Torrieri et al., 2002). La Figure 8 représente la classification des zones bâties autour du Vésuve (Italie) suivant différentes classes de risque.

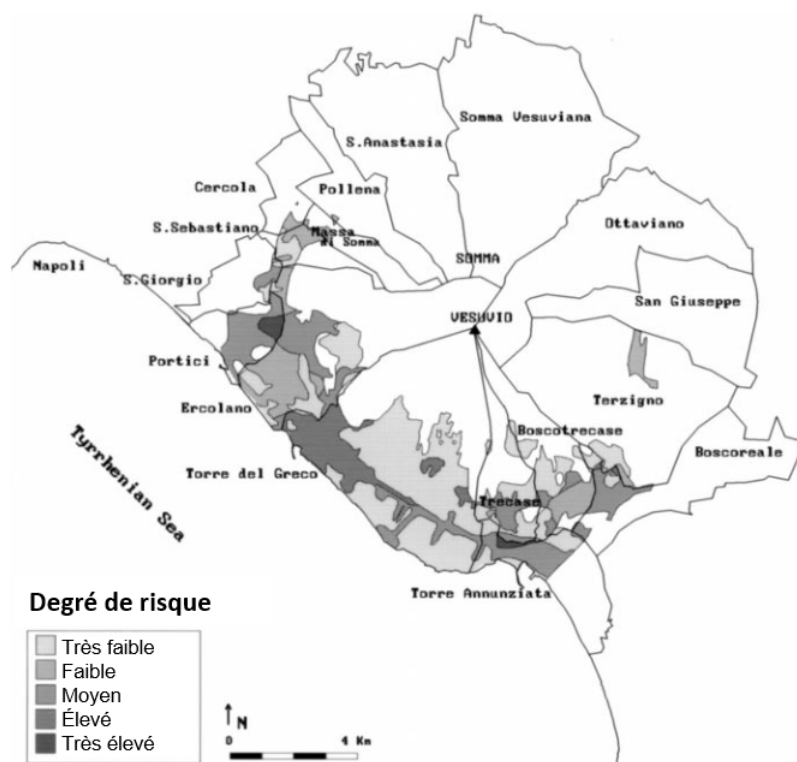


Figure 8 – Carte des classes de risque des zones bâties dans la région du Vésuve (Italie) (adaptation de Lirer and Vitelli (1998))

2.3.2 L'évaluation de la vulnérabilité

La vulnérabilité est un concept clé dans l'évaluation du risque d'un événement et permet de distinguer les catastrophes dites "naturelles" des phénomènes physiques isolés. En effet, la probabilité d'occurrence des phénomènes physiques extrêmes est relativement constante mais la vulnérabilité des populations face à ces phénomènes augmente, résultant alors en un plus grand nombre de catastrophes (Biass et al., 2012; O'Keefe et al., 1976; Stieltjes, 1996).

Le concept de vulnérabilité a été défini de nombreuses manières. La définition de l'UN/ISDR (2004)⁷ indique qu'il s'agit "des conditions déterminées par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui augmentent la susceptibilité d'une communauté à l'impact des dangers". La vulnérabilité est également qualifiée de processus dynamique puisqu'elle varie dans l'espace et dans le temps et à travers divers groupes sociaux (Cutter et al., 2003).

L'estimation de la vulnérabilité est un exercice complexe mais est indispensable à l'évaluation du risque, ceci afin d'élaborer des stratégies adéquates en vue de réduire le risque face à un phénomène menaçant (Biass et al., 2012). Cette évaluation peut être approchée de façon qualitative, quantitative ou semi-quantitative.

L'approche qualitative évalue la fragilité des sociétés face à un événement sur base de l'analyse de facteurs socio-économiques, psychologiques, institutionnels, politiques, démographiques ou encore techniques et fonctionnels (Biass et al., 2012; Lavigne, 1999; Stieltjes, 1996).

7. United Nations / International Strategy for Disaster Reduction.

L'approche quantitative, plus reproductible et détaillée que l'approche qualitative, mesure les dommages potentiels suivant une évaluation des coûts directs et indirects des éléments exposés à un événement dangereux (Biass et al., 2012; Jean-Claude & D'Ercole, 1996; Lavigne, 1999).

Enfin, l'approche semi-quantitative tient compte de l'analyse des facteurs de fragilité ainsi que des dommages potentiels (Lavigne, 1999).

L'évaluation de la vulnérabilité des systèmes agraires face aux retombées de téphra est une tâche ambitieuse. Premièrement, elle requiert la compréhension des caractéristiques agricoles qui déterminent la vulnérabilité des exploitations agricoles. Les caractéristiques de vulnérabilité à l'échelle de la ferme sont la taille et le type de ferme, l'accès aux ressources en eau et en nourriture, l'accès à l'irrigation et aux machines, la saisonnalité, les caractéristiques du sol et son pouvoir tampon, les types de cultures, leur morphologie et leur gestion, les types d'animaux et leur gestion, l'accès à un abri, le nombre de travailleurs et leur expérience (Craig et al., 2016; Craig et al., 2021; Wild et al., 2019). Deuxièmement, les caractéristiques de vulnérabilité au niveau de la région telles que le climat, la valeur des cultures, la situation politique et économique, les organisations communautaires et le soutien aux zones rurales interviennent également dans l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes agraires (Craig et al., 2016). De plus, les conditions environnementales affectent les conditions préexistantes des animaux et des cultures mais également la taille et l'intensité des exploitations agricoles (Craig et al., 2016). Finalement, les impacts des dépôts de téphra et leurs mécanismes d'action sur les systèmes sont complexes à modéliser puisqu'ils peuvent être de nature physique et chimique (Craig et al., 2021).

2.3.3 Les fonctions de fragilité

Les fonctions de fragilité sont les outils les plus puissants pour représenter quantitativement la vulnérabilité. En effet, celles-ci permettent, non plus de montrer des seuils discrets attribués à un état d'impacts mais de visualiser une relation continue entre l'intensité de l'aléa et son impact (Craig et al., 2021; T. Wilson et al., 2007). Cependant, une compréhension quantitative des impacts pouvant être générés sur un élément lorsqu'il est exposé à un danger d'une intensité spécifique, est essentielle afin de construire cette fonction (Craig et al., 2021).

Dans le domaine de l'agriculture et de la foresterie, les fonctions de fragilité permettent de fournir la probabilité qu'un certain niveau d'impact soit atteint ou dépassé (Singhal & Kiremidjian, 1996; Tarbotton et al., 2015). Une étude menée par Craig et al. (2021) a permis de développer différentes fonctions de fragilité, évaluant la probabilité qu'une exploitation (pastorale, horticole ou forestière) atteigne ou dépasse un état d'impact pour une épaisseur de téphra donnée. La Figure 9 représente les fonctions de fragilité de six types de cultures horticoles : légumes à feuilles et légumes-racines (Figure 9a), fruits non-arboricoles et arboricoles (Figure 9b), céréales et viticulture (Figure 9c). Quatre niveaux d'état d'impact IS1, IS2, IS3 et IS4 ont été déterminés, désignant respectivement des perturbations faibles (productivité plus faible mais une récolte récupérable), moyenne (une perte de production allant jusqu'à 30%), forte (perte de production d'environ 60%) et une perte totale des capacités (perte de production de plus de 90% et nécessitant plus d'une saison pour récupérer).

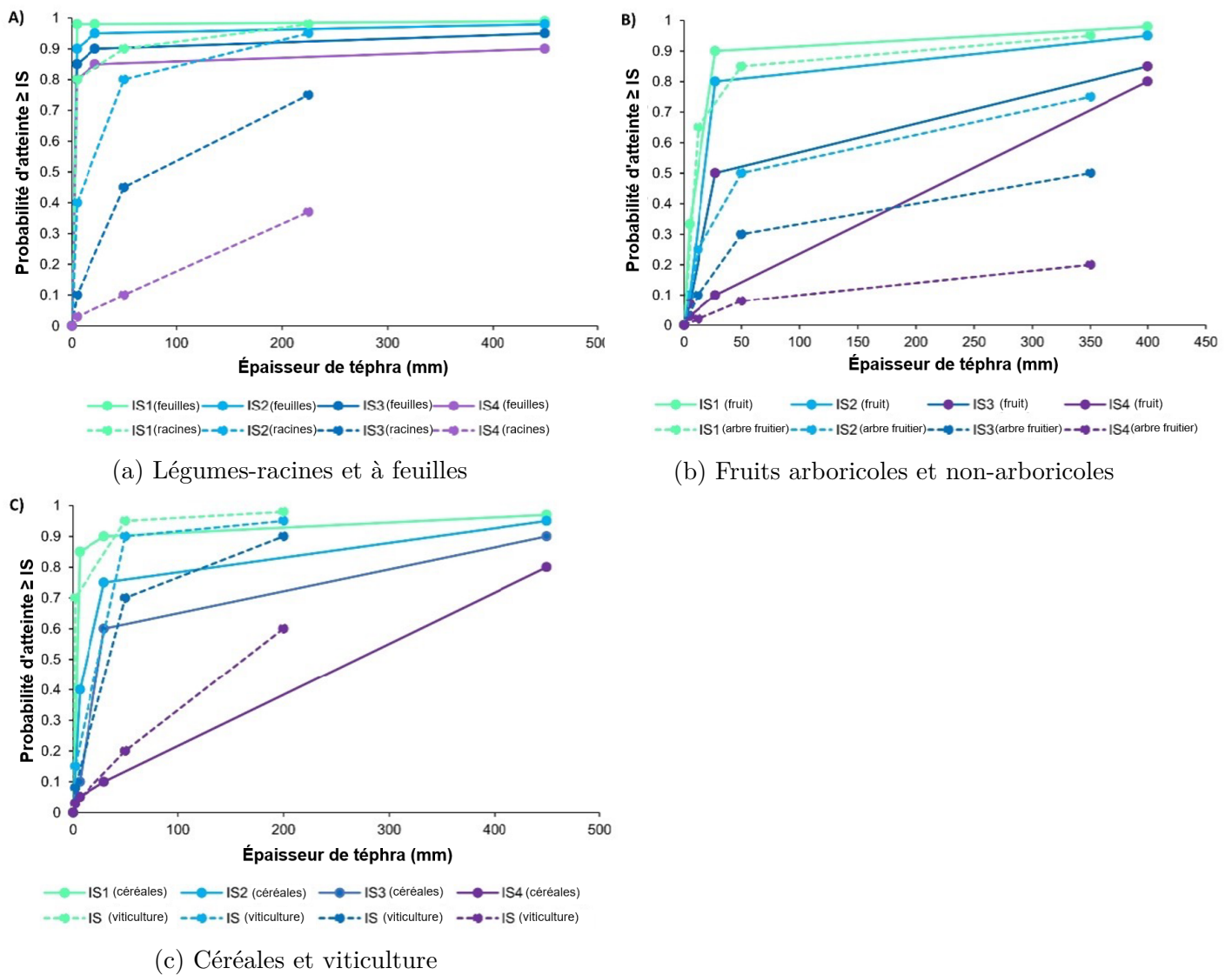


Figure 9 – Courbes de fragilités de cultures horticoles suivant quatre niveaux d'état d'impact; IS1, IS2, IS3, IS4 (adaptation de Craig et al. (2021))

La figure 9a montre que la probabilité d'atteindre ou de dépasser l'état d'impact de niveau 4 est de plus de 80% lors d'un dépôt de téphra d'environ 2 mm pour les légumes à feuilles alors qu'il est très peu probable que les légumes-racines atteignent cet état même sous les épaisseurs de téphra plus élevées. Les cultures de légumes à feuilles sont donc plus vulnérables que celles des légumes-racines, probablement parce que la surface comestible exposée au téphra est plus élevée dans le cas d'un légume à feuilles (Craig et al., 2021).

D'autres constats peuvent également être faits tels que l'observation d'une vulnérabilité plus faible des cultures de fruits arboricoles comparés aux autres cultures horticoles grâce à leur morphologie limitant la déposition et l'enfouissement par le téphra, une vulnérabilité plus élevée des céréales par rapport aux cultures de fruits et de légumes-racines en raison du téphra plus difficile à retirer une fois accumulé dans les structures auriculées⁸ et entre les fleurons⁹, une vulnérabilité différente suivant

8. Expansion de certaines plantes, située à la base des pétales, des feuilles ou des étamines, ayant la forme d'oreille (CNRTL, 2012).

9. Fleurs de petites tailles telles que celles à l'origine des inflorescences dans la famille des Asteracées (Composées)

le stade de développement, etc. Le stade de floraison est particulièrement vulnérable à cause des brûlures acides, des abrasions ou encore des blessures sur les bourgeons en fleurs en diminuant la pollinisation ou en empêchant les fruits de se développer (Ayris & Delmelle, 2012; Craig et al., 2021). Cependant, tous ces résultats sont le fruit d'une nouvelle approche dans le domaine de développement des fonctions de fragilité par suite aux dépositions de téphra et ne doivent pas être pris comme une représentation rigoureuse de la réalité.

2.3.4 La résilience d'un système

Le notion de résilience varie selon le domaine d'application mais de nombreuses définitions intègrent la résilience d'un système comme sa capacité à retrouver son état d'équilibre et son niveau de performance après une perturbation en réduisant l'ampleur et la durée de la déviation par rapport à son état d'équilibre de la manière la plus efficace possible (Devanandham & Ramirez-Marquez, 2012; Proag, 2014). Cette définition est illustrée par la Figure 10, représentant la reprise lente ou rapide de l'état d'équilibre et de performance d'un système (Proag, 2014).

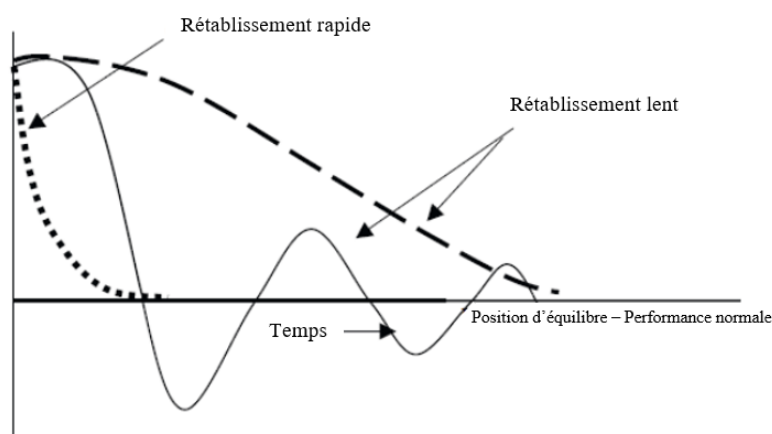


Figure 10 – Illustration de la définition du concept de résilience sur base d'un rétablissement lent et rapide des performances et de l'état d'équilibre d'un système (adaptation de Proag (2014))

3 Objectif du travail

L'objectif général de notre étude est d'évaluer de manière semi-quantitative la vulnérabilité des exploitations agricoles face à l'aléa volcanique, en particulier les chutes de téphra. Pour ce faire, l'exploitation est considérée comme un système régit par des interactions entre ses composants. Nous souhaitons démontrer la faisabilité et la pertinence de l'approche dans le cadre de l'évaluation des risques volcaniques pour l'agriculture. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- (i) décrire la structure et le fonctionnement d'exploitations agricoles dans une région potentiellement soumise aux retombées de téphra ;
- (ii) estimer semi-quantitativement la vulnérabilité des exploitations en considérant des scénarios différents d'exposition au téphra ;
- (iii) utiliser les résultats de (i) et (ii) pour comparer la vulnérabilité des exploitations agricoles et les facteurs principaux qui la contrôle.

La région choisie pour mener notre travail est située à proximité du volcan Taal, sur l'île de Luçon, aux Philippines. Les résultats pourront servir à enrichir l'analyse des risques, dont fait partie intégrante l'évaluation de la vulnérabilité, afin in fine de mettre en place des stratégies visant à réduire le risque de catastrophe dans les régions volcaniques où l'agriculture peut être impactée par les chutes de téphra.

4 Matériels et méthodes

Dans de ce travail, une analyse qualitative et semi-quantitative de la vulnérabilité des systèmes agraires face aux retombées de téphra a été faite. L’approche qualitative utilise l’analyse des réseaux écologiques ainsi que l’analyse visuelle des réseaux alors que la semi-quantitative se base sur des études réalisées notamment par S. Jenkins et al. (2015) et Wilson et al. (2007). Ces deux formes d’analyse ont pu être réalisées dans le cadre d’un cas d’étude particulier, sur base d’informations recueillies lors d’une enquête de terrain aux Philippines. Bien que la méthodologie employée vise à pouvoir s’appliquer à tous les systèmes agraires, il était indispensable d’illustrer son utilité au moyen d’un cas concret.

4.1 Analyse qualitative

4.1.1 Analyse des réseaux écologiques

La méthodologie utilisée dans le cadre de ce travail se base sur une étude menée par Stark et al. (2019). Cette étude vise, d’une part, la caractérisation de l’intégration agriculture - élevage au sein des systèmes agraires, c’est-à-dire un ensemble de pratiques agricoles favorisant les interactions synergiques dans le temps et l’espace entre les espèces animales et végétales via des transferts de ressources de l’un à l’autre (Martin et al., 2016). Elle cherche, d’autre part, à évaluer les performances agroécologiques de ceux-ci sur base d’indicateurs prédéfinis tels que le recyclage de l’azote, la productivité, l’efficacité, la résilience ou encore la dépendance. L’efficacité d’un système agricole est sa capacité à maximiser ses productions avec le minimum de moyens (Smith et al., 2015), alors que sa résilience se définit par sa capacité à retrouver son état d’équilibre et son niveau de performance après une perturbation (Devanandham & Ramirez-Marquez, 2012). Enfin, la dépendance d’un système agricole est son besoin en intrants extérieurs au système sans lesquels il ne peut fonctionner (Stark et al., 2019).

Cette étude fait appel à l’analyse des réseaux écologiques (Ecological Network Analysis, ou ENA), une approche quantitative de modélisation et d’analyse dont le but est la caractérisation et la comparaison de l’organisation, du fonctionnement et de l’évolution des écosystèmes (Proulx et al., 2005). Elle permet donc de représenter quantitativement les composantes d’un système et les interactions de ces composantes entre elles et avec leur environnement. Cette analyse requiert une étape qualitative préliminaire, à savoir, la création d’un modèle conceptuel du système étudié.

Cette étape préliminaire de l’ENA est la porte d’entrée de ce travail. La première étape de la méthodologie de ce rapport consiste donc à conceptualiser un système agricole fictif complet. Pour ce faire, l’identification des composantes pouvant être présentes dans un système agricole, des interactions possibles entre chacune d’elles au sein du système, mais également entre le système et son environnement ont dû être identifiées, et ce essentiellement sur base des études de Rufino et al. (2009) et Stark et al. (2019). Le système agricole ainsi modélisé à l’aide du logiciel *PowerPoint* est représenté à la Figure 11. Il comporte quatre sous-systèmes : les cultures, l’élevage, le stockage et les ressources informelles. Puisqu’il est impossible de représenter au sein d’un système agricole toutes les cultures, celles-ci ont été agrégées en quatre catégories : les cultures à cycle court,

annuelles, pérennes et fourragères. Pour les mêmes raisons, les animaux du sous-système d'élevage ont également été divisés en deux classes, à savoir les animaux ne pâturent pas et ceux pouvant être laissés en pâture. Le sous-système de stockage comporte le stockage des déjections animales¹⁰ et le stockage des éléments végétaux tels que le fourrage ou les résidus de culture. Enfin, les ressources informelles représentent les surfaces ne faisant pas toujours partie de l'exploitation mais sur lesquelles les animaux sont autorisés à pâture. Par facilité, dans le cadre de ce travail, il est considéré que ces terres font partie du système agricole. De plus, par souci de clarté, le schéma représente les productions consommées par le ménage, symbolisées par une flèche rouge discontinue, comme des éléments sortant du système alors que celles-ci devraient bien rester en son sein.

10. Le terme "lisier" utilisé dans le modèle fait référence uniquement aux excréments et à l'urine des animaux tandis que le "fumier" comprend le lisier ainsi que la litière des animaux.

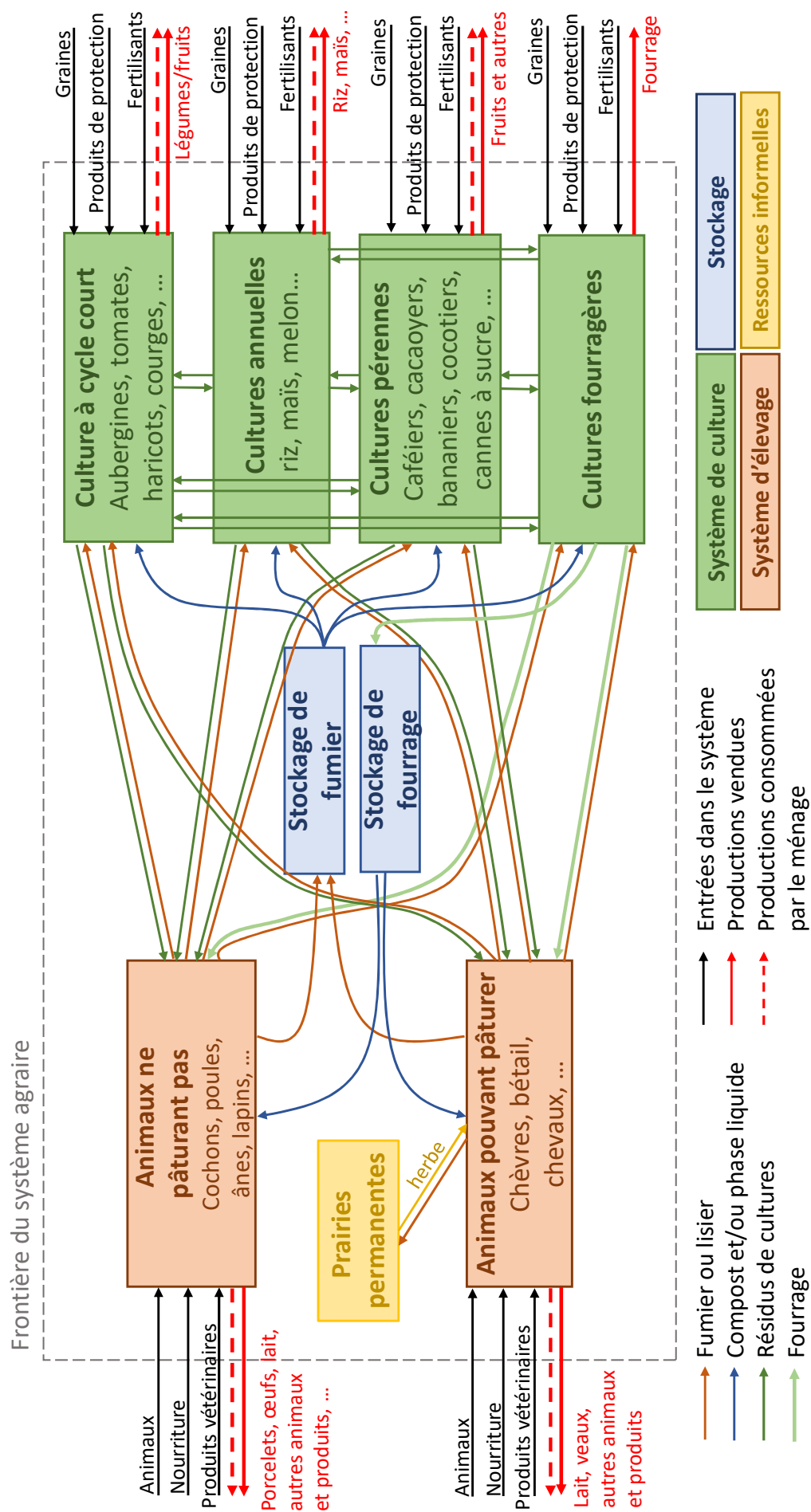


Figure 11 – Système agricole fictif représentant toutes les composantes et les liens envisageables en son sein ainsi qu'entre le système et son environnement

4.1.2 Analyse visuelle des réseaux - Gephi

Une étape ultérieure de la méthodologie est de représenter visuellement l'impact des cendres sur le système agraire. Le modèle créé sur *PowerPoint* est indispensable pour de nombreuses analyses (section 4.1.1) mais ne permet pas la mise en évidence claire des impacts des retombées de téphra. C'est pourquoi une seconde analyse qualitative a été réalisée avec le logiciel de visualisation de réseau *Gephi* (version 0.9) (<https://gephi.org/>). Ce logiciel, gratuit et open-source, permet de visualiser, de manipuler et d'explorer des réseaux, et ce dans un grand nombre de disciplines (Bastian et al., 2009) (Figure 12). Les composantes du réseau sont alors représentées par des cercles, appelés "nœuds" et les interactions entre ceux-ci sont représentées par des flèches, appelées "liens". La taille, la couleur, la forme ou encore la labellisation de chaque élément du système peuvent être modifiées de façon manuelle ou automatique. En effet, Gephi permet de modifier la taille ou l'intensité de la couleur d'un nœud donné proportionnellement au nombre de liens qu'il établit avec les autres nœuds du système. De plus, différents algorithmes permettent de moduler l'agencement des liens et des nœuds au sein du réseau. Par exemple, l'algorithme *Force Atlas 2*, utilisé dans ce travail, donne une disposition dictée par les forces d'attraction et de répulsion, c'est-à-dire que les nœuds ont tendance à se repousser alors que les liens attirent les nœuds vers ceux auxquels ils sont reliés. L'algorithme tourne jusqu'à trouver une convergence vers un état d'équilibre soit une configuration spatialisée facilitant l'interprétation des données (Jacomy et al., 2014).

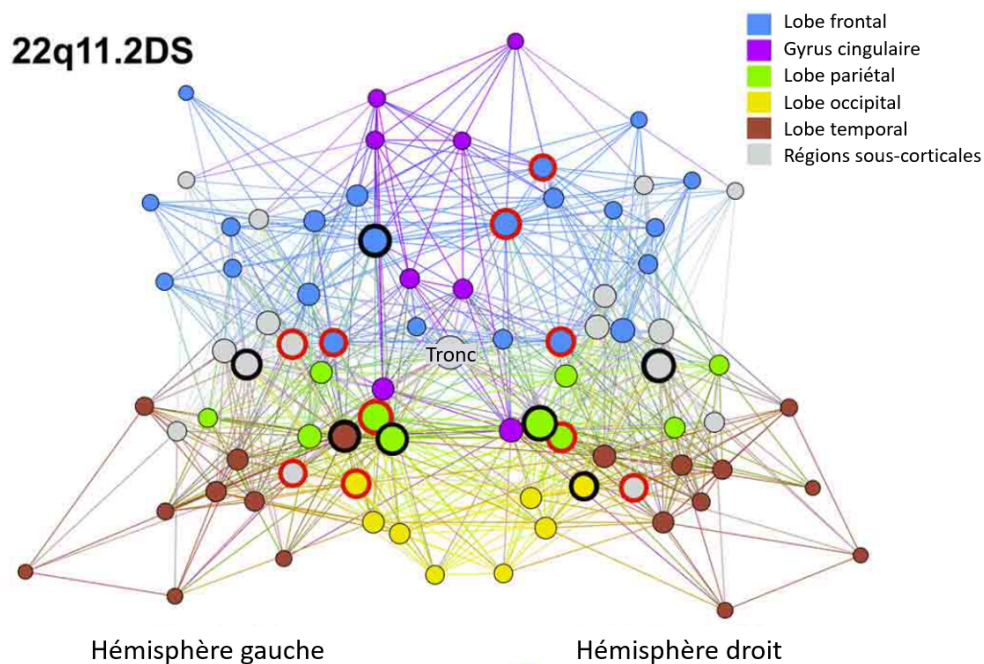


Figure 12 – Exemple d'application du logiciel Gephi dans le domaine médical. Représentation du cerveau moyen d'un groupe homogène d'individus atteints du syndrome de la délétion 22q11.2 (sous-type génétique de la schizophrénie), (adaptation de Ottet et al. (2013))

4.2 Analyse quantitative

Afin d'analyser quantitativement (ou semi-quantitativement) la vulnérabilité d'un système agraire, chacun de ses éléments doit être quantifié. Il s'agit donc d'attribuer une valeur chiffrée définissant

chaque composante telle que la superficie des cultures, le nombre de plants ou d'arbres, le nombre d'animaux, la superficie des bâtiments dans lesquels ceux-ci sont gardés, la superficie de leur terre de pâture, ... Ensuite, les interactions entre les différentes composantes sont quantifiées en termes des flux de matière, autrement dit, la quantité de matière entrant dans chaque composante du système, ainsi que celle en sortant. Bien que les différentes entités du système puissent toutes être quantifiées selon des unités qui leur sont propres, il est important que tous les flux représentés dans le modèle soient exprimés en termes d'une unité unique afin de pouvoir comparer les interactions les unes avec les autres. C'est pourquoi il a été décidé de ramener toutes les données à une unité unique, à savoir, la valeur économique.

4.3 Recherche d'informations

4.3.1 Description générale

La caractérisation des systèmes agraires et l'évaluation de leur vulnérabilité face aux retombées de cendres volcaniques requièrent la récolte de valeurs chiffrées. Il a été décidé d'obtenir ces informations sur base d'une enquête de terrain en région volcanique par le biais d'interviews auprès de divers agriculteurs. En raison des contraintes physiques (enquête à l'étranger, accessibilité des exploitations), économiques (coût de déplacement, rémunérations des intervenants), temporelles (disponibilité des intervenants, temps imparti pour la réalisation du travail) ou encore linguistiques, les interviews ont dû être préparées de manières rigoureuses, claires et précises.

Avant l'enquête de terrain, un questionnaire-type a dû être élaboré. Celui-ci a été établi sur base du modèle conceptuel créé préalablement (section 4.1) et de l'ouvrage de Barral et al. (2012). Le questionnaire a pour objectif de décrire l'environnement de l'exploitation ainsi que son organisation et son fonctionnement économique mais également d'identifier et de quantifier ses composantes et ses interactions. Pour ce faire, chaque élément du modèle conceptuel a été retranscrit sous forme de question en tenant compte du fait que les réponses obtenues doivent pouvoir être transposées ensuite dans une unité commune permettant la comparaison des valeurs.

Le questionnaire établit dans le cadre de ce travail (Annexe A, Tables 14 à 20), rédigé en anglais, comporte sept formulaires se concentrant sur des catégories précises :

- Contact du propriétaire, généralités et environnement de l'exploitation,
- Système d'élevage,
- Système de culture,
- Économie,
- Main d'oeuvre,
- Inquiétudes et craintes,
- Retombées de téphra.

Le volet sur les retombées de téphra a été rajouté pour des exploitations ayant déjà fait face à cette situation et apporte une indication qualitative supplémentaire sur les composantes les plus vulnérables de la ferme ou celles, à l'inverse, augmentant la résilience du système. Au sein de chaque volet,

différentes sous-catégories ont été distinguées et la mise en page a été pensée de façon à pouvoir être imprimée sur des feuilles A4. Cependant, dans le cadre de l'enquête réalisée par ce travail, le questionnaire a dû être traduit dans la langue locale et la mise en page initialement prévue a dû être adaptée à la réalité du terrain.

4.3.2 Région du Taal, Philippines

L'étude est ciblée sur la région du volcan Taal, située dans la province de Batangas aux Philippines. Elle s'inscrit dans le cadre d'un projet financé par la coopération belge au développement (Synergy ARES) impliquant l'UCLouvain, l'University of the Philippines at Los Banos et l'antenne locale de Solidagro, une ONG belge œuvrant aux Philippines. Le Taal est d'un volcan les plus actifs de la planète. Au cours des 600 dernières années (1572 ap. J.-C. à 1977 ap. J.-C.), 33 éruptions explosives du Taal ont été rapportées, dont au moins quatre avec des VEI compris entre 3 et 5 (Delos Reyes et al., 2018). L'édifice consiste en une grande caldera (25 x 30 km) qui renferme un lac et au centre duquel se trouve le centre éruptif qui a donné lieu aux éruptions historiques (13 ; (Ramos, 2002)). L'activité volcanique est caractérisée par des éruptions phréatomagmatiques, c'est-à-dire des éruptions durant lesquelles du magma rentre en contact avec l'eau pour donner lieu à des explosions particulièrement violentes. En général, l'interaction entre le magma et l'eau augmente la fragmentation du magma, favorisant ainsi la production de téphra avec une granulométrie plus enrichie en particules fines comparée aux produits issus des éruptions purement magmatique. De plus, les panaches éruptifs associés aux éruptions du Taal sont non seulement chargés en téphra, mais également en eau. Les chutes de téphra qui en résultent sont généralement à l'origine de dépôts humides et n^o lourds z (denses).

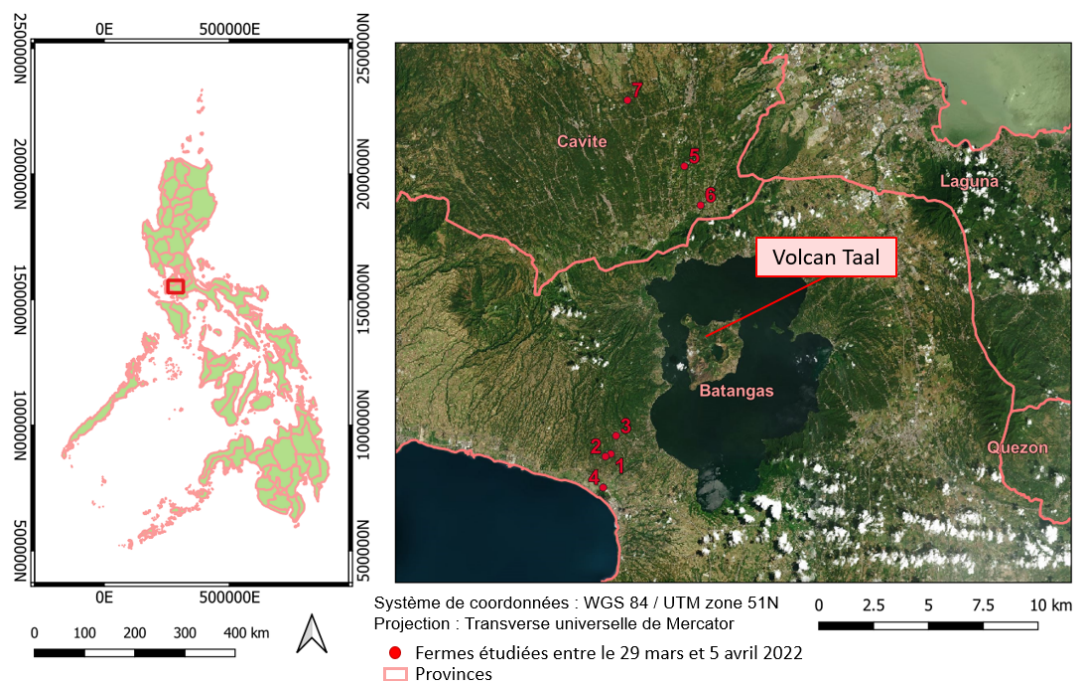


Figure 13 – Localisation des sept enquêtes réalisées dans la région du volcan Taal, Philippines

Près de trois millions de personnes vivent dans la province de Batangas, c'est-à-dire dans un rayon

de moins de 35 km du Taal, incluant les habitants de la caldera et de l'île Taal (Authority, 2021; Delos Reyes et al., 2018). Le Taal se situe également à un peu plus de 60 km de la capitale des Philippines, Manille, présentant une population de près de 14 millions d'habitants en 2020 (Authority, 2021). De nombreuses autres villes de plus de 100 000 habitants, en dehors de la province de Batangas, sont localisées dans un rayon de moins de 30 km du volcan (Authority, 2021). En raison de sa proximité avec une haute densité de population, le Taal est l'un des volcans les plus dangereux au monde (Discovery, 2022).

L'éruption du Taal le 12 janvier 2020, dont le VEI est estimée à 3 ou 4 selon la méthodologie utilisée, a généré une colonne éruptive de 17 à 21 km de haut. Celle-ci a provoqué des retombées de tephra sur une surface de 8605 km² jusqu'à septante kilomètres au nord/nord-est du point d'émission (Delos Reyes et al., 2018). Une carte des dépôts, réalisée grâce à du crowdsourcing¹¹, des enquêtes sur le terrain, et des analyses en laboratoire, a déjà été présentée dans l'état de l'art (Section 2.1.2.2, Figure 3).

Dans les régions touchées, les retombées de tephra ont provoqué différents dommages tels qu'un appauvrissement de la qualité de l'air, des difficultés de trafic, des effondrements de toits ou encore des destructions de cultures. Les pertes économiques sont également sévères, et ce, particulièrement dans le secteur de l'agriculture et de la pêche (Laforga & Galang, 2020). Le Département de l'Agriculture philippin rapporte que les dommages dans le secteur de l'agriculture s'élèvent à 3,06 milliards de pesos philippins dont plus de la moitié sont dûs aux dégâts dans l'industrie de la pêche. Près de 16 000 hectares de cultures ont été affectés par l'éruption et 1 923 animaux ont été déclarés morts cinq jours après l'éruption (Communications, 2020).

4.4 Traitement de données

Les données récoltées sur le terrain ont été traitées de manière à pouvoir être comparées. Là où les données récoltées englobent une période supérieure à un an, celles-ci ont été révisées afin d'adhérer à la période standard d'un an. Les deux unités utilisées sont : la productivité par an en termes de matière produite (kg/an) et la productivité par an en termes de revenu (pesos/an). Puisque les données récoltées lors de la première enquête sur le terrain étaient incomplètes et rendaient impossible le calcul des productivités, deux enquêtes supplémentaires ont dû être entreprises. Celles-ci se sont basées sur de nouveaux questionnaires comportant des questions précises propres à chaque exploitation et aux données manquantes relatives à ces exploitations. D'autres valeurs permettant de décrire la gestion des exploitations ont aussi été recalculées pour la période d'un an telles que le nombre d'heures de travail prestées par des travailleurs quotidiens et saisonniers.

4.4.1 Analyse qualitative

Sur base de ces données, différents outils indispensables à la compréhension de la vulnérabilité des différentes exploitations ont été réalisés. Premièrement, chaque exploitation a été représentée sous la forme d'un modèle conceptuel dérivé de la Figure 11. Celui-ci permet de faciliter la vision globale et

11. Les personnes touchées par les retombées de tephra ont été invitées dès le 13 janvier, par le biais des réseaux sociaux, à se localiser sur une carte interactive et à estimer, le plus rapidement possible, l'épaisseur des dépôts de tephra dans leur région ([delos_reyes_synthesis_2018](#).)

de mettre en évidence la dépendance ou l'indépendance de l'exploitation vis-à-vis des éléments qui lui sont extérieurs ainsi que sa complexité potentielle, complexité mise en évidence par le nombre de ses composantes et de leurs interactions. Les systèmes agraires ont été modélisés sur Gephi et la disposition spatiale des nœuds a été déterminée par l'algorithme *Force Atlas 2*. Deuxièmement, pour chaque exploitation, les principales informations concernant les productivités (kg/an et pesos/an) par type de culture et de bétail ont été regroupées au sein d'une table récapitulative permettant d'identifier aisément les productions générant le plus de revenus. Troisièmement, les données relatives à la productivité de chaque culture et élevage (kg/an et pesos/an), au travail effectif (heures/an) et à la santé économique de l'exploitation (pesos/an), comprenant les charges, les revenus bruts et nets et les activités secondaires de chaque exploitation ont été résumées au sein d'un nouveau tableau afin de simplifier leur comparaison.

4.4.2 Analyse quantitative - scénarios éruptifs

Une fois les systèmes agraires décrits de façon visuelle et quantitative, les impacts des retombées de téphra sur ceux-ci après une éruption volcanique ont été évalués. Pour ce faire, un pourcentage de perte a été associé à chacune des productions et actifs des exploitations. Ensuite, les pertes ont été calculées sur base d'équations (Équations 2 et 3).

4.4.2.1 Détermination des pourcentages de perte

La détermination des pourcentages de pertes suite à des retombées de téphra est tirée d'une étude menée par Wilson et al. (2007) en Nouvelle-Zélande. Celle-ci apprécie les dégâts attendus dans différents secteurs agricoles (élevage pastoral, horticulture et foresterie) à l'aide de fonctions de fragilité, décrites à la section 2.3.3. Afin de construire ces fonctions, Wilson et al. (2007) ont séparé la sévérité des impacts en trois classes : 1%, 20% et 90% de dommages, chacune des classes étant associée à une épaisseur de téphra donnée. Dans le cas des cultures de légumes-fruits, une sévérité de 1% correspondrait à quelques abrasions et dégâts chimiques, de 20% à quelques destructions de cultures et de fruits et de 90% à une incapacité presque totale de récolter. Afin de rendre compte de l'incertitude sur ces valeurs, les auteurs ont systématiquement considéré que trois épaisseurs de téphra, présentant respectivement une probabilité faible, moyenne et élevée, pouvaient causer 90% de dommages à chaque entité considérée. De plus, pour chaque secteur agricole étudié, deux catégories de dégâts sont évaluées : les dégâts sur la production elle-même telle que la viande, les fruits ou encore les légumes et les dégâts sur la valeur du capital, c'est-à-dire, les impacts sur les éléments permettant cette production comme les bâtiments, les arbres ou les pâtures. Contrairement aux dégâts sur la valeur du capital, les dommages sur les productions dépendent fortement de la saisonnalité, puisque les activités agricoles dépendent de la période de l'année et des conditions climatiques. Par exemple, des dépôts de téphra durant les semis ou la floraison causeront des dégâts plus importants sur les cultures que durant d'autres stades de développement (Craig et al., 2016). Pour rendre compte de cette variabilité saisonnière, les auteurs ont considéré trois coefficients devant être associés à la vulnérabilité de chaque entité agricole en fonction de leurs stades de développement respectifs au moment de l'éruption (Table 2).

Dans ce travail, un coefficient de 1 sera appliqué systématiquement afin de simuler les dégâts les plus

importants pouvant se produire. Ce choix a été fait dans le but d'envisager l'état le plus vulnérable de chaque élément afin de mettre en exergue ceux sur lesquels la priorité doit être mise lors de stratégies de réduction des impacts face à une éruption, et ce, peu importe la période de l'année. Les tables présentant le ratio et la justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les secteurs de l'agriculture pastorale et horticole ainsi que leurs fonctions de fragilité se trouvent à l'Annexe B.

Table 2 – Coefficients de vulnérabilité, table traduite de Wilson et al. (2007)

Vulnérabilité saisonnière suivant le stade de culture	Coefficient
Peu vulnérable (hors saison)	0,25
Assez vulnérable (saison intermédiaire)	0,75
Fortement vulnérable (en saison)	1

Une seconde étude, réalisée par S. Jenkins et al. (2015), évalue les impacts potentiels des retombées de téphra sur le secteur de la santé publique, les infrastructures (transport, eau), les bâtiments, l'agriculture, le nettoyage du téphra et l'économie. Les impacts du téphra sur chacun de ces éléments ont été étudiés dans le cas de quatre catégories d'épaisseur de dépôt, à savoir 1 à 10 mm, 10 à 100 mm, 100 à 1000 mm et supérieure à 1000 mm. Cette étude évalue également les pertes de productions de différents types d'agriculture en fonction de l'épaisseur du dépôt de téphra. Ces données sont détaillées dans l'Annexe C.

Dans ce travail, deux scénarios de dépôts de téphra ont été envisagés, l'un d'une épaisseur relativement faible de 5 mm et l'autre d'une épaisseur plus élevée de 50 mm. Sur base des fonctions de fragilité et des tables de Wilson et al. (2007), le pourcentage de perte de production et d'actifs a été estimé pour chaque élément des systèmes agraires face à un dépôt de téphra des deux épaisseurs choisies. Les pourcentages de perte ont alors été repris sous la forme de tables récapitulatives et également insérés dans les modèles créés sur Gephi afin de faciliter la visualisation des retombées de téphra sur les systèmes. L'étude de S. Jenkins et al. (2015), présentant moins de données quantitatives que celle de Wilson et al. (2007), est utilisée afin d'étoffer ou de valider les impacts détaillés par Wilson et al. (2007).

4.4.2.2 *Calculs des pertes de production*

Ensuite, pour les deux scénarios envisagés, les pertes de production ainsi que la perte en actifs des exploitations par rapport à une situation sans retombées de téphra ont été quantifiées séparément. Cette distinction a été choisie en raison de la durée des conséquences de l'impact. En effet, les pertes sur les actifs se répercutent sur plusieurs années alors que celles sur les productions sont calculées sur une année.

Les pertes sur les productions en termes de quantité (kg/an) et de revenus (pesos/an) par rapport à une situation sans retombées de téphra ont été calculées quantitativement sur base de l'impact direct des retombées de téphra sur chacun des éléments du système agricole (Équations 2 et 3). Ensuite, les pertes totales de l'exploitation ont été obtenues par addition des pertes sur chaque production. Les pertes qualifiées d'"indirectes", c'est-à-dire celles qui se répercutent au sein du système sans affecter

de manière directe l'élément étudié, sont également prises en compte dans ce travail mais ne sont pas évaluées de façon quantitative en raison d'un manque de données. Un exemple de perte indirecte sur des cultures pourrait être une perte directe sur l'élevage de cochons, induisant une perte sur la production d'engrais organique à partir des déjections porcines, diminuant ainsi la quantité de fertilisant disponible pour la production de cultures.

$$\text{Perte en quantité (kg/an)} = \text{Pourcentage de perte (en décimale)} \times \text{Production (kg/an)} \quad (2)$$

$$\text{Perte en revenu (pesos/an)} = \text{Pourcentage de perte (en décimale)} \times \text{Production (pesos/an)} \quad (3)$$

4.4.2.3 *Calculs des pertes sur les actifs*

Les pertes d'actifs liées à l'élevage prennent en compte des dégâts provoqués sur les terres de pâture, les équipements et les bâtiments nécessaires à la production animale tandis que les pertes sur les actifs liés à l'horticulture sont associées aux dommages sur la fertilité des sols, les infrastructures, les équipements de production ou encore la destruction des plantes et des arbres.

Les pertes associées aux dégâts sur les terres de pâture ainsi que sur la fertilité des sols n'ont pas été quantifiées dans ce travail en raison de sa courte durée d'étude.

Deux façons de déterminer les pertes d'actifs sur les infrastructures et bâtiments ont été envisagées. Premièrement, sur base de la valeur du bâtiment: un endommagement de x% induira une perte de x% sur la valeur du bâtiment, nécessitant des coûts de réparation. Deuxièmement, sur base du taux de renouvellement : l'infrastructure devrait être réparée tous les x temps suite à une usure normale, cependant, en raison des téphra, la vitesse d'usure sera accélérée et les coûts de réparation, normalement déboursés tout les x temps, devront être avancés d'une plus ou moins grande période selon le pourcentage de pertes évalué. Cependant, en raison d'un manque de données, aucune de cette deux approches n'a pu être mise en application.

Ensuite, les pertes associées à la perte d'arbres sont calculées via les équations suivantes:

$$\begin{aligned} \text{Perte de production en kg sur x années} &= \text{Nombre d'arbres perdus} \times \text{Production (kg/an/arbre)} \\ &\quad \times \text{Temps de renouvellement (an)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Perte en pesos sur x années} &= \text{Nombre d'arbres perdus} \times \text{Production (pesos/an/arbre)} \\ &\quad \times \text{Taux de renouvellement (an)} \end{aligned} \quad (5)$$

où le taux de renouvellement désigne le temps nécessaire pour qu'une plantule (achetée ou obtenue par reproduction végétative) se développe et puisse porter une nouvelle récolte.

5 Résultats

5.1 Description des systèmes agraires

Afin de décrire les systèmes agraires présents dans la région du Taal, sept enquêtes de terrain ont été réalisées du 29 mars au 5 avril 2022. Deux visites supplémentaires ont eu lieu le 22 et 30 mai 2022 (Figure 13; Annexe D, Table 38). Toutes les informations récoltées décrivent les exploitations dans leur état de fonctionnement au moment des enquêtes de terrain. Ce choix de collecter les données dans la situation post-éruption a été fait afin d'augmenter la précision et la concordance des données et de minimiser les biais éventuels liés à une information portant sur une situation passée. Sur base des informations récoltées, un modèle conceptuel de chaque gestion agricole a été créé (Annexe E), permettant de catégoriser les exploitations en trois groupes distincts : (i) système agricole uniquement composé d'un système de culture (exploitations n°4 et 6), (ii) système agricole composé d'un système de culture et d'élevage sans d'interaction entre les systèmes (exploitations n°1 et 2) et (iii) système agricole composé d'un système de culture et d'élevage avec interactions entre les systèmes (exploitations n°3, 5 et 7).

Une fois les exploitations décrites et analysées, deux ont été sélectionnées pour l'analyse quantitative complète, à savoir les exploitations n°1 et 5. Le choix de l'exploitation n°5 s'est fait sur base du niveau de complexité de son système agricole, comme révélé par les enquêtes. Ensuite, il a été choisi de la comparer avec l'exploitation n°1, dont le système agricole plus simple est composé d'un système de culture et d'élevage qui ne sont pas en interaction. Les descriptions des fermes non analysées quantitativement sont fournies à l'Annexe F.

5.1.1 Exploitation n°1 : système agricole composé de sous-systèmes de culture et d'élevage sans interaction entre les sous-systèmes

L'exploitation n°1 (Annexe E, Figure 33) est située dans les plaines aux collines ondulées du quartier de Coral Na Munti (province d'Agoncillo). Ce système agricole présente un niveau de complexité plus élevée que celui des fermes n°4 et n°6 (voir Annexe F) en raison de la présence d'un sous-système d'élevage. Cependant, les deux sous-systèmes sont complètement indépendants l'un de l'autre.

La quasi totalité de la surface de l'exploitation (0,98 %) de 0,7 hectares est occupée par 50 bananiers, 50 cocotiers et un jacquier (Figure 14). Cependant, les noix de coco sont les seules cultures pérennes mises sur le marché et contribuent aux revenus de la ferme à hauteur de 2% de la somme totale. L'exploitation ne possède pas de cultures à cycle court ou annuelles et les cultures pérennes sont donc les seules représentantes du sous-système de culture. L'exploitation possède également un sous-système d'élevage de cochons produisant des porcelets et des cochons engraisés. Les ventes de porcelets et de cochons engraisés rapportent par an respectivement 154 000 et 435 600 pesos soit 26 et 72 % des revenus totaux. Néanmoins, le système d'élevage concentre la quasi totalité des dépenses (99 %), comprenant l'alimentation des cochons, les produits vétérinaires (vitamines et vaccins) et les dépenses en eau et électricité. L'élevage de cochons est donc totalement dépendant d'intrants extérieurs alors qu'aucun intrant n'est apporté sur les cultures pérennes, à l'exception des 25 plants

de bananiers achetés initialement en 2021. Ensuite, 25 nouveaux plants de bananiers ont été cultivés à partir des précédents par multiplication végétative en séparant les rejets et en les replantant.



Figure 14 – Description visuelle des paysages bordant l’exploitation n°1

Le "TLU" (Table 3), Tropical Livestock Unit (Unité de l'élevage tropical), est une valeur de référence permettant d'informer sur la capacité de charge des pâtures en quantifiant les espèces d'animaux d'élevage qui consomment du fourrage (Rothman-Ostrow et al., 2020). Par convention, différents facteurs de conversion de TLU ont été attribués aux catégories d'élevage, ceux-ci sont présentés à l'Annexe G (FAO, 1979). Cependant, aucune distinction n'est faite sur la race, le sexe et l'âge des animaux ou encore sur la finalité de l'élevage (viande, lait, laine, ...).

Les nombres d'animaux figurant à la Table 3 font référence aux animaux présents dans la ferme lors de la deuxième série d'enquêtes (22 mai 2022), onze porcelets ayant été vendus peu de temps avant la visite. N'ayant pas d'information sur le nombre de porcelets vendus par an mais sachant que 22 cochons engraisés sont vendus par an, que 11 porcelets viennent d'être vendus et que les truies mettent bas deux fois par an, l'hypothèse est que 22 porcelets sont vendus chaque année. Sur cette base, il est donc estimé que les truies donnent environ 8,8 porcelets par portée. Cependant, le nombre de porcelets destinés à être engraisés, vendus une fois le poids de 90 kg atteint vers quatre ou cinq mois, et celui des porcelets vendus à l'âge de quatre semaines peuvent varier selon les demandes du négociant. Les cochons sont gardés dans un bâtiment de 120 m² où ils sont nourris deux fois par jour avec du son de riz, à l'exception des porcelets qui ne sont nourris qu'avec le colostrum de leur mère pendant le premier mois. En ce qui concerne les cultures pérennes, elles sont toutes plantées à l'arrière de la ferme où les bananiers sont placés entre les cocotiers, distancés de 5 m. Les fruits du jacquier n'étant pas pesés, un poids moyen de 15 kg leur a été attribué afin de pouvoir calculer une production moyenne par an (Morton & Dowling, 1987).

Table 3 – Résumé des productions et revenus annuels de l'exploitation n°1

EXPLOITATION N°1									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures pérennes									
Bananes	0,683	50	12	5	grappe	10	-	600	-
Noix de coco	0,683	50	4	1300	fruit	0,923	2,5	4800	12000
Jacques	0,683	1	1	2,5	fruit	15	-	37,5	-
Système d'élevage	TLU	Nombre	Bâtiment (ha)	Portées par an	Nombre par portée	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cochons			0,012						
Truies	1	5		2					
Porcelets	0	0			4,4	15	7000	330	154000
Cochons engraisés	1	5			4,4	90	19800	1980	435600
Production totale								7747,5	601600

5.1.2 Exploitation n°5 : système agraire composé de sous-systèmes de culture et d'élevage avec interactions entre les sous-systèmes

L'exploitation agricole n°5, de 1,2 hectares, est située dans la ville de Silang, dans le quartier de Mataas Na Buron (province de Cavite). Au sein de son système agraire, différents échanges s'effectuent entre les sous-systèmes via le transfert de fruits, de résidus de cultures, de fourrage, de déjections, des fumiers ou encore d'ensilage. Cependant, la ferme n°5 présente le niveau de complexité le plus élevé des fermes étudiées en raison du système de stockage qu'elle est la seule à posséder et des nombreuses interactions entre ses sous-systèmes.

Les cultures à cycle court, occupant 51,1% de la superficie disponible pour l'ensemble des cultures (0,2078 sur 0,4063 ha) sont composées de 500 pieds de maïs (Figure 15a), de courges, de patates douces et de 608 plants d'aubergines. Les nombres de plants de courges et de patate douces ne sont pas connus. Le maïs a été classé dans les cultures à cycle court car celui-ci est cultivé continuellement tout au long de l'année. La récolte des aubergines ayant lieu deux fois par semaine durant deux mois, seuls 85% des aubergines sont cueillis par récolte, à raison d'une aubergine par pied. Les cultures annuelles comprennent uniquement les melons cantaloupes (Figure 15b) répartis sur une superficie de 0,0532 ha, soit 13,1% de la surface alloués aux cultures. Les cultures pérennes, composées de cacaoyers, cocotiers, pitayas (dont les fruits portent également le nom de pitaya ou de fruits du dragon), de bananiers et de papayes, représentent 35,8% de la superficie cultivée.



(a) Maïs



(b) Melons



(c) Courges sur tuteurs et patates douces au sol



(d) Pitayas

Figure 15 – Exemples de cultures de l'exploitation n°5

Le système d'élevage comprend l'élevage de cochons (Figures 16a et 16b) constitué de cinq truies, un verrat et dix porcelets, et de gallinacés (Figure 16c), comportant vingt-sept poules, cinq coqs et un nombre variable de poussins. Les cochons sont gardés dans un bâtiment de 700 m² où, les truies et le verrat sont nourris quotidiennement avec 3 kg d'un mélange d'aliments (50% maïs, 40% son de riz, 10% farine de coprah¹²) et 5 kg d'ensilage. Les porcelets, étant vendus à l'âge de deux mois, sont nourris pendant le premier mois avec le colostrum et le deuxième mois avec 3 kg du mélange d'aliments par jour pour l'ensemble des porcelets et 0,5 kg d'ensilage par jour par porcelet. En ce qui concerne les poules et les coqs, ils sont gardés dans un enclos et leurs oeufs sont placés dans un incubateur où ils éclosent 21 jours plus tard. Ensuite, les poussins sont gardés avec leurs parents durant les deux premiers mois. Les deux derniers mois restant avant leur vente, ils sont laissés en liberté dans la ferme. L'ensemble des poules, coqs et poussins est nourri avec un total de 0,5 kg du même mélange d'aliments que les cochons (50% maïs, 40% son de riz, 10% farine de coprah).

12. Farine produite à partir de la chair séchée des noix de coco (Schcheglov, 2018).



(a) Cochons



(b) Porcelets



(c) Poules

Figure 16 – Système d'élevage de l'exploitation n°5

Au niveau de l'utilisation de l'eau, l'exploitation est reliée à l'eau de ville et possède également un puits. L'eau de ville sert uniquement pour l'arrosage des cultures à cycle court tandis que l'eau du puits est utilisée pour les animaux.

L'exploitation n°5 réalise deux sortes de stock de fumier, l'une à partir des déjections de poules et l'autre de celles des cochons. Le fumier consiste en un mélange des déjections et des coques de riz en proportions égales, ayant reposé pendant trois mois afin de permettre le compostage. Ensuite, celui-ci pourra être utilisé comme engrais sur le système de culture. En moyenne, un peu plus de trois conteneurs de 20 litres chez les poules et neuf sacs de 20 kg chez les cochons sont collectés par mois. Les coques de riz ne sont pas produites par l'exploitation mais achetées dans un moulin à riz pour 30 pesos par sac de 20 kg soit 1,5 pesos/kg. D'autres liens entre le système de culture et d'élevage sont matérialisés par la production d'ensilage, nourrissant les cochons, obtenue à partir des tiges de maïs dans des conteneurs de 100 kg. De plus, les troncs de bananes abandonnés sont également utilisés afin de faire du lombricompostage. Cependant, aucune information précise n'a pu être obtenue sur le temps nécessaire au remplissage d'un conteneur de 100 kg pour l'ensilage ou sur la production et l'utilisation détaillée du lombricompostage.

En ce qui concerne les revenus annuels, l'exploitation rapporte un revenu net de 45 000 pesos par an, une fois toutes les charges retirées. La vente des cultures génère 46,32% des revenus bruts totaux, dont 80,93 % sont réalisés par les cultures à cycle court et 19,07 % par les cultures pérennes. La culture annuelle de melons a été lancée en mars 2022 pour l'amusement de l'agriculteur. Les productions seront donc gardées pour la consommation du ménage tout comme une part de chaque autre type

de culture. Les élevages de cochons et de poules rapportent respectivement 23,66 % et 30,02 % des revenus bruts de l'exploitation. Par an, 48 porcelets, âgés de deux mois et pesant alors environ 17 kg, sont vendus pour 4 500 pesos par tête et quatre porcelets sont gardés pour la consommation personnelle du ménage. Ceci explique la valeur de 216 000 pesos/an pour la vente des cochons et non de 234 000 pesos/an dans la Table 4 puisque quatre cochons ne sont pas vendus. Sachant que 52 porcelets naissent par an, qu'il y a cinq truies et qu'elles peuvent avoir deux portées et demi par an, un nombre moyen de 4,16 porcelets par portée a été estimé. Les poulets, d'environ 1,2 kg, sont vendus à l'âge de quatre mois au prix de 350 pesos par animal. Tous les quatre mois, environ 261 poules sont mises sur le marché, soit une moyenne de 9,67 poussins par poule. Cette valeur prend en compte la productivité des poules, le taux d'éclosion des oeufs après incubation et la mortalité des poussins. Les oeufs ne sont pas commercialisés mais quelques-uns, à raison de neuf par semaine, sont gardés pour la consommation du ménage.

Table 4 – Résumé des productions et revenus annuels de l'exploitation n°5

EXPLOITATION N°5									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures à cycle court	0,2078								
Maïs	0,09	5000	continue					8000	160000
Courges	0,0570		32		récolte	90	4050	2880	129600
Patates douces	0,0570		1					420	8400
Aubergines	0,0608	608	16	516	fruit	0,143	5,357	1179	44229
Cultures annuelles	0,0532								
Melon	0,0532		1					-	-
Cultures pérennes	0,1453								
Cacao (Graines)	0,0243	27	32		récolte	1,7	51	54,4	1632
Noix de coco	0,0450	18	52	126	fruit	0,8	4	5241,6	26208
Pitayas	0,0540	55			arbre	8,5	510	467,5	28050
Bananes	0,0220	200	26	7	arbre	9	225	234	5850
Papayes	0,0220		28		récolte	27	675	756	18900
Système d'élevage	TLU	Nombre	Bâtiment (ha)	Portées par an	Nombre par portée	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cochons			0,07						
Verrat	0,2	1							
Truies	1	5		2,5					
Porcelets	2	10			4,16	17	4500	884	216000
Poules									
Coq	0,05	5							
Poules	0,27	27		3					
Poussins	0,1	10			9,67	1,2	350	939,6	274050
Production totale								21057	912919

5.1.3 Comparaison générale des sept exploitations

Un tableau comparatif des productions totales, des heures de travail prestées et de l'économie de chaque exploitation sur une année est présenté à la Table 5. Les détails pour les exploitations n°2, 3, 4, 6 et 7 sont fournis à l'Annexe F, section F.4.

Table 5 – Comparaison des actifs, des productions et des revenus des sept exploitations étudiées

Exploitations	1	2	3	4	5	6	7
UAA (ha)	0,7	1,2058	0,881	1,4012	1,2	2	0,5004
Système de culture							
Cultures à cycle court (ha)			0,205	0,4	0,2078		0
Cultures annuelles (ha)			0,455		0,0532		0
Cultures pérennes (ha)	0,683	1,2	0,25	1	0,1453	2	0,5
Cultures fourragères (ha)			0,125				
Production totale (kg/an)	5437,5	620	10477,5	1452,5	12479,4	43800	
Revenus totaux (pesos/an)	12000	5000	66900	73077	342229	1224000	
Système d'élevage							
TLU	2	6,5	4,4		3,6		2
TLU/ha	2,9	5,4	5		3		4
Cochons	10	32	5		16		3
Poules			100		42		
Vaches			3				2 (3)
Chèvres		1 (2)	3				
Production totale (kg/an)	2310	156	890		1823,6		
Revenus totaux (pesos/an)	589600	73050	18333		490050		
Effectif de travail							
Nombre de travailleurs journaliers	2	2	1	1	3		
Prestation des travailleurs journaliers (heures/an)	1460	546	2555	1460	384	3	
Prestation des travailleurs saisonniers (heures/an)	256	64	168	176	5616	7488	
Travail total (heures/an)	1716	610	2723	1636	6000		
Économie							
Dépenses totales	623600	-	25000	13282	462919	240000	
Revenus totaux (pesos/an)	601600	-	85233	73077	912919	1224000	
Revenus nets (pesos/an)	-22000	<78050	35000	59795	450000	984000	
Revenus extérieurs aux activités de l'exploitation	360000	-	-	50000	60000	200000	

Exploitation n°1

Pour l'exploitation n°1, un temps moyen de quatre heures par jour est nécessaire pour gérer la ferme. Le travail, essentiellement du nettoyage et le nourrissage des cochons, est effectué majoritairement par la propriétaire, le propriétaire travaillant sur un bateau en moyenne neuf mois par an. De plus, quatre travailleurs saisonniers sont employés pendant deux jours de huit heures tous les trois mois afin de récolter les noix de coco.

En ce qui concerne de l'économie de l'exploitation n°1, les dépenses étant supérieures aux rentrées d'argent, les revenus générés par une activité secondaire extérieure à la ferme sont indispensables. Ceux-ci sont rapportés par le propriétaire effectuant des cycles de six mois payés sur un bateau et de deux mois de repos non payés. Le calcul des dépenses comprend les salaires de saisonniers (6 000 pesos/an), l'alimentation des cinq truies et des 22 porcelets engraisés (respectivement 350 000 pesos/an et 184 800 pesos par an), des vaccins (7 200 pesos/an pour l'ensemble des cochons), l'eau (57 600 pesos/an) et l'électricité (18 000 pesos/an). L'élevage de cochons représente ~99% des charges de l'exploitation.

Exploitation n°5

La gestion de l'exploitation n°5 requiert trois travailleurs quotidiens à raison de 36 heures par semaine par travailleur. De plus, durant l'année, au moins deux saisonniers sont engagés 24 jours pour des journées de huit heures.

Les dépenses de chaque production de l'exploitation n'ont pas été détaillées par le propriétaire, à l'exception de celles associées à l'élevage de poules, valant 85% des revenus qu'il génère et qui sont alors chiffrées à 232 942,5 pesos par. Il est supposé que les dépenses associées à l'élevage de cochons soient également de 85% des revenus bruts qu'il génère, soit 183 600 pesos par an. Les dépenses totales annuelles de l'exploitation, chiffrées à 462 918,6 pesos, ont été calculées sur base de l'estimation du revenu brut annuel de 912 919 pesos et du revenu net, estimée par la propriétaire à 450 000 pesos par an. Ceci signifie que seuls 49% des 912 919 pesos de revenu brut annuel sont perçus par le propriétaire. Les dépenses annuelles liées à l'élevage sont donc estimées à 416 542,5 pesos, soit 90% des charges totales annuelles de l'exploitation. Les charges supportées par le sous-système de culture représentent donc 10% des charges de l'exploitation et s'élèvent alors à 46 376,1 pesos par an. Sur base de ces nombres et sachant que les revenus bruts des cultures génèrent annuellement 422 868,6 pesos, le revenu net est donc estimé à 376 492,5 pesos par an, signifiant alors les charges associées à la production de cultures sont de 11%.

Le propriétaire de l'exploitation étant vétérinaire, il effectue des consultations et des inséminations dans d'autres fermes. Il offre également des services aux autres agriculteurs et possède lui-même une seconde ferme dans la région. Par ces activités secondaires, un total de 60 000 pesos par an est ajoutée à ses revenus.

5.2 Quantification de la vulnérabilité

5.2.1 Détermination des pourcentages de pertes après un dépôt de téphra

Tous les pourcentages de perte sur les productions et les actifs des exploitations n°1 et 5 ont été estimés sur base des tables de ratio des impacts des retombées de téphra sur différentes productions et des fonctions de fragilité (Annexe B) réalisées par Wilson et al. (2007).

Exploitation n°1

Les pertes sur les productions de cultures pérennes de l'exploitation n°1 ont été évaluées à partir de la fonction de fragilité des "cultures arboricoles" fournie par Wilson et al. (2007) (Annexe B.2, Figure 29). En ce qui concerne le bétail, les pertes de production estimées sur les systèmes d'élevage (Wilson et al., 2007) se réfèrent à une agriculture pastorale, c'est-à-dire pour les animaux broutants (Annexe B.1). L'élevage de cochons n'appartient à aucune de ces catégories, et dès lors il a été choisi d'assimiler celui-ci à l'"élevage de moutons et de cerfs", simplement en considérant la taille des moutons qui se rapproche de celle des cochons. Sur base de Wilson et al. (2007), un dépôt de 5 mm de téphra génère des pertes estimées entre 1 et 20% sur l'élevage de moutons et de cerfs (Annexe B.1, Table 23). Puisque dans cette exploitation, les cochons ne broutent pas, qu'ils restent sous un abri et reçoivent de la nourriture provenant de l'extérieur du système, ceux-ci sont moins vulnérables aux chutes de téphra et à leur ingestion que les moutons. Au vu de ces considérations, la perte associée à l'élevage porcin a donc été arbitrairement fixée à 2% suite à un dépôt de téphra de 5 mm. Pour un dépôt de téphra de 50 mm, les pertes sur l'élevage de moutons et de cerfs peuvent aller de 20 à 90%. La plus petite perte, soit 20%, est considérée dans le cadre de la production de cochons.

Les pourcentages de perte sur les productions de l'exploitation n°1 sont repris à la Table 6 et ceux sur les actifs à la Table 7.

Table 6 – Estimation des pourcentages de perte associés aux productions de l'exploitation n°1. La colonne "Référence" correspond à la classification des productions décrites par Wilson et al. (2007).

Exploitation			Pourcentage de perte sur les productions (%)	
Catégorie	Type	Référence	Scénario 5 mm	Scénario 50 mm
Cultures pérennes	Bananes	Arbre	30	100
	Noix de coco	Arbre	30	100
	Jacques	Arbre	30	100
Élevage	Cochons	Moutons	2	20

En ce qui concerne l'évaluation des pertes sur les actifs de l'exploitation, celles concernant les cultures pérennes ont été évaluées sur base des pertes estimées sur les "cultures permanentes" (Annexe B.2, Table 32 et Figure 30). Les pertes d'actifs liées à l'élevage correspondent à des dégâts sur les infrastructures de l'exploitation tels que la corrosion du métal des toits et des clôtures ou des endommagements des gouttières des bâtiments. Aucune distinction n'est donc faite en fonction du type d'élevage et les pertes sur les actifs de l'élevage de cochons sont évaluées sur base de la fonction de fragilité des pertes d'actifs de l'agriculture pastorale (Annexe B.1, Figure 28).

Table 7 – Estimation des pourcentages de perte associés aux actifs de l'exploitation n°1. La colonne "Référence" correspond à la classification des actifs décrite par Wilson et al. (2007).

Exploitation			Pourcentage de perte sur les actifs (%)	
Catégorie	Type	Référence	Scénario 5 mm	Scénario 50 mm
Cultures pérennes	Bananes	Permanent	3	15
	Noix de coco	Permanent	3	15
	Jacques	Permanent	3	15
Élevage	Cochons	Infrastructures	1	14

Exploitation n°5

Les pourcentages de perte de production sur les cultures des courges, d'aubergines, de melons et de maïs ont été estimés à l'aide de la fonction de fragilité des "cultures de légume-fruit" de la section horticulture (Annexe B.2, Figure 29). Puisque l'étude de Wilson et al. (2007) ne comprend pas de catégorie "céréales" dont devrait faire partie le maïs, celui-ci a été associé à la catégorie "légume-fruit". Les patates douces ont été associées aux "légumes-racines" et leurs pertes sont déterminées sur base de la Table 28. En ce qui concerne les cultures pérennes, les pertes ont été estimées sur base de la fonction de fragilité des "cultures arboricoles" (Annexe B.2, Figure 29). Les pertes de production sur l'élevage des cochons et des poules ont été estimées par le biais de l'"élevage de moutons et de cerfs" (Annexe B.1, Table 23, Figure 28) pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'exploitation n°1. Cependant, les valeurs de pertes choisies sont sensiblement supérieures à celles de l'exploitation n°1 et atteignent, pour un dépôt de 5 et 50 mm de téphra, respectivement 5 et 30%. Ce choix a été fait en considération du fait que les cochons ont ici la possibilité de rentrer et de sortir de leurs enclos et que les poules peuvent sortir lors des deux derniers mois précédant leur vente. Les animaux, malgré qu'ils soient également nourris avec de la nourriture achetée ainsi que de l'ensilage pour les cochons, sont donc plus susceptibles d'être exposés au téphra et d'en ingérer plus que les cochons élevés dans la ferme n°1.

Les pertes d'actifs sur les cultures à cycle court ont été estimées à partir des pertes sur les "cultures saisonnières" (Annexe B.2, Table 31 et Figure 30) tandis que les cultures pérennes l'ont été sur base des valeurs associées aux "cultures permanentes" (Annexe B.2, Table 32 et Figure 30). En ce qui concerne les pertes d'actifs liées à l'élevage de cochons et de poules, les valeurs sont reprises sur base de la fonction de fragilité des pertes d'actifs de l'agriculture pastorale (Annexe B.1, Figure 28) sur base du même postulat qu'énoncé pour l'exploitation n°1.

Les pourcentages de perte sur les productions et les actifs de l'exploitation n°5 sont présentés aux Tables 8 et 9.

Table 8 – Estimation des pourcentages de pertes associés aux productions de l’exploitation n°5. La colonne "Référence" correspond à la classification des productions décrite par Wilson et al. (2007).

Exploitation			Pourcentage de perte sur les productions (%)	
Catégorie	Type	Référence	Scénario 5 mm	Scénario 50 mm
Cultures à cycle court	Maïs	Légume-fruit	90	100
	Courges	Légumes-fruit	90	100
	Patates douces	Légume-racine	1	90
	Aubergines	Légume-fruit	90	100
Culture annuelle	Melons	Légume-fruit	90	100
Cultures pérennes	Graines de cacao	Arbre	30	100
	Noix de coco	Arbre	30	100
	Pitayas	Arbre	30	100
	Bananes	Arbre	30	100
	Papayes	Arbre	30	100
Élevage	Cochons	Moutons	5	30
	Poules	Moutons	5	30

Table 9 – Estimation des pourcentages de pertes associés aux actifs de l’exploitation n°5. La colonne "Référence" correspond à la classification des actifs décrite par Wilson et al. (2007).

Exploitation			Pourcentage de perte sur les actifs (%)	
Catégorie	Type	Référence	Scénario 5 mm	Scénario 50 mm
Cultures à cycle court	Maïs	Saisonnier	1	10
	Courges	Saisonnier	1	10
	Patates douces	Saisonnier	1	10
	Aubergines	Saisonnier	1	10
Culture annuelle	Melons	Saisonnier/permanent	1	10
Cultures pérennes	Graines de cacao	Permanent	3	15
	Noix de coco	Permanent	3	15
	Pitayas	Permanent	3	15
	Bananes	Permanent	3	15
	Papayes	Permanent	3	15
Élevage	Cochons	Infrastructures	1	14
	Poules	Infrastructures	1	14

5.2.2 Représentation des scénarios de retombées de téphra sur les systèmes agraires

Trois états du système agraire des exploitations n°1 et n°5 ont été modélisés avec Gephi. La première situation représente le système dans son état d’équilibre, considéré comme l’état du système en absence de retombée de téphra. Les deux situations suivantes représentent les systèmes sous les scénarios envisageant un dépôt de 5 et 50 mm respectivement.

Pour la modélisation, les nœuds représentant les différentes entités du système, ont été dessinés en premier. Une couleur spécifique leur a été attribuée selon la place qu’ils occupent dans le réseau. Ensuite, des liens entre les entités ont été rajoutés aux moyens de flèches, le sens de la flèche indiquant l’origine et la destination. Des flèches reliant une entité à elle-même ont aussi été utilisées afin de

représenter le renouvellement et signifient alors que cette entité peut se reproduire au sein du système par reproduction animale ou végétative. L'établissement des liens entre nœuds a ensuite permis d'utiliser une fonctionnalité du logiciel Gephi pour donner automatiquement une taille aux nœuds en fonction du nombre de liens y entrant et en sortant. Un nombre de liens élevé donne lieu à un nœud de taille plus grande, soulignant les importances relatives des différents éléments du système. La valeur économique des productions vendues a été mise en évidence grâce à la pondération des liens reliant les nœuds de productions au nœud des productions vendues (liens de couleur rose). Un poids spécifique, proportionnel à la part de revenus que la production génère par rapport aux revenus totaux de l'exploitation, a donc été attribué à chacun de ces liens. Les autres liens du système n'ont pas été pondérés. Enfin, l'outil de spatialisation utilisant l'algorithme *Force Atlas 2* a été utilisé. Cependant, puisque certains labels se chevauchaient, la disposition a été légèrement modifiée afin de permettre une meilleure lisibilité des modèles des systèmes agraires.

L'impact d'un dépôt de téphra sur les systèmes agraires est représenté en termes de pourcentages de pertes sur les productions et sur les actifs. Ceux-ci ont été classés en cinq catégories : (i) impacts très faibles (1 à 5% de pertes), (ii) impacts faibles (10 à 15% de pertes), (iii) impacts moyens (20 à 30% de pertes), (iv) impacts très forts (90 à 100% de pertes) et (v) impacts indéterminés. Les classes peuvent être étendues dans le but de couvrir tous les pourcentages de 1 à 100%, cependant il a été choisi de limiter la taille des classes aux valeurs définies dans la section 5.2.1, cela afin d'augmenter la lisibilité et la compréhension.

5.2.2.1 *Exploitation n°1*

Système agricole sans retombées de téphra

Le modèle du système agricole de l'exploitation n°1 (Figure 17), illustre qu'il n'existe aucune interaction entre les sous-systèmes d'élevage et de culture. Les déjections animales ne sont pas utilisées pour la fertilisation des cultures, et les cultures ne servent pas à l'alimentation du bétail. Ces deux sous-systèmes fonctionnent de manière tout à fait indépendante l'un de l'autre et font donc grandement appel à des intrants extérieurs au système.

L'exploitation possède des cochons gardés dans un abris en béton de 12 m. Cet élevage nécessite des intrants extérieurs au système, à savoir des vitamines, des vaccins et de la nourriture constituée de son de riz. Le renouvellement se fait soit via l'achat de cochons, soit via la sélection de certains porcelets ayant de bonnes pré-dispositions à devenir mères reproductrices.

Le sous-système de culture ne comprend que des cultures pérennes et est composé de noix de coco, bananes et jacquiers. Les noix de coco et les jacquiers ont été hérités et proviennent donc de l'extérieur du système. Les plants de bananiers, eux ont été achetés à l'origine et de nouveaux pieds de bananiers ont ensuite été produits au sein du système par reproduction végétative à partir des pousses des anciens plants. Ceci est représenté à la Figure 17 par le lien de renouvellement reliant le nœud "Bananes" à lui-même. Les productions du système sont séparées en deux catégories : les productions consommées par le ménage et les productions vendues, générant un revenu. Toutes les productions au sein du sous-système d'élevage sont vendues ; en revanche, seules les noix de coco génèrent un revenu au sein du sous-système de culture, les autres productions étant destinées à la consommation

personnelle. Parmi les productions vendues, les revenus générés par la vente des cochons engraisés sont plus importants que ceux des porcelets et encore plus importants que ceux issus de la vente des noix de coco (illustré à la Figure 17 par l'épaisseur des flèches).

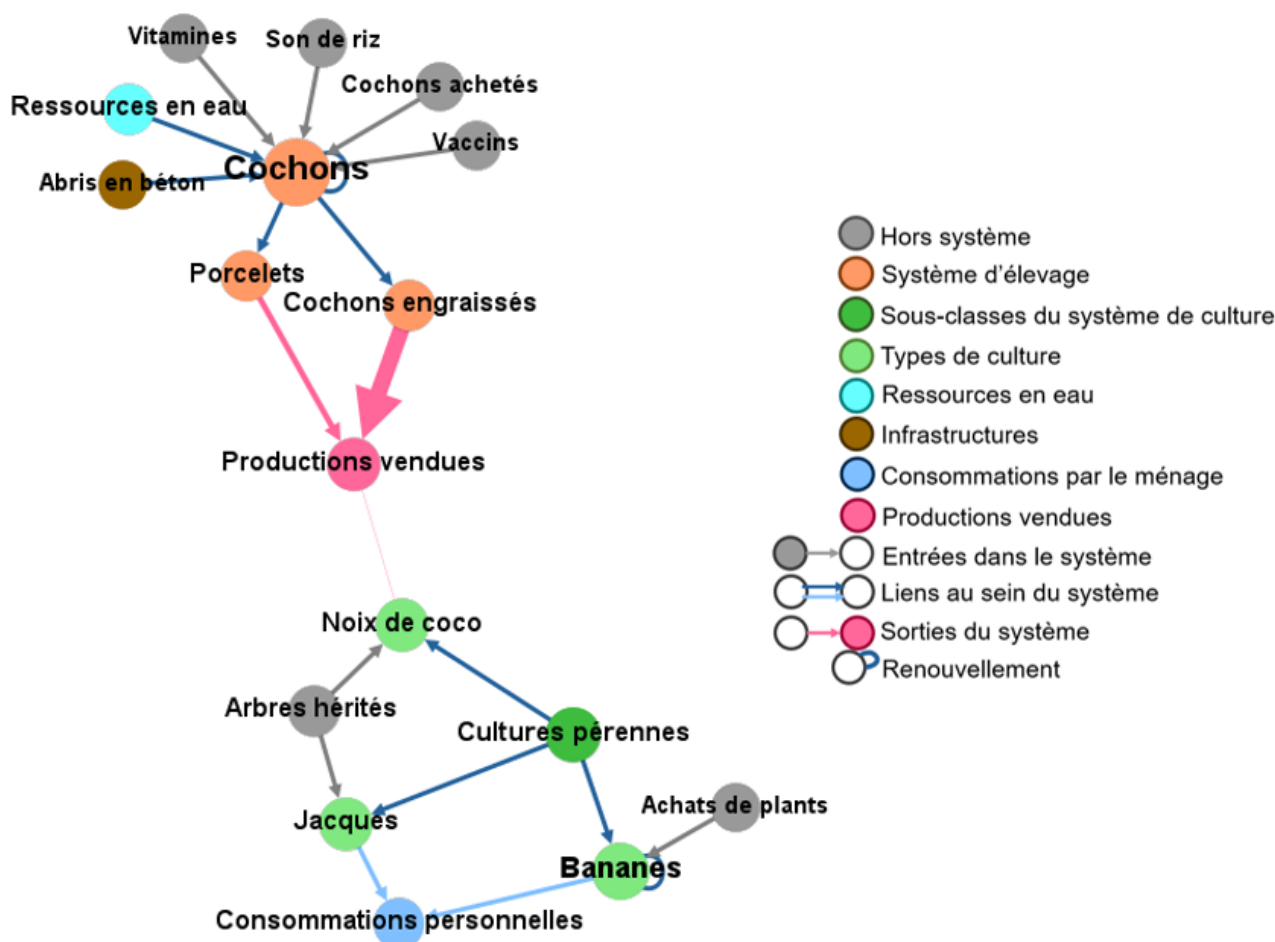


Figure 17 – Modèle du système agricole de l'exploitation n°1 en absence de dépôt de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi

Scénario n°1 : Quantification des impacts sur le système agricole n°1 suite à un dépôt de 5 mm de téphra

Il est important de pouvoir distinguer l'impact du dépôt de téphra sur le système de culture sur les productions de l'impact affectant les actifs. Pour ce faire, les pertes d'actifs sont représentées par un lien reliant le nœud "Téphra 5mm" au nœud "Cultures pérennes", alors que les pertes de productions ont été représentées par des liens directs entre "Téphra 5 mm" et chaque type de culture. Cette symbolique est également employée pour les cultures à cycle court et annuelles de l'exploitation n°5 (Sections 5.2.2.2 et 5.2.2.2).

À la Figure 18, les niveaux d'impact sont représentés par des flèches de couleurs différentes. Les cochons, les porcelets, les cochons engraisés, leur abris ainsi que les impacts sur les actifs des cultures pérennes subissent une sévérité d'impact très faible (de 1 à 5% de pertes). Des impacts de sévérité moyenne (de 20 à 35% de pertes) sont estimés sur les productions de noix de coco, des bananes ainsi

que de jacquiers. Les impacts sur les ressources en eau ne sont pas quantifiés.

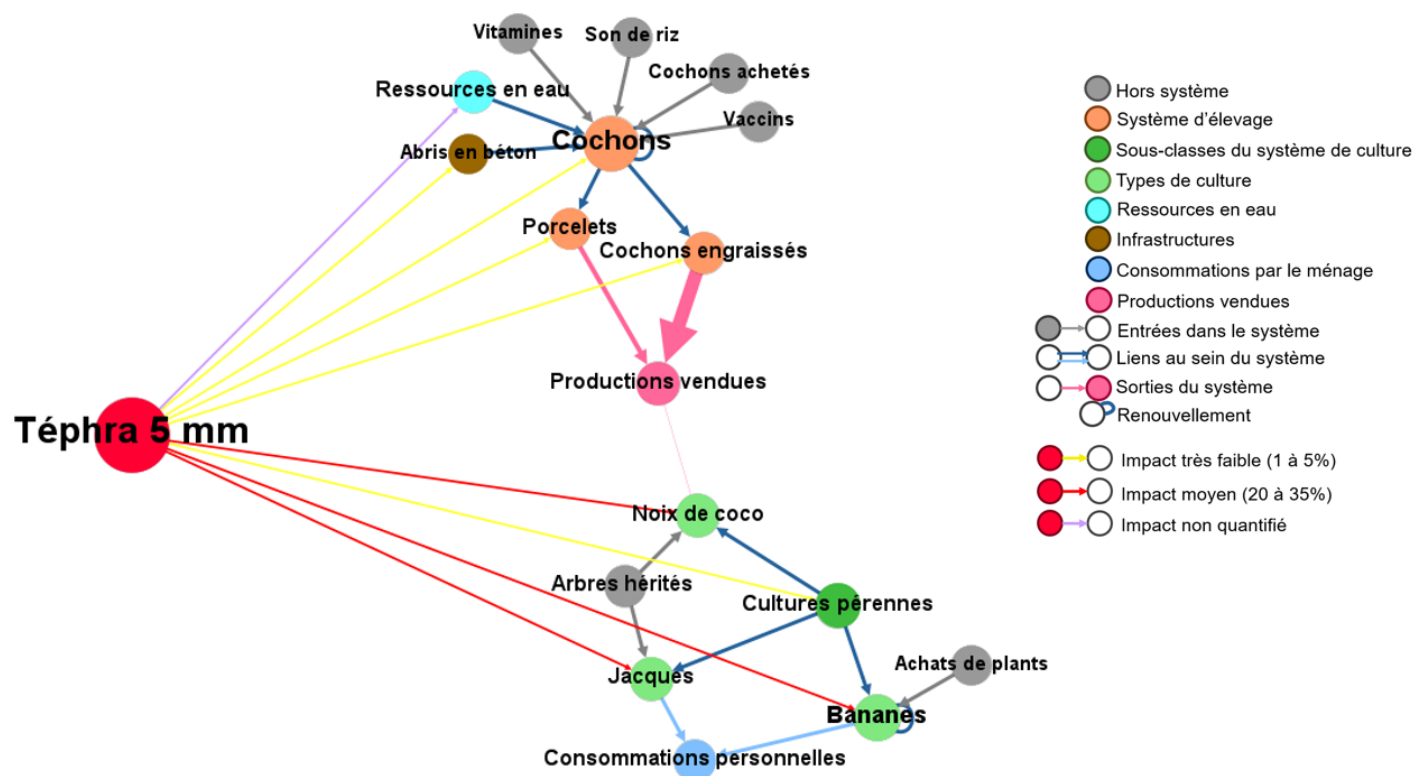


Figure 18 – Modèle du système agricole de l'exploitation n°1 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinq millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi

Scénario n°2 : Quantification des impacts sur le système agricole n°1 suite à un dépôt de 50 mm de téphra

Les impacts associés à un dépôt de téphra de 50 mm sont plus important que ceux résultant d'une exposition à 5 mm de téphra. En effet, les pertes d'actifs sur les cultures pérennes ainsi que sur l'abri des cochons sont estimées à 10 à 15%, correspondant à des impacts de sévérité faible. Les impacts sur les cochons, les porcelets et sur les cochons engraisés, considérés comme très faibles dans le scénario n°1 sont maintenant considérés comme moyens (de 20 à 35% de pertes). Des impacts d'une sévérité beaucoup plus élevée (de 90 à 100% de pertes) sont attendus sur l'ensemble des productions des cultures pérennes, alors que ceux-ci n'étaient que de sévérité moyenne dans le scénario n°1.

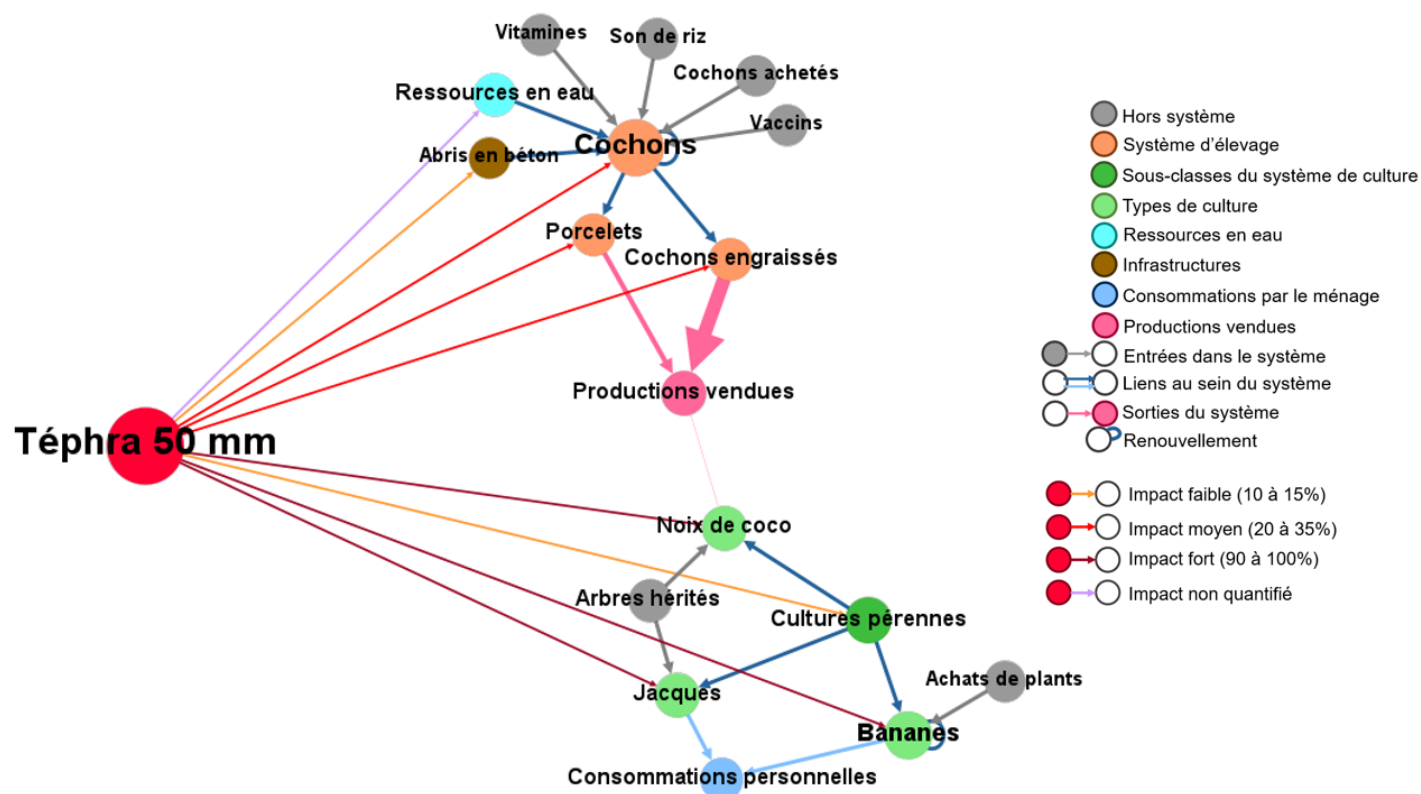


Figure 19 – Modèle du système agricole de l’exploitation n°1 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinquante millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi

5.2.2.2 Exploitation n°5

Système agricole sans retombées de téphra

Le modèle de l’exploitation n°5 (Figure 20) fait état de la complexité de son système agricole. En effet, les liens existants entre les éléments du système sont plus nombreux et le nombre de sous-systèmes est plus important que dans l’exploitation n°1. Le sous-système de stockage, comprenant l’ensilage et le stockage de fumier, permet de faire le lien entre le système de culture, (nœuds verts) et le système d’élevage (nœuds oranges). Un autre sous-système, absent dans l’exploitation n°1, est celui des ressources informelles. Celui-ci est constitué des prairies permanentes dont dépendent les cochons et les poules. Les ressources en eau sont également plus détaillées : l’eau de ville permet d’arroser les cultures à cycle court et annuelles tandis que l’eau du puits est utilisée pour abreuver les animaux. Afin de visualiser plus clairement les liens entre les éléments du système, différentes parties de celui-ci ont été mises en évidence pour être décrites séparément (Figures 21 à 24).

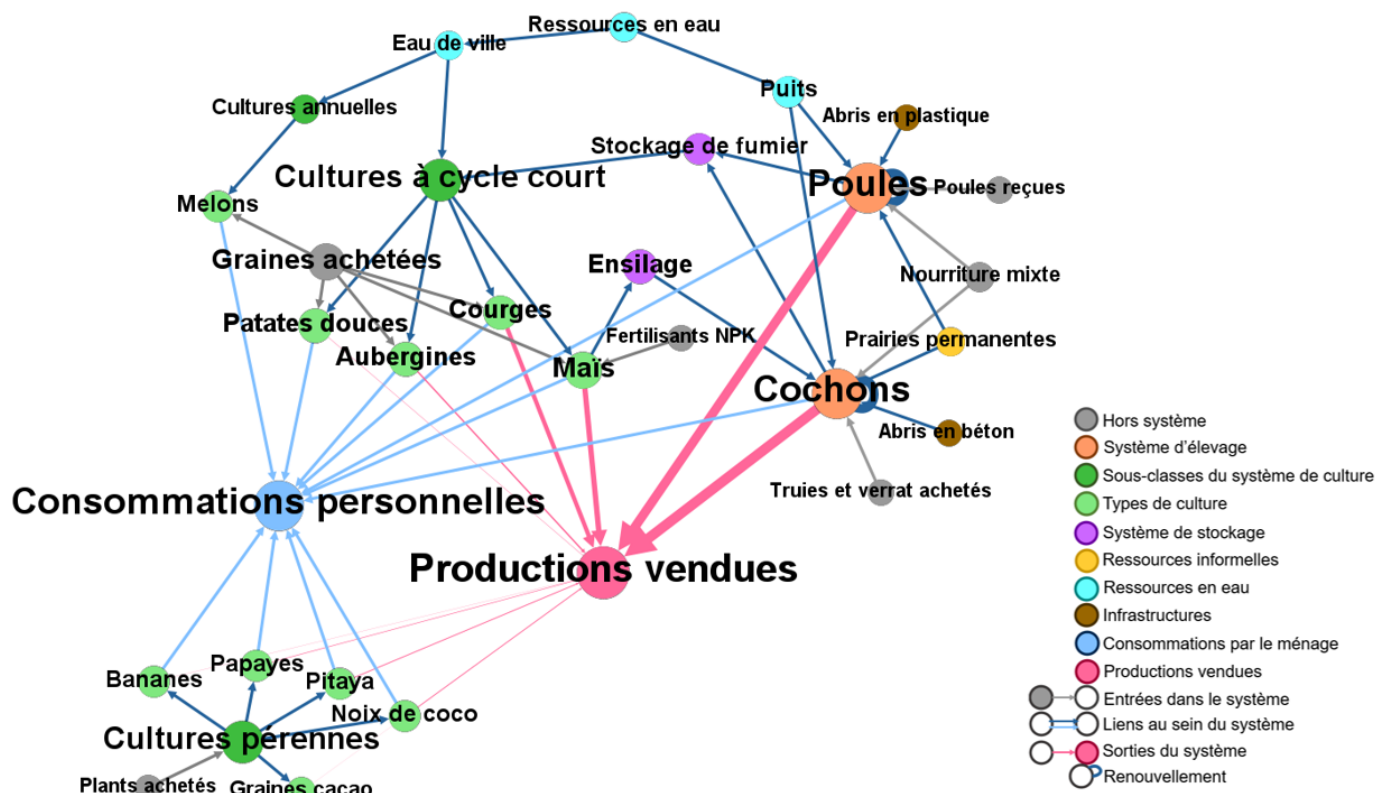


Figure 20 – Modèle du système agricole de l'exploitation n°5 en absence de dépôt de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi

Les Figures 21a, 21b et 21c illustrent les types de culture au sein des trois classes du sous-système de culture. Les cultures pérennes ne présentent aucune interaction avec des éléments internes du système tandis que les cultures à cycle court et annuelles sont dépendantes des ressources en eau de l'exploitation. Les cultures à cycle court, quant à elles, interagissent avec le sous-système de stockage à deux niveaux (Figures 22a et 22b). D'une part, elles dépendent du stockage de fumier, qui est utilisé pour la fertilisation de toutes ces cultures. D'autre part, le maïs sert notamment à la production d'ensilage au sein de l'exploitation n°5, destiné à la consommation des cochons : ainsi, le maïs est l'un des nœuds qui relie les sous-systèmes de culture et d'élevage (Figure 20). Il faut également noter que la culture de maïs est la seule qui dépend d'un apport de fertilisants provenant de l'extérieur du système (nœud "Fertilisants NPK"), NPK correspondant à la composition des fertilisants, à savoir, nitrates (N), phosphore (P) et de potassium (K).

Le système d'élevage est mis en évidence dans les Figures 23a et 23b. Tant l'élevage de cochons que celui des poules présentent de nombreuses interactions avec les autres sous-systèmes du système agricole. Parmi les éléments au sein du système, les cochons et les poules sont dépendants des prairies permanentes et des bâtiments dans lesquels ils sont gardés. Les cochons dépendent également de l'ensilage produit à partir du système de culture à cycle court (Figure 22a). L'élevage de poules et de cochons est également un élément important pour les cultures à cycle court grâce au stockage de leurs déjections et donc à la production d'engrais (Figure 22b).

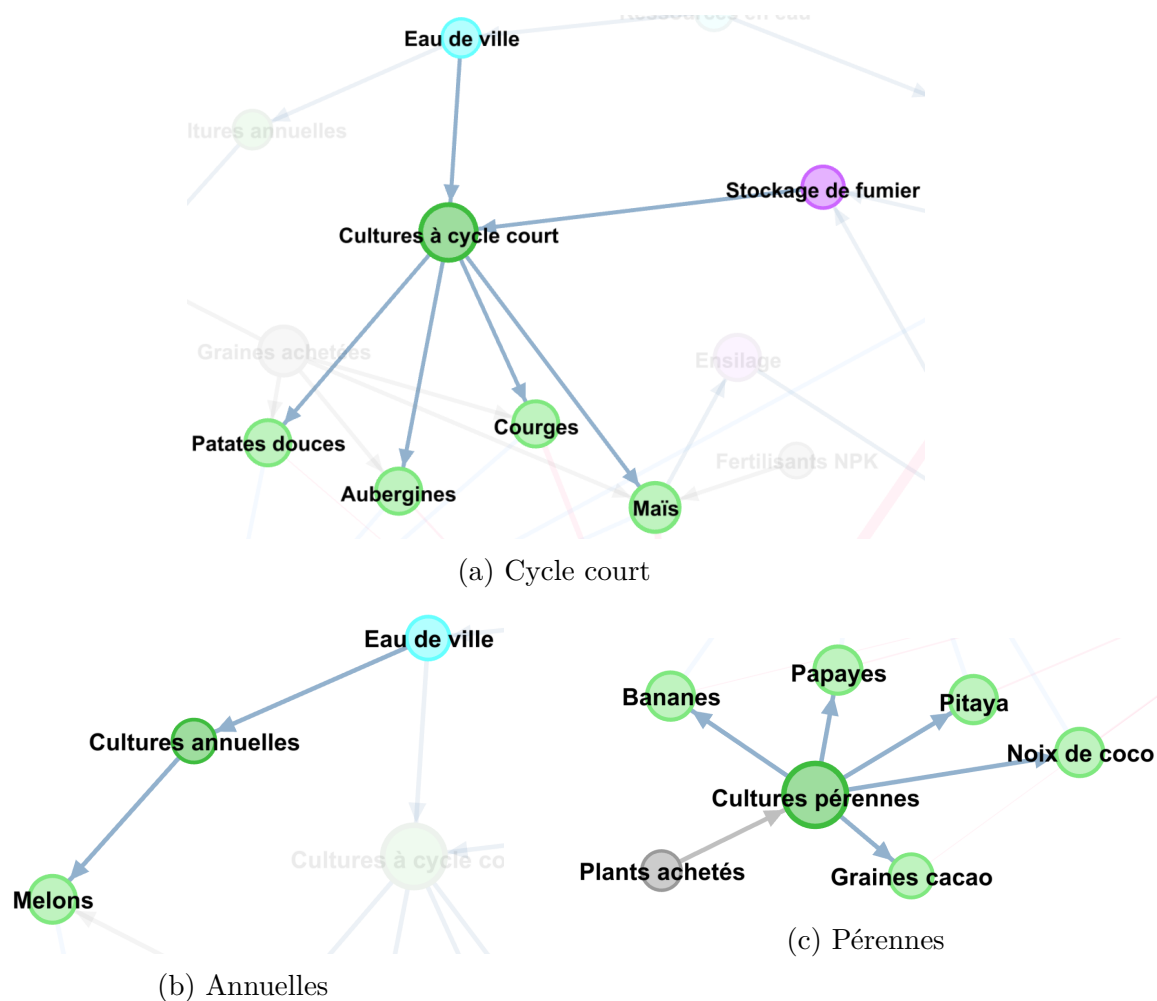


Figure 21 – Mise en évidence des éléments du sous-système de culture du modèle de l'exploitation n°5, comprenant des cultures à cycle court (a), annuelle (b) et pérennes (c), et de leurs interactions directes au sein du système agraire réalisé avec Gephi

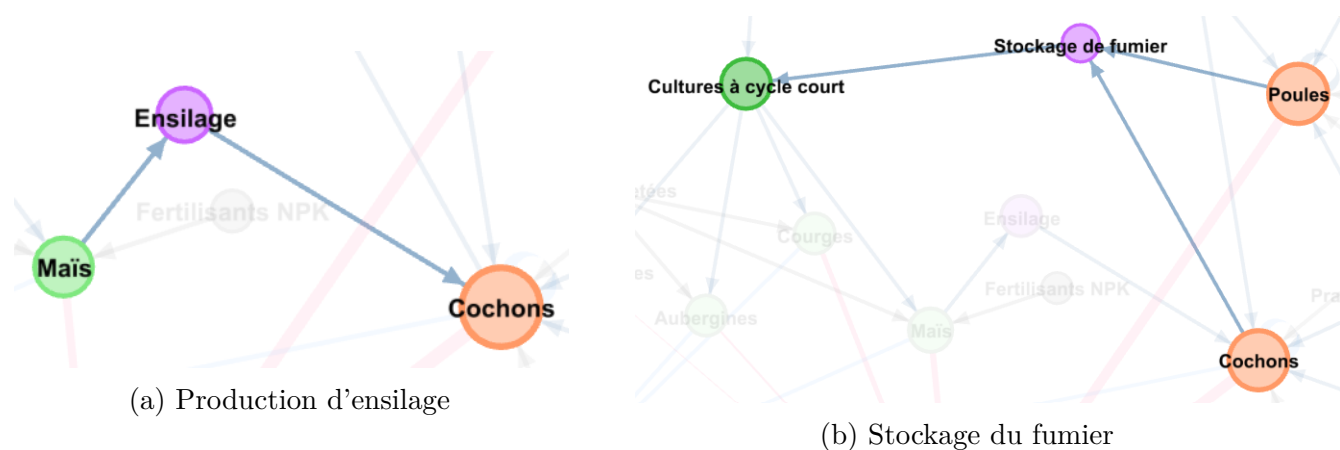
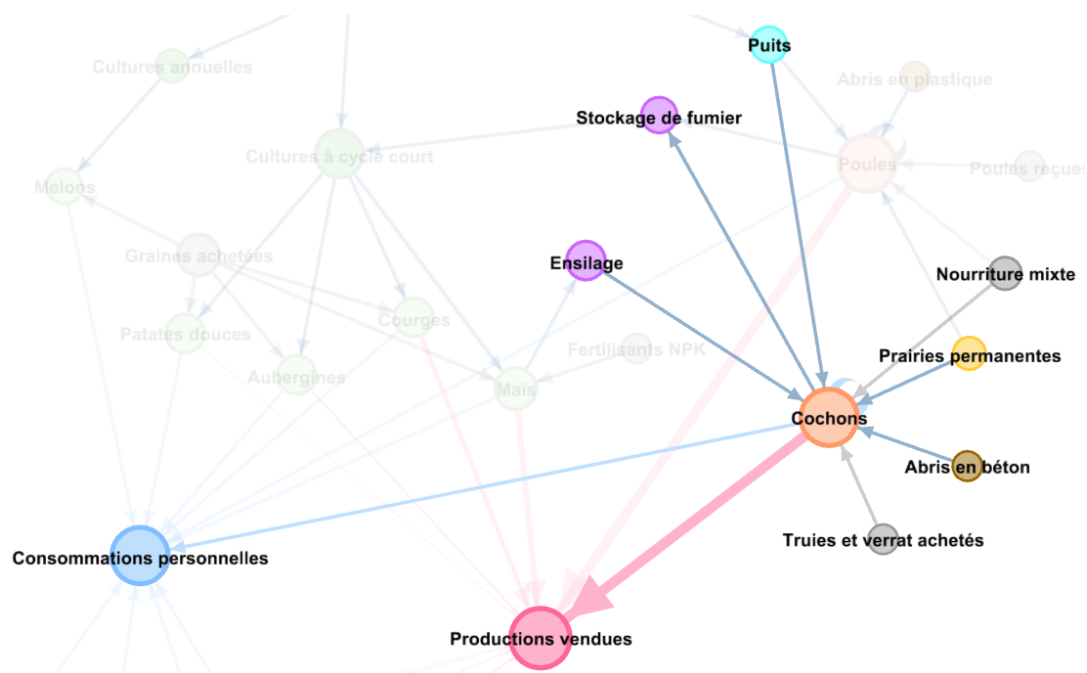
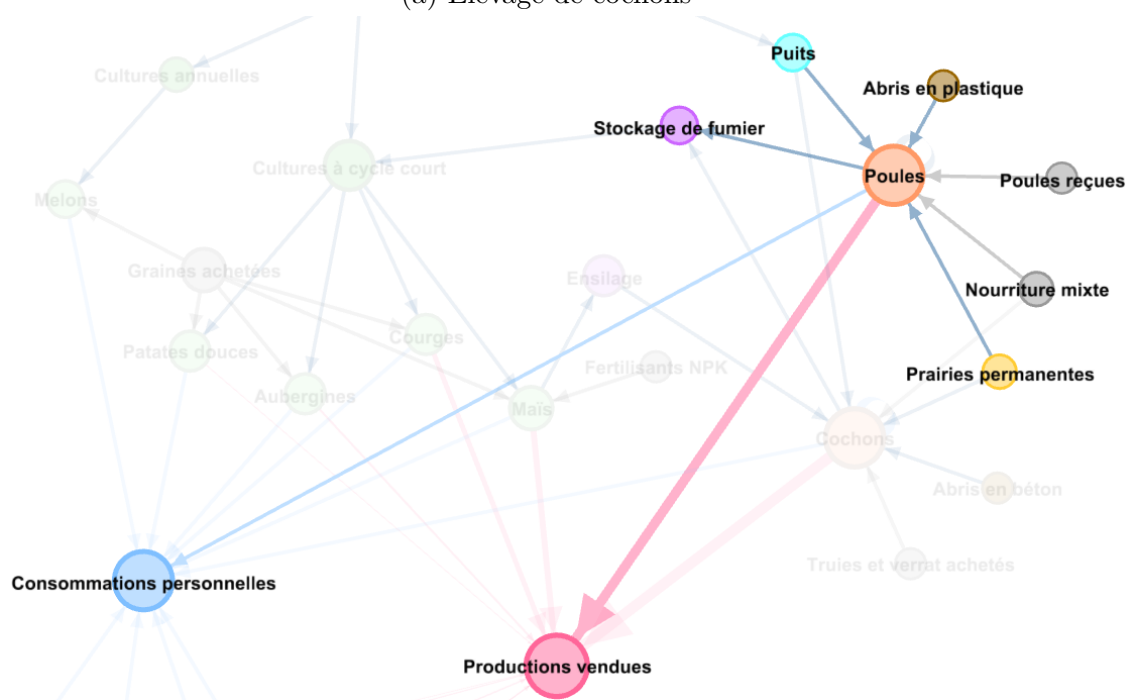


Figure 22 – Mise en évidence des sous-systèmes de stockage du modèle de l'exploitation n°5, comprenant la production d'ensilage (a) et le stockage de fumier (b), et de leurs interactions directes au sein du système agraire réalisé avec Gephi



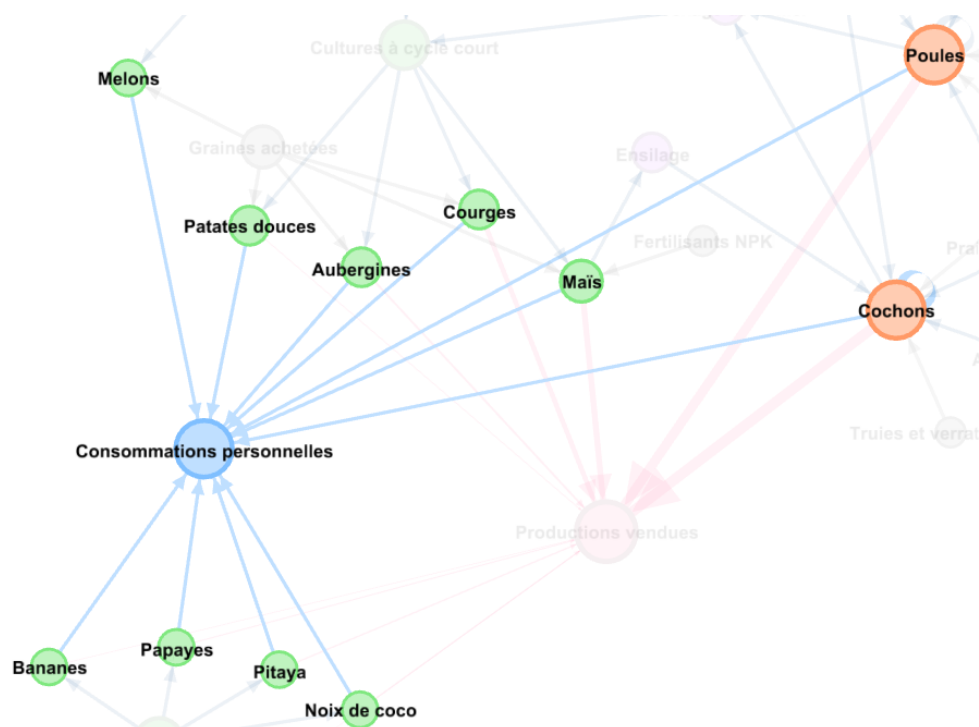
(a) Élevage de cochons



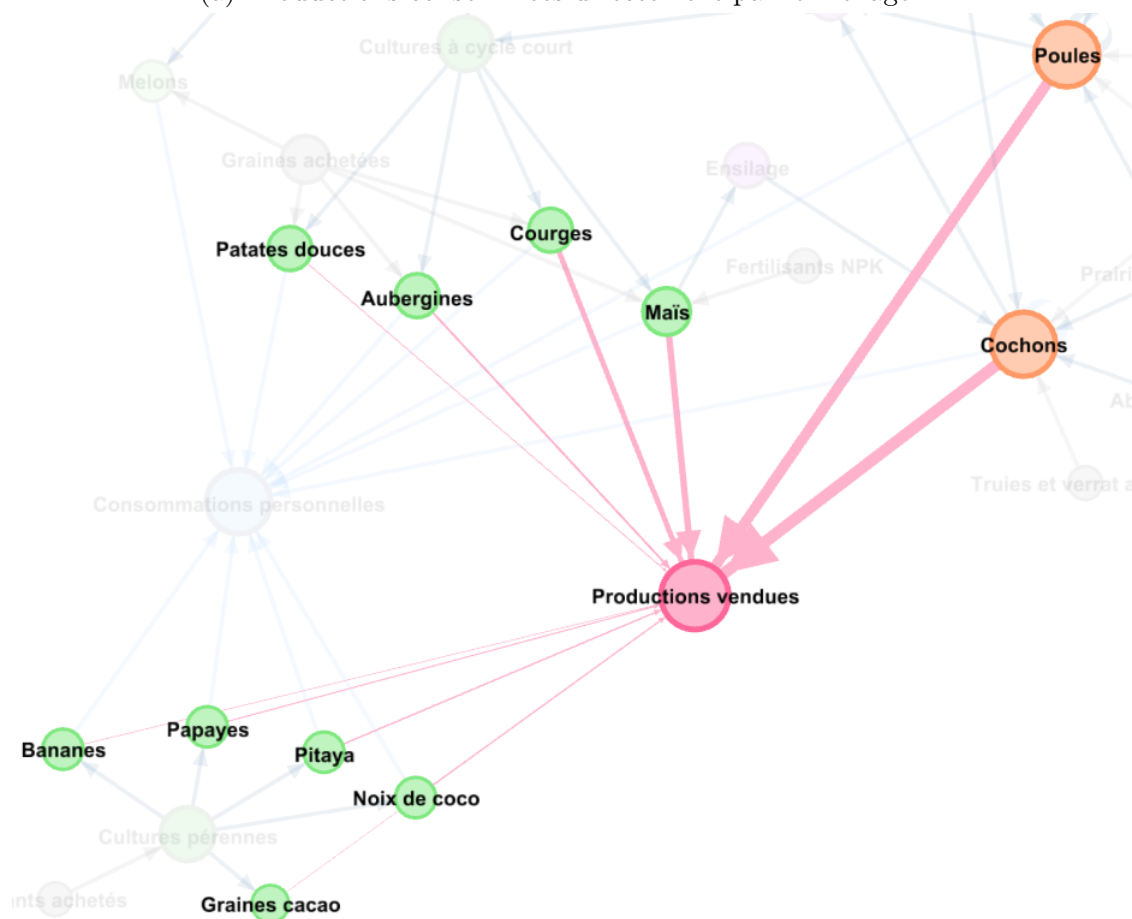
(b) Élevage de poules

Figure 23 – Mise en évidence des éléments du sous-système d'élevage du modèle de l'exploitation n°5, comprenant des cochons (a) et des poules (b), et de leurs interactions directes au sein du système agraire, réalisé avec Gephi

Toutes les productions de la ferme sont destinées à la vente, à la consommation personnelle du ménage, ou aux deux. En effet, comme le montre la Figure 24b, toutes les cultures, hormis celle du melon, ainsi que tous les animaux élevés sont en partie vendus et génèrent un profit. Cependant, une petite partie de chaque production, en ce compris la totalité des melons, reste dans le système et est consommée par le ménage directement (Figure 24a).



(a) Productions consommées directement par le ménage



(b) Productions vendues ; l'épaisseur des lignes illustre la participation relative de chaque production aux revenus totaux de l'exploitation

Figure 24 – Mise en évidence des productions végétales et animales du modèle de l'exploitation n°5, destinées à la consommation personnelle (a) et à la vente (b), réalisé avec Gephi

Scénario 1 : Quantification des impacts sur le système agricole n°5 suite à un dépôt de 5 mm de téphra

Dans ce premier scénario, représenté à la Figure 25, il a été considéré que l'exploitation n°5 est exposée à un dépôt de téphra d'une épaisseur de 5 mm. Afin de faciliter la visualisation des impacts directs d'une retombée de téphra sur l'exploitation n°5, seuls les nœuds subissant cet impact direct ont été mis en évidence. Le reste du modèle apparaît en arrière-plan, subissant des dommages indirects après un dépôt de téphra. Des impacts d'une sévérité très faible (1 à 5% de pertes) sont estimés sur les actifs de l'ensemble des sous-classes du système de culture, sur la production des patates douces, sur les poules et les cochons ainsi que sur leurs abris. Les différentes cultures pérennes subissent toutes des impacts moyens (de 20 à 35% de pertes) alors que les diverses cultures à cycle court, hormis les patates douces, ainsi que la culture de melons sont touchées par de forts impacts (de 90 à 100% de pertes). Tout comme pour l'exploitation n°1, l'impact sur les ressources en eau n'est pas quantifié.

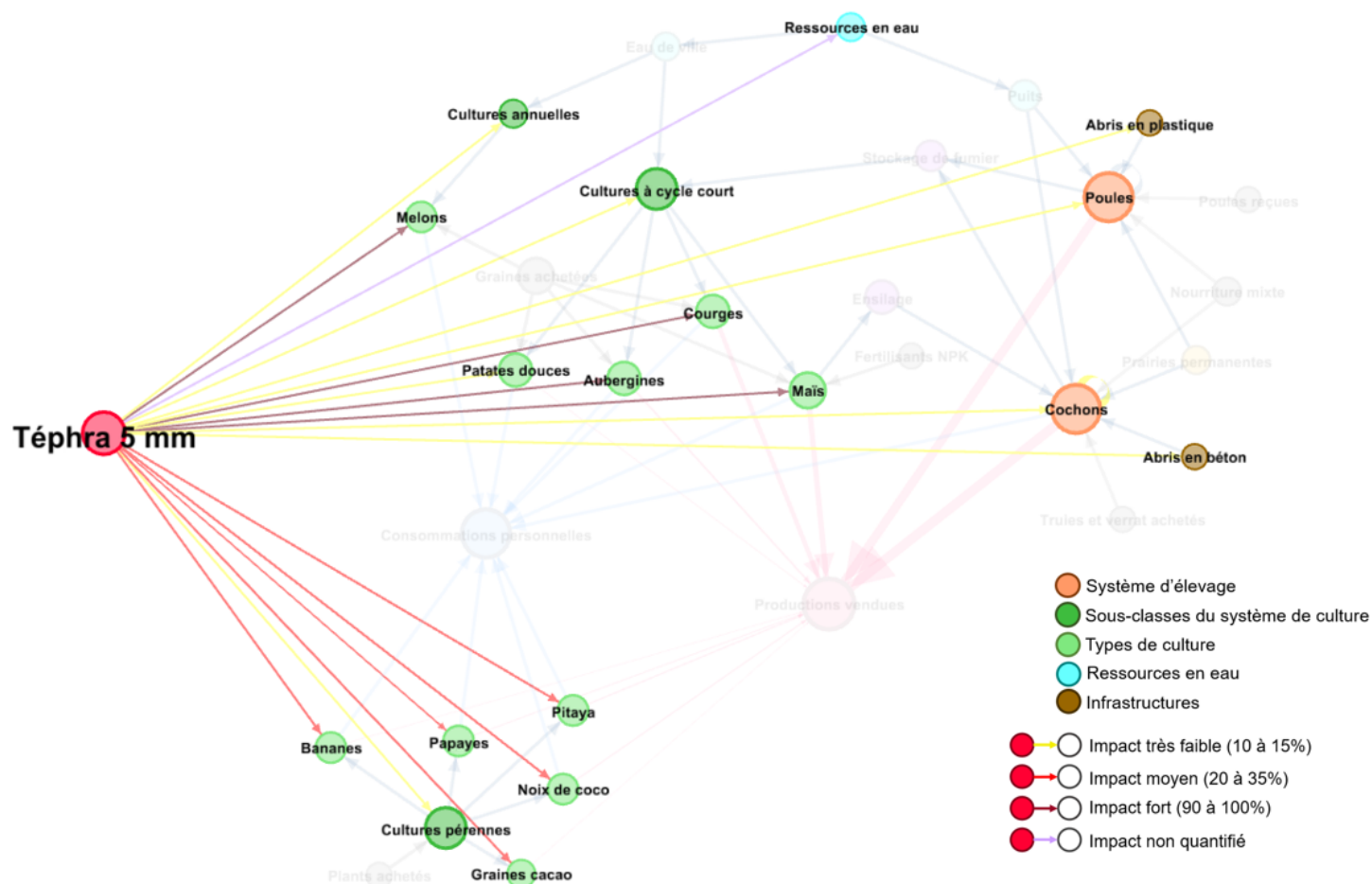
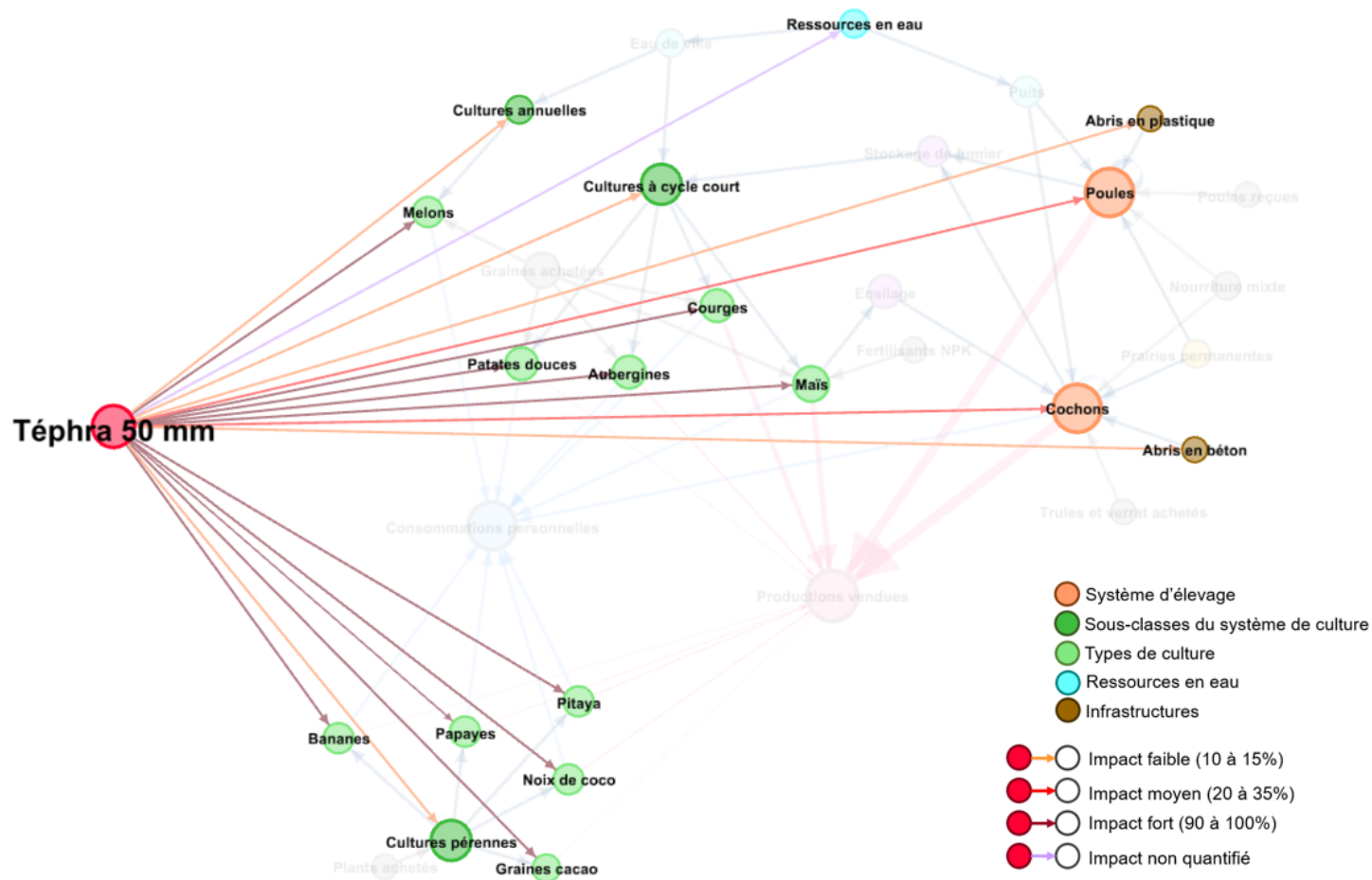


Figure 25 – Modèle du système agricole de l'exploitation n°5 et de la sévérité des impacts sur cette exploitation suite à un dépôt de cinq millimètres de téphra, réalisé avec le logiciel Gephi

Scénario 2 : Quantification des impacts sur le système agraire n°5 suite à un dépôt de 50 mm de téphra

La Figure 26 présente la sévérité des impacts face à un dépôt de 50 mm de téphra, comme dans le scénario n°1, seul ce qui est directement impacté est mis à l'avant-plan. Les impacts sont plus importants pour les actifs de toutes les sous-classes du système de culture et les actifs du système d'élevage (abris) qui passent d'impacts très faibles (1 à 5% de pertes) à faibles (10 à 15% de pertes). Les poules et les cochons, pour lesquels les impacts subis étaient aussi considérés de sévérité très faible, subissent désormais des impacts de sévérité moyenne (de 20 à 35% de pertes). Lors d'un dépôt de 50 mm, toutes les productions de cultures sont désormais impactées fortement (de 90 à 100% de pertes).



5.2.3 Quantification des pertes sur les productions et sur les actifs

Une fois la modélisation des impacts réalisée et d'après les niveaux d'impact tels qu'évaluées par Wilson et al. (2007), il est possible de procéder aux calculs des pertes sur les productions végétales et animales des exploitations n°1 et 5 suite à un dépôt de téphra. Ces pertes ont été calculées pour chaque type de production sur base d'impact direct des téphra sur l'élément en question pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra (Tables 10 et 12).

En ce qui concerne les pertes en actifs associées aux cultures saisonnières, elles sont négligeables par rapport aux pertes de leurs productions, il a donc été considéré comme superflu de les calculer. Dès lors, seules les pertes d'actif des cultures pérennes ont été déterminées. Celles-ci ont été calculées sur base des équations 4 et 5 et sont présentées aux Tables 11 et 13. Lorsque des actifs de culture pérenne, c'est-à-dire des arbres matures et producteurs, sont perdus, il est important de pouvoir déterminer le laps de temps pendant lequel cette perte va affecter la production de la ferme, et donc ses revenus. C'est pourquoi, il est nécessaire de se pencher sur la question du renouvellement d'un verger affecté par une retombée de téphra. Différentes hypothèses ont été faites sur le temps nécessaire aux arbres pour passer du stade de plantule au stade mature capable de produire des fruits. Puisque les valeurs varient selon les variétés et également selon les conditions climatiques, une valeur moyenne a été choisie pour chacune des cultures. Les bananiers requièrent entre neuf et quinze mois pour atteindre leur maturité (Cayla, 2021), les cocotiers entre quatre et six ans (Degnan, 2018), les jacquiers environ quatre ans (Yule, 2022), les papayers entre sept et onze mois (Albert, 2022), les pitayas environ un an (Harrington, 2018) et enfin les cacaoyers cinq ans en moyenne (Gilmore, 2022).

Dans cette étude, les pertes d'actifs sur les infrastructures n'ont pas été calculées. En effet, les valeurs théoriques des pourcentages de perte fournies par l'étude de Wilson et al. (2007) ne sont pas appropriées à la situation aux Philippines puisque celles-ci concernent des infrastructures liées à la production laitière et des bâtiments pour les animaux ayant une résistance plus élevée que ceux rencontrés aux Philippines. Il est donc probable que des dépôts de téphra de 5 et 50 mm engendreraient dans la région du Taal des pertes plus élevées que celles prédites. Cependant, il est impossible de les calculer quantitativement en raison du manque de données théoriques et d'informations de terrain. De fait, aucune information sur le prix de construction des bâtiments ni sur leur taux de renouvellement n'a été fournie.

5.2.3.1 *Exploitation n°1*

Dans le cas de l'exploitation n°1, tous les impacts sont des impacts directs, à l'exception de celui sur les ressources en eau, qui affecte le système d'élevage. Cependant, cet impact n'a pas pu être quantifié.

En termes de quantité, les productions baissent de 22 à 76% suite à des dépôts respectivement de 5 mm et 50 mm alors que les revenus de l'exploitation, eux ne chutent que de 3 à 22% par rapport à la situation d'équilibre (Table 10). En effet, parmi les cinq productions de l'exploitation n°1, les trois produits mis en vente sont ceux qui présentent la plus faible vulnérabilité au téphra. Cependant, ces pertes sont des pertes brutes. Or, puisqu'en situation d'équilibre les charges liées à l'élevage de cochons (99% des charges totales) sont déjà supérieures au revenu brut que l'exploitation en tire, une perte de revenus bruts de 3% aggraverait dès lors fortement l'économie de la ferme. En supposant que les charges totales restent inchangées (623600 pesos/an) et que les revenus liés aux activités secondaires de l'exploitation soient maintenus (360 000 pesos/an), les revenus nets usuels de 338 000 pesos/an, chuteraient à 322 608 pesos/an lors d'un dépôt de 5 mm et à 208 080 pesos/an lors de 50 mm de dépôts soit une perte de 4,5 à 38%. De plus, la perte des productions consommées par le ménage engendre des coûts supplémentaires dûs à l'achat de nourriture pour atteindre ce même niveau de consommation.

Table 10 – Quantification des pertes directes sur les productions de l’exploitation n°1 suite à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm

Exploitation		Etat d’équilibre		Scénario 5 mm			Scénario 50 mm		
Catégorie	Type	Productions		Pertes			Pertes		
		kg/an	pesos/an	%	kg/an	pesos/an	%	kg/an	pesos/an
Cultures pérennes	Bananes	600	-	30	180	-	100	600	-
	Noix de coco	4800	12000	30	1440	3600	100	4800	12000
	Jacques	37,5	-	30	11,25	-	100	37,5	-
Élevage	Porcelets	330	154000	2	6,6	3080	20	66	30800
	Cochons engraisés	1980	435600	2	39,6	8712	20	396	87120
Total		7747,5	601600		1677,45	15392		5899,50	129920
Perte totale (%)					21,7	2,6		76,1	21,6

La perte d’actifs sur les cultures pérennes engendre des pertes à plus ou moins long terme en fonction du temps nécessaire à l’espèce pour atteindre son stade de maturité, capable de produire, à partir du stade de graine ou de plantule. Bien que les jacquiers et les cocotiers aient un temps de renouvellement semblable, respectivement de quatre et cinq ans, les pertes en termes de quantité sont bien plus importantes pour la culture de noix de coco, ceci notamment dû au fait que la productivité des cocotiers est cinq fois plus élevée que celle des jacquiers. En termes de perte de revenus directs, les noix de coco, étant la seule culture vendue, entraînent des pertes de 1 800 pesos réparties sur cinq ans, soit 360 pesos/an lors d’un dépôt de 5 mm et cinq fois plus élevées, soit de 9 000 pesos répartis sur cinq ans, lors de dépôt de 50 mm (Table 11). Des coûts supplémentaires sont à envisager suite à l’achat de nouveaux plants de cocotiers et des jacquiers afin de remplacer les arbres perdus. De tels coûts ne sont pas ajoutés en ce qui concerne les bananiers en raison de leur renouvellement aisé par multiplication végétative.

Table 11 – Pertes d’actifs sur les cultures pérennes de l’exploitation n°1 suite à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm

	Cultures permanentes		
	Bananiens	Cocotiers	Jaquiers
Production (kg/an)	600	4800	37,5
Production (pesos/an)	-	12000	-
Nombre d’arbres initialement	50	50	2
Production par arbre (kg/an/arbre)	12	96	18,75
Production par arbre (pesos/an/arbre)	-	240	-
Temps de renouvellement (an)	1	5	4
Pourcentage de perte sous 5 mm (%)	3	3	3
Nombre d’arbres perdus	1,5	1,5	0,06
Productions perdues (kg)	18	720	4,5
Productions perdues (pesos)	-	1800	-
Pourcentage de perte sous 50 mm (%)	15	15	15
Nombre d’arbres perdus	7,5	7,5	0,3
Productions perdues (kg)	90	3600	22,5
Productions perdues (pesos)	-	9000	-

5.2.3.2 Exploitation n°5

Les pertes sur les productions de l'exploitation n°5 sont présentées à la Table 12. Lors d'un dépôt de 5 mm de téphra, une diminution de 62% des productions est attendue, due essentiellement aux pertes sur les cultures, à raison de 99%. Les pertes sur les revenus bruts, de 38%, sont dues à 93% aux pertes sur les cultures contre 7% aux pertes sur l'élevage. Cette différence de pourcentages s'explique par le prix de vente au kg des productions animales, largement supérieur à celui des productions végétales. Si l'exploitation est touchée par 50 mm de téphra, les pertes en termes de quantité sont "colossales", soit de 94% en raison de la perte totale de la production de toutes les cultures qu'elles soient à cycle court, annuelles ou pérennes, à l'exception des patates douces dont la perte est de 90%. La perte sur les revenus bruts totaux serait de 62%, dont 74% dûs aux pertes sur les cultures et 26% sur l'élevage. Cependant, puisqu'aucune information sur la répartition des charges entre le système de culture et d'élevage, à l'exception des dépenses associées à l'élevage de poules, n'a été obtenue, les calculs des revenus nets par production et totaux de l'exploitation sont impossibles.

Table 12 – Quantification des pertes directes sur les productions de l'exploitation n°5 suite à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm

Exploitation		Etat d'équilibre		Scénario 5 mm			Scénario 50 mm		
Catégorie	Type	Productions		Pertes			Pertes		
		kg/an	pesos/an	%	kg/an	pesos/an	%	kg/an	pesos/an
Cultures à cycle court	Courges	2880	129600	90	2592	116640	100	2880	129600
	Patates douces	420	8400	1	4,2	84	90	378	7560
	Maïs	8000	160000	90	7200	144000	100	8000	160000
	Aubergines	1179,429	44228,571	90	5609,354	124,616	100	6232,616	138,462
Culture annuelle	Melons	-	-	-	-	-	-	-	-
Cultures pérennes	Bananes	234	5850	30	70,2	1755	100	232	5850
	Papayes	756	18900	30	226,8	5670	100	756	18900
	Pitayas	467,5	28050	30	140,25	8415	100	467,5	28050
	Cacao	54,4	1632	30	16,32	489,6	100	54,4	1632
	Noix de coco	5241,6	26208	30	1572,48	7862,4	100	5241,6	26208
Élevage	Porcelets	330	154000	5	44,2	10800	30	265,2	64800
	Poules	939,6	274050	5	46,98	13702,5	30	281,88	82215
Total		21057	912919		12974,9	349224		19738	569044
Perte totale (%)					61,6	38,3		93,7	62,3

Néanmoins, cette première quantification des pertes de production de l'exploitation n°5 ne tient compte que des impacts directs d'un dépôt de téphra sur les différents éléments du système, et non des interactions entre ces éléments. Les pertes réelles, lorsque l'on considère ces interactions en plus du simple dépôt, sont plus complexes et à revoir à la hausse. En effet, l'élevage de cochons est dépendant de l'ensilage (Figure 22a) apporté par la culture du maïs mais les cultures à cycle court sont également dépendantes de l'engrais créé à partir des déjections animales (Figure 22b). Des pertes sur l'un des éléments de la chaîne aura donc des répercussions sur toute la chaîne.

En ce qui concerne les pertes sur les actifs de l'exploitation n°5 (Table 13), elles sont les plus élevées sur les cultures de noix de coco et s'élèvent à 3 931,2 et 19 656 pesos répartis sur 5 ans lors d'un dépôt de 5 et 50 mm respectivement. Les bananiers sont les arbres pour lesquelles les pertes, en termes de

quantité et de revenus, sont les moins élevées. En effet, le taux de renouvellement des bananiers est très court mais leur taux de productivité est également très faible.

Table 13 – Pertes d’actifs sur les cultures pérennes de l’exploitation n°5

	Cultures permanentes				
	Bananiers	Papayes	Pitayas	Cacaoyers	Cocotiers
Production (kg/an)	234	756	467,5	54,4	5241,6
Production (pesos/an)	5850	18900	28050	1632	26208
Nombre d’arbres initialement	200	15	55	27	18
Production par arbre (kg/an/arbre)	1,17	50,4	8,5	2,015	291,2
Production par arbre (pesos/an/arbre)	29,25	1260	510	60,44	1456
Temps de renouvellement (an)	1	0,75	1	5	5
Pourcentage de perte sous 5 mm de téphra (%)	3	3	3	3	3
Nombre d’arbres perdus	6	0,45	1,65	0,81	0,54
Productions perdues (kg)	7,02	17,01	14,025	8,16	786,24
Productions perdues (pesos)	175,5	425,25	841,5	244,8	3931,2
Pourcentage de perte sous 50 mm de téphra (%)	15	15	15	15	15
Nombre d’arbres perdus	30	2,25	8,25	4,05	2,7
Productions perdues (kg)	35,1	85,05	70,125	40,8	3931,2
Productions perdues (pesos)	877,5	2126,3	4207,5	1224	19656

6 Discussion

Les retombées de téphra, engendrées par une éruption volcanique, provoquent des dégâts importants dans de multiples secteurs tels que celui de la santé publique, des transports, de l’agriculture ou encore de l’économie, comme l’évoque notamment l’étude de S. Jenkins et al. (2015). Lors de l’éruption du Taal en janvier 2020, la valeur des dommages dans le secteur de l’agriculture, évaluée à 3,06 milliards pesos par le Département de l’Agriculture philippin, témoigne des pertes colossales subies par ce secteur. Les deux scénarios considérés dans notre étude, envisageant un dépôt de téphra de 5 et 50 mm respectivement, tentent de quantifier cette vulnérabilité de l’agriculture au travers de l’évaluation des pertes de production, en termes de quantité et de revenus, et ce, en adoptant une approche systémique.

6.1 Évaluation de la vulnérabilité de l’exploitation n°1

L’exploitation n°1 présente un système agraire constitué d’un sous-système de culture, composé uniquement de cultures pérennes (cocotiers, bananiers et jaquiers) et d’un sous-système d’élevage de cochons. Ces deux sous-systèmes sont complètement indépendants l’un de l’autre (Figure 17). Le système d’élevage de cette exploitation est fortement dépendant d’intrants extérieurs (nœuds gris) en termes d’alimentation, de produits vétérinaires ou d’achat de nouveaux animaux reproducteurs. Cependant, dans un système à l’équilibre, la dépendance vis-à-vis de l’achat de mères reproductrices devrait disparaître puisque leur renouvellement est assuré par la sélection de porcelets ayant de bonnes dispositions pour les remplacer. Le système de culture est presque indépendant d’intrants extérieurs. En effet, l’achat des bananiers a été indispensable pour commencer la production mais ne sera plus nécessaire en raison du renouvellement des bananiers par multiplication végétatives, à partir des

repousses sur les plants déjà présents. En outre, la Figure 17 met aussi en avant l'importance de la production de cochons engraisés dans les revenus annuels de l'exploitation puisqu'elle génère, à elle seule, 72% des revenus totaux annuels bruts soit 435 600 pesos. La vente de porcelets ne participe qu'à 26% des revenus totaux et celle des noix de coco, la seule culture vendue, à 2% seulement.

6.1.1 Pertes sur les productions

Lors d'un dépôt de téphra de 5 mm, les pertes de 3% sur le revenu total annuel brut de l'exploitation sont à 77% dues aux pertes de production sur l'élevage. En effet, malgré que les pourcentages de perte de productions sur les cultures pérennes et sur l'élevage de cochons soient respectivement de 30% et 2%, l'importance de la vente des cochons est telle que les 2% de pertes génèrent trois fois plus de pertes de revenus que les 30% de pertes sur la vente des noix de coco. Ce constat est d'autant plus marqué pour un dépôt de 50 mm de téphra. En effet, dans ce cas, les pertes de revenus totaux annuels bruts par rapport à la situation d'équilibre passent à 22%, dont 91% sont attribuables aux pertes sur les productions de l'élevage, alors que le pourcentage de pertes de celles-ci ne sont que de 20%. Les pertes sur la vente de noix de coco ne contribuent donc qu'à raison de 9% aux pertes de revenus de l'exploitation alors que la totalité de la production est perdue. Cette quantification des pertes permet donc de mettre en évidence l'importance d'étudier la vulnérabilité de l'ensemble du système agraire et non uniquement celle de ses composantes isolées les unes des autres. Elle appuie également l'un des principes de systémique énoncé par von Bertalanffy : "Un système est plus que la somme de ses parties" (Bertalanffy, 1950).

L'étude réalisée par Wilson et al. (2007), sur base des pourcentages de pertes de production sur les cultures et sur l'agriculture pastorale suite à des retombées de téphra, pointe vers une vulnérabilité des productions des cultures pérennes plus élevée que sur celle de productions liées à l'élevage des cochons. Cependant, en évaluant la vulnérabilité de l'exploitation sous un angle systémique, il en ressort que la vulnérabilité du système agraire découle de la vulnérabilité de son sous-système d'élevage et non de son sous-système de culture. Il est important de rappeler que ces constatations sont faites en considérant que la vulnérabilité puisse être évaluée sur base des pertes de revenus bruts. De plus, les conclusions tirées doivent être nuancées puisque des revenus bruts élevés ne correspondent pas toujours à des revenus nets élevés. En effet, la vente des porcelets, et particulièrement des cochons engraisés, génère un revenu brut important. Cependant, la valeur des charges est telles que celles-ci sont supérieures aux revenus bruts, la production de cochons étant donc à pertes. La vente des cochons rapporte 589 600 pesos par an alors que les charges s'élèvent à 617 600 pesos par an, engendrant donc une perte de 28 000 pesos chaque année et justifiant alors la nécessité pour les propriétaires d'exercer une activité secondaire. Malgré le revenu net lié à la vente des noix de coco (soit de 6 000 pesos par an), celui-ci ne permet pas de contrebalancer les pertes du sous-système d'élevage. Dans ce cas précis, l'analyse appuie le fait que la vulnérabilité du système agraire repose sur la vulnérabilité du sous-système d'élevage puisque celui-ci génère déjà une perte de revenus nets en absence de téphra. De plus, les charges étant composées de coûts fixes et variables, il est fort probable que lors d'une diminution de production, la proportion des dépenses dans les revenus nets augmente en raison du poids plus important des coûts fixes par rapport à l'ensemble des dépenses. Par exemple, le coût de l'éclairage d'un bâtiment des cochons ne changera pas qu'il soit occupé par dix ou deux cochons.

Néanmoins, puisque les seuls revenus nets positifs proviennent de la vente de noix de coco, une perte sur celle-ci entraîne des complications budgétaires importantes pour l'exploitation, augmentant alors la vulnérabilité du système agricole en raison de la vulnérabilité sur les cultures. De plus, les pertes de production sur les cultures destinées à la consommation personnelle ne sont pas reprises dans les calculs de revenu, mais il est certain qu'elles entraînent des coûts supplémentaires car une quantité nutritionnelle équivalente à une perte d'environ 200 kg et 600 kg de fruits, respectivement pour des dépôts de 5 et 50 mm, nécessite d'être compensée par des achats.

6.1.2 Pertes sur les actifs

En ce qui concerne les pertes d'actifs de l'exploitation n°1, elles ont uniquement pu être quantifiées sur les cultures pérennes et non sur les infrastructures liées à l'élevage. Suite à un dépôt de téphra de 5 mm, 3% des arbres fruitiers seront perdus, correspondant, en moyenne, à une perte de 1,5 bananiers, de 1,5 cocotiers et de moins d'un jacquier. Les pertes, en termes de revenus, sur la production des noix de coco sont alors de 1 800 pesos répartis sur cinq ans, soit de 360 pesos par an. De plus, le revenu brut de la vente de noix de coco chutant à 8 400 pesos par an lors d'une épaisseur de 5 mm de téphra et en supposant que les charges de 6000 pesos par an restent inchangées par rapport à la situation d'équilibre, l'addition de la perte d'actifs et de productions sur les noix de coco génère un revenu net de 2 400 pesos par an au lieu des 6 000 pesos attendus. Cependant, si la productivité des arbres n'est pas affectée les quatre années suivantes, ce revenu net sur les noix de coco sera de 5 640 pesos soit seulement une baisse de 6% par rapport à la situation d'équilibre.

Lors de retombées de téphra de 50 mm d'épaisseur, les pertes d'actifs sont cinq fois plus élevées que lors d'un dépôt de 5 mm, entraînant donc la perte de cinq fois plus d'arbres. Les pertes d'actifs sur les noix de coco sont évaluées à 9 000 pesos répartis sur cinq ans, soit 1 800 pesos par an. Dans ce cas, puisque la totalité de la production de noix de coco est perdue, et en considérant que les charges soient toujours de 6 000 pesos, un revenu net négatif de 7 800 pesos est attendu la première année et devrait revenir positif, à raison de 4 200 pesos par an les quatre années suivantes. Dans les deux scénarios, la considération de charges constantes de 6 000 pesos permet d'évaluer la pire situation possible vis-à-vis de celles-ci. Il faut toutefois noter que des coûts supplémentaires doivent être envisagés afin de renouveler les arbres perdus. Cependant, ces pertes de revenus et ces coûts de renouvellement restent très faibles comparées à ceux attendus sur les productions de cochons. De plus, les pertes sur les cultures pérennes ont certainement été surestimées. En effet, les noix de coco sont récoltées quatre fois par an, il est donc possible que seule la production d'une des récoltes a été affectée et que les suivantes puissent toujours être réalisées malgré une perte de productivité possible.

En raison de valeurs théoriques non applicables à la situation aux Philippines dans la région du Taal, aucune perte sur les infrastructures n'a été évaluée. Cela ne veut pas pour autant laisser supposer que ces pertes peuvent être négligées.

6.1.3 Comparaison avec la réalité de terrain

Les agriculteurs ont subi des chutes de téphra lors de l'éruption du volcan Taal le 12 janvier 2020. Le dernier volet du questionnaire d'enquête traite des conséquences des retombées de téphra sur les

exploitations des agriculteurs interrogés (Annexe 20). Cette démarche permet, dans une certaine mesure, de confronter les estimations des pertes avec la réalité de terrain.

L'estimation de l'épaisseur de téphra suite à l'éruption du Taal en janvier 2020 sur l'exploitation n°1 est réalisée en confrontant la carte d'isopaques de téphra autour du Taal (Figure 3) avec la carte localisant les exploitations (Figure 13). Sur cette base, une estimation grossière permet d'évaluer une épaisseur du dépôt comprise entre 5 et 15 mm.

Sous cette épaisseur, les propriétaires déclarent qu'ils ne furent pas capables de récolter leurs cultures pérennes durant une année après l'éruption. Avant l'éruption, l'exploitation possédait cent cochons. Cependant, le poids des téphra ainsi que leur effet corrosif a endommagé et cassé le toit de la porcherie. De ce fait, les cochons furent exposés aux téphra qui provoqua la mort de plus de la moitié des porcelets. De plus, les porcelets rescapés s'engraissaient lentement et les mères ne donnaient pas naissance à des porcelets sains.

Les pertes sur les productions sont donc plus sévères que celles envisagées dans les deux scénarios. Il a été évalué qu'un dépôt de 50 mm est nécessaire pour perdre 100% des productions des cultures pérennes, or, il ne suffit que d'un dépôt estimé entre 5 et 15 mm pour observer de telles pertes. Ce constat est d'autant plus marqué au niveau de la production de l'élevage. Quant aux dégâts sur les cochons énoncés-ci dessous, il est clair que ceux-ci provoquent des pertes de productions largement supérieures à 2 ou 20%. Au niveau des pertes sur les actifs de culture, seule l'incapacité de récolter pendant une année a été mentionnée sans précision si celle-ci est due à un affaiblissement des cultures, à la production de fruits invendables et/ou à la perte de certains arbres. Les dommages engendrés sur la porcherie et les répercussions sur les cochons confirment le fait que les pourcentages de pertes fournis par l'étude de Wilson et al. (2007) sur les actifs agricoles ne représentent pas la réalité des exploitations aux Philippines. En effet, ces pertes sont estimées à seulement 20% et ce, pour un dépôt de 70 mm, nettement plus élevé que celui estimé sur l'exploitation n°1.

Le passage d'un élevage de 100 cochons avant l'éruption à 10 lors de l'enquête n'est pas dû uniquement à l'éruption mais également à la peste porcine africaine, maladie très contagieuse et mortelle affectant les cochons, qui a touché l'élevage, encore affaiblis par l'éruption. Cependant, la description des impacts des retombées de téphra sur l'élevage de l'exploitation n°1 est suffisante pour confirmer les pertes importantes générées par les pertes de production sur les cochons et donc leur vulnérabilité importante face aux dépôts de téphra.

6.2 Évaluation de la vulnérabilité de l'exploitation n°5

L'exploitation n°5 présente le système agraire le plus complexe de toutes les exploitations visitées. Cette complexité est attribuable aux différents sous-systèmes qu'elle possède et aux nombreux liens reliant leurs éléments (Figure 20). La dépendance de l'exploitation aux intrants extérieurs est relativement faible. En effet, les apports extérieurs au système en ce qui concerne l'élevage ne comprennent que l'achat de cochons, les poules qu'ils ont reçues et l'achat d'une partie de la nourriture pour leurs animaux. Les autres intrants extérieurs, c'est-à-dire les graines, les plants et le fertilisant "NPK" sont destinés au sous-système de culture. De plus, tout comme pour l'exploitation n°1, dans

une situation à l'équilibre, le renouvellement des poules et des cochons se fait grâce à la reproduction de ceux-ci au sein du système, rendant le sous-système d'élevage uniquement dépendant au niveau de l'alimentation en ce qui concerne les intrants extérieurs.

Les sous-systèmes d'élevage et de cultures sont connectés entre eux via le sous-système de stockage (Figure 22). Les déjections des poules et des cochons sont compostées et utilisées comme engrais sur les cultures à cycles courts (maïs, patates douces, aubergines et courges) à raison de deux à trois kilogrammes par mètre carré au début de chaque cycle de culture. Un lien est établi dans l'autre sens, c'est-à-dire du sous-système de culture vers le sous-système d'élevage par le biais des résidus de maïs qui sont transformés en ensilage, destiné à l'alimentation des cochons, soit 5 kg par cochon et 0,5 kg par porcelet par jour. Le sous-système d'élevage est également dépendant des prairies permanentes, cependant celles-ci ne sont pas considérées comme un apport alimentaire en raison des faibles quantités de ressources disponibles sur celles-ci.

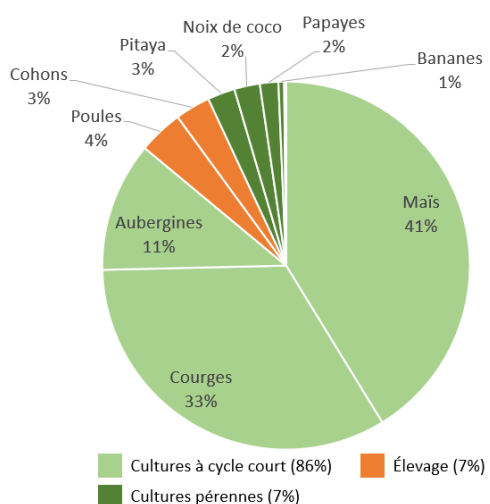
Tous les types de productions de l'exploitation sont destinés à la consommation personnelle du ménage et à la vente, à l'exception des melons dont leur consommation est uniquement réservée au ménage. La Figure 24b qui montre les proportions de revenus bruts de chaque production sur les revenus bruts totaux de l'exploitation permet de visualiser l'importance du sous-système d'élevage dans les revenus ainsi que celle de la culture de maïs et de courges au sein du sous-système de culture. Sur les 912 918,6 pesos de revenu annuel de l'exploitation, 54% sont générés par la vente de porcelets et de poules, dont 30% par celle des poules et 24% par celle des porcelets. Les 46% restants sont obtenus via la vente des cultures, les cultures à cycle court contribuant à 36% aux revenus bruts totaux contre 10% pour les cultures pérennes (Table 4). Cependant, ces chiffres d'affaires sont bien différents en termes de revenus nets. En considérant que les dépenses supportées par le sous-système d'élevage soient de 85% des revenus bruts, le revenu net annuel associé à l'élevage est estimé à 73507,5 pesos, soit 16% du revenu net annuel total de l'exploitation, chiffré à 450 000 pesos. Les cultures seraient donc responsables de 84% du revenu net annuel de l'exploitation alors que leurs charges ne seraient responsables uniquement de 10% des dépenses de l'exploitation. La marge bénéficiaire sur le sous-système de culture est donc bien plus élevée que celle du sous-système d'élevage.

6.2.1 Pertes directes sur les productions

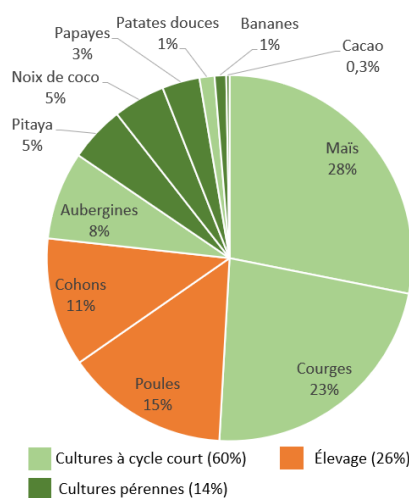
Lors d'un dépôt de 5 mm, les impacts sur les cultures à cycle court provoquent 90% de pertes sur les productions, à l'exception des patates douces qui ne perdent qu'1% de leur production. Les cultures pérennes sont moins impactées et présentent un pourcentage de perte de production de 30%. En effet, les cultures de légumes à feuilles (courges), fruitières non arboricoles (melons, aubergines) et de céréales (maïs) sont plus vulnérables aux retombées de téphra que les cultures fruitières arboricoles (cocotiers, bananiers, pitayas, jacquiers, papayers) ou que celles de légumes-racines (patates douces), comme l'illustrent les fonctions de fragilité proposées par (Craig et al., 2021) (Figure 9). La plus grande vulnérabilité des légumes à feuilles par rapport aux légumes-racines serait probablement due à leurs plus grandes surfaces comestibles exposées au téphra. En ce qui concerne les céréales, leur vulnérabilité est élevée en raison de la morphologie de la plante qui retient plus facilement les dépôts de téphra. Les cultures arboricoles sont moins vulnérables que les cultures horticoles, car la taille des

arbustes ou des arbres limitent le risque d'enfouissement par le téphra (Craig et al., 2021). Suite à un dépôt de téphra de 5 mm, les pertes de revenus bruts annuels de l'exploitation n°5 sont estimées à 324 722 pesos, expliquées à 80% par les pertes sur les productions de maïs et les courges. Lors d'un dépôt de 50 mm, toutes les productions de culture sont perdues, à l'exception des patates douces mais qui subissent quand même des pertes de 90%. Cela engendre une perte de revenu brut annuel sur le sous-système de culture de 422 029 pesos dont les pertes sur les cultures de maïs et de courges sont responsables à 69%. La proportion de pertes liées aux pertes sur les productions des maïs et de courges diminue en raison de l'impact sur les cultures pérennes qui passent de 30 à 100%, respectivement pour un dépôt de 5 et 50 mm de téphra. La production de noix de coco et de pitayas notamment, dont les pertes de revenus sur le sous-système de culture représentent respectivement 2% et 3% lors d'un dépôt de 5 mm, sont responsables de 6% et 7% des pertes sur l'ensemble du sous-système de culture lors de 50 mm d'épaisseur de téphra. Sans une connaissance détaillée des charges sur chaque type de cultures, il n'est pas possible de calculer le revenu net de celles-lors d'un dépôt de téphra.

Au total, dans le cas d'un dépôt de téphra de 5 mm, les 38% de pertes de revenu brut annuel par rapport à la situation d'équilibre sont dûs à 93% aux pertes de productions sur le sous-système de culture et à 7% à celles sur le sous-système d'élevage (Figure 27a). Lors de retombées de téphra d'une épaisseur de 50 mm, les pertes de revenu brut annuel sont estimées à 62%, dont le sous-système de culture n'est plus responsable qu'à 74% (Figure 27b). Ceci est expliqué par les pourcentages de pertes sur productions animales qui passent de 5 à 30%, respectivement lors de 5 et 50 mm de dépôts. Les pertes de revenu brut annuel associées à l'élevage sont alors de 24 502,5 pesos lors de 5 mm de dépôt de téphra et 147 015 pesos lors de 50 mm de dépôt, traduisant donc une augmentation des pertes de 32% alors que les pertes sur le sous-système de culture n'augmentent que de 23% entre le scénario envisageant 5 mm de téphra et celui en envisageant 50.



(a) Dépôt de 5 mm de téphra



(b) Dépôt de 50 mm de téphra

Figure 27 – Pertes de revenus bruts annuels par production de l'exploitation n°5 suite à un dépôt de 5 (a) et 50 mm de téphra (b)

Dans le cas d'un dépôt de 5 mm et en supposant que les charges restent constantes, le revenu net annuel de l'exploitation n°5 chute de 22% par rapport à la situation d'équilibre, soit passe de 450 000 pesos par an à 100 776 pesos. La situation est plus critique dans le cas de 50 mm de dépôt puisque le revenu net annuel de l'entreprise serait en négatif de 119 044 pesos. En effet, le revenu brut annuel n'est plus que de 343 875 pesos et la soustraction des charges de 462 919 pesos le rendrait donc négatif, et ce même avec les 60 000 pesos annuel généré par l'activité secondaire du propriétaire.

6.2.2 Pertes indirectes sur les productions

Les impacts chiffrés ci-dessus concernent uniquement les impacts directs sur certains éléments du système. En raison des interactions entre les sous-systèmes du système agraire de l'exploitation n°5, les impacts directs sur un élément du système ont des répercussions sur d'autres éléments du système. En effet, le sous-système de culture, en particulier les cultures à cycle court, requièrent l'engrais produit par le système de culture à partir du stockage des déjections animales. À l'inverse, le maïs, une des cultures à cycle court, permet de fournir 63 % de l'alimentation annuelle des cochons (truies, verrats et porcelets) via la transformation des tiges de maïs en ensilage.

Pour un dépôt de téphra de 5 mm, l'ensilage de maïs ne pourra contribuer que de 6% à l'alimentation des cochons, en raison des pertes de 90% sur la production de maïs. Bien qu'une perte de production de 90% n'engendre pas systématiquement une perte de 90% des tiges de maïs, l'hypothèse d'une perte identique sur les résidus de culture et sur la production est appliquée afin d'envisager le scénario le plus défavorable possible. Pour un dépôt de 5 mm, associé à une perte de 90% des résidus de cultures, deux situations sont envisageables : soit l'exploitant cherchera à maintenir le même niveau de production, auquel cas, les 57% d'alimentation manquants doivent être achetés hors du système, soit le niveau de production ne peut être maintenu et seuls les 6% fournis par l'ensilage et les 37% provenant habituellement de l'extérieur du système sont donnés aux cochons. Dans ce cas, seuls 43% de l'apport en nourriture des cochons peut être fourni, induisant alors la mort de plus de la moitié de ceux-ci, et ce malgré l'initiative de vendre tous les porcelets, quels que soient leurs poids, afin d'utiliser toute la nourriture pour les animaux reproducteurs (truies et verrats). En effet, de tels niveaux de nourriture ne permettront de nourrir qu'un peu moins de trois cochons. La perte d'individus reproducteurs nécessite donc leur rachat par la suite. Cependant, la plus faible quantité de produits vendables suite à la perte de production végétale génère moins de revenus, rendant l'achat d'animaux reproducteurs plus difficile. Dans le scénario où le dépôt de téphra est de 50 mm, les pertes sur le maïs sont de 100% et aucun ensilage ne peut être produit, induisant donc soit l'achat de toute la nourriture des cochons à l'extérieur du système pour maintenir le niveau de production, soit une alimentation réduite à 37% de la quantité fournie en situation d'équilibre. Les montants exacts des dépenses supplémentaires n'ont pas pu être calculés par manque d'informations sur les prix d'achat des animaux et de la nourriture, prix qui fluctueraient en outre fortement dans le cas d'une crise de production suite à une éruption volcanique.

Par ailleurs, les pertes sur l'élevage de cochons et de poules induisent une diminution sur la quantité d'engrais produite et qui peut être apportée aux cultures à cycle court (Figure 22b). En effet, les déjections des poules et des cochons sont compostées afin de produire de l'engrais dont 2-3 kg/m²

trois kilogrammes par mètre carré sont épendus sur les cultures à cycle court à chaque nouveau cycle. Ces fertilisants sont les seuls apportés aux cultures à l'exception du maïs dont dix grammes de fertilisant "NPK" sont utilisés par pied un mois après la plantation. En cas de retombées de téphra, trois situations différentes sont envisageables: soit il est supposé que la perte d'engrais sera contre-balancée par l'effet fertilisant des téphra (si un tel effet existe), soit le niveau de production se veut d'être maintenu et l'achat de fertilisants hors du système sera requis, soit le niveau de production sera diminué en raison du manque d'engrais.

Sachant qu'un dépôt de téphra de 5 et 50 mm sur les cultures à cycle court provoque des pertes de production de 90 et 100% respectivement, il semblerait que la quantité de fertilisants disponible soit suffisante pour satisfaire aux demandes des cultures restantes. Cependant, l'évaluation de la situation est plus complexe qu'il n'y paraît. En effet, les pertes sur les productions peuvent dues au fait que les productions récoltées ne soient pas vendables, et ce malgré des efforts importants de lavage et de retrait des téphra, et/ou et dues à la destruction des cultures. Ne pouvant déterminer la proportion de cultures détruites, il n'est pas possible d'évaluer si les fertilisants disponibles suffiront ou non aux apports nécessaires aux cultures restantes.

6.2.3 Pertes sur les actifs

Tout comme pour l'exploitation n°1, seules les pertes d'actifs sur les cultures pérennes ont été quantifiées. Des retombées de téphra de 5 mm et de 50 mm d'épaisseur entraînent respectivement la perte de 3 et 15 % des cultures pérennes. Suite à un dépôt de téphra, les pertes d'actifs les plus importantes (en termes de perte de revenus bruts) sur les cultures, sont celles affectant les noix de coco (3 931 pesos répartis sur 5 ans), les pitayas (842 pesos sur un an), les papayes (425 pesos sur 9 mois), les cacaoyers (244,8 pesos sur 5 ans) et les bananiers (176 pesos sur un an). Ces valeurs correspondent aux pertes de revenus bruts totaux pour chaque culture pérenne lors d'un dépôt de téphra de 5 mm, ceux-ci sont multipliés par cinq pour un dépôt de 50 mm. Les pertes sur les noix de coco, bien que leur prix de cinq pesos au kilogramme soit le plus faible de toutes les cultures pérennes et que seuls 18 arbres sont cultivés, entraînent le plus de perte de revenus bruts en raison de la haute productivité par arbre. Les cocotiers sont récoltés quatre fois par an et un arbre peut donc produire environ 291 kg de noix de coco par an. En ce qui concerne les pitayas, la deuxième culture engendrant le plus de pertes de revenus bruts, la productivité par arbre est plus faible, soit 8,5 kg, mais le prix de vente au kilogramme est le plus élevée des cultures pérennes et est chiffré à 60 pesos. Pour des dépôts de 5 mm, lors de la première année suivant l'éruption, les pertes de revenus associées à la perte d'actifs sont de 2 277 pesos soit seulement 0,4% du revenu brut annuel de l'exploitation de 563 694 pesos, en tenant compte des pertes directes sur les productions. Suite à un dépôt de téphra de 50 mm, les pertes de revenus bruts dues à l'impact sur les actifs des cultures pérennes est de 11 387 pesos la première année, représentant 3,3% des revenus bruts annuels de 343 875 dans cette situation. Ces pourcentages pourraient légèrement augmenter en considérant le remplacement des arbres perdus. Lors du passage du scénario n°1 (5 mm de téphra) au scénario n°2 (50 mm de téphra), la proportion des pertes liées aux actifs augmente en raison des revenus bruts annuels de l'exploitation qui diminuent de 39% et de l'augmentation de 5% des pertes de revenus liées aux pertes sur les actifs du sous-système de culture. Ces pertes d'actifs sur les cultures peuvent donc être considérées comme

négligeables par rapport à l'ensemble de pertes de revenus bruts encaissées par l'exploitation. De plus, ces pertes auront tendance à diminuer au cours des années puisque les pertes d'actifs sur les bananiers, les papayiers et les pitayas sont uniquement encaissés durant la première année suivant l'éruption, reflétant simplement un temps de renouvellement de un an ou moins.

6.2.4 Comparaison avec la réalité du terrain

L'éruption du Taal en 2020 a provoqué un dépôt de téphra estimé entre 50 et 100 mm d'épaisseur, sur bases des cartes d'isopaques (Figure 3) et de localisation des exploitations (Figure 13). L'étude de Thomas (2020) indique que durant la majeure partie de l'éruption les vents ont dispersé le téphra au nord-nord-est du volcan. L'exploitation n°5, se trouvant à environ 17 km au nord du Taal, il est logique d'y rencontrer des épaisseurs de téphra plus élevées que sur l'exploitation n°1, située au sud-ouest, à 13,5 km du Taal.

Sous ces dépôts de téphra, les sous-systèmes de culture et d'élevage furent fortement affectés. En ce qui concerne les cultures à cycle court, elles ont été détruites par les retombées de téphra, engendrant la perte de leurs productions. De plus, aucune production n'a pu être récoltée pendant presque un an. En effet, pendant les six mois suivant l'éruption, les plantes n'ont pu se développer sur les sols couverts de cendres. Quelques mois supplémentaires ont été nécessaires pour revenir à une situation quasi normale. La production des cultures pérennes a également été perdue, à l'exception des cocotiers qui ont produit 20% de leur rendement habituel. Les bananiers, cocotiers, cacaoyers et pitayas ont survécu mais ont perdu leurs feuilles suite aux dépôts de téphra et furent incapables de produire pendant une (bananiers et pitayas) et deux (cocotiers et cacaoyers) années. Les retombées de téphra sur les papayers ont causé la destruction de toute la culture, nécessitant alors la plantation de nouveaux plants et l'attente de neuf mois supplémentaires afin d'obtenir des arbres matures capables de produire à nouveau.

En ce concerne l'élevage de cochons, 70% des porcelets sont décédés de pneumonies et de diarrhées suite à leur exposition aux téphra et à l'eau contaminée. Les cochons d'âge adulte ont survécu mais se nourrissaient moins en raison du stress subi. De plus, une des deux porcheries de l'exploitation s'est effondrée sous le poids du téphra, mais les porcelets qui s'y trouvaient habituellement avaient été déplacés dans l'aire de croissance. Aucun dégât n'est reporté sur l'élevage de poules car celui-ci n'a débuté qu'après l'éruption.

Les impacts décrits par le propriétaire de l'exploitation n°5 sont plus importants que ceux estimés dans le scénario envisageant un dépôt de 50 mm de téphra. Comme évalué dans ce travail, les retombées de téphra ont provoqué la perte de production de l'ensemble des cultures à cycle court et pérennes. Cependant, les pertes d'actifs sur les cultures pérennes ont fortement été sous-estimées en raison de l'incapacité de production des arbres qui n'a pas été prise en compte dans notre étude et la destruction totale de la culture de papayes. Cette sous-estimation est notamment expliquée par le fait que l'exploitation n°5 a subi un dépôt estimé entre 50 et 100 mm de téphra, soit plus que les deux scénarios théoriques envisagés. Cependant, pour un dépôt de 100 mm de téphra, Wilson et al. (2007) estiment des pertes d'actifs sur les cultures permanentes de seulement 30%, ce qui reste inférieur aux dégâts réellement subis par l'exploitation sur ses cultures pérennes, en raison de leur incapacité

à produire qui se répercute sur plusieurs années. De plus, l'absence de production des cultures à cycle court, et donc du maïs, pendant l'année suivant l'éruption aggrave la situation de l'exploitation puisqu'aucun résidu de maïs n'est alors disponible pour l'ensilage utilisé comme nourriture pour les cochons. La perte de 70% de porcelets entraîne la perte de 17% des revenus bruts annuels de l'exploitation par rapport à la situation d'équilibre. Ce chiffre doit néanmoins être revu à la hausse en raison du stress sur les mères reproductrices, diminuant leur capacité d'engendrer des porcelets sains. Si une même perte de 70% est envisagée sur l'élevage de poules, les pertes des revenus bruts annuels de l'exploitation seraient de 37% en considérant ensemble les pertes sur l'élevage de poules et de cochons. En termes de revenus nets, les pertes seraient encore plus importantes puisque les dépenses associées à l'élevage représentent 85% des revenus bruts de la production d'animaux. Les charges fixes, restant inchangées malgré une production plus faible, les dépenses représenteront une plus grande proportion des revenus bruts, diminuant dès lors les marges bénéficiaires sur les productions de l'élevage. Suite à ces constats, il semble évident que les estimations faites sur les impacts subis par le sous-système d'élevage et de culture, et donc sur leur vulnérabilité face aux retombées de téphra, ont été fortement sous-estimées.

6.3 Relation entre la vulnérabilité et la complexité des systèmes agraires

La vulnérabilité des systèmes agraires des exploitations n°1 et °5 suite à des retombées de téphra est principalement dictée par la vulnérabilité de leur sous-système d'élevage. Les productions de l'élevage sont celles dont les marges bénéficiaires sont les plus faibles. Lors de dépôts de téphra, les pertes de production génèrent des pertes sur les revenus bruts mais leurs charges ne diminuent pas proportionnellement aux pertes de production. Il en résulte alors une diminution significative du chiffre d'affaires, ayant tendance à s'aggraver avec la sévérité des impacts. La contribution des revenus des productions animales au sein des revenus nets totaux des exploitations s'est dès lors diminuée. De plus, dans la situation d'équilibre, cette contribution est déjà négative en ce qui concerne l'exploitation n°1 et ne s'élève qu'à 16% des revenus annuels nets totaux de l'exploitation n°5.

La proportion des revenus bruts générés par les cultures au sein des revenus bruts annuels totaux de l'exploitation varie entre les exploitations n°1 et n°5. Elle ne représente que 2% des revenus bruts annuels totaux pour l'exploitation n°1 alors qu'elle est de 46% pour l'exploitation n°5. Cependant, le sous-système de culture est essentiel puisqu'il permet, dans une situation à l'équilibre, de générer la totalité (dans le cas de l'exploitation n°1) ou la quasi totalité (84% pour l'exploitation n°5) des revenus nets annuels totaux des exploitations. L'étude soulève donc l'importance des sous-systèmes de culture à l'égard de la santé économique des fermes. La prise en compte des pertes sur les actifs liés aux cultures amplifie l'importance des pertes subies par les exploitations puisque celles-ci se marquent sur la production de plusieurs années et que des coûts sont à prévoir afin de renouveler les arbres endommagés. Néanmoins, le système de culture, de part l'importance de ses revenus nets, est l'élément déterminant dans le redémarrage des exploitations après avoir subi une éruption volcanique.

Le choix volontaire d'exploitations présentant des niveaux différents de complexité de leurs systèmes agraires, a permis de mettre en relation la vulnérabilité et la complexité des systèmes agraires. L'étude suggère qu'un système agricole plus complexe, possédant de nombreuses interactions entre

ses sous-systèmes, est plus vulnérable face aux chutes de téphra. En effet, les impacts directs sur les éléments du système engendrent des répercussions plus au moins importantes selon la dépendance des éléments entre eux. Un impact sur le sous-système de culture de l'exploitation n°1 n'entraînera donc aucun impact sur son sous-système d'élevage et la dépendance du système en intrants extérieurs reste inchangée voir légèrement diminuée dans le cas de la perte de cochons. La situation est radicalement différente lorsque les sous-systèmes sont inter-connectés. En effet, le sous-système d'élevage de l'exploitation n°5 présente une telle dépendance au sous-système de culture, via l'alimentation des cochons, qu'une perte des cultures de maïs suite à des retombées de téphra entraînera des dommages importants sur son sous-système d'élevage. L'exploitation, généralement peu dépendante en intrants extérieurs, se verra contrainte de compenser ce manque de nourriture afin de conserver le niveau de productivité du système d'élevage. Les achats requis engendreront des coûts additionnels, d'ordinaire non compris dans les dépenses. La situation économique de l'exploitation, déjà affaiblie par la perte de ses revenus liées aux cultures, ne s'en verra qu'aggravée. Cette constatation inattendue soulève une nouvelle interrogation dans le contexte d'une agriculture soumise aux risques liés aux changements climatiques. En effet, Stark et al. (2019) démontrent que les systèmes agraires présentant une intégration importante entre leurs sous-systèmes d'élevage et de culture sont plus productifs, efficaces et résilients que ceux peu intégrés. L'approche d'évaluation des risques sur les systèmes agraires vis-à-vis des changements climatiques n'est pas nécessairement directement applicable aux aléas volcaniques, en l'occurrence les retombées de téphra. Dans un contexte de risque volcanique combiné aux changements climatiques, il est intéressant de se demander quelles sont les stratégies les plus adéquates à adopter dans le secteur de l'agriculture, en vue de réduire les risques dans les régions volcaniques actives : faut-il privilégier les systèmes à haute intégration élevage-culture ou, au contraire, limiter au maximum les dépendances au sein du système ?

6.4 Pistes d'améliorations et perspectives

Le travail réalisé permet d'approcher de manière semi-quantitative la vulnérabilité des systèmes agraires en utilisant la "santé" économique des exploitations. L'estimation des impacts directs des chutes de cendres sur les éléments du système agricole s'est basée sur les pertes de revenus bruts annuels de chacune des productions du système. L'interprétation des résultats a permis de soulever l'importance de la prise en compte des charges dans l'évaluation de la vulnérabilité. Des informations détaillées sur les charges supportées par chaque type de production, comportant le détail des coûts fixes et variables, enrichiraient la quantification des pertes en termes de revenus nets, plus représentatifs de la santé économique de l'exploitation.

Ce mémoire a permis pour la première fois d'évaluer semi-quantitativement la vulnérabilité des systèmes agraires suite à des chutes de téphra. Bien que la méthode de quantification des impacts directs semble prometteuse, des améliorations pourraient être apportées afin d'estimer de manière plus systématique les impacts indirects, résultant des interactions entre les éléments du système. Une piste serait de se servir des approches proposées par d'autres études menées sur les systèmes agraires et de les adapter à la quantification de la vulnérabilité des systèmes agraires face aux retombées de téphra. Notamment, l'étude de Stark et al. (2019) utilise une approche matricielle afin de décrire le système agricole et les interactions en son sein. La taille des éléments ainsi que les flux de matière entre

ces éléments sont transposés au sein d'une matrice. Ensuite, différents indicateurs sont développés afin d'étudier les performances du système. Il pourrait donc être envisageable de construire de tels indicateurs capables de traduire la vulnérabilité des systèmes agraires face aux dépôts de téphra.

Cependant, le facteur limitant la démarche réside dans le manque important d'informations sur la quantification des impacts générés par des chutes de téphra sur les différents éléments du système agricole. Bien que des fonctions de fragilité existent, telles que celles proposées par Craig et al. (2021) et Wilson et al. (2007), celles-ci restent trop peu nombreuses, trop approximatives et ne prennent en considération que peu de composantes du système agricole. En effet, aucune étude n'a jamais été réalisée sur les impacts subis par les systèmes d'élevage autres que ceux de l'agriculture pastorale. De plus, les études sur les cultures englobent de multiples types de plantes au sein d'un même groupe de cultures. Les fonctions de fragilité ne sont donc pas capables de faire transparaître les impacts, parfois très différents, subis par les différents types de cultures regroupées au sein du même groupe. L'exploitation n°5 illustre parfaitement cette remarque par le biais de la description des dégâts causés sur ses cultures pérennes. De fait, les bananiers et les papayers de l'exploitation, deux cultures faisant partie du groupe des "cultures pérennes" (ou des "cultures arboricoles"), ont subi des impacts très inégaux face aux dépôts de téphra, et ce, bien qu'ils soient plantés sur la même parcelle. Les dégâts sur les papayers étaient tels que tous les arbres ont dû être replantés alors que les bananiers étaient toujours sur pieds mais furent incapables de produire pendant une année. Cependant, dans les études d'impacts, aucune distinction n'est faite entre ces deux types de culture et les fonctions de fragilité leur associent donc des impacts égaux. Dès lors, tant que des études supplémentaires ne seront pas mises en oeuvre pour quantifier les impacts des chutes de téphra sur le système agricole, il sera impossible de quantifier de manière rigoureuse la vulnérabilité de celui-ci et in fine de développer des stratégies adéquates de réduction de risque.

7 Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif principal d'évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles face à l'aléa volcanique, en l'occurrence les retombées de téphra.

L'étude du fonctionnement des exploitations agricoles susceptibles d'être soumises aux aléas volcaniques combinée à l'évaluation des impacts des chutes de téphra sur les différents éléments du système agraire, a permis de quantifier la vulnérabilité de l'ensemble du système agraire. Deux scénarios de dépôts de téphra (5 et 50 mm) ont été envisagés et la quantification de la vulnérabilité a été réalisée au travers de l'estimation des pertes de revenus bruts annuels des exploitations suite aux retombées de téphra. Il en résulte alors que les éléments du système considérés comme les plus vulnérables lorsqu'ils sont étudiés en étant isolés les uns des autres, ne sont pas inéluctablement les responsables principaux de la vulnérabilité du système lorsqu'il est étudié dans son intégrité. En effet, notre étude soulève que la vulnérabilité des systèmes agraires dépend majoritairement de la vulnérabilité de leur sous-système d'élevage. Cependant, les travaux précédents suggèrent que les impacts des dépôts de téphra sont sans conteste plus élevés sur les cultures que sur l'élevage, traduisant ainsi une vulnérabilité plus élevée des sous-systèmes de culture. De plus, les résultats de ce mémoire illustrent aussi que le redémarrage des exploitations, après avoir été impactées par des retombées de téphra, repose principalement sur leurs sous-systèmes de culture puisque ceux-ci sont responsables de la majorité des revenus nets des exploitations étudiées.

La comparaison de systèmes agraires avec des structures montrant des niveaux de complexité différents a suscité une question importante quant à leur vulnérabilité face à l'aléa volcanique mais dans le contexte des dérèglements climatiques actuels. Nos résultats suggèrent que les systèmes agraires ne présentant pas, voire peu, de dépendance(s) entre leurs sous-systèmes sont potentiellement moins vulnérables face aux retombées de téphra que ceux présentant de nombreuses interactions. Ce constat est en opposition avec l'analyse de la vulnérabilité des systèmes agraires vis-à-vis des changements climatiques. En effet, ces études démontrent l'importance de l'intégration du système d'élevage et de culture au sein des systèmes agraires afin d'augmenter leurs performances en termes de productivité, d'efficacité et de résilience. Ceci appuie l'importance de l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes agraires à proximité de volcans potentiellement actifs puisqu'ils se trouvent, à la fois, soumis à l'aléa volcanique et aux effets des changements climatiques. In fine, cette évaluation permettra une analyse de risque adéquate indispensable à l'élaboration et à la mise en place de stratégies adaptées visant à la réduction de risque de catastrophe dans les régions volcaniques actives.

References

- Adams, C. M., & Hutchinson, T. C. (1987). COMPARATIVE ABILITIES OF LEAF SURFACES TO NEUTRALIZE ACIDIC RAINDROPS. II. THE INFLUENCE OF LEAF WETTABILITY, LEAF AGE AND RAIN DURATION ON CHANGES IN DROPLET pH AND CHEMISTRY ON LEAF SURFACES. *New Phytologist*, 106(3), 437–456. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb00151.x>
- Albert, S. (2022, June 8). *How to plant, grow, and harvest papaya* [Harvest to table]. Retrieved August 6, 2022, from <https://harvesttotable.com/how-to-grow-papaya/>
- AquaPortail. (2021, October 5). *Fleuron : définition et explications*. Retrieved August 11, 2022, from <https://www.aquaportail.com/definition-2495-fleuron.html>
- Authority, P. S. (2021, July 7). *2020 census of population and housing (2020 CPH) population counts declared official by the president / philippine statistics authority* [Philippines statistics authority]. Retrieved August 13, 2022, from <https://psa.gov.ph/content/2020-census-population-and-housing-2020-cph-population-counts-declared-official-president>
- 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>
- Balangue-Tarriela, M. I. R., Lagmay, A. M. F., Sarmiento, D. M., Vasquez, J., Baldago, M. C., Ybañez, R., Ybañez, A. A., Trinidad, J. R., Thivet, S., Gurioli, L., de Vries, B. V. W., Aurelio, M., Rafael, D. J., Bermas, A., & Escudero, J. A. (2022). Analysis of the 2020 taal volcano tephra fall deposits from crowdsourced information and field data. *Bulletin of Volcanology*, 84(3), 35. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01534-y>
- Barral, S., Touzard, I., Ferraton, N., Rasse-Mercat, E., & Pillot, D. (2012). *Assessing smallholder farming : Diagnostic analysis of family-based agricultural systems in a small region* (SEARCA). Retrieved August 15, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/315840004_Assessing_Smallholder_Farming_Diagnostic_Analysis_of_Family-Based_Agricultural_Systems_in_a_Small_Region_Illustrated_with_the_Case_Study_of_the_Giham_Pioneer_Front_Sumatra_Indonesia
- Bas, M. J. L., Maitre, R. W. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: An open source software for exploring and manipulating networks [Number: 1]. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 3(1), 361–362. Retrieved August 5, 2022, from <https://ojs.aaai.org/index.php/ICWSM/article/view/13937>
- Bertalanffy, L. V. (1950). AN OUTLINE OF GENERAL SYSTEM THEORY. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1(2), 134–165. <https://doi.org/10.1093/bjps/I.2.134>

- Biass, S., Frischknecht, C., & Bonadonna, C. (2012). A fast GIS-based risk assessment for tephra fallout: The example of cotopaxi volcano, ecuador-part II: Vulnerability and risk assessment. *Natural Hazards*, 64(1), 615–639. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0270-x>
- Black, R. A., & Mack, R. N. (1986). Mount st. helens ash: Recreating its effects on the steppe environment and ecophysiology. *Ecology*, 67(5), 1289–1302. <https://doi.org/10.2307/1938685>
- Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A., & Koyaguchi, T. (2015). Tephra dispersal and sedimentation. *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 587–597). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00033-X>
- Burns, R. G. (1993, September 16). *Mineralogical applications of crystal field theory* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524899>
- Cashman, K. V., & Scheu, B. (2015). Magmatic fragmentation. *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 459–471). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00025-0>
- Cayla, L. (2021, December 31). *When do banana trees produce fruit? what you need to know* [HappySprout] [Section: Gardening]. Retrieved August 6, 2022, from <https://www.happysprout.com/gardening/when-does-banana-plant-fruit/>
- Cédric, A. (2014, March 8). *Comment cultiver un bananier dans votre jardin* [Au potager bio - Conseils pour votre potager biologique]. Retrieved July 22, 2022, from <https://au-potager-bio.com/comment-cultiver-un-bananier/>
- CNRTL. (2012). *AURICULE : Définition de AURICULE* [Centre national des ressources textuelles et lexicales]. Retrieved August 11, 2022, from <https://www.cnrtl.fr/definition/auricule>
- Communications, D. (2020, January 17). *Agri damage from taal eruption reaches php3b* [Official portal of the department of agriculture]. Retrieved August 13, 2022, from <https://www.da.gov.ph/agri-damage-from-taal-eruption-reaches-php3b/>
- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I., & Williams, G. J. (1981). Impact on agriculture of the mount st. helens eruptions. *Science*, 211(4477), 16–22. <https://doi.org/10.1126/science.211.4477.16>
- Craig. (2015). Agricultural vulnerability to tephra fall impacts. [Accepted: 2017-03-12T18:53:43Z Publisher: University of Canterbury]. <https://doi.org/10.26021/6184>
- Craig, Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016). 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, Wilson, T. M., 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), 345–367. <https://doi.org/10.30909/vol.04.02.345367>
- Cronin, S. J., Neall, V., Lecoindre, J., Hedley, M., & Loganathan, P. (2003). Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: A case study from ruapehu volcano, new zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(3), 271–291. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00465-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00465-1)

- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards* [[_eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1540-6237.8402002](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1540-6237.8402002)]. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Dahlgren, R., Saigusa, M., & Ugolini, F. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in agronomy* (pp. 113–182). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
- De La Cruz-Reyna, S. (1996). Long-term probabilistic analysis of future explosive eruptions. *Monitoring and mitigation of volcano hazards* (pp. 599–629). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_18
- Degnan, S. (2018, December 15). *How long does it take for a coconut tree to get coconuts?* [Home guides | SF gate]. Retrieved August 6, 2022, from <https://homeguides.sfgate.com/long-coconut-tree-coconuts-84353.html>
- Delmelle, P., Lambert, M., Dufrêne, Y., Gerin, P., & Óskarsson, N. (2007). Gas/aerosolash interaction in volcanic plumes: New insights from surface analyses of fine ash particles. *Earth and Planetary Science Letters*, 259(1), 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.052>
- Delmelle, P., Maters, E. C., Calkins, J. A., Gaspard, F., Opfergelt, S., & Jenkins, S. F. (2021). Eruptive style controls the formation of silicon hexafluoride salts on volcanic ash: The case of the 2010 eruption of eyjafjallajökull volcano, iceland. *Chemical Geology*, 579, 120327. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120327>
- Delmelle, P., Opfergelt, S., Cornelis, J.-T., & Ping, C.-L. (2015). Volcanic soils. *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 1253–1264). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00072-9>
- Delos Reyes, P. J., Bornas, M. A. V., Dominey-Howes, D., Pidlaon, A. C., Magill, C. R., & Solidum, J., Renato U. (2018). A synthesis and review of historical eruptions at taal volcano, southern luzon, philippines. *Earth-Science Reviews*, 177, 565–588. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.014>
- Devanandham, H., & Ramirez-Marquez, J. E. (2012). Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.09.002>
- Dickson, J. H. (1965). The effects of the eruption of 1961 on the vegetation of tristan da cunha [Publisher: The Royal Society]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 249(759), 403–424. Retrieved July 10, 2022, from <https://www.jstor.org/stable/2416689>
- Discovery, V. (2022, August 21). *Taal* [Volcano discovery]. Retrieved August 13, 2022, from <https://www.volcanodiscovery.com/taal.html>
- Dixon, J., Gibbon, D. P., Gulliver, A., & Hall, M. (2001). *Farming systems and poverty: Improving farmers' livelihoods in a changing world* [OCLC: ocm48933776]. FAO ; World Bank.
- FAO, F.
bibinitperiod A. O. o. t. U. N. (1979). *FAO yearbook production* (FAO Rome) [ISSN: 0071-7118].

- Freire, S., Florczyk, A., Pesaresi, M., & Sliuzas, R. (2019). An improved global analysis of population distribution in proximity to active volcanoes, 1975–2015. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(8), 341. <https://doi.org/10.3390/ijgi8080341>
- Gilmore, P. (2022, April 5). *How long does it take to grow a cocoa tree? (solution found)* [Environmental project in malaysia]. Retrieved August 6, 2022, from <https://www.klriver.org/faq/how-long-does-it-take-to-grow-a-cocoa-tree-solution-found.html>
- Gueymard, C. A., Lara-Fanego, V., Sengupta, M., & Xie, Y. (2019). Surface albedo and reflectance: Review of definitions, angular and spectral effects, and intercomparison of major data sources in support of advanced solar irradiance modeling over the americas. *Solar Energy*, 182, 194–212. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.040>
- Haines, B. L., Jernstedt, J. A., & Neufeld, H. S. (1985). DIRECT FOLIAR EFFECTS OF SIMULATED ACID RAIN. II. LEAF SURFACE CHARACTERISTICS. *New Phytologist*, 99(3), 407–416. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb03668.x>
- Harrington, J. (2018, December 29). *How long does dragon fruit bear fruit?* [Home guides | SF gate]. Retrieved August 6, 2022, from <https://homeguides.sfgate.com/long-dragon-fruit-bear-fruit-102059.html>
- Harris, E., Mack, R. N., & Ku, M. S. B. (1987). Death of steppe cryptogams under the ash from mount st. helens [Publisher: Botanical Society of America]. *American Journal of Botany*, 74(8), 1249–1253. <https://doi.org/10.2307/2444160>
- Heiken, G. (1972). Morphology and petrography of volcanic ashes. *Geological Society of America Bulletin*, 83(7), 1961. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[1961:MAPOVA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[1961:MAPOVA]2.0.CO;2)
- Hinckley, T. M., Imoto, H., Lee, K., Lackner, S., Morikawa, Y., Vogt, K. A., Grier, C. C., Keyes, M. R., Teskey, R. O., & Seymour, V. (1984). Impact of tephra deposition on growth in conifers: The year of the eruption. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(5), 731–739. <https://doi.org/10.1139/x84-130>
- Hotes, S., Poschlod, P., Takahashi, H., Grootjans, A. P., & Adema, E. (2004). Summary.
- Hunt, A. (2006). *La chimie de A à Z: 1200 mots pour comprendre* [Google-Books-ID: C9dgPQAA-CAAJ]. Dunod.
- Jacomy, M., Venturini, T., Heymann, S., & Bastian, M. (2014). ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the gephi software [Publisher: Public Library of Science]. *PLOS ONE*, 9(6), e98679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098679>
- Jean-Claude, T., & D’Ercole, R. (1996). Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : Effets, facteurs et réponses sociales. *Cahiers des sciences humaines*, 32, 407–422.
- Jenkins, S., Wilson, T., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., Marzocchi, W., Boulton, M., Bonadonna, C., & Costa, A. (2015, August 1). Volcanic ash fall hazard and risk. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>
- Jenkins, S. F., Biass, S., Williams, G. T., Hayes, J. L., Tennant, E., Yang, Q., Burgos, V., Meredith, E. S., Lerner, G. A., Syarifuddin, M., & Verolino, A. (2022). Evaluating and ranking southeast

- asia's exposure to explosive volcanic hazards [Publisher: Copernicus GmbH]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(4), 1233–1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1233-2022>
- Julien, M. (n.d.). *HOLOCÈNE* [Encyclopædia Universalis]. Retrieved May 20, 2022, from <https://www.universalis.fr/encyclopedie/holocene/>
- Keller, E. A., DeVecchio, D. E., & Blodgett, R. H. (2015). *Natural hazards: Earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes* [OCLC: 864789911].
- Kennedy, R. A. (1980). Ash from mt st helens. *Nature*, 287(5783), 581–581. <https://doi.org/10.1038/287581a0>
- Laforga, B. M., & Galang, V. M. P. (2020, January 20). *Income lost from taal eruption could hit p4.3b* [BusinessWorld]. Retrieved August 13, 2022, from <https://www.bworldonline.com/top-stories/2020/01/21/274338/income-lost-from-taal-eruption-could-hit-p4-3b/>
- Larousse, É. (n.d.). *Définitions : agriculture - Dictionnaire de français Larousse*. Retrieved July 8, 2022, from <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/agriculture/1773>
- Lavigne, F. (1999). SIG et zonage des risques volcaniques : Application au volcan merapi, java, indonésie (GIS and zonation of the volcanic hazards : Application to merapi volcano, java, indonesia) [Publisher: Persée - Portail des revues scientifiques en SHS]. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 76(4), 371–382. <https://doi.org/10.3406/bagf.1999.2129>
- Le Guern, F., Bernard, A., & Chevrier, R. M. (1980). Soufrière of guadeloupe 1976/1977 eruption mass and energy transfer and volcanic health hazards. *Bulletin Volcanologique*, 43(3), 577–593. <https://doi.org/10.1007/BF02597694>
- Le Maitre, R. W., International Union of Geological Sciences, & Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. (2004). *Igneous rocks a classification and glossary of terms: Recommendations of the international union of geological sciences, subcommittee on the systematics of igneous rocks* [OCLC: 1326130274]. Cambridge University Press. Retrieved July 6, 2022, from <http://resolver.ebscohost.com/Redirect/PRL?EPPackageLocationID=9616.330600.6724653&epcustomerid=s8491974&db=9616>
- L'Esprit Sorcier. (2020, November 16). *Les volcans effusifs et explosifs - L'Esprit Sorcier Officiel* [L'Esprit Sorcier] [Section: Blogs membres]. Retrieved May 18, 2022, from <https://www.lespritsorcier.org/blogs-membres/les-volcans-effusifs-et-explosifs/>
- Ligot, N., Guevara, A., & Delmelle, P. (2022). Drivers of crop impacts from tephra fallout: Insights from interviews with farming communities around tungurahua volcano, ecuador [Number: 1]. *Volcanica*, 5(1), 163–181. <https://doi.org/10.30909/vol.05.01.163181>
- Lirer, L., & Vitelli, L. (1998). Volcanic risk assessment and mapping in the vesuvian area using GIS. *Natural Hazards*, 17(1), 1–15. <https://doi.org/10.1023/A:1007977110144>
- Loughlin, S. C., Sparks, S., Brown, S. K., Jenkins, S. F., & Vye-Brown, C. (Eds.). (2015, July 24). *Global volcanic hazards and risk* (1st ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>

- Mack, R. N. (1981). Initial effects of ashfall from mount st. helens on vegetation in eastern washington and adjacent idaho. *Science*, *213*(4507), 537–539. <https://doi.org/10.1126/science.213.4507.537>
- Martin, G., Moraine, M., Ryschawy, J., Magne, M.-A., Asai, M., Sarthou, J.-P., Duru, M., & Therond, O. (2016). Croplivestock integration beyond the farm level: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(3), 53. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>
- Menchaca, M. A., Chase, C. C., Olson, T. A., & Hammond, A. C. (1996). Evaluation of growth curves of brahman cattle of various frame sizes. *Journal of Animal Science*, *74*(9), 2140. <https://doi.org/10.2527/1996.7492140x>
- Morton, J. F., & Dowling, C. F. (1987). *Fruits of warm climates*. J.F. Morton ; Distributed by Creative Resources Systems.
- National Geophysical Data Center. (2001). Global significant volcanic eruptions database [Type: dataset]. <https://doi.org/10.7289/V5JW8BSH>
- Neild, J., New Zealand, & Ministry of Agriculture and Forestry. (1998). *Impact of a volcanic eruption on agriculture and forestry in new zealand* [OCLC: 85483518]. MAF. Retrieved July 11, 2022, from <http://www.maf.govt.nz/mafnet/rural-nz/adverse-events/volcanoes/volcano-eruption-impact/httoc.htm>
- Newhall, C., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of the explosive magnitude for historical eruptions. *J. Geophys. Res*, *87*.
- O’Keefe, P., Westgate, K., & Wisner, B. (1976). Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature*, *260*(5552), 566–567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
- Ottet, M.-C., Schaer, M., Debbané, M., Cammoun, L., Thiran, J.-P., & Eliez, S. (2013). Graph theory reveals dysconnected hubs in 22q11ds and altered nodal efficiency in patients with hallucinations. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00402>
- Parfitt, R. L. (2009). Allophane and imogolite: Role in soil biogeochemical processes. *Clay Minerals*, *44*(1), 135–155. <https://doi.org/10.1180/claymin.2009.044.1.135>
- Percy, K. E., & Baker, E. A. (1988). Effects of simulated acid rain on leaf wettability, rain retention and uptake of some inorganic ions. *New Phytologist*, *108*(1), 75–82. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1988.tb00206.x>
- Proag, V. (2014). The concept of vulnerability and resilience. *Procedia Economics and Finance*, *18*, 369–376. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00952-6](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00952-6)
- Proulx, S., Promislow, D., & Phillips, P. (2005). Network thinking in ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, *20*(6), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.004>
- Pyle, D. M. (1989). The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, *51*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF01086757>
- Qian, J., Ferro, A. R., & Fowler, K. R. (2008). Estimating the resuspension rate and residence time of indoor particles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *58*(4), 502–516. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.4.502>

- Ramos, E. G. (2002). Origin and geologic features of taal lake, philippines. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 5(2), 155–162. <https://doi.org/10.1080/14634980290031794>
- Rosen, C. J., & Eliason, R. (2005). Nutrient management for commercial fruit & vegetable crops in minnesota, 40.
- Rothman-Ostrow, P., Gilbert, W., & Rushton, J. (2020). Tropical livestock units: Re-evaluating a methodology. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. Retrieved August 11, 2022, from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2020.556788>
- 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>
- Schcheglov, S. (2018, June 21). *What is copra and how is it made?* [WorldAtlas] [Section: WorldAtlas Originals]. Retrieved July 27, 2022, from <https://www.worldatlas.com/articles/what-is-copra-used-for-and-how-is-it-made.html>
- Scherbatskoy, T., & Tyree, M. T. (1990). Kinetics of exchange of ions between artificial precipitation and maple leaf surfaces [Publisher: [Wiley, New Phytologist Trust]]. *The New Phytologist*, 114(4), 703–712. Retrieved July 10, 2022, from <https://www.jstor.org/stable/2556842>
- Scholze, H., & Lakin, M. J. (2011). *Glass - nature, structure, and properties*. [OCLC: 1026819822].
- Schön, J. (2011). *Physical properties of rocks: A workbook (handbook of petroleum exploration and production)* [OCLC: 1229179346]. Elsevier.
- 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), 339–343. <https://doi.org/10.1007/BF00378859>
- Shepherd, T., & Wynne Griffiths, D. (2006). The effects of stress on plant cuticular waxes. *New Phytologist*, 171(3), 469–499. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01826.x>
- Shipley, S., & Sarna-Wojcicki, A. (1983). *Maps showing distribution, thickness, and mass of late pleistocene and holocene tephra from major volcanoes in the pacific northwest of the united states; a preliminary assessment of hazards from volcanic ejecta to nuclear reactors in the pacific northwest*. <https://doi.org/10.3133/mf1435>
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the world* (3rd ed). Smithsonian Institution.
- Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2015). *The encyclopedia of volcanoes* (Second edition). Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Singhal, A., & Kiremidjian, A. S. (1996). Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage [Publisher: American Society of Civil Engineers]. *Journal of Structural Engineering*, 122(12), 1459–1467. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:12\(1459\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:12(1459))
- Small, C., & Naumann, T. (2001). The global distribution of human population and recent volcanism. *Environmental Hazards*, 3(3), 93–109. <https://doi.org/10.3763/ehaz.2001.0309>

- Smith, L. G., Williams, A. G., & Pearce, B. D. (2015). The energy efficiency of organic agriculture: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(3), 280–301. <https://doi.org/10.1017/S1742170513000471>
- Spedding, C. R. W. (1988). *An introduction to agricultural systems*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6408-5>
- Stark, F., Archimède, H., González-García, E., Pocard-Chapuis, R., Fanchone, A., & Moulin, C. (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 [Publisher: INRA]. <https://doi.org/10.15454/L1W6US>
- Stieltjes, L. (1996). *Vulnérabilité aux phénomènes volcaniques : Méthodologie et évaluation - application à la martinique, approche préliminaire*. BRGM. Retrieved July 17, 2022, from <https://side.developpement-durable.gouv.fr/OCCI/doc/SYRACUSE/70444/vulnerabilite-aux-phenomenes-volcaniques-methodologie-et-evaluation-application-a-la-martinique-appr>
- Suttle, N. F. (2010). *Mineral nutrition of livestock* (4th ed). CABI.
- Taddeucci, J., Edmonds, M., Houghton, B., James, M. R., & Vergnolle, S. (2015). Hawaiian and Strombolian eruptions. *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 485–503). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00027-4>
- Tarbotton, C., Dall'Osso, F., Dominey-Howes, D., & Goff, J. (2015). The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice. *Earth-Science Reviews*, 142, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.002>
- Tejedor, M., Jiménez, C., & Daz, F. (2003). Volcanic materials as mulches for water conservation. *Geoderma*, 117(3), 283–295. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00129-0)
- Thomas, P. (2020, February 4). *Ashes smoldered farmers after taal eruption in philippines* [Slow food international]. Retrieved July 19, 2022, from <https://www.slowfood.com/ashes-smoldered-farmers-after-taal-eruption-in-philippines/>
- 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>
- Torrieri, F., Concilio, G., & Nijkamp, P. (2002). Decision support tools for urban contingency policy. a scenario approach to risk management of the Vesuvio area in Naples, Italy [eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1468-5973.00185>]. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 10(2), 95–112. <https://doi.org/10.1111/1468-5973.00185>
- Totaro, F., Alberico, I., Di Martire, D., Nunziata, C., & Petrosino, P. (2020). The key role of hazard indices and hotspot in disaster risk management: The case study of Napoli and Pozzuoli municipalities (southern Italy) [Publisher: Taylor & Francis eprint: <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1698472>]. *Journal of Maps*, 16(2), 68–78. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1698472>
- UNESCO. (2010). *Managing disaster risks for world heritage* [OCLC: 1099962465]. UNESCO.

- UN/ISDR. (2004). *Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives* (2004 version). United Nations.
- United Nation. (2017). *World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100* [United nations] [Publisher: United Nations]. Retrieved May 16, 2022, from <https://www.un.org/en/desa/world-population-projected-reach-98-billion-2050-and-112-billion-2100>
- USGS. (2015, December 15). *Volcanic ash impacts & mitigation - weight of ash on crops* [Volcanic ashfall impacts]. Retrieved July 19, 2022, from https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/weight_ash_crops.html
- Varnes, D. J. (1984). LANDSLIDE HAZARD ZONATION: A REVIEW OF PRINCIPLES AND PRACTICE [ISBN: 9789231018954]. *Natural Hazards*, (3). Retrieved July 17, 2022, from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=281932>
- Wikipédia. (2022, April 28). Système [Page Version ID: 193240677]. *Wikipédia*. Retrieved July 8, 2022, from <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Syst%C3%A8me&oldid=193240677>
- Wild, A. J., Wilson, T. M., Bebbington, M. S., Cole, J. W., & Craig. (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, G., Wilson, T., Deligne, N., & Cole, J. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148–182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>
- Wilson, Kaye, & GNS Science (N.Z.) (2007). *Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards* [OCLC: 217260623]. GNS Science.
- Wilson, T., Kaye, G., Stewart, C., & Cole, J. (2007). *Impacts of the 2006 eruption of merapi volcano, indonesia, on agriculture and infrastructure* [OCLC: 174067506]. Institute of Geological; Nuclear Sciences.
- Wilson, T. (2009). Vulnerability of pastoral farming systems to volcanic ashfall hazards [Accepted: 2011-12-02T00:25:59Z Publisher: University of Canterbury. Geological Sciences]. <https://doi.org/10.26021/9258>
- 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. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Wardman, J., Wilson, G., & Barnard, S. T. (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. (2007). Potential impact of ash eruptions on dairy farms from a study of the effects on a farm in eastern bay of plenty, new zealand; implications for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 43, 103–128. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9111-8>
- Wohletz, K. H. (1986). Explosive magma-water interactions: Thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies. *Bulletin of Volcanology*, 48(5), 245–264. <https://doi.org/10.1007/BF01081754>
- Yule, S. (2022, March 30). *Growing jackfruit tree: Planting, caring for and using jackfruits* [Morning-Chores]. Retrieved August 8, 2022, from <https://morningchores.com/growing-jackfruit-tree/>
- Zimanowski, B., Wohletz, K., Dellino, P., & Büttner, R. (2003). The volcanic ash problem. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122(1), 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00471-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00471-7)
- Zobel, D. B., & Antos, J. A. (1997). A DECADE OF RECOVERY OF UNDERSTORY VEGETATION BURIED BY VOLCANIC TEPHRA FROM MOUNT ST. HELENS. *Ecological Monographs*, 67(3), 317–344. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0317:ADOROU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0317:ADOROU]2.0.CO;2)

Annexes

A Questionnaire d'enquête sur le terrain

Table 14 – Volet 1 du questionnaire d'enquête de terrain : Contact

Farmer's first and last name:

Date:

Interviewer's first and last:

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

FARM - Generalities	
Address	
Total surface area of the farm crops + livestock + infrastructure ((if the farmer provides an estimate in local units, make sure that these can be converted later into more conventional ones)	
Type of farm Choose all the words that describe your farm	apiary - commercial - cooperative - crop - family - flower - hay - hobby - meat - microfarm organic - poultry - rice - subsistence farm - livestock raising - orchard - ranch - vineyard Other :
Additional information	

LANDSCAPE	
Type of landscape around the farm <i>Pleas provide as much details as you can (e.g., presence of a valley, rock outcrops, near a lake, next to a river, in a forest, next to a forest, grazing land, lots of vegetation, trees, shrubs, ...)</i>	

Farmer's first and last name:
Interviewer's first and last:

Date:

Infrastructures and their distance from the farm, from the crops, from water bodies ... (e.g., dwelling next to the farmhouse and at 500 m from the pig drinker, paths, roads, amenities, buildings, fences, ...)	
Additional information	

Table 15 – Volet 2 du questionnaire d'enquête de terrain : Système d'élevage

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS

Date :

DESCRIPTION OF LIVESTOCK	
DESCRIPTION	
Describe the livestock in your farm. What are the farm animals that you keep? Can you list them by category (i.e. cattle, pigs, goats, horses, poultry, etc)? For each category, how many animals do you have?	
Type of management for each animal (if possible) and time associated <i>Ex: kept outside during the day/inside during the night, 3 months always inside and 9 months outside during the day/inside during the night, all year round outside, ...</i>	
If animals are kept in a building, where do dejections go ? Are the animal dejections stored : what forms ? For how long?	
ANIMALS	
How many animals have been bought and/or received ? (=enter the system) Average per year ? <i>If possible, provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard</i>	
When did you acquire them for the farm?	
For what purpose? Reproduction? Meat production? Milk production? ...	
FOOD (What do animals eat each day ?)	
Do you grow food in your farm to feed the animals? If so, what types of crops do you grow for which animals specifically? How many animals do you feed with the crop you grow?	

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS

Date :

Do you use crop residues to feed your farm animal category? If so which crops and for which animals? In what form is this food given to each type of animal that can be kept outside the farmyard ? (i.e. roots, leaves, plants, ...) Quantity associated for each type of food and each animal category? <i>(If the farmer provides an estimate in local units, make sure that these can be converted later into usable ones)</i> What types of animal food come from fodder storage? In what quantities? <i>(make sure to clarify units)</i>	
What types of food are brought into the farm from outside to feed each type of animal ? (i.e distribution, market, neighbourhood, ...) In what quantities? <i>(make sure to clarify units)</i> Does this represent a large amount of the total food received by the farm animals? In what circumstances is/are the purchase(s) made? <i>Provide details for the different food types given</i> <i>I.e. purchases are made for cattle only when ...</i>	
Do animals graze on plots allocated to cropping? <i>Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard</i>	

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS

Date :

One which one(s)? *Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard*

For how long? *(If the farmer provides an estimate in local units, make sure that these can be converted later into usable ones / number of hours a day, all day and night long during 3 months, ...)*

What is/are the surface areas of the crop plots where animals are let to graze? *(make sure to clarify units)*

Do animals graze on lands that are not allocated to cropping? *Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard*

On which one(s) (i.e. grass on the side of the road, ...) ? *Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard*

For how long ? *(make sure to clarify units)*

What is/are the surface area(s) of the non-cultivated land(s) where the farm animals are let to graze? *(make sure to clarify units)*

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS

Date :

VETERINARY PRODUCTS	
Are medicine or vaccines given to the animals ? <i>Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard</i> What kind? How often? When? In what quantity? For what purpose?	
OUTFLOW	
How many animals are sold each year? <i>Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard</i> When are they sold? For what purpose?	
Which animal products are sold? <i>Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard</i> In what quantity? <i>(make sure to clarify units)</i>	
What animal products are kept for the farmer's own consumption? <i>Provide details for each type of animal that can be kept outside the farmyard</i> In what quantity? <i>(make sure to clarify units)</i>	

Table 16 – Volet 3 du questionnaire d'enquête de terrain : Système de culture

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS
CROP FLUXES

Date :

SHORT CYCLE CROPS/MARKET GARDENING	
DESCRIPTION OF CROPS	
What are the crops that you cultivate in your farm? Do you always sow the same crop on the same plot? <i>Provide details for each type of short-cycle crop if possible</i> If not, what is the crop cycle/rotation ? What is the cultivated surface area (make sure to clarify units) (crop by crop)? Provide details for each type of short-cycle crop if possible When do you sow and when do you harvest the crop product (crop by crop)? Provide details for each type of short-cycle crop if possible Where are the crop fields located (near the farm buildings, a river etc.) (crop by crop)? Describe the landscape where the different crops are cultivated (crop by crop)?	

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS
CROP FLUXES

Date :

SEEDS/PLANTS	
Do you use seeds or seedlings? Provide details for each type crop if possible Are the seeds/seedlings bought each year or do you produce them from your own crops from the previous cultivation cycle? Provide details for each type of crop if possible What amount of seeds (weight) / seedlings (number) do you use per unit of surface area (make sure to clarify units)? Provide details for each type of crop if possible Are the seeds you are using chemically treated (for example, to prevent fungal disease)?	
FERTILIZERS	
How do you manage soil fertility (crop by crop)? Provide details for each type of crop if possible Which fertilizer(s) do you use (crop by crop)? Provide details for each type of short-cycle crop if possible	

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS
CROP FLUXES

Date :

From where do you get the fertilizer(s)? Purchased? Composted crops (which one(s))? Unstored livestock manure and from which animals? Animals grazing on the crops and which animal type(s)? Provide details for each type of crop if possible	
Do the fertilizers you use come from the storage of animal manure? Are animals kept inside part of the year and their manure collected and stored? If so, how is manure stored, as solid compost or in liquid form? Provide details for each type of crop if possible In what quantity (make sure to clarify units) (crop by crop)? When ? How many times a year? (crop by crop) In which case(s) are fertilizers applied? Systematically? When needed and in this case, based on what?	
PHYTOSANITARY/PROTECTION PRODUCTS	
Do you use phytosanitary/protection products for crops? What types? (crop by crop) What is the amount you apply per surface area unit (make sure to clarify surface area units)? Provide details for each type of crop if possible	

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

BIOMASS
CROP FLUXES

Date :

When are they applied? How many times a year? (crop by crop)

Why? (crop by crop)

OUTFLOWS

What product do you sell? In what quantity?
(crop by crop)

What do you keep for personal
consumption? In what quantity ? (crop by
crop)

What amount of forage is stored ?

Table 17 – Volet 4 du questionnaire d'enquête de terrain : Économie

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

EXPENSES AND INCOME

Date :

EXPENSES AND INCOME		
GENERALITIES		
Total income of the farm during a "normal" year (pre- eruption and pre-covid)		
Total expenses of the farm during a "normal" year		
Other source(s) of income outside the farm and corresponding income generated yearly		
CROPPING SYSTEM		
Income (or proportion of the total income or proportion of cropping sytem) provided by	List each crop and revenue associated	
Expense (or proportion of the total income or proportion of cropping sytem) due to	List each crop and revenue associated	
Most cost-effective vegetal product and income associated		
Most expensive operation and expenses associated		
Additional information		
LIVESTOCK SYSTEM		
Income (or proportion of the total income or proportion of livestock sytem) provided by	List each animals and revenue associated	

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

EXPENSES AND INCOME

Date :

Expense (or proportion of the total income or proportion of livestock sytem) due to	List each animals and revenue associated	
Most cost-effective animal products and income associated		
Most expensive operation and expenses associated		
Additional information		

Table 18 – Volet 5 du questionnaire d'enquête de terrain : Main d'oeuvre

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

WORKING FORCES

Date :

WORKING FORCES		
GENERALITIES		
Number of people working daily on the farm?		
Number of seasonal people needed (please detail when and for which operation(s) they are needed)		
How are workers usually paid? (money, in kind, ...)		
Are some facilities or equipment shared with other farmers? If yes, which ones? For what? How is their usage paid?		
Main activity of the farm and what is the average income generated yearly?		
Secondary activity and what is its yearly income ?		
Tertiary activity and what is its yearly income ?		
Do you have another or other sources of income from outside of the farming activity? What is the yearly income generated by it (them)?		
CROPPING SYSTEM		
Number of people needed (or proportion of the total people or proportion of people needed in cropping system) for	List each crop and work associated	
Number of working hours (or proportion of the total hours or proportion of hours needed in cropping sytem) for	List each crop and work associated	
Operations that require more working force (+how much)		
Additional information		

Farmer's first and last name :
Interviewer's first and last

WORKING FORCES

Date :

LIVESTOCK SYSTEM		
Number of people needed (or proportion of the total people needed or proportion of people needed in livestock system) for	List each animals and work associated	
Number of working hours (or proportion of the total hours or proportion of hours needed in livestock sytem) for	List each animals and work associated	
Operations that require more working force (+how much)		
Additional information		

Table 19 – Volet 6 du questionnaire d'enquête de terrain : Inquiétudes et craintes

CONCERNS AND FEARS	
What is the major constraint that you have to face in your farm ? (water supply, finding cattle food, ...). Please explain	
Are there other constraints/problems you want to raise?	
What are your main concerns/fears regarding your future activities as a farmer? (e.g., another volcanic eruption, climate change, lack of water, not enough people working on the farm, ...)	
What are your future plans? (for the farm, for your life, ...) (e.g., wanting to stop raising livestock and focus solely on cropping, wanting to stop the entire farming activity, deciding when to buy new crops, when to move to the city, ...)	

Additional information	
------------------------	--

Table 20 – Volet 7 du questionnaire d'enquête de terrain : Retombées de téphra

VOLCANIC HAZARD		
How do you deal with volcanic hazard and especially volcanic ash fall ?		
What do you do when you have been warned that a volcanic hazard is coming?		
What are the most important things that you do when a volcanic hazard is coming and you haven't been warned in time?		
What are the negative consequences (disadvantages) of volcanic hazard? Write them from the worst to the less severe		
Are there positive consequences (advantages), if yes, which one(s) ? <i>Write them from the better to the least good</i>		
How do you evaluate the economic impact of volcanic ash fall on this elements and why ? (0 no impact; 5 high impact)	Short cycle crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Annual crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Perennial crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Animals living near the farm (monogastric)	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Grazing animal (herbivores and ruminants)	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5

5 strongest impact)	Permanent grassland	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Stored manure	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Forage	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
How do you evaluate the impact of volcanic ash fall on the yield of this elements and why ? (0 no impact; 5 strongest impact)	Short cycle crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Annual crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Perennial crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Animals living near the farm (monogastric)	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Grazing animal (herbivores and ruminants)	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Permanent grassland	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
How do you evaluate the impact of volcanic ash fall on the infrastructures (buildings, water supplies, ...) of this elements and why ? (0 no impact; 5 strongest impact)	Short cycle crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Annual crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Perennial crops	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Animals living near the farm (monogastric)	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5
	Grazing animal (herbivores and ruminants)	0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5

How do you evaluate the social impact of volcanic ash fall ? Explain	
How much time does it take to come back to a "normal" situation (situation without the influence of the volcanic hazard)?	
What are the factors that helped to come back to a "normal situation"?	
What should have been done to allow to get back to normal?	
What are the steps that need to be taken to recover after a volcanic ash fall ?	
Additional information	

B Tables et fonctions de fragilité créés par Wilson et al. (2007) évaluant les dégâts dans le secteur de l'agriculture en fonction de l'épaisseur de téphra

B.1 Agriculture pastorale

Table 21 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production laitière

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Ashfall may begin to impact production rates as pastures are coated with ash – may put stock off eating and create uncertainty for the farmer about the future (Neild et al., 1998; Cronin et al., 1996).
0.2	5	Pasture covered, stock put off eating, increased use of supplementary feed (possibly up to 100%), additional stress on dairy cow lowers production. Ash takes longer to be shed from pastures (rainfall needed) – prolongs reliance on supplementary feed. Once lactation ceases, there will be no more production for the season and farmers may need to consider destocking in some situations.
0.9	100 (low)	Pasture covered and supplementary feed stocks will be used to simply maintain herds rather than supply additional energy for milking. Limited milking could occur if electrical supply and milk tanker pickup services are still operational. Drastic de-stocking may be required, leaving only a small number of livestock with high breeding (genetic) value to enable some economic functioning of the farm during the crisis. Culling may be necessary as large scale stock evacuation is unlikely to be feasible (Neild et al., 1998; Wilson 2007). Hopefully there are sufficient stock remaining on farms to rebuild the previous economic capacity over time (potentially to pre eruption capacity), although this may be difficult with pasture reestablishment requiring time and sufficient resources to meet the likely high demand (i.e. seed, fertiliser and cultivation equipment).
	125 (average)	
	200 (high)	

Table 22 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de bétail bovin (viande)

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some increase in supplementary feed consumption as animals are put off pasture. Risk of chemical poisoning from aerosols (e.g. fluorosis).
0.2	10	Pasture covered, cattle put off feeding, animal health impacts, increased chance of aerosol poisoning, increased supplementary feed required as pastures are increasingly covered. This additional stress on the beef cows lowers their weight gaining potential. Ash takes longer to be shed from pastures (Neild et al., 1998).
0.9	100 (low)	All pasture will be coated with ash regardless of length, potentially stopping animals eating it. Pastures may be destroyed so will need to be rehabilitated as quickly as possible. Similar impacts as to dairy farms.
	175 (average)	
	300 (high)	

Table 23 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de moutons et de cerfs

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	lowest possible value – any ashfall is likely to impact production
0.2	7	Pasture will be mostly covered, stock put off eating, increased use of supplementary feed. Less resilient than beef as graze closer to ground level – higher level of volcanic ash ingestion (increased animal health impacts, e.g. teeth abrasion, aerosol poisoning, etc.).
0.9	90 (low)	Similar vulnerabilities to beef and dairy farms, with pasture rehabilitation likely to be required at this point.
	150 (average)	
	250 (high)	

Table 24 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs agricoles liés à la production animale

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5 mm	Possible damage to gutters on farm buildings, corrosion of metal roofs and fences, damage to cooling systems (condensers), farm machinery if operating in ashy conditions (Neild et al., 1998; Blong, 1984; Johnston, 1997)
0.2	70 mm	Damage to pastures creating a possible need to cultivate (plough under) ash layer, additional fertiliser inputs, potential long term loss of soil fertility. If the ash becomes wet and has not been cleared from roofs, then collapse may be possible (Spence et al., 2005). Animal deaths are likely to occur through lack of clean feed (dependant on supplementary feed reserves) and health problems.
0.9	200 mm (low)	Inability to plough ash into soil (Neild et al., 1998), possibly resulting in the need to consider land use change (e.g. to forestry). 300 mm of wet ash is a 6 kPa load, creating a 96% probability (P) roof collapse for weak roof; 70% P roof collapse for strong roof (Spence et al. 2005). It is likely the farm will suffer near complete loss of livestock herd, either through lack of feed, culling or health problems.
	300 mm (average)	
	400 mm (high).	

Table 25 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs agricoles

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5 mm	Possible damage to gutters on farm buildings, corrosion of metal roofs and fences, damage to cooling systems (condensers), farm machinery if operating in ashy conditions (Neild et al., 1998; Blong, 1984; Johnston, 1997)
0.2	70 mm	Damage to pastures creating a possible need to cultivate (plough under) ash layer, additional fertiliser inputs, potential long term loss of soil fertility. If the ash becomes wet and has not been cleared from roofs, then collapse may be possible (Spence et al., 2005). Animal deaths are likely to occur through lack of clean feed (dependant on supplementary feed reserves) and health problems.
0.9	200 mm (low)	Inability to plough ash into soil (Neild et al., 1998), possibly resulting in the need to consider land use change (e.g. to forestry). 300 mm of wet ash is a 6 kPa load, creating a 96% probability (P) roof collapse for weak roof; 70% P roof collapse for strong roof (Spence et al. 2005). It is likely the farm will suffer near complete loss of livestock herd, either through lack of feed, culling or health problems.
	300 mm (average)	
	400 mm (high).	

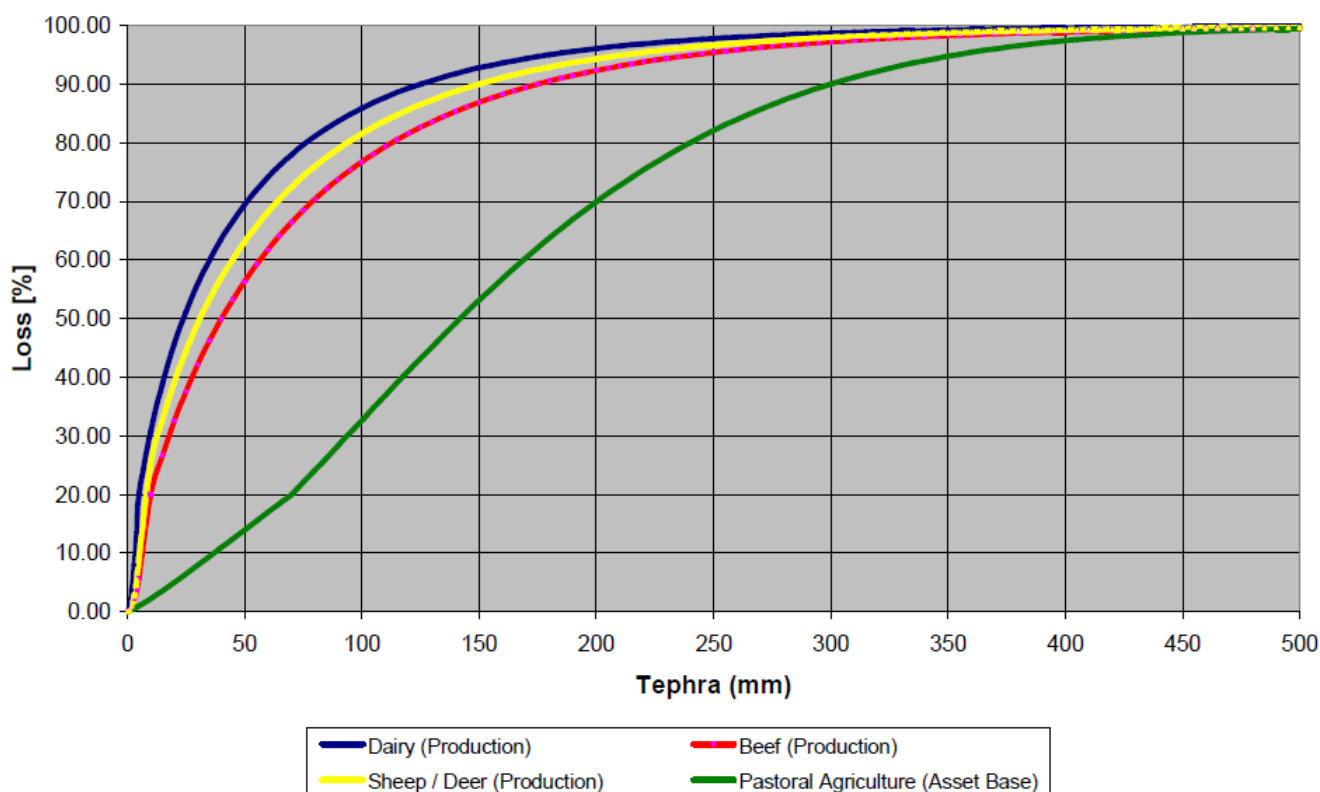


Figure 28 – Fonctions de fragilité pour l'agriculture pastorale

B.2 Horticulture

Table 26 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de légumes à feuilles

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some abrasion and chemical impacts.
0.2	2	Ash abrasion and chemical impacts on plants. Increased difficulty removing volcanic ash from crops to a satisfactory level for sale. Careful hand washing techniques may be necessary to remove ash from leaves and crevices at bases of leaves (Wilson et al., 2007).
0.9	5 (low)	Ninety percent of crop is likely to be un-saleable as volcanic ash coverage is of sufficient amounts to either destroy crops, or make ash removal so expensive as to make harvesting un economical (Barnard, 2003).
	10 (average)	
	30 (high)	

Table 27 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de légumes-fruits

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some abrasion and chemical damage
0.2	3	Some of crop destroyed from abrasion of fruit by ash and absorption of ash similar into skins, similar to tree crops but more severe as closer proximity to the ground (secondary deposition, wind abrasion, thicker bunches of leaves on stalks)
0.9	5 (low)	Very small amount of crop can be successfully harvested and sold after intense washing and ash removal efforts during cleanup.
	10 (average)	
	20 (high)	

Table 28 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de légumes-racines

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5	Some abrasion and chemical damage to leaves. Most of the crop value retained as the valuable root remains unaffected and the relatively small thickness of ash may be washed from leaves over time either manually or naturally.
0.2	30	Increased impacts to above ground leaves, possibly causing smothering or acidification damage.
0.9	50 (low)	Crop lost due to higher amounts of ash accumulating and overwhelming leafy vegetable stalks near to the ground, which might decimate the portions of the plants above ground, but allows for removal of below ground (valuable) portions with some difficulty.
	100 (average)	
	150 (high):	

Table 29 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de cultures arboricoles

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Losses expected due to pitting of fruit skin and absorption of ash into the fruits (Barnard, 2003). Some impact to harvesting operations.
0.2	3	Higher frequency of occurrence of losses due to pitting and skin damage, also harvesting operations more severely affected.
0.9	10 (low)	Severe impact to fruit, possible breakage of tree branches. Very small amount of crop can be successfully harvested and sold, even after intense washing and ash removal efforts.
	20 (average)	
	50 (high)	

Table 30 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur la production de raisins pour le vin

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some abrasion and chemical impacts to grapes. Some impact to harvesting operations.
0.2	2	Intensive steps necessary to save fruit (hand washing). Costs to recover grapes by removing ash begin to equal value of crop.
0.9	1 (low)	Grapes nearly all destroyed by volcanic ash – near total loss of crop.
	5 (average)	
	20 (high)	

Table 31 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs de cultures saisonnières

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5	impacts to gutters on farm buildings, corrosion of metal roofs, fences, damage to cooling system (condensers), farm machinery if operating in ashy conditions
0.2	100	impact to soils, need to cultivate (plough under) ash layer, additional fertiliser inputs, potential long term loss of soil fertility. Wet ash – roof collapse (Spence et al., 2005). Specialist harvesting equipment may be damaged if operated in ashy conditions.
0.9	200 (low)	Inability to plough ash into soil – land use change to forestry may be required.
	300 (average)	
	400 (high).	

Table 32 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs de cultures permanentes

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	3	Few trees and plants destroyed, some damage to farm infrastructure
0.2	75	Trees and plants breaking under ash load, minor damage to farm infrastructure
0.9	250 (low)	Widespread damage to trees and plants, high risk of building and equipment damage (as mentioned within seasonal crops).
	350 (average)	
	100 (high)	

Table 33 – Ratio et justification des dommages causés par les retombées de téphra sur les actifs viticoles

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	3	Few trees and plants destroyed, some damage to farm infrastructure
0.2	75	Trees and plants breaking under ash load, minor damage to farm infrastructure
0.9	250 (low)	Widespread damage to trees and plants, high risk of building and equipment damage (as mentioned within seasonal crops).
	350 (average)	
	100 (high)	

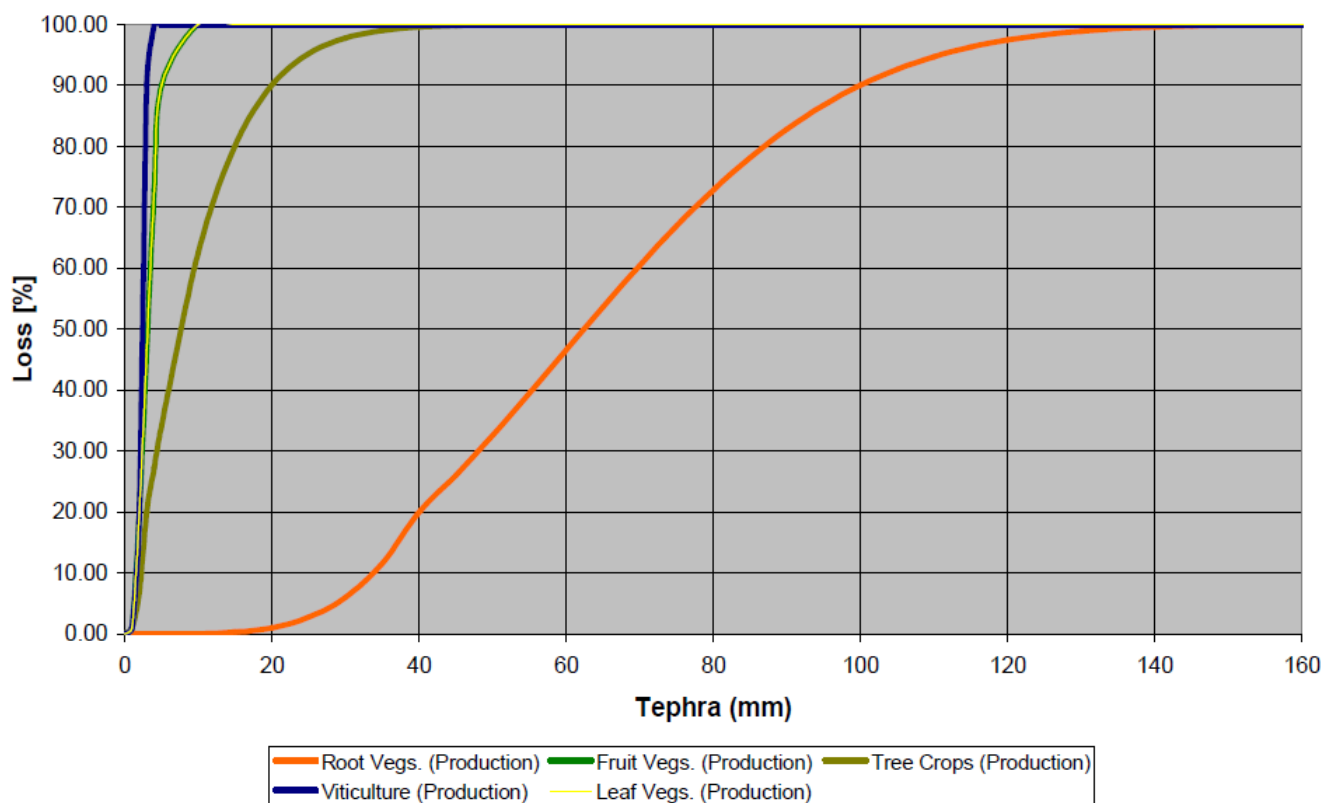


Figure 29 – Fonctions de fragilité pour l'agriculture horticole (perte de production)

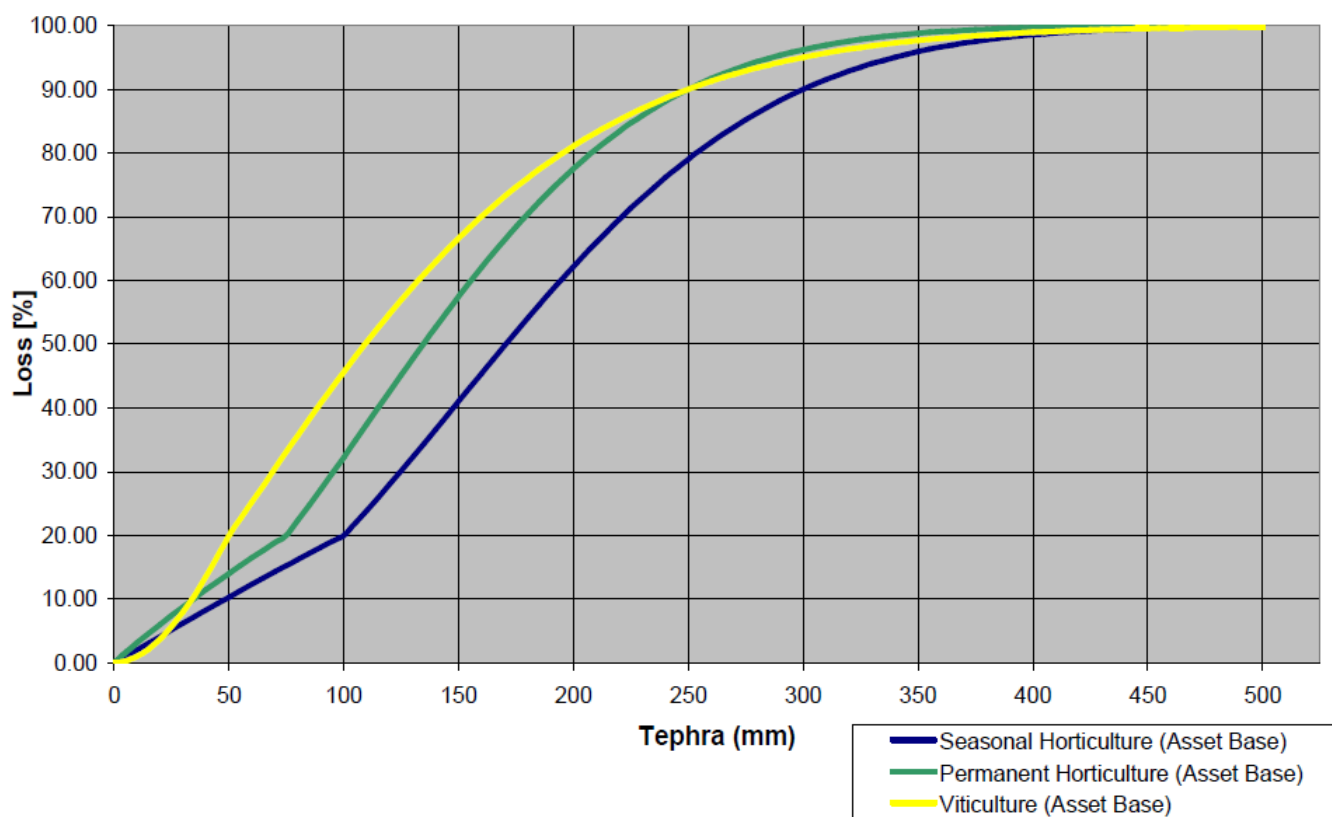


Figure 30 – Fonctions de fragilité pour l'agriculture horticole (perte d'actifs)

C Évaluation des pertes de production pour différents types d'agriculture pour différents dépôts et tables des impacts potentiels par secteur selon l'épaisseur des dépôts de téphra (S. Jenkins et al., 2015)

Code:			D0	D1	D2	D3	D4	D5
Description:			No damage	Disruption to harvest operations and livestock grazing of exposed feed	Minor productivity loss: less than 50 %/crop	Major productivity loss: more than 50 %/crop; Remediation required	Total crop loss; Substantial remediation required	Major rehabilitation required/ Retirement of land ⁷
AGRICULTURE TYPE:	Horticulture & Arable	Ground Crops & Arable	0 mm (0-20 mm)	1 mm (0.1-50 mm)	5 mm (1-50 mm)	50 mm (1-100 mm)	100 mm (25-200 mm)	300 mm (100- 500 mm)
		Tree Crops	0 mm (0-20 mm)	1 mm (0.1-50 mm)	5 mm (1-50 mm)	50 mm (1-100 mm)	200 mm (5-500 mm)	300 mm (200- 500 mm)
	Pastoral		0 mm (0-20 mm)	3 mm (0.1-50 mm)	25 mm (1-70 mm)	60 mm (20-150 mm)	100 mm (30-200 mm)	300 mm (100- 500 mm)
	Paddies		0 mm (0-50 mm)	1 mm (0.1-50 mm)	30 mm (1-75 mm)	75 mm (20 - 300 mm)	150 mm (75 – 300 mm)	300 mm (100- 750 mm)
	Forestry		0 mm (0-75 mm)	5 mm (0.1-75 mm)	200 mm (20-300 mm)	1000 mm (100-2000 mm)	1500 mm (100->2000 mm)	?

Figure 31 – Évaluation des pertes de production de différents types d'agriculture suivant l'épaisseur du dépôt de téphra. Les valeurs données correspondent aux valeurs médianes et aux interdéciles des épaisseurs de téphra sec approximées.

Table 34 – Impacts potentiels d’une épaisseur de dépôt de téphra de 1 à 10 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages

	Potential consequences	Relevant ash characteristics
Public health	Casualties from fall deposits may occur, e.g. due to people falling from roofs during clean-up. However, the most commonly reported public health effects of ash exposure are irritation of the eyes and upper airways and exacerbation of pre-existing respiratory conditions, such as asthma. Serious health problems (requiring hospitalisation) are rare. A proportion of the population is likely to experience increased levels of psychological distress due to factors such as increased workload during the eruption and uncertainty about effects on health and livelihoods. People with pre-existing health vulnerability are more at risk of psychological distress. Individuals who may be exposed to ash conditions will require protective clothing and masks Most road markings obscured; traction and visibility problems; Airports often closed and requiring clean-up. Increased wear of engine and brakes; possible signal failure on railway lines.	Particle size; Mineral composition; Surface area; Morphology; Soluble salt burden; Thickness
Infrastructure	Possible clogging of air- and water-handling and filtration systems, mechanical and electrical equipment and abrasion damage by waterborne ash to pump impellers and turbines. Minor short-term increases, particularly in streams and small reservoirs, in elements leached from ash. Blockage of water intake structures, particularly in streams. Suspended ash in water intakes and sewer lines a possible threat to water/wastewater treatment plants. Open systems (e.g. with open air sand filters) are more vulnerable. Potential flashover of power lines and transformers (particularly in light wet weather conditions). Corrosion and/or abrasion of, e.g. paintwork, windcreens, metallic elements, some air- and waterhandling, mechanical, electrical equipment or engines. Possible damage to external telecommunication components or power cables.	Thickness; Particle size; Mechanical strength Soluble salt burden; Conductivity; Abrasiveness; Particle size
Buildings	No structural damage. Possible infiltration and internal contamination and corrosion of metallic components. Roofing materials may be abraded or damaged by human actions during ash removal. Effects on livestock expected to be minor but may include irritation of eyes and skin. Animals may ingest ash along with feed but small quantities are unlikely to cause harm. Cases of fluorosis (if ash contains moderate to high levels of soluble F) are rare but have been reported for these depths of ash fall.	Loading; Soluble salt burden; Abrasiveness
Agriculture	Ash coverage of crops, may lead to aesthetic discolouration and/or acid damage to leaves and fruits and abrasion during clean-up or harvest. Ash fall may have beneficial effects on soil if ash contains high levels of available plant growth nutrients such as sulfur, and may provide a beneficial mulching effect. Ash may also encourage or discourage pests and/or pollinating insects. Minor clean-up required: sweeping of roads, paved areas and roofs/gutters usually sufficient. Ash falls of only a few mm depth will generate large volumes of ash for collection and disposal and clean-up is a timeconsuming, costly and resource-intensive operation. Water demand may remain high for months afterwards if wind-remobilised ash requires dampening	Soluble salt burden; Particle size; Abrasiveness
Clean-up		Thickness; Density; Abrasiveness
Economy	Some economic activities may increase, e.g. volcano tourism, but most will be disrupted. Disruption to work and travel. Clean-up cost. Increased maintenance costs (e.g. at water supply plants where sand filter beds may need to be cleaned more frequently). Increased labour and health and safety requirements.	Thickness; Presence

Table 35 – Impacts potentiels d’une épaisseur de dépôt de téphra de 10 à 100 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages

	Potential consequences	Relevant ash characteristics
Public health	Short-term effects as for Table 3.2 but with greater proportions of the population affected. Ash deposit remobilisation may prolong effects of ash exposure. Increased likelihood of long-term physical and psychosocial effects in vulnerable individuals. Self or official evacuations more likely.	Thickness; Particle size; Mineral composition; Surface area; Soluble salt burden
Infrastructure	Ground transport networks disrupted by visibility and traction problems. Airports closed. Ash accumulation may overload lines, weak poles and light structures, and cause additional treefall onto lines. Suspended ash in water intakes and sewer lines a threat to water/wastewater treatment plants. Changes to surface water composition from elements leached from ash still likely to be minor. Possible blockage of storm drains, ditches and/or sewers, leading to surface flooding (depending on catchment size and system or network design).	Thickness; Particle size Thickness; Particle size; Abrasiveness
Buildings	In rare instances, non-engineered and long span roofs may be vulnerable to damage, particularly when ash falls wet or is subsequently wetted. Non-structural elements such as gutters and overhangs may suffer damage. Some infiltration of dry ash into interiors.	Loading
Agriculture	Effects on livestock as for Table 3.2 but likely to be more pronounced. Thicker ash falls may smother feed and restrict access to drinking water, leading to starvation and/or dehydration. Ingestion of larger quantities of ash along with feed may cause intestinal blockages. Livestock likely require supplementary feed due to ash coverage of pasture. Cases of fluorosis (if ash contains moderate to high levels of soluble F) more probable. Ash coverage of plants may lead to loading damage and shading from light. Windblown ash may burden strip foliage. Acidic ash leachate may damage fruit or foliage. Ash coverage of soils will have increasingly detrimental impacts with increasing thickness (with some dependency on grain sizes).	Thickness; Mechanical strength; Soluble salt burden
Clean-up	All roads and paved areas on public and private properties require cleaning. Private properties usually require assistance with clean-up/disposal. Need for co-ordination of clean-up. Ash dump(s) established and maintained to reduce ash mobilisation	Thickness; Abrasiveness
Economy	Considerable production losses possible from impact to crops and livestock. Loss of assets possible, e.g. farm land disruption requiring at least temporary land-use change. Repeated ash falls or remobilisation of deposits drives health concerns that can disrupt business activities, e.g. employee anxiety, and the tourism industry.	Thickness; Soluble salt burden

Table 36 – Impacts potentiels d’une épaisseur de dépôt de téphra de 100 à 1000 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages

	Potential consequences	Relevant ash characteristics
Public health	Casualties (blunt trauma injuries from impact or falling debris, suffocation/inhalation injuries) possible from collapse of buildings or trees. Prolonged or permanent relocation possible due to concerns about health and disruption to critical infrastructure and economic activities. Prolonged exposure to ash leading to high prevalence of effects described in Table 3.2. Increased levels of stress may manifest as psychological morbidity (e.g. post-traumatic stress syndrome or depression). Prolonged exposure to ash may increase risk of chronic silicosis or inflammatory responses.	Particle size; Mineral composition; Surface area; Morphology; Soluble salt burden; Loading
Infrastructure	networks severely affected by reduced traction. Very thick ash falls may create extra loading on bridges, especially when wet. Substantial and repeated clean-up of sites required; dry, windy conditions exacerbate remobilisation and drifting. Most generation plants likely to be disrupted. Major and ongoing damage to water supply intake structures located in streams; blockages of canals, intake structures and pipes. Blockages of underground drainage leading to surface flooding. High risk of severe damage to water- and wastewater- treatment plants if ash enters systems through intakes, or by direct ash fall. Non-engineered and long span or low pitched roofs more vulnerable to collapse.	Thickness; Density; Particle size Thickness; Particle size; Mechanical strength
Buildings	Non-structural elements (such as gutters) likely to be damaged.	Loading
Agriculture	Burial of pasture and most crops; loading damage to tree crops and shade trees likely. Soil rehabilitation, e.g. through mixing or removal of the ash, is typically required for agricultural production to be restored. The buried soils fertility may wane over time as key soil processes are broken or inhibited by ash blanket (i.e. water, oxygen and nitrogen cycles). Damage/burial of farm assets, including machinery, irrigation systems, access-ways, etc	Thickness; Loading; Density; Particle size
Clean-up	Tree damage possible in production forests, particularly for those not adapted to snow. As for thinner ash falls, but much larger volumes will require greater resources, time, repeated and frequent clean-up. Vegetated areas (e.g. parks and gardens) may require cleaning.	Loading; Thickness
Economy	Losses associated with business interruption, supply chain failures, reconstruction and relocation costs and loss of land. Prolonged disruption to economic activities may drive evacuations and associated direct and indirect economic losses.	Loading; Thickness

Table 37 – Impacts potentiels d’une épaisseur de dépôt de téphra supérieure à 1000 mm par secteur et les caractéristiques clés des téphra déterminant le niveau de dommages

	Potential consequences	Relevant ash characteristics
Public health	Casualties possible from collapse of buildings or trees (see Table 3.4). Rescue operations are likely to be required. Prolonged or permanent relocation possible due to land-use change from very thick ash deposits.	Thickness; Particle size; Mineral composition; Surface area; Morphology; Soluble salt burden; Loading
Infrastructure	Structural damage to all structures possible. Most infrastructure systems will be damaged and disrupted for extended periods. Ground transport networks rendered impassable to most vehicles. Substantial and repeated clean-up of sites required; fluvial remobilisation of unconsolidated deposits is likely for years to decades; dry, windy conditions exacerbate remobilisation and drifting.	Thickness; Density; Particle size; Loading
Buildings	Structural damage to most buildings likely.	Loading
Agriculture	Total burial of crops/pastures, likely requiring land-use change without rehabilitation. The buried soils fertility will decrease over time as key soil processes are sealed off. Tree damage likely in production forests.	Thickness; Loading; Density; Particle size
Clean-up	As for thinner falls, but much larger volumes will require greater resources, time and repeated and frequent clean-up. It may not be economic to undertake a clean-up operation.	Loading; Thickness
Economy	Losses associated with business interruption, supply chain failures, reconstruction and relocation costs and loss of land. Prolonged disruption to economic activities may drive evacuations and associated direct and indirect economic losses.	Loading; Thickness

D Coordonnées GPS des sept fermes étudiées

Table 38 – Coordonnées GPS (latitudes et longitudes) des sept fermes étudiées

Fermes	x	y	Localisation du points GPS
1	274027	1540551	Devant la maison
2	273537	1540319	Devant la maison
3	274508	1542213	Route devant la ferme
4	273329	1537488	Lieu de réunion, les champs sont plus loin
5	280736	1566758	Route devant la ferme
6	282225	1563205	Champs d'ananas
7	275549	1572765	Dans la ferme

E Modèles conceptuels des exploitations agricoles

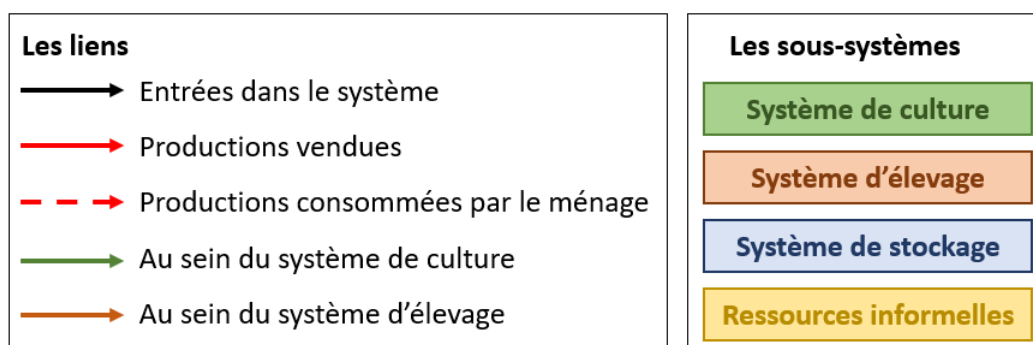


Figure 32 – Légende des modèles conceptuels

Exploitation 1

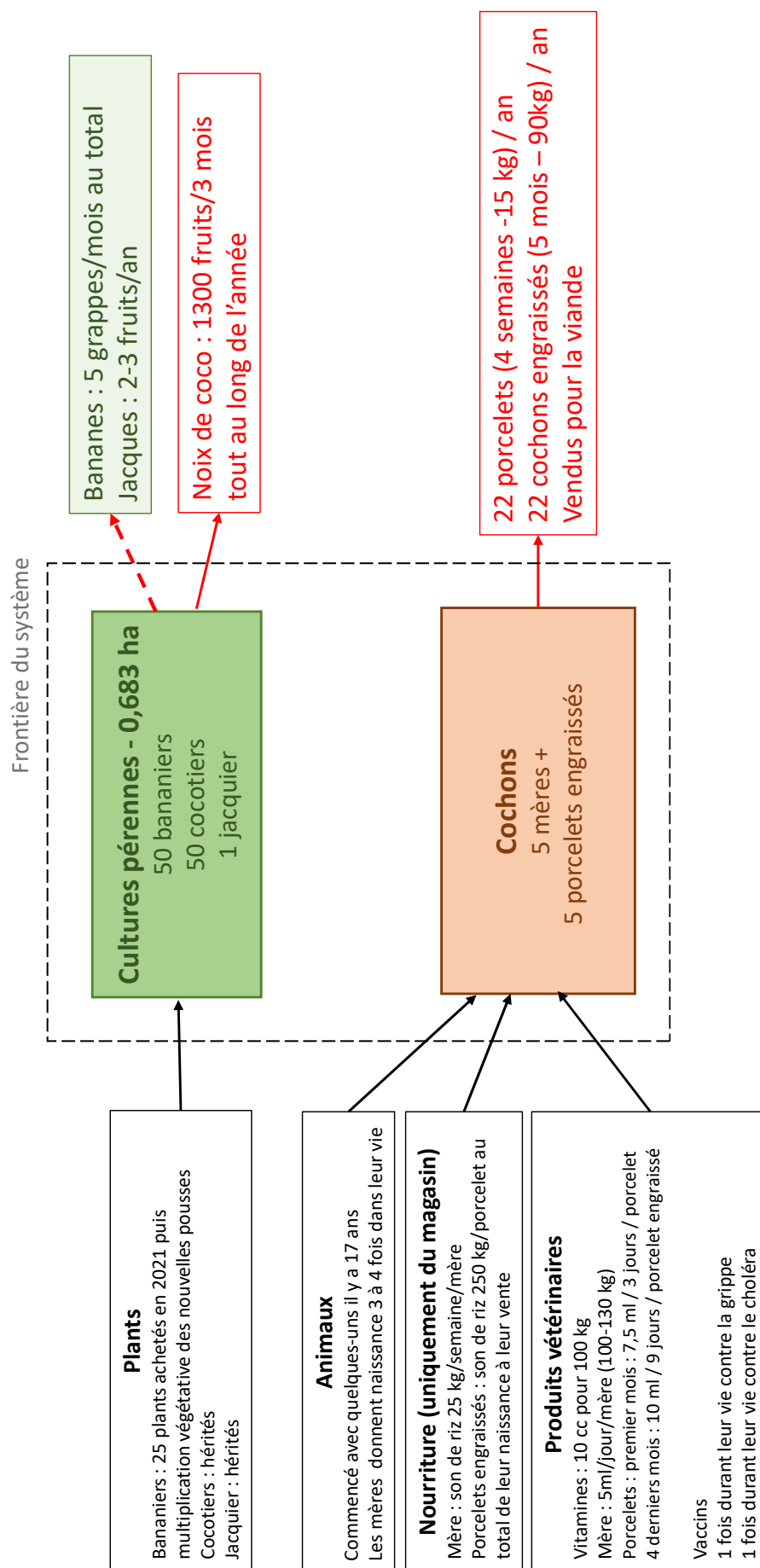


Figure 33 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°1

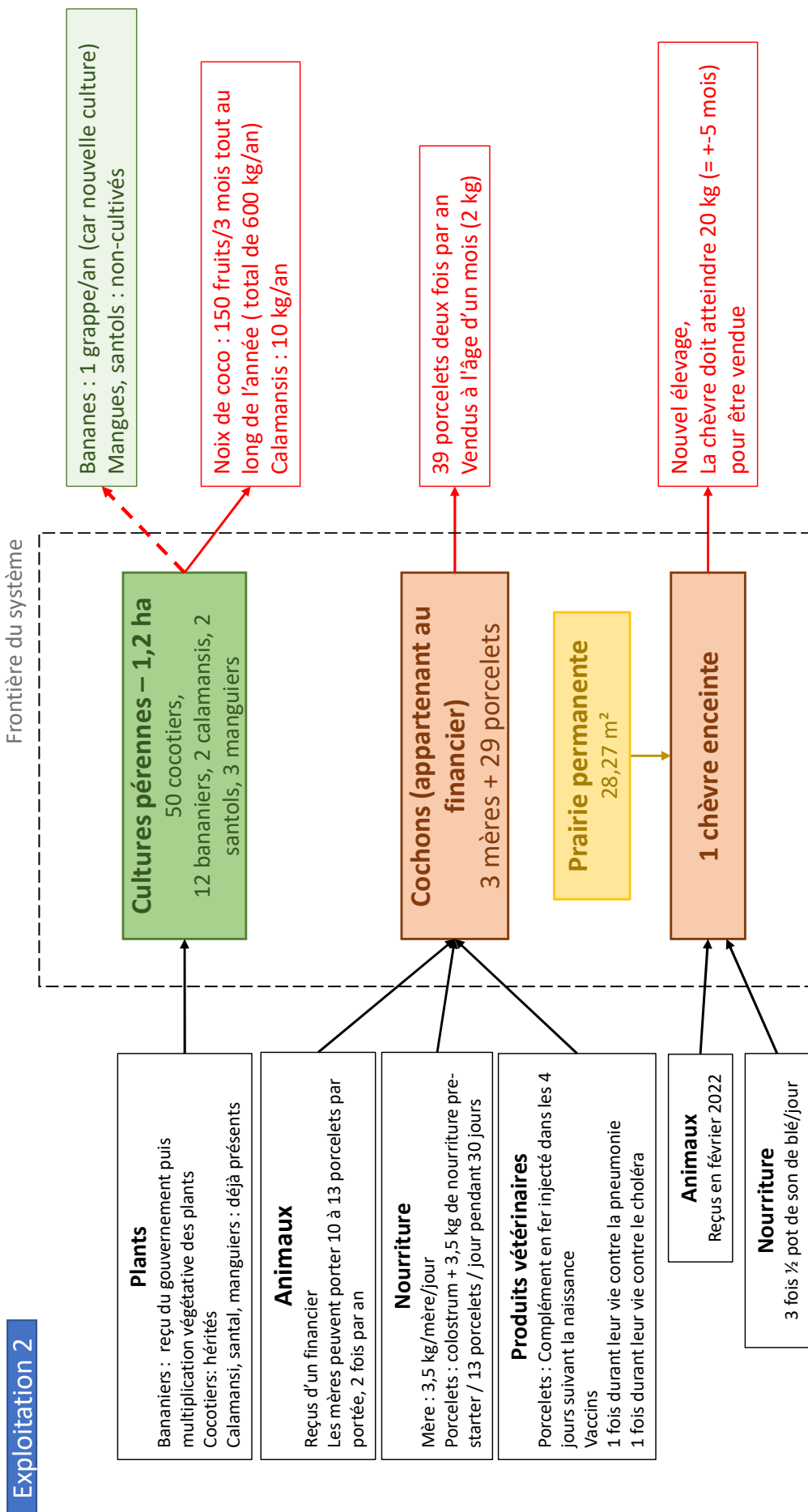


Figure 34 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°2

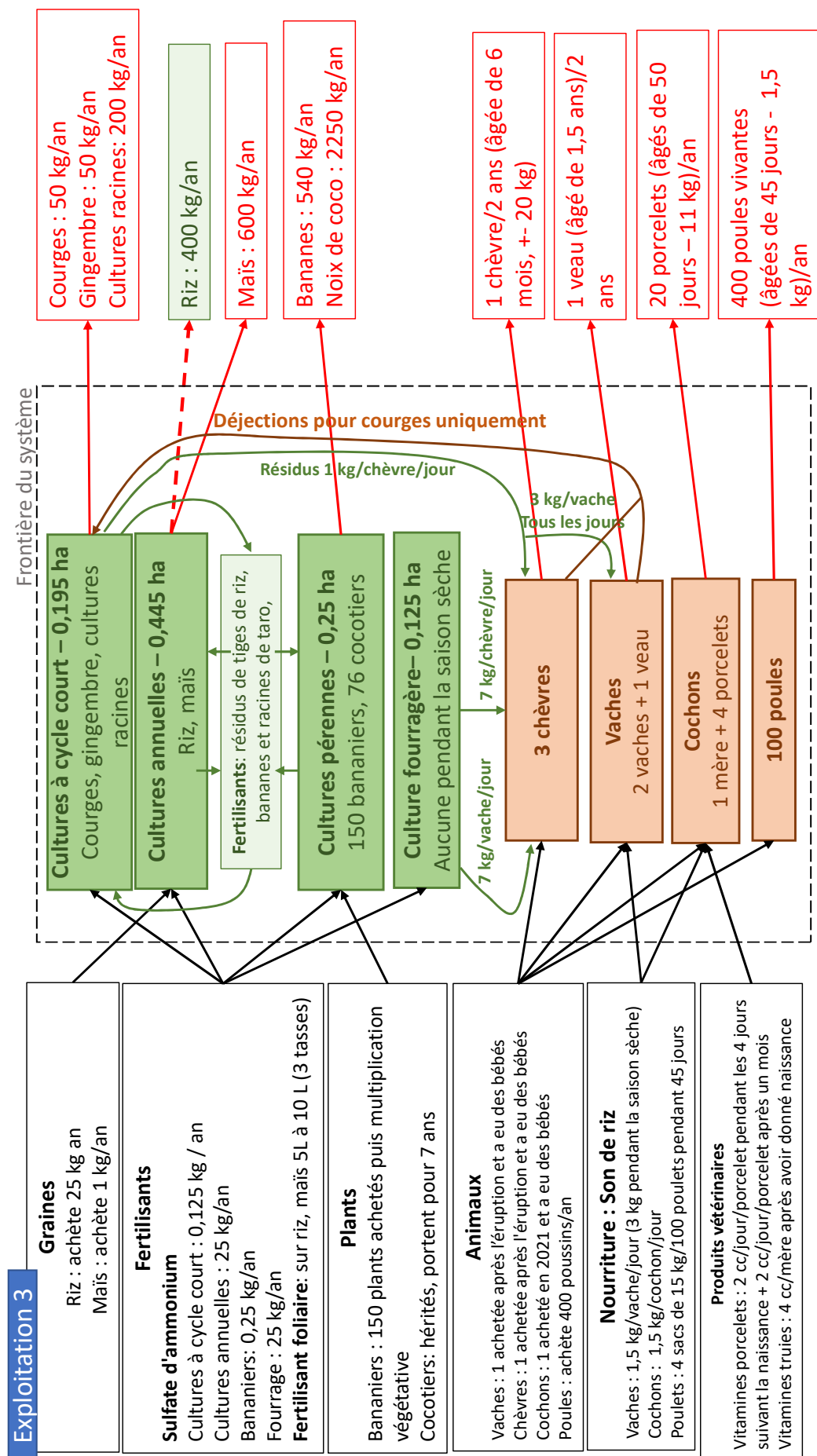


Figure 35 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°3

Exploitation 4

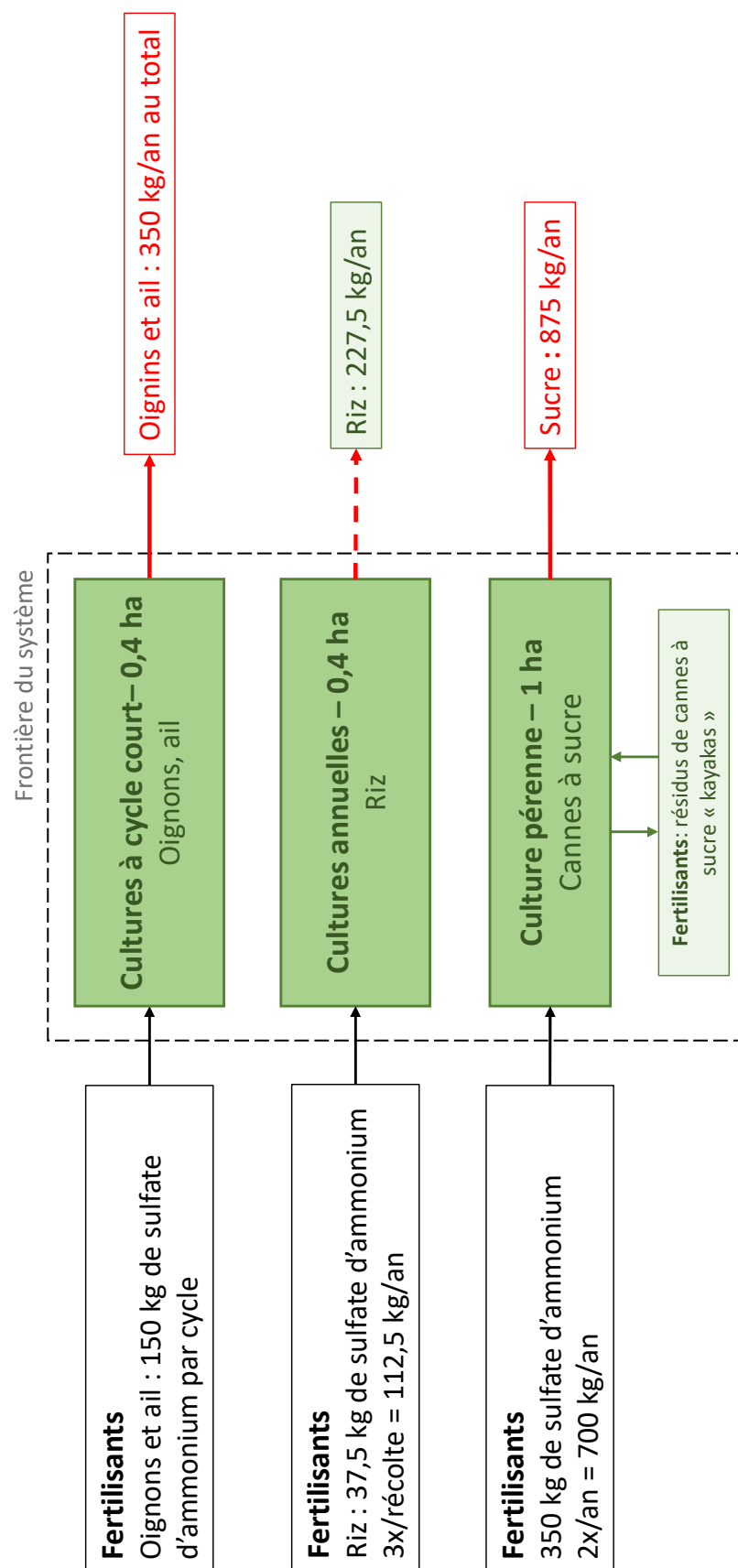


Figure 36 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°4

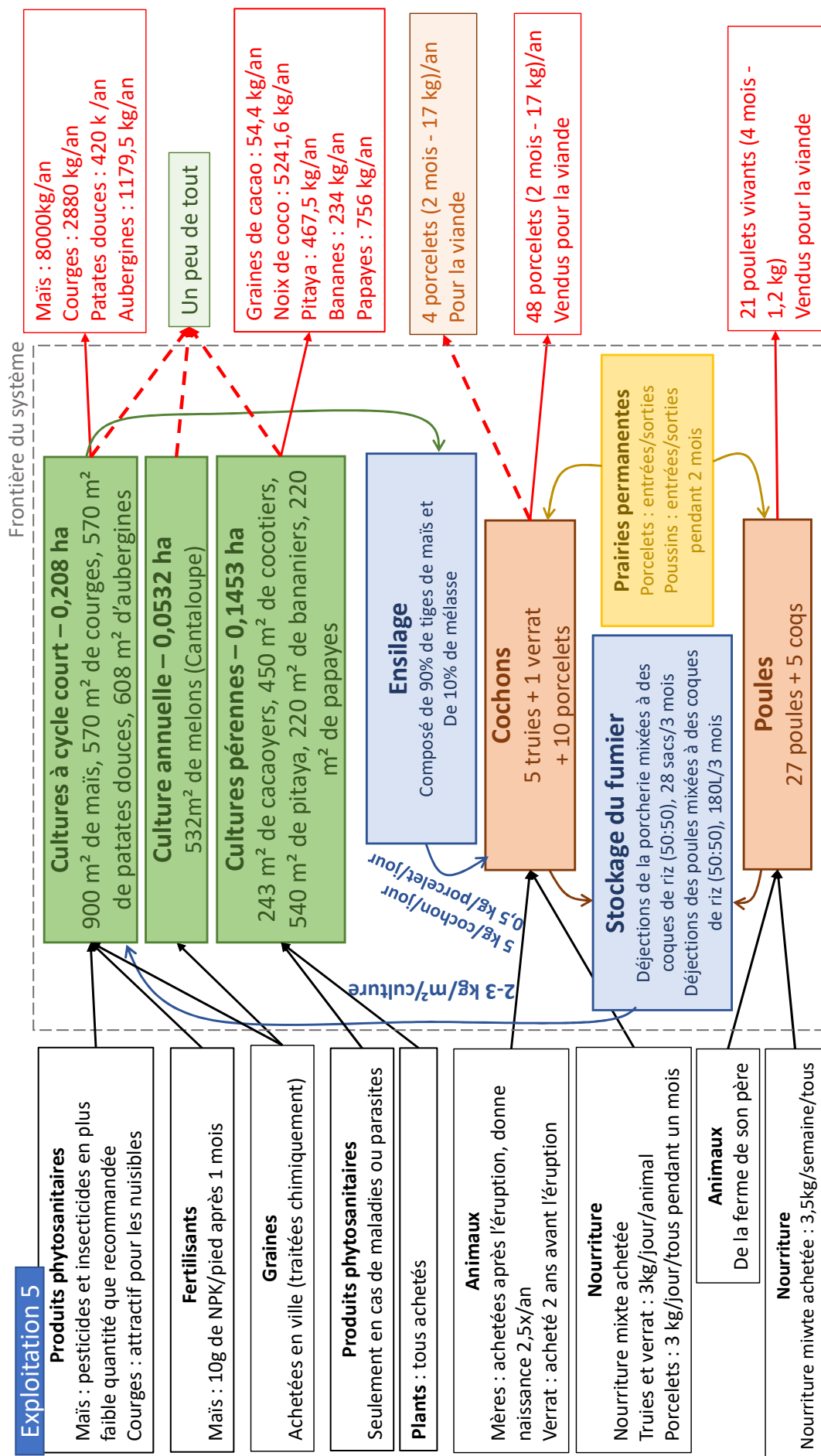


Figure 37 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°5

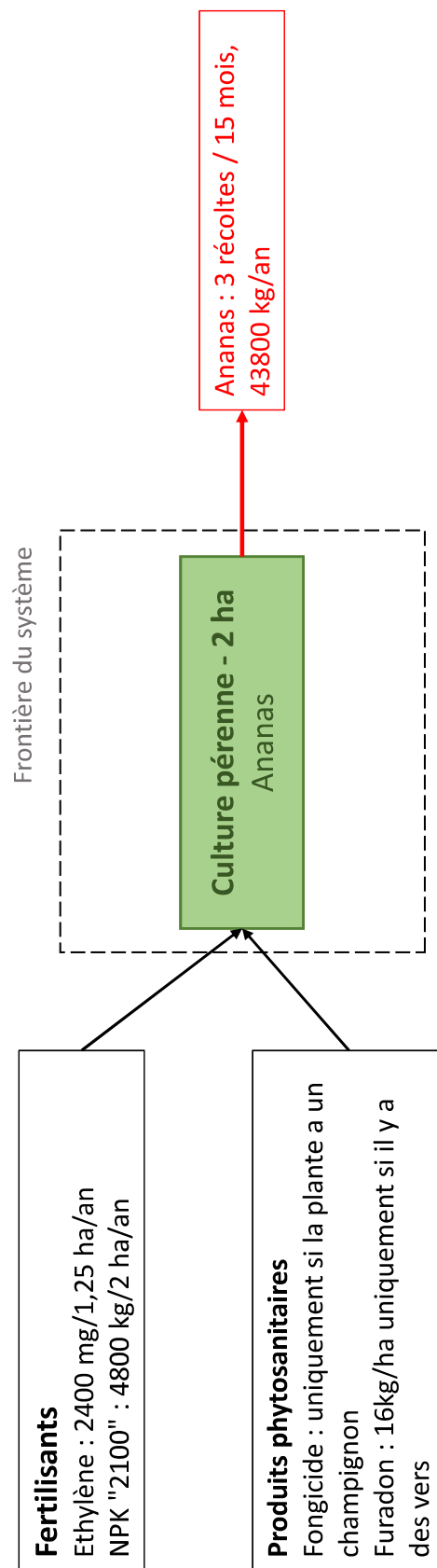


Figure 38 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°6

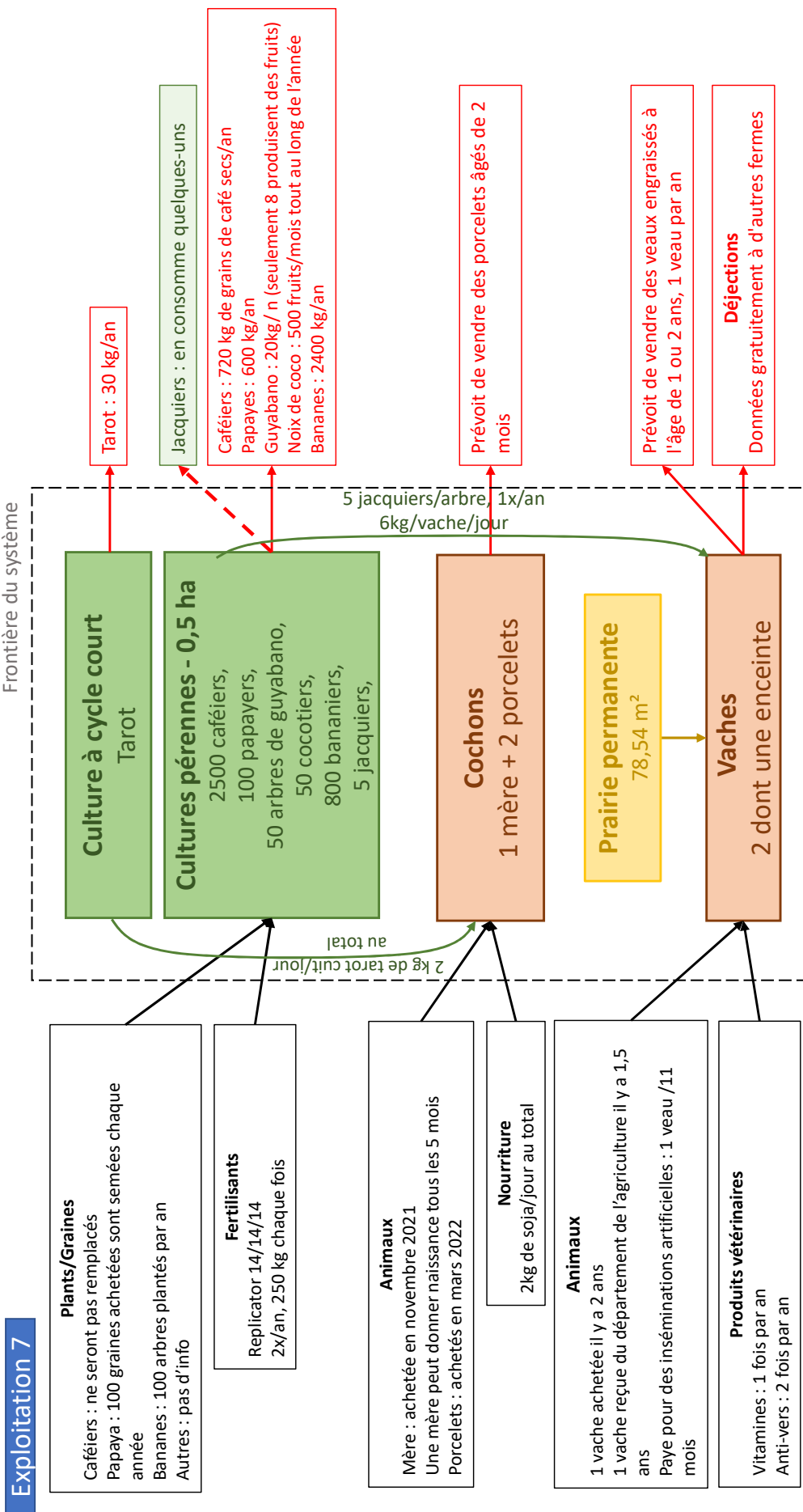


Figure 39 – Modèle conceptuel de l'exploitation n°7

F Descriptions des systèmes agraires non analysés quantitativement

F.1 Système agricole uniquement composé d'un système de culture

Les exploitations n°4 et n°6, ne se basant que sur la culture et non le bétail, sont les fermes à la gestion la plus simple. De plus, aucun recyclage de la matière organique n'est effectué, les exploitations sont donc totalement dépendantes des intrants provenant de l'extérieur du système.

Exploitation n°4 (Annexe E, Figure 36)

L'exploitation n°4 est une ferme de type commercial et de subsistance située dans le quartier de Malinis dans la commune de Lemery (province de Batangas). Le paysage est formé de collines sur les hautes terres et d'une plaine sur les terres basses. Un hectare de cannes à sucre, situé dans les terres hautes, est planté chaque année en décembre et 875 kg de sucre sont récoltés l'année suivante en avril. Sur les terres basses, 0,4 hectares de riz sont semés aux alentours de juillet, fournissant 230 kg de riz après trois mois. Soixante jours plus tard, des oignons et de l'ail sont plantés et l'ensemble de leurs récoltes est de 350 kg par an. Ensuite, divers légumes, variant selon les années, sont également plantés. Seuls le sucre, les oignons et l'ail sont commercialisés, générant par an respectivement, 33,9 et 66,1 % du revenu total net de 68 076,92 pesos par an. Toutefois, ces valeurs sont à prendre avec précaution. Les revenus nets par an associés à la production de cannes à sucre, soit 23 076,923 pesos pour 875 kg de sucre, ont été calculés sur base des données pré-éruption. Avant l'éruption, 6 825 kg de riz étaient récoltés par 18 à 20 travailleurs saisonniers et généraient 115 400 pesos nets par an. N'ayant pas obtenu les valeurs de production et de revenus précis mais sachant que le nombre de saisonniers est passé de 18-20 travailleurs à 2-3 après l'éruption, les données ont simplement été multipliées par 0,128. Ceci est une hypothèse grossière puisque beaucoup de facteurs peuvent avoir changé tels que le prix de vente, des fertilisants, la paie des travailleurs, ... Si les productions de sucre étaient restées de 6 825 kg, la culture de cannes à sucre générerait 72 % des revenus totaux nets par an alors que les oignons et l'ail ne représenteraient que 28 % de ceux-ci. Suivant le cas retenu, l'interprétation de l'importance de la culture par rapport aux revenus produits est donc très différente. Les valeurs concernant la canne à sucre reprises dans la Table 39, sont celles fournies pré-éruption par le propriétaires de la ferme.

Bien que l'exploitation utilise un apport important de fertilisants provenant du système, une partie de ceux-ci provient directement de résidus de culture produits par la ferme. En effet, les résidus de cannes à sucre, appelés "kayakas", sont rassemblés et brûlés. Les cendres sont ensuite mélangées aux sols et servent d'engrais pour les cultures suivantes.

Table 39 – Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°4

EXPLOITATION N°4									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures à cycle court									
Riz	0,4	-	1	7	sac	32,5	-	227,5	-
Oignon/ail	0,4	-	1					350	50000
Cultures pérennes									
Cannes à sucre	1	-	1	7	camion	975	25714,3	875	23076,923
Production totale								1452,5	73076,923

Exploitation n°6 (Annexe E, Figure 38)

L'exploitation n°6 se trouve dans une région vallonnée de la ville de Tagaytay (province de Cavite). Cette ferme, de type commercial, avec ses deux hectares de monoculture d'ananas (Figure 40) est la structure la plus simple des sept exploitations rencontrées. Tous les quinze mois, trois récoltes de 10000 ananas sont effectuées, chacune d'elle générant 510 000 pesos (410 000 pesos nets).



Figure 40 – Culture d'ananas de l'exploitation n°6

Les calculs du revenu tiennent compte du fait de la différence de calibres des ananas (small - medium - large), leurs poids (1 - 1,75 - 2 kg), leurs prix (30 - 40 - 60 pesos) et leurs proportions respectives par récolte (0,1 - 0,3 - 0,6) entraînant une estimation de 1,825 kg par fruit (Table 40).

En ce qui concerne les intrants, seuls le fertilisant "NPK 2000", à raison de 1000 kg par hectare tous les cinq mois, et 2,4 L d'éthylène par hectare appliqués cinq mois avant la date de récolte prévue, entrent dans le système. En effet, bien que le cycle des ananas n'est que de trois ans, aucun nouveau pied n'est acheté en dehors du système car 0,75 hectares des deux hectares de cultures sont destinés à la formation de ces nouveaux pieds. Après la floraison, une plante d'ananas peut donner cinq à sept pieds si la fructification n'est pas induite par l'application d'éthylène. Il est donc supposé que

l'éthylène n'est appliqué que sur 1,25 ha afin de permettre la régénération des pieds d'ananas sur 0,75 ha.

Table 40 – Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°6

EXPLOITATION N°6									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures pérennes Ananas	2	-	2,4	10000	fruit	1,825	51	43800	1224000
Production totale								43800	1224000

F.2 Système agraire composé d'un système de culture et d'élevage sans interaction entre les systèmes

L'exploitation n°2 (Annexe E, Figure 34) est située à 500m de l'exploitation n°1 dans les plaines aux collines ondulées du quartier de Coral Na Munti (province d'Agoncillo).

L'exploitation a une superficie de 1,206 hectares où poussent des cocotiers, bananiers, calamansi, santols et manguiers. Tout comme pour l'exploitation n°1, aucun fertilisant ou produit phytosanitaire n'est appliqué sur le système de culture. Le système d'élevage, composé de cochons et d'une chèvre (enceinte en avril 2022), possède une particularité. En effet, les cochons n'appartiennent pas aux propriétaires de la ferme mais à un financier extérieur au système. Celui-ci apporte alors tous les financements nécessaires à l'élevage des cochons en échange des soins et des infrastructures prodigués par les propriétaires de l'exploitation. Les revenus nets de 146 100 pesos par an sont alors divisés en deux parts égales, soit 73 050 pesos par an. En ce qui concerne l'élevage de chèvres, celui-ci vient juste d'être lancé, la chèvre ayant été reçue en février 2022. L'ambition future est de développer cet élevage et de vendre les chèvres une fois le poids de 20 kg atteint. Les revenus sont donc uniquement basés sur la vente de noix de coco (4 500 pesos par an), de calamansi (5 000 pesos par an) et des porcelets (73 050 pesos nets par an), les autres cultures étant destinées à la consommation des personnes ou n'étant pas récoltées (Table 41).

Toutes les cultures pérennes sont associées sur le même espace de cultures de 1,2 ha dont la surface allouée aux cocotiers est d'environ 1 ha (Figure 41a). Les cochons sont gardés constamment à l'intérieur dans un bâtiment de 30 m² et la nourriture, stockée dans ce même espace, leur est apportée deux fois par jour. La chèvre est attachée dans le jardin à un piquet avec une corde de 3 m de long (Figure 41b). Elle broute donc la journée sur une superficie de 28 m² et reçoit également du son de blé trois fois par jour. Sa localisation est changée tous les jours et elle est rentrée dans un abri durant la nuit.



(a) Cultures associées

(b) Chèvre attachée à sa corde

Figure 41 – Description visuelle de l'exploitation n°2

Table 41 – Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°2

EXPLOITATION N°2									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures pérennes	1,2								
Noix de coco		50	4	150	fruit	1	7,5	600	4500
Bananes		12	1	1	grappe	10	-	10	-
Mangues		3	1					10	500
Calamansi		2							
Santols		2							
Système d'élevage	TLU	Nombre	Bâtiment (ha)	Portées par an	Nombre par portée	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cochons			0,003						
Truies	0,6	3		2					
Porcelets	5,8	29			13	2	7000	156	73050 ¹³
Chèvre	0,1	1(2)				20	-		-
Production totale								776	78050

F.3 Système agraire composé d'un système de culture et d'élevage avec interactions entre les systèmes

Les exploitations n°3, 5 et 7 présentent les gestions les plus complexes sur les sept fermes analysées. En effet, au sein du système agraire, différents échanges s'effectuent entre les sous-systèmes via le transfert de fruits, de résidus de cultures, de fourrage, de déjections, des fumiers ou encore de sillage.

Exploitation n°3

Comme les exploitations n°1 et 2, l'exploitation agricole n°3 est située dans le quartier de Coral Na

Munti (province de Agoncillo). Les 0,881 ha d'exploitation sont situés dans une région vallonnée entourée de forêts. N'étant pas à proximité de rivières, de plans d'eau ou d'autres sources d'eau, l'eau doit être acheminée via un système de canalisation.



Figure 42 – Mode de gestion des animaux de l'exploitation n°3

Le système de culture est composé de quatre sous-systèmes différents : cultures à cycle court (courges, gingembre et cultures racines), cultures annuelles (riz et maïs), cultures pérennes (bananiers et cocotiers) et culture fourragère (grandes herbes). Le système d'élevage est également très diversifié puisqu'il est constitué de trois chèvres, deux vaches (Brahman), un veau, une truie, quatre porcelets et cent poules. La journée, les chèvres et les vaches sont gardées à l'extérieur ; les chèvres sont attachées à un piquet dehors, une vache est aussi attachée à un piquet, son veau restant près d'elle, et la vache la plus vieille reste dans un enclos. La nuit, seules les chèvres sont transférées dans un abri. Il n'est pas considéré que les vaches et les chèvres broutent car toute la nourriture doit leur être apportée en raison du sol dénudé de végétation. Les porcelets sont gardés jour et nuit dans un petit enclos et leur mère est attachée à l'extérieur tandis que les poules sont libres de se déplacer dans l'exploitation

(Figure 42).

Des transferts de matière sont opérés depuis le système de culture vers le système d'élevage via l'apport de 7 kg de hautes herbes par jour par vache et par chèvre en dehors des saisons sèches. De plus, est donné tous les jours un total de 3kg par vache et 1 kg par chèvre de courges, de tarot et/ou résidus de maïs selon les disponibilités. À l'inverse, des transferts se font du système d'élevage vers le système de culture via les déjections des vaches et des chèvres apportées sur les cultures de courges. Les déjections des poules ne sont pas utilisées car jugées trop riches et agressives pour les plantes. La fertilité est également maintenue au sein du système de culture grâce aux tiges de riz qui sont taillées et laissées sur les champs pour être ensuite réincorporées dans le sol lors de la préparation de la terre, aux plantes de tarot qui sont déracinées, mises de côté et laissées pourrir et mixées dans le sol et aux tiges de bananiers mortes qui sont coupées et également laissées pourrir pour être incorporées dans le sol. Cependant, des fertilisants provenant de l'extérieur du système comme le sulfate d'ammonium sont aussi apportés aux cultures.

Les revenus totaux de l'exploitation sont générés à 64% par la vente d'animaux contre 36% pour la vente de culture, dont 72% sont réalisés par la vente de bananes et de noix de coco (Table 42). Cependant, ces chiffres se basent sur de nombreuses hypothèses. Premièrement, la vente de chèvres a été fixée à une fois tous les deux ans mais cette vente n'est pas régulière puisqu'elle dépend de la venue d'un acheteur. Les chèvres sont vendues à l'âge de six mois et leur poids est alors estimé à 20 kg sur base de l'enquête de l'exploitation n°2. Deuxièmement, le nombre de ventes et leurs prix sont basés sur les données pré-éruption. De plus, le poids d'un veau n'étant pas connu, il est estimé à 180 kg à l'âge de 18 mois sur base des courbes de croissance des bovins Brahman (Menchaca et al., 1996). La superficie de l'abri des chèvres et des cochons n'est pas connue. En ce qui concerne la superficie allouée aux cultures pérennes, les bananiers sont plantés entre les champs de maïs/riz et les cultures à cycle court tandis que les cocotiers sont situés à la périphérie de la propriété. Les valeurs des superficies, n'ayant pas été données pour chacune des cultures, elles ont donc été calculées sur base d'hypothèses. La superficie initiale des cultures à cycle court est de 0,25 ha, des cultures annuelles de 0,5 ha et des cultures fourragères de 0,125 ha. L'espacement entre deux bananiers est estimé à 2,5 m (Cédric, 2014), les 150 bananiers nécessitent donc une superficie de 937,5 m² arrondie à 900 m² (0,09 ha) par facilité. Sachant que la superficie totale de l'exploitation est fixée à 0,875 ha, l'espace requis pour les bananiers a été retiré des terres allouées aux cultures annuelles et à cycle court, ré-estimés respectivement alors à 0,455 ha et 0,205 ha. Les cocotiers, étant plantés aux abords de la propriété, n'ont pas été retirés de la surface totale de l'exploitation.

Table 42 – Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°3

EXPLOITATION N°3									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures à cycle court	0,205								
Courges			1					50	1250
Gingembre			1					50	1750
Racines			1					200	2400
Cultures annuelles	0,455								
Riz			1	8	sac	50	-	400	-
Maïs			1					600	13500
Cultures pérennes	0,9								
Bananes		150	3		récolte	180	10000	540	30000
Noix de coco		76	6		fruit	0,75	6	2250	18000
Fourrage	0,125								
Hautes herbes			182,5		récolte	35	-	6387,5	-
Système d'élevage	TLU	Nombre	Bâtiment (ha)	Portées par an	Nombre par portée	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Chèvre	0,3	3	-	0,5	1	20	4500	10	2250
Vaches									
Mères	1,4	2		0,33					
Veau	0,7	1			1	180	55000	60	18333,3
Cochons									
Truie	0,2	1		2					
Porcelets	0,8	4			10	11	1210	220	24200
Poules	1	100		4	100	1,5	180	600	72000
Production totale								11367,5	183683,333

Exploitation n°7

Située sur les plaines du quartier de Tamahal à Amadéo (province de Cavite), l'exploitation n°7 couvre une superficie de 0,5 ha, faisant d'elle la plus petite exploitation étudiée. Elle possède un système de culture composé d'une culture à cycle court, le tarot, et de cultures pérennes très diversifiées (caféiers, papayers, arbres de guyabano, cocotiers, bananiers, jacquiers)(Figures 43b, 43c et 43d). Le système d'élevage, très restreint, n'est composé que d'une truie et de ses deux porcelets et de deux vaches dont une enceinte lors de l'enquête (avril 2022). Chacune d'elles est attachée à un piquet par une corde de 5 m, leur laissant alors une superficie d'environ 80 m² pour pâturer tandis que les cochons sont gardés dans un petit abri (Figure 43a) où la nourriture leur est directement apportée deux fois par jour.



(a) Abri à cochons



(b) Bananiers



(c) Cultures pérennes



(d) Cultures pérennes

Figure 43 – Description visuelle de l'exploitation n°7

En raison des transferts de matière du système de culture vers le système d'élevage, l'exploitation n°7 a été classée dans le même groupe que les exploitations n°3 et 5 malgré le niveau de complexité beaucoup plus faible. En effet, en plus des 2 kg de soja donnés par jour pour l'ensemble des cochons, 1 kg de tarot, préalablement cuit, leur est apporté. Les vaches broutent et reçoivent 6 kg de jacques par vache par jour. Cependant, puisqu'une seule enquête n'a pu être effectuée pour cette exploitation, de nombreuses questions restent sans réponse. En effet, aucune information n'est fournie sur la durée pendant laquelle le tarot et les jacques sont disponibles et peuvent servir à nourrir les animaux ou sur le type de nourriture donnée lorsqu'aucune de ses cultures ne peut être apportée. De plus, le nombre de porcelets vendus par an et le poids des veaux à la vente ne sont pas connus. Par an, un veau est vendu pour 15 000 pesos mais ses valeurs sont celles pré-éruption. Au niveau du système de culture, la superficie allouée aux différentes cultures, à l'exception de celle des caféiers, la provenance et la méthode de renouvellement des caféiers, arbres de guyabano, cocotiers, jacquier et tarot ne sont pas connues. De nombreuses informations sur les quantités récoltées et les prix de vente sont également manquantes. En raison du nombre de données manquantes, les valeurs des productions totales par an

en terme de quantités (kg) et de revenus (pesos) n'ont pas été calculées puisqu'elles ne seraient pas représentatives de la réalité (Table 43).

Table 43 – Résumé des productions (kg et pesos) par an de l'exploitation n°7

EXPLOITATION N°7									
Système de culture	Ha	Nombre	Récoltes par an	Valeur par récolte	Unité	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Cultures à cycle court Tarot							-	30	
Cultures pérennes	+/- 0,5								
Café (grains)	0,5	2500	1	60	boîte	12	1200	720	1200
Papayes		100	12		récolte	50		600	
Guyabano		50	1		arbre	2	40	20	400
Noix de coco		50	12	500	fruit		5		30000
Bananes		800	52		récolte	46,15	1384,6	2400	72000
Jacques		5	1	25	fruit		-		-
Système d'élevage	TLU	Nombre	Bâtiment (ha)	Portées par an	Nombre par portée	Kg par unité	Pesos par unité	Kg par an	Pesos par an
Vaches									
Mères	1,4	2		1					
Veaux	0	0 (1)			1		15000		15000
Cochons			0,0004						
Truie	0,2	1							
Porcelets	0,4	2				4,5	2500		
Production totale									

F.4 Détails sur la Table comparative des sept exploitations (Table 5)

Exploitation n°2

Dans l'exploitation n°2, les deux propriétaires travaillent quotidiennement 1,5 heures par jour au total. Tout comme pour l'exploitation n°1, des saisonniers sont engagés pour la récolte de noix de coco. Les heures prestées par les saisonniers en situation post-éruption n'étant pas connues, elles ont été recalculées sur base des valeurs fournies avant l'éruption. Quatre travailleurs, pendant une journée de huit heures, étaient engagés pour récolter 300 noix de coco, et ce, six fois par an. Un total de 192 heures était donc nécessaire pour récolter 1 800 noix de coco par an. Après l'éruption, le nombre de récoltes par an est passé à 4 et le nombre de noix de coco par récolte à 150. La production, passant alors à 600 fruits par an, a été diminué par trois. Il est donc supposé que la prestation de travail est également trois fois moindre et s'élèverait donc à 64 heures par an, soit à deux saisonniers travaillant huit heures par jour tous les trois mois.

En ce qui concernent les dépenses et le revenus de la ferme n°2, sont ceux-ci sont difficiles à estimer en raison d'un manque de données post-éruption. En effet, avant l'éruption une dépense de 155 000 pesos était estimée par les propriétaires par an. Cependant, de nombreuses variables, tels que les

changements dans la production des noix de coco, les cochons détenus par un financier extérieur, les potentiels changements de prix, ... ont changé entre la situation pré et post-éruption rendant l'estimation impossible. Sachant que la vente des cochons rapportent par an 73 050 pesos nets et celles brutes des cultures 5 000 pesos, l'exploitation devrait rapporter un peu moins de 78 050 pesos par an une fois les charges liées aux cultures déduites tels que l'eau ou la main d'oeuvre.

Exploitation n°3

La gestion de l'exploitation n°3 requiert un travail journalier d'environ sept heures par jour. De plus, la récolte des noix de coco nécessite trois personnes pendant une journée de huit heures, cinq fois par an et le désherbage du riz et des courges demandent deux fois par an, trois personnes pendant huit heures.

Au niveau économique, les revenus totaux calculés sur base des valeurs recueillies sont de 183 683,333 pesos par an. Cependant, les valeurs des dépenses et des revenus nets pour l'ensemble de l'exploitation n°3 sont chiffrées, respectivement à 25 000 et 35 000 pesos par an. Aucun détail sur l'obtention de ces chiffres n'a été fourni.

Exploitation n°4

Le propriétaire de l'exploitation travaille tous les jours quatre heures. Celui-ci engage également de la main d'oeuvre pour la culture de riz et des oignons/ail. Par an, la plantation et la récolte du riz requièrent chacune deux travailleurs pendant quatre matinées tandis que le désherbage ne demande que deux travailleurs pendant deux matinées. Les matinées correspondent à des périodes de quatre heures. De plus, un à deux saisonniers sont engagés durant trois à cinq jours de huit heures pour le désherbage de la parcelle d'oignons/ail.

La question des revenus a déjà été traité dans la section F.1. Les dépenses totales ont simplement été obtenues par soustractions des revenus bruts et nets. En plus des revenus générés par l'exploitation, le propriétaire, ingénieur de profession, obtient 50 000 pesos par an pour l'inspection et le nettoyage de petits projets de construction d'installations électriques.

Exploitation n°6

Le propriétaire, âgé de 70 ans et n'étant plus capable de s'occuper de son exploitation, engage trois travailleurs pour huit heures par jour, et ce, six jours par semaine.

Les dépenses totales pour la production d'ananas sont d'environ dix pesos par fruit, soit 240 000 pesos par an. En soustrayant les dépenses du revenu total par an, un revenu net de 984 000 pesos par an est généré. Le propriétaire met aussi en location des stands de marché, lui apportant 200 000 pesos supplémentaires par an.

Exploitation n°7

Des chiffres exacts n'ont pas pu être calculés pour cette exploitation. Toutefois, les ventes les plus lucratives, d'après les réponses collectés lors de l'enquête, sont la vente de bananes et celles de veaux.

Au contraire, l'activité la plus chère au sein de la ferme est l'élevage des cochons en raison du prix de leur nourriture. La ferme ne permettant pas de vivre, les activités secondaires, à savoir la profession d'enseignante de la femme du propriétaire et la mise en location d'une maison, sont les principaux revenus. Le ferme est donc une manière d'augmenter la nourriture et les revenus du ménage.

G Unité tropicale d'élevage (Livestock Tropical Unit, TLU)

Table 44 – Facteurs de conversion de TLU pour différentes espèces d'élevage (FAO, 1979)

Espèces	Facteurs de conversion TLU
Chameaux	1,0
Bovins	0,7
Moutons	0,1
Chèvres	0,1
Chevaux	0,8
Mules	0,7
Ânes	0,5
Cochons	0,2
Poules	0,01

Évaluation de la vulnérabilité des systèmes agaires soumis aux retombées de cendres volcaniques

Réalisé par Marine Donfut

Près d'un milliard d'individus vivent à moins de 100 km d'un volcan qui a été actif durant l'Holocène. Cette population tire largement profit du haut potentiel agronomique des sols développés sur des dépôts de téphra, un matériau volcanique non consolidé mis en place par les éruptions explosives. Si l'agriculture prospère aux pieds des volcans, elle est aussi menacée par leur réveil. L'agriculture est de fait le secteur économique le plus impacté par les retombées de téphra associées aux éruptions volcaniques. L'évaluation de la vulnérabilité des systèmes agaires soumis à l'aléa volcanique est une problématique centrale dans l'analyse des risques et plus généralement dans l'édification de stratégies efficaces pour réduire l'ampleur du risque de catastrophe. Cependant, un nombre très limité d'études examinent les risques encourus par l'agriculture sujette aux dépôts de téphra. Les informations disponibles s'attachent essentiellement aux impacts sur les cultures et ne considèrent jamais la vulnérabilité du système agricole dont la structure et le fonctionnement sont souvent régis par la présence de sous-systèmes de cultures et d'élevage en interaction.

L'objectif général de notre étude est d'évaluer de manière semi-quantitative la vulnérabilité des exploitations agricoles face aux chutes de téphra. Plus spécifiquement, nous visons à : (i) décrire la structure et le fonctionnement d'exploitations agricoles dans une région potentiellement soumise aux retombées de téphra ; (ii) estimer semi-quantitativement la vulnérabilité des exploitations en considérant des scénarios différents d'exposition au téphra ; et (iii) utiliser les résultats de (i) et (ii) pour comparer la vulnérabilité des exploitations agricoles et les facteurs principaux qui la contrôlent. La région choisie pour mener notre travail est située à proximité du volcan Taal aux Philippines.

Les résultats de nos recherches révèlent que la vulnérabilité des systèmes agaires face aux retombées de téphra n'est pas due inéluctablement aux éléments les plus vulnérables de leurs sous-systèmes (élevage et cultures) lorsque ceux-ci sont évalués isolément. Il en ressort également que les sous-systèmes de cultures jouent un rôle crucial pour permettre aux exploitations impactées par des chutes de téphra de redémarrer. En outre, nous suggérons que les systèmes agaires présentant de nombreuses interactions entre leurs sous-systèmes pourraient être plus vulnérables aux effets négatifs des chutes de téphra. Ce constat contraste avec les conclusions tirées par ailleurs sur la vulnérabilité des systèmes agaires vis-à-vis des changements climatiques. Pour les régions volcaniques actives, il semble donc important de considérer conjointement les aléas associés aux chutes de téphra et ceux liés aux dérèglements du climat. Les nouvelles informations générées dans notre travail ouvrent de nouvelles perspectives pour développer des méthodes capables de fournir une estimation quantitative de la vulnérabilité des exploitations agricoles sujettes aux retombées de téphra, et par là contribuer à mettre en œuvre des stratégies qui permettront de diminuer le risque d'émergence d'une catastrophe lors d'une éruption volcanique.

Université Catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro