

Faculté des bioingénieurs

Évaluation de la vulnérabilité des systèmes agricoles face aux retombées de téphra : une approche économique.

Cas d'étude : volcan Tungurahua, Équateur

Auteur	Saskia De Meunynck
Promoteurs	Pierre Delmelle (SST/ELI/ELIE) Sophie Malherbe (SST/ELI/ELIE)
Lecteurs	Guillaume Lobet (SST/ELI/ELIA) Philippe Baret (SST/ELI/ELIA)
Année Académique	2023 - 2024

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

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs Pierre Delmelle et Sophie Malherbe de m'avoir fait confiance pour ce sujet de mémoire. Je les remercie pour leurs précieux conseils et le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie particulièrement Sophie Malherbe pour l'organisation du travail de terrain et sa disponibilité tout au long de l'année. Merci d'avoir fait preuve d'écoute et de patience, pour tes nombreuses relectures et tes encouragements.

Je tiens également à remercier Fabien Stark pour ses conseils et son aide dans l'amélioration de notre travail.

Je remercie toutes les personnes en Équateur qui ont permis la récolte des données. Un grand merci aux cinq agriculteurs Gustavo, Roberto, Esthela, Jorge et Victor pour leur temps et leur grande gentillesse. Merci à Marlon et à ses parents pour leur accueil, ainsi que pour le logement, les activités et les repas. Merci à Edwin, David et Anaïs de nous avoir accompagnées et aidées pendant les interviews. Merci à Sophie et à Inessa qui ont rendu cette expérience inoubliable.

Merci aux professeurs Guillaume Lobet et Philippe Baret d'avoir accepté d'être membres de mon jury en tant que lecteurs.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour tout leur soutien et leurs encouragements. Merci à mes parents qui ont relu mon mémoire, et merci à Noux pour son aide, sa patience et les bons moments qui m'ont permis de rester motivée.

Table des matières

Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
1. Introduction	6
2. État de l'art.....	7
2.1. Contexte général.....	7
2.2. Le volcanisme	7
2.2.1. Les éruptions volcaniques.....	7
2.2.2. Le téphra.....	8
2.3. Impacts des chutes de téphra sur les exploitations agricoles.....	9
2.3.1. Définition de l'exploitation agricole	9
2.3.2. Impacts du téphra sur les cultures	9
2.3.3. Impacts du téphra sur le bétail	11
2.3.4. Impacts du téphra sur le système agricole	12
2.4. L'approche systémique	13
2.5. Évaluation du risque	14
2.5.1. Définition du risque et de la vulnérabilité.....	14
2.5.2. Introduction aux fonctions de fragilité.....	15
3. Objectifs du travail	16
4. Matériels et méthodes	17
4.1. Zone d'étude : le volcan Tungurahua	17
4.2. Collecte des données.....	19
4.3. Analyse qualitative	20
4.4. Analyse quantitative	22
4.5. Détermination des coefficients de perte	23
4.5.1. Coefficients de perte sur les productions.....	24
4.5.2. Coefficients de saisonnalité	25
4.5.3. Coefficients de perte sur les actifs	26
4.6. Hypothèses de la simulation	28
4.6.1. Hypothèses générales	28
4.6.2. Hypothèses sur les cultures	28
4.6.3. Hypothèses sur le bétail.....	29
5. Résultats	30
5.1 Modèles conceptuels.....	30
5.1.1 Exploitation n°1.....	30
5.1.2 Exploitation n°2.....	31

5.1.3	Exploitation n°3.....	32
5.1.4	Exploitation n°4.....	33
5.1.5	Exploitation n°5.....	34
5.2	Analyses économiques	35
5.2.1	Exploitation n°1.....	36
5.2.2	Exploitation n°2.....	37
5.2.3	Exploitation n°3.....	38
5.2.4	Exploitation n°4.....	39
5.2.5	Exploitation n°5.....	40
5.2.6	Choix des données pour les simulations	41
5.3.	Détail des exploitations n°4 et n°5 avant les simulations.....	42
5.4.	Simulations de dépôt de téphra.....	44
5.4.1.	Détermination des pertes de revenu brut de l'exploitation n°4	44
5.4.2.	Exploitation n°4 : scénario de cinq millimètres, septembre	45
5.4.3.	Exploitation n°4 : scénario de cinquante millimètres, juillet.....	49
5.4.4.	Détermination des pertes de revenu brut de l'exploitation n°5	53
5.4.5.	Exploitation n°5 : scénario de cinq millimètres, septembre	54
5.4.6.	Exploitation n°5 : scénario de cinquante millimètres, septembre	58
6.	Discussion.....	61
6.1.	Interprétation des résultats.....	61
6.1.1.	Exploitation n°4.....	61
6.1.2.	Exploitation n°5.....	65
6.1.3.	Comparaison des exploitations n°4 et n°5	68
6.2.	Limitations du travail	73
6.3.	Perspectives	75
7.	Conclusion	78
	Références	79
	Annexes	86

Liste des figures

Figure 1 - Classification des types de téphra en fonction de la granulométrie	9
Figure 2 - Nécrose (Di@gno-Lég - Nécroses, s. d.)	11
Figure 3 - Les premières incisives du bétail ont été usées jusqu'aux gencives, les deuxièmes incisives presque entièrement émergées montrent déjà une usure inégale importante.	12
Figure 4 - Interactions entre une vache et une culture de maïs	13
Figure 5 - Diagramme de flux dans un système polyculture-élevage (Ryschawy 2014)	14
Figure 6 - Fonctions de fragilité pour le bétail développées par Wilson et Kaye (2007)	15
Figure 7 - Présentation des provinces en Équateur	18
Figure 8 - Localisation des cinq exploitations autour du volcan Tungurahua en Équateur	19
Figure 9 - Modèle conceptuel général décrivant la limite du système, les sous-systèmes de culture et d'élevage et les flux intrants, sortants et interagissant au sein du système	21
Figure 10 - Carte montrant la surface couverte par cinq lignes d'isopaques de cendres (5, 10, 20, 29, 39 kg m ⁻²) qui délimitent les surfaces correspondant aux cinq plages d'accumulation de cendres pendant l'éruption du Tungurahua du 16 et 17 août 2016. (Ligot 2022).	23
Figure 11 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°1	30
Figure 12 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°2	31
Figure 13 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°3	32
Figure 14 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°4	33
Figure 15 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°5	34
Figure 16 - Analyse économique de l'exploitation n°1	36
Figure 17 - Analyse économique de l'exploitation n°2	37
Figure 18 - Analyse économique de l'exploitation n°3	38
Figure 19 - Analyse économique de l'exploitation n°4	39
Figure 20 - Analyse économique de l'exploitation n°5	40
Figure 21 - Comparaison des exploitations n°1, n°4 et n°5	41
Figure 22 - Contribution des cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°4 en situation normale	42
Figure 23 - Contribution du bétail à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°4 en situation normale	43
Figure 24 - Contribution des cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°5 en situation normale	43
Figure 25 - Contribution du bétail à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°5 en situation normale	44
Figure 26 - Pertes sur le revenu annuel brut de l'exploitation n°4 pendant les douze mois de l'année, scénarios de 5 et 50 mm	45
Figure 27 - Analyse économique de l'exploitation n°4, scénario de 5 mm en septembre	46
Figure 28 - Exploitation n°4 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre	47
Figure 29 - Exploitation n°4 : pertes par culture, scénario de 5 mm, septembre	48
Figure 30 - Exploitation n°4 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre	48
Figure 31 - Exploitation n°4 : pertes sur le bétail, scénario de 5 mm, septembre	49
Figure 32 - Analyse économique de l'exploitation n°4, scénario de 50 mm en juillet	50
Figure 33 - Exploitation n°4 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, juillet	51
Figure 34 - Exploitation n°4 : pertes par culture, scénario de 50 mm, juillet	52
Figure 35 - Exploitation n°4 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, juillet	52
Figure 36 - Exploitation n°4 : pertes sur le bétail, scénario de 50 mm, juillet	53
Figure 37 - Pertes sur le revenu annuel brut de l'exploitation n°5 pendant les douze mois de l'année, scénarios de 5 et 50 mm	54

Figure 38 - Analyse économique de l'exploitation n°5, scénario de 5 mm en septembre	55
Figure 39 - Exploitation n°5 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre	56
Figure 40 - Exploitation n°5 : pertes par culture, scénario de 5 mm, septembre	56
Figure 41 - Exploitation n°5 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre	57
Figure 42 - Exploitation n°5 : pertes sur le bétail, scénario de 5 mm, septembre	57
Figure 43 - Analyse économique de l'exploitation n°5, scénario de 50 mm en septembre	58
Figure 44 - Exploitation n°5 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, septembre	59
Figure 45 - Exploitation n°5 : pertes par culture, scénario de 50 mm, septembre	59
Figure 46 - Exploitation n°5 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, septembre	60
Figure 47 - Exploitation n°5 : pertes sur le bétail, scénario de 50 mm, septembre	60
Figure 48 - Comparaison des pertes économiques de chaque flux des exploitations n°4 et n°5 pour le scénario de 5 mm en septembre	70
Figure 49 - Comparaison des pertes économiques de chaque flux des exploitations n°4 et n°5 pour le scénario de 50 mm en juillet (exploitation n°4) et en septembre (exploitation n°5)	72
Figure 50 - Nouveau modèle conceptuel général d'un système agricole	77

Liste des tableaux

Tableau 1 - Éruptions volcaniques classées sur base de l'indice d'explosivité volcanique (Tableau repris de Newhall & Self, 1982)	8
Tableau 2 - Coefficients de perte de production des différents types de cultures	24
Tableau 3 - Coefficients de perte de production des différents types d'animaux	24
Tableau 4 - Coefficients de saisonnalité basés sur le travail de Wilson et Kaye (2007)	25
Tableau 5 - Coefficients de saisonnalité des différents types de cultures avec un dépôt d'une épaisseur de 5 mm de téphra	26
Tableau 6 - Coefficients de saisonnalité des différents types de cultures avec un dépôt d'une épaisseur de 50 mm de téphra	26
Tableau 7 - Coefficients de perte sur les actifs des cultures arboricoles avec des dépôts d'une épaisseur de 5 mm et de 50 mm de téphra	27
Tableau 8 - Temps de renouvellement en années des cultures pérennes	27
Tableau 9 - Détermination des pertes de la valeur annuelle brute du maïs en fonction de son stade phénologique, exploitation n°4, 5 mm	62
Tableau 10 - Exploitation n°4, comparaison des pertes (en %) que subit le bétail en fonction du mois impacté, pour le scénario de 5 mm. Les naissances des volailles sont séparées pour les poussins (p) et les canetons (c). Les (ventes) représentent les ventes de l'année d'après qui ne sont pas prises en compte dans les pourcentages car la simulation est sur un an.	63
Tableau 11 - Exploitation n°5, comparaison des pertes (en %) que subit le bétail en fonction du mois impacté, pour le scénario de 5 mm.. Les naissances des volailles sont divisées en poussins et dindonneaux. Les (vente) correspondent aux ventes de l'année suivante qui ne sont pas prises en compte dans la simulation qui est sur un an. Le (((vente))) correspond à la vente des caprins trois ans plus tard.	67

1. Introduction

La population mondiale vivant à moins de 100 km d'un volcan actif ne fait qu'augmenter (Loughlin et al., 2015), s'estimant déjà à 800 millions de personnes (Brown et al., 2015), et représentant ainsi environ 10 % de la population totale (World Population Clock, s.d.). L'une des principales raisons qui pousse les gens à s'installer à proximité des volcans actifs est la grande fertilité des sols volcaniques. Bien qu'ils ne représentent qu'environ 0,7% de la surface terrestre totale, ils nourrissent approximativement 10% de la population mondiale grâce à leur potentiel agronomique élevé, ce qui les rend propices à l'agriculture (Delmelle et al 2015).

Cependant, le secteur de l'agriculture à proximité des volcans est particulièrement vulnérable aux chutes de téphra (Wilson et al., 2012). Le téphra désigne les fragments de magma éjectés lors d'une éruption volcanique explosive. Ils peuvent être dispersés par les vents sur de longues distances, pouvant couvrir jusqu'à plus de 1000 km depuis la bouche du volcan (Watkins et al., 1978). Cette caractéristique en fait le danger volcanique le plus répandu (Newhall et Hoblitt, 2002). Le téphra peut nuire à la santé humaine, affecter les infrastructures, les sols, les plantes et les animaux (Ayrís and Delmelle, 2012).

Jusqu'à présent, la vulnérabilité des cultures et du bétail face à un dépôt de téphra a été estimée dans des études peu nombreuses (Craig et al. (2016a, 2021), Wilson et al. (2011), Wilson et Kaye (2007) et Ligot (2022)) qui quantifient l'effet d'épaisseurs de téphra données sur ces éléments pris de manière isolée. Pourtant, les interactions entre les éléments d'une exploitation agricole sont nombreuses. Par exemple, les résidus de culture peuvent être utilisés pour nourrir les animaux, et les déjections des animaux comme engrais pour les cultures. Nous proposons dans ce travail d'étudier l'exploitation agricole dans son ensemble en utilisant une approche systémique.

Ce mémoire vise à développer une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité associée à la chute de téphra afin d'améliorer les connaissances sur la vulnérabilité des exploitations agricoles se trouvant à proximité de volcans. Pour ce faire, nous travaillons sur cinq exploitations agricoles en Équateur, situées autour du volcan Tungurahua.

2. État de l'art

2.1. Contexte général

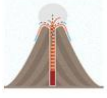
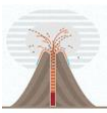
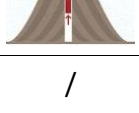
Environ 800 millions de personnes vivent à moins de 100 km d'un volcan actif (Brown et al., 2015). Les régions du monde où l'exposition humaine aux dangers volcaniques est la plus élevée sont l'Amérique Centrale et du Sud, l'Asie du Sud-Est et le Japon (Siebert et al., 2010). Vivre dans des zones volcaniques offre de nombreux avantages tels que des ressources géothermiques, un sous-sol riche (propice à l'exploitation de matériaux volcaniques et de pierres précieuses) et une attractivité touristique (Erickson, 1988 ; Decker et Decker, 1991 ; Lane et al., 2003 ; Kelman et Mather, 2008). Mais l'une des principales raisons qui pousse les gens à s'installer à proximité des volcans actifs est la grande fertilité des sols volcaniques. Dans les régions volcaniques, et en particulier dans les pays moins développés économiquement, les propriétés de ces sols soutiennent un mode de vie basé sur l'agriculture (FAO, 2021). Bien que les sols volcaniques ne représentent qu'environ 0,7% de la surface terrestre totale, ils nourrissent à peu près 10% de la population mondiale grâce à leur potentiel agronomique élevé (Delmelle et al 2015). Cependant, le secteur de l'agriculture à proximité des volcans est particulièrement vulnérable aux chutes de téphra : des particules de magma qui constituent le principal produit des éruptions explosives (Wilson et al., 2012).

2.2. Le volcanisme

2.2.1. Les éruptions volcaniques

Les éruptions volcaniques peuvent être classées en deux types : explosives, au cours de laquelle du magma fragmenté est éjecté dans l'atmosphère, et effusives, donnant lieu majoritairement à des coulées de lave. C'est la teneur en silice du magma qui dictera le type d'éruption : lorsqu'elle augmente, la teneur en composés volatiles du magma croît et l'éruption sera explosive ; à l'inverse, lorsque la teneur en composés volatiles de magma est faible, une éruption effusive a lieu (Keller et al 2015). La distinction des éruptions volcaniques en seulement deux types s'avère insuffisante pour permettre de décrire avec précision la diversité des éruptions volcaniques observées sur terre. C'est pourquoi Newhall et Self (1982) ont élaboré l'indice d'explosivité volcanique (VEI), qui donne une mesure de la puissance d'une explosion volcanique et a été mis en place sur base d'enquêtes sur les éruptions passées (Simkin et al. 1981 ; Simkin and Siebert 1994). Le Tableau 1 présente les différents VEI, allant de 0 à 8, en fonction de la magnitude de l'explosion. Lorsqu'elle augmente, le volume de téphra éjecté accroît également.

Tableau 1 - Éruptions volcaniques classées sur base de l'indice d'explosivité volcanique (Tableau repris de Newhall & Self, 1982)

VEI	Description générale	Description	Volume de pyroclastes éjecté (km ³)	Hauteur de la colonne (km)	Fréquence
0	Non-explosive		<0,0001	<0,1	Fréquent
1	Petite		0,0001 à 0,001	0,1 à 1	Fréquent
2	Modérée		0,001 à 0,01	1 à 5	Une dizaine par an
3	Modérée à large		0,01 à 0,1	3 à 15	Plusieurs par an
4	Large		0,1 à 1	10 à 25	Une dizaine par décennie
5	Très large		1 à 10	> 25	Une par décennie
6	Très large	/	10 à 100	> 25	Plusieurs pas siècle
7	Très large	/	100 à 1000	> 25	Plusieurs par millénaire
8	Très large	/	> 1000	> 25	2 par 100 000 ans

2.2.2. Le téphra

Les éruptions explosives, c'est-à-dire ayant un VEI allant de 1 à 8, provoquent la fragmentation du magma en particules solides de toutes les tailles appelées téphra, qui sont propulsées dans l'atmosphère et retombent ensuite à la surface du globe (Gonnermann 2015, Cashman et al. (2000). La chute de téphra, phénomène s'étant produit au cours de 90% des éruptions explosives historiques, est le danger volcanique le plus fréquent. Le téphra peut être classé en trois catégories en fonction de la taille des particules (Figure 1) : les blocs et bombes, les lapillis et les cendres volcaniques (Le Maitre et al. 2002).

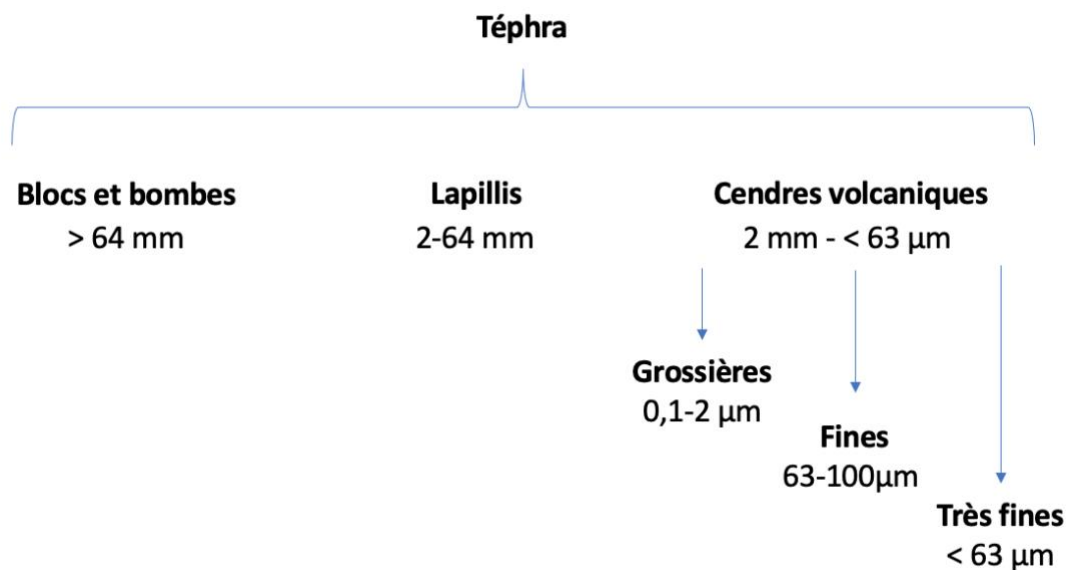


Figure 1 - Classification des types de téphra en fonction de la granulométrie

Un tri granulométrique se produit dans les retombées de téphra depuis la cheminée du volcan (Pyle 1989). Au plus les fragments de téphra sont volumineux et lourds, au plus proche du volcan ils se déposeront. À l'inverse, plus ils sont petits et légers, plus longtemps ils resteront en suspension dans l'air et retomberont loin du volcan (Ayriss and Delmelle 2012, Wilson et al. 2011). Lors d'une éruption explosive, le téphra peut être dispersé sur de longues distances, selon la force et la direction des vents (Heiken et Wohletz 1985), pouvant couvrir des distances de 1000 km depuis la bouche du volcan (par exemple Watkins et al., 1978), ce qui en fait le danger volcanique le plus répandu (Newhall et Hoblitt, 2002).

2.3. Impacts des chutes de téphra sur les exploitations agricoles

2.3.1. Définition de l'exploitation agricole

Une exploitation agricole se définit comme une unité économique et sociale élémentaire où se réalise la production agricole (Larousse, s.d.). Elle peut être organisée de trois manières différentes : une exploitation agricole de cultures, d'élevage ou mixte. Cette dernière est définie comme l'association de cultures et élevage dans un cadre coordonné (van Keulen et Schiere, 2004).

2.3.2. Impacts du téphra sur les cultures

L'effet néfaste du téphra sur la végétation reste peu étudié. La plupart de nos connaissances reposent sur les observations faites après l'éruption de 1980 du Mont St. Helens, aux États-

Unis (par exemple, Cook et al., 1981 ; Mack, 1981) et plus tard pour d'autres éruptions (Neild et al., 1998 ; Wilson et al., 2015 ; Ligot, 2022).

Sur le long terme, la chute de téphra peut améliorer la fertilité du sol grâce à son altération chimique qui fournit une nouvelle source de nutriments (K, Ca, P et S) facilement disponibles pour les plantes, améliorant ainsi la productivité agricole des cultures (Dahlgren et al. 2004). Cependant, lors de l'accumulation du téphra, la présence de ces particules peut entraîner des dommages mécaniques directs ou des perturbations physiologiques indirectes sur les cultures.

La charge en masse et l'abrasivité du téphra peuvent avoir des impacts négatifs directs sur les cultures allant jusqu'à l'enfouissement, l'étouffement, le versement, l'abrasion et l'abscission des feuilles et des fruits. L'accumulation de téphra sur les cultures est la principale cause des pertes agricoles (Burket et al. 1980). À la suite d'un dépôt d'un mètre d'épaisseur ou plus, la plupart des plantes sont enterrées et meurent (Griggs 1919 ; Eggler 1948). Les cultures plus hautes ne seront pas totalement enfouies mais risqueront toutefois de subir des dommages physiques tels qu'une cassure de tige ou de branche si le poids du dépôt de téphra dépasse sa résistance mécanique. Ce poids dépend de la quantité de téphra accumulée et de son contenu en eau (Macedonio et Costa, 2012).

Des impacts négatifs indirects sont également possibles. Le déplacement du téphra lors d'une éruption ou par le vent si les particules sont déposées sur la plante, peut provoquer une abrasion et des blessures au niveau des feuilles et des fruits, favorisant le développement de pathogènes, un dessèchement des feuilles (Cook et al., 1981 ; Wilson et al., 2011) voire une défoliation (Black et Mack, 1984). L'accumulation de téphra sur les feuilles peut également entraver les échanges de gaz et l'interception de la lumière, limitant leur capacité à faire la photosynthèse et à réguler efficacement sa température foliaire (Hirano et al., 1991).

Les dommages liés aux propriétés chimiques du téphra sont décrits comme étant des brûlures, des lésions nécrotiques (Figure 2), des taches chlorotiques ou de jaunissement, un dessèchement et un flétrissement (Miller, 1967b ; Cook et al., 1981 ; Black et Mack, 1981 ; Wilson et al., 2007).



Figure 2 - Nécrose (Di@gno-Lég - Nécroses, s. d.)

Les effets physiques et chimiques du téphra sur les plantes peuvent diminuer le rendement des cultures et affecter leur valeur commerciale en altérant l'aspect des produits et en détériorant leur qualité externe (Ligot 2022).

2.3.3. Impacts du téphra sur le bétail

Il n'existe pas beaucoup d'études concernant l'effet néfaste du téphra sur le bétail. La plupart de nos connaissances reposent sur les études de Wilson et Kaye (2007), en Nouvelle-Zélande, qui restent peu détaillées car le bétail est regroupé par groupes et ne comprend pas tous les animaux présents dans l'agriculture.

La chute de téphra n'entraîne pas nécessairement la mort immédiate du bétail, sauf lorsque les taux de dépôt sont exceptionnellement élevés (Neild et al, 1998). Des impacts négatifs directs ont été répertoriés par Easdale et al. (2014) : la présence de téphra sur le corps et dans la fourrure peut entraîner des démangeaisons et des problèmes cutanés, des problèmes oculaires peuvent survenir, et une usure anormale des dents (Figure 3) peut se produire, entraînant une diminution significative de l'espérance de vie des animaux (Flueck, 2013; Wilson et al., 2013). L'ingestion du téphra peut provoquer un blocage du rumen et éventuellement amener au décès de l'animal (Flueck, 2016).



Figure 3 - Les premières incisives du bétail ont été usées jusqu'aux gencives, les deuxièmes incisives presque entièrement émergées montrent déjà une usure inégale importante.

Les animaux qui sont élevés dans des bâtiments ne sont que peu, ou pas, affectés par les chutes de téphra. Cependant, la présence d'infrastructures dédiées aux animaux ajoute un danger alternatif, à savoir que si le poids des dépôts de téphra dépasse la capacité du bâtiment à le retenir, celui-ci s'écroulera, provoquant la mort de certains, voire de tous, les animaux se trouvant à l'intérieur (Lirer & Vitelli, 1998; Loughlin et al., 2015).

2.3.4. Impacts du téphra sur le système agricole

Les impacts du téphra cités dans les sections 1.3.2 et 1.3.3 se concentrent sur les cultures et le bétail de manière individuelle. Il n'existe pour le moment pas d'étude concernant les effets néfastes du téphra sur les interactions possibles au sein d'une exploitation agricole. De nombreuses interactions sont possibles, par exemple, entre les cultures, entre les animaux, entre les cultures et les animaux, entre l'exploitation et son environnement, etc. La Figure 4 illustre le cas d'une exploitation mixte qui utilise les résidus de culture pour nourrir les animaux, et les déjections des animaux comme engrais pour les cultures. Si une chute de téphra venait à endommager la culture, la quantité de résidus de culture s'en trouverait réduite, ce qui impacterait indirectement le bétail.

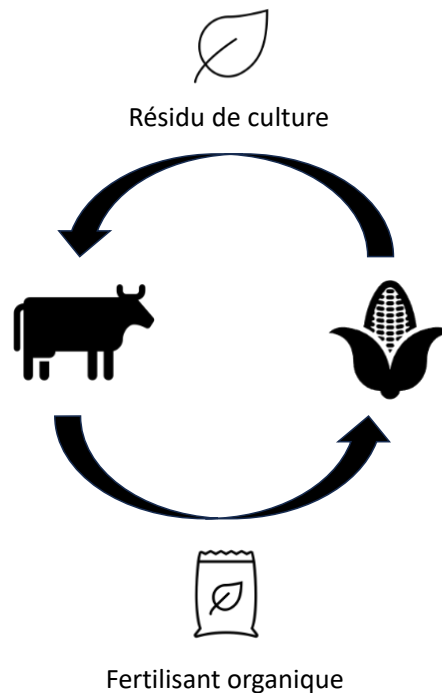


Figure 4 - Interactions entre une vache et une culture de maïs

2.4. L'approche systémique

Afin d'étudier les exploitations agricoles, il est selon nous nécessaire de trouver une approche qui implique de les considérer comme un ensemble. En effet, nous proposons que la perte, même partielle, d'un élément du système agricole peut engendrer un « effet domino » sur l'ensemble du système, en perturbant les flux qui le composent. Sans une évaluation systémique des exploitations, nous risquons de négliger ou de sous-estimer l'impact du téphra sur ces dernières. Une approche systémique permettrait ainsi d'avoir une vision globale des exploitations agricoles et d'examiner les éléments et les interactions qui les composent.

Afin d'étudier un système, il faut commencer par le représenter. L'analyse conceptuelle est une méthode qui permet de séparer les composantes principales d'un système, dans notre cas agricole, d'identifier les différents flux (entrants, sortants et au sein du système) et de déterminer les échelles spatiale et temporelle de l'analyse. Ryschawy et al. (2014) proposent une représentation conceptuelle simplifiée d'une exploitation mixte autosuffisante (Figure 5) où les flèches représentent des flux de matière entre le système de culture et le système d'élevage.

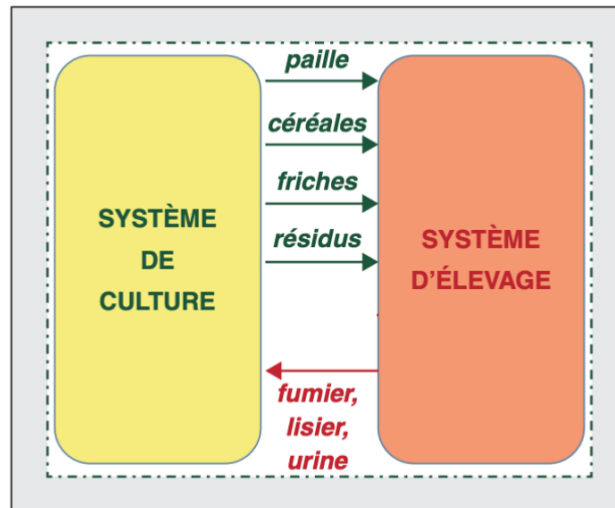


Figure 5 - Diagramme de flux dans un système polyculture-élevage (Ryschawy 2014)

2.5. Évaluation du risque

2.5.1. Définition du risque et de la vulnérabilité

L'évaluation du risque est une discipline nous permettant d'évaluer l'impact de la chute de téphra sur le système agricole. Le risque est défini par l'Équation 1 comme étant une perte découlant de la combinaison d'un danger, de l'exposition et de la vulnérabilité de l'élément étudié (UNDRO, 1980 ; ISDR, 2004 ; Aspinall et Blong, 2015).

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

Les dangers sont des phénomènes naturels définis dans l'espace et le temps. Sahni et al. (2001) définissent le danger comme une menace potentielle pour les humains et leur bien-être, et le risque comme la probabilité de survenue d'un danger spécifique. Par exemple, dans notre cas la chute de téphra constitue le danger, qui peut exister quelle que soit la zone touchée (habitée ou non), alors que le risque que présente la chute de téphra n'existe que pour la zone habitée (Proag 2014). L'exposition de tout élément (une culture, des personnes, un bâtiment, un système...) se rapporte à sa présence physique dans la zone de danger (Ligot 2022). La vulnérabilité mesure la proportion de la valeur de l'élément exposé, qui est susceptible de subir des pertes suite au danger de la chute de téphra. Elle représente dans notre travail les pertes financières subies par l'exploitation.

Jusqu'à présent, les connaissances en termes de vulnérabilité des éléments de l'exploitation agricole sont incomplètes. L'évaluation des risques associés aux dépôts de téphra de

différentes épaisseurs est essentielle pour l'évolution des connaissances dans ce domaine, qui permettra le développement de stratégies afin de réduire le risque dans les régions volcaniques (Jenkins, 2015).

2.5.2. Introduction aux fonctions de fragilité

À ce jour, la majorité des études sur la vulnérabilité de l'agriculture aux retombées de téphra se base sur l'estimation des pertes de rendement des cultures agricoles en fonction de l'épaisseur des dépôts de téphra. Les données disponibles viennent d'enquêtes peu nombreuses réalisées notamment par Craig et al. (2016a, 2021), T. Wilson et al. (2011), Wilson et Kaye (2007) et Ligot (2022). Ces études quantifient l'effet néfaste du téphra sur les éléments du système agricole de manière isolée et ne prennent pas en compte tous les types de productions. Par exemple, Wilson et Kaye (2007) divisent l'horticulture en légumes feuillus (par exemple le chou), légumes fructifères (par exemple les tomates), cultures de racines (par exemple les carottes), cultures arboricoles (par exemple les pommes) et viticulture. Cette classification est un bon début mais ne permet pas d'étudier les cultures en détail.

La quantification de la vulnérabilité se fait à l'aide des fonctions de fragilité qui mettent en relation l'épaisseur du dépôt de téphra et le niveau de perte de l'animal ou de la production agricole. La Figure 6 ci-dessous montre des fonctions de fragilité développées par Wilson et Kaye (2007) pour le bétail avec des dépôts de téphra allant de 0 à 500 millimètres.

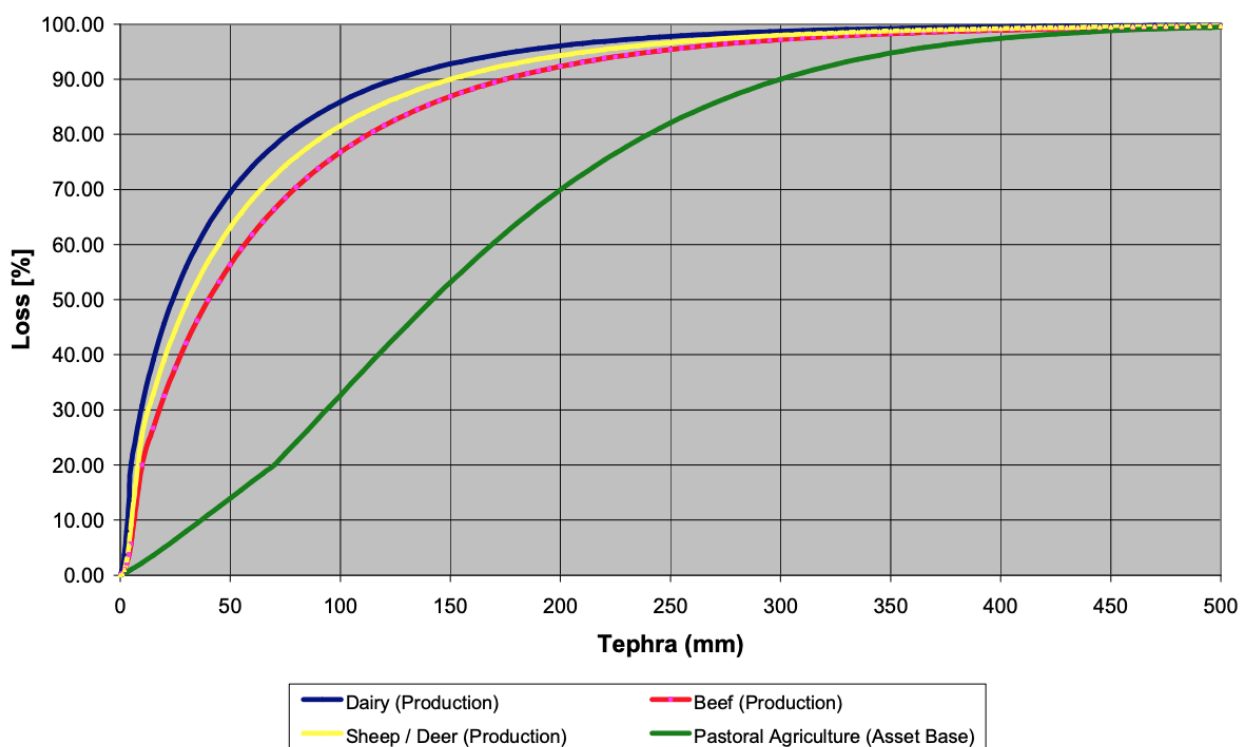


Figure 6 - Fonctions de fragilité pour le bétail développées par Wilson et Kaye (2007)

3. Objectifs du travail

L'objectif de ce travail est de développer et d'appliquer une méthode pour quantifier la vulnérabilité des exploitations agricoles. Pour ce faire, l'exploitation est considérée comme un système composé de deux sous-systèmes : les cultures et l'élevage, ainsi que des interactions entre leurs différents composants et des flux entrants et sortants du système.

Cet objectif général se divise en trois sous-objectifs :

- Caractériser la situation économique de deux exploitations agricoles contrastées.
- Analyser la vulnérabilité des deux exploitations en simulant l'impact du téphra.
- Comparer les deux exploitations afin d'identifier le système le plus vulnérable.

Cette étude se base sur cinq exploitations autour du volcan Tungurahua en Équateur. Les résultats pourront enrichir nos connaissances autour de la vulnérabilité et de manière plus large, contribuer au développement des stratégies qui visent à atténuer le risque chez les agriculteurs dans les régions volcaniques.

4. Matériels et méthodes

4.1. Zone d'étude : le volcan Tungurahua

Le volcan Tungurahua, aussi connu sous le nom de « El Reventador », se situe dans la chaîne montagneuse andine appelée « Cordillera Real », en Équateur. Il s'agit d'un édifice volcanique atteignant une hauteur de 5 020 mètres avec un diamètre de 16 km (TUNGURAHUA - Instituto Geofísico - EPN, s. d.). Il est considéré comme l'un des volcans les plus actifs d'Équateur ces dernières décennies (Hall et al., 2008 ; Naranjo et al., 2016 ; Arnold et al., 2017 ; Ramón et al., 2021). Depuis son réveil en novembre 2002, El Reventador est en éruption continue (Wright, 2016) présentant des éruptions à la fois explosives et effusives (Vásconez et al., 2022b).

La province de Tungurahua est située au centre du pays (Figure 7) et possède une superficie de 3 369 kilomètres carrés, à 2 557 mètres d'altitude (Carrasco, 2018). La population de la province est aujourd'hui de 597 009 habitants (Tungurahua_Demografia, s. d.). Il s'agit de la septième province la plus peuplée de l'Équateur, avec 43 % de la population résidant dans les zones rurales et 57 % dans les zones urbaines. Elle se distingue des autres provinces par le nombre de personnes travaillant en tant qu'indépendants dans plusieurs domaines, dont la production agricole (Carrasco, 2018).

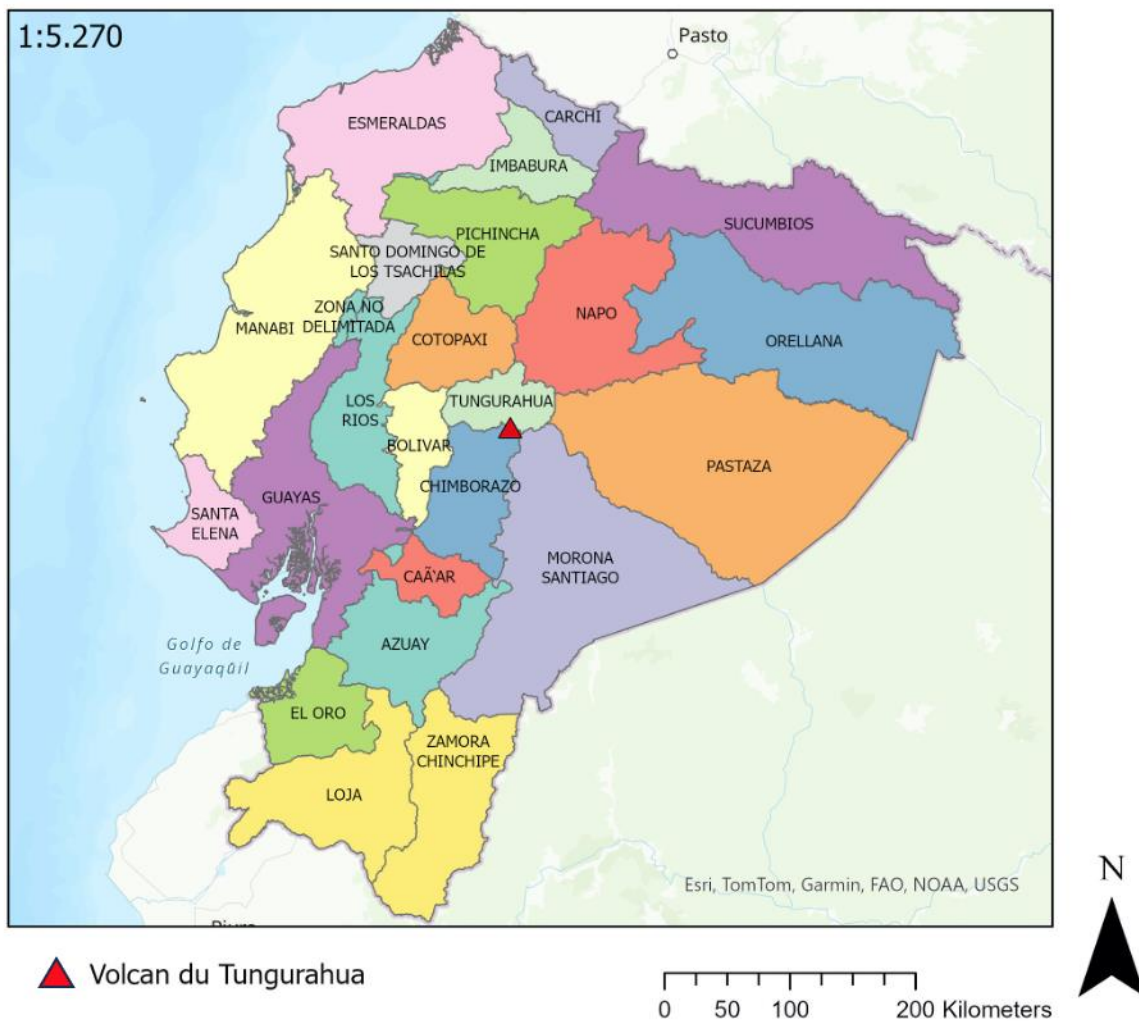


Figure 7 - Présentation des provinces en Équateur

Les habitants se sont habitués à la présence du volcan et continuent leur activité agricole malgré ses éruptions répétées et les chutes continues de téphra. Un système de monitoring a été mis en place par l'Institut Géophysique en collaboration avec plus de 30 volontaires qui observent journalièrement le Tungurahua afin de prévenir des risques volcaniques. Lorsque l'activité éruptive dure plus de 48h, les habitants se voient obligés d'évacuer leurs terres, comme ce fut le cas en 2015 lors de grandes explosions caractérisées par un VEI allant de 4 à 8 (Elcommercio, 2015).

Dans le cadre de notre étude, cinq exploitations agricoles représentatives de l'agriculture de cette région, dans un rayon de 8,5 km du volcan, ont été sélectionnées par l'Institut Géographique. Elles sont présentées sur la Figure 8.

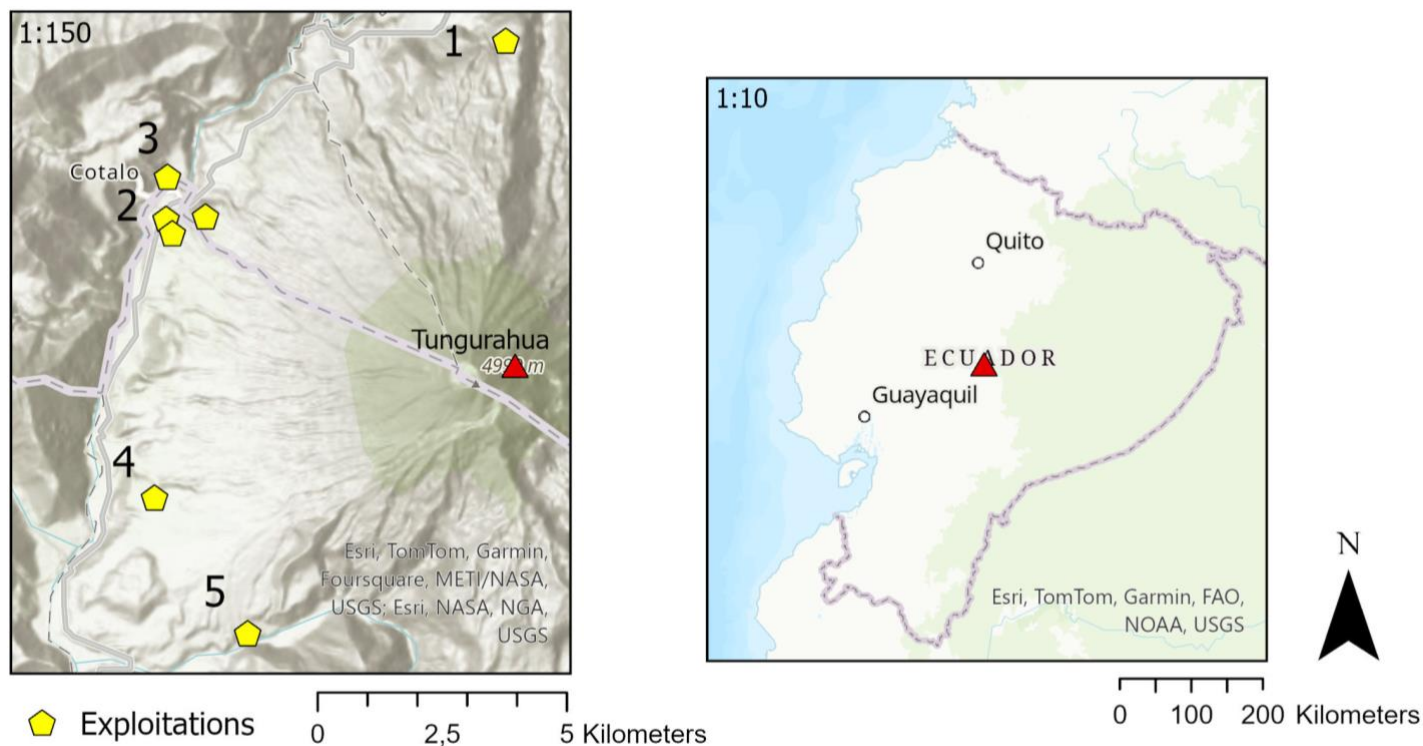


Figure 8 - Localisation des cinq exploitations autour du volcan Tungurahua en Équateur

4.2. Collecte des données

Un travail de terrain de 18 jours a été effectué en Équateur entre le 1^{er} et le 17 septembre 2023. Dix interviews ont été réalisées sur place autour de deux volcans : cinq autour du volcan Tungurahua et cinq autour du volcan Sangay. Le groupe qui a permis la collecte de données était constitué de cinq personnes : Telenchana Edwin (volcanologue de l'institut géophysique d'Équateur), Hidalgo David (traducteur et conducteur), Malherbe Sophie (doctorante, membre de l'UCL), Del Natale Inessa (mémorante à l'UCL) et moi-même. Cette mission est effectuée dans le cadre du projet de recherche ARC TALOS (TALOS, s. d.). La suite du présent travail se concentrera uniquement sur les cinq exploitations autour du Tungurahua, qui constitue la zone d'étude sélectionnée.

Les interviews ont été réalisées à l'aide d'un questionnaire basé sur les méthodes informelles d'enquête pour la recherche sur les systèmes agricoles de Rhoades (1985). Le document est structuré en sept parties :

- 1) Informations de contact et généralités,
- 2) Système d'élevage,
- 3) Système de culture,
- 4) Forces et travail,

- 5) Dépenses et revenus,
- 6) Préoccupations et craintes,
- 7) Le volcan et les cendres volcaniques.

Les différentes parties sont détaillées en Annexe 1.

4.3. Analyse qualitative

L'analyse qualitative utilisée dans ce travail se base sur la méthodologie de Stark et al. de 2019. Elle repose sur le concept « input-output » qui vient de l'économie, dont l'objectif est la représentation qualitative des interactions entre les composantes d'un système ainsi que celles entre les composantes et leur environnement.

La première étape de ce travail consiste à utiliser l'analyse conceptuelle pour représenter un système agricole général et définir les flux qui le composent. Pour cela, il faut commencer par définir les frontières du système dans l'espace et dans le temps. Ici, nous travaillons au niveau de l'exploitation agricole et sur une période annuelle. La segmentation des composantes du système a été opérée de façon à répondre aux objectifs de l'étude en lien avec le niveau de détail des données que nous avons collectées sur le terrain ainsi que celles détaillées dans la Section 4.5 de ce travail. Au sein du système sont représentées deux composantes principales : les sous-systèmes de cultures et d'élevage. Le compartiment « cultures » est divisé en trois sous-catégories : cultures à cycle court, annuelles et pérennes. Le compartiment « élevage » se divise en neuf sous-catégories : bovins, volailles, cobayes, caprins, porcins, équidés, léporidés, poissons et abeilles. Le stockage de fumier (sous le nom de « stockage »), le fourrage et le pâturage sont représentés comme des compartiments distincts dans le système. Les flux directs et indirects entre les composantes sont également représentés. Par exemple, la consommation d'herbe d'une vache en pâture est un flux direct allant du compartiment des « cultures » vers celui de l'« élevage ». A l'inverse, une culture fourragère donnée aux cochons d'Inde en bâtiment, est un flux indirect allant aussi du compartiment des « cultures » vers celui de l'« élevage ».

Les flux d'entrée proviennent de l'extérieur du système agricole et y entrent, arrivant directement dans la composante associée : par exemple, les produits vétérinaires constituent un flux entrant dans le système vers le compartiment « élevage ». Les flux sortants correspondent aux flux quittant le système, par exemple les productions vendues ou consommées par la cellule familiale de l'agriculteur.

Un système agraire-type complet est présenté à la Figure 9. C'est sur celui-ci que se basent les analyses conceptuelles des cinq exploitations.

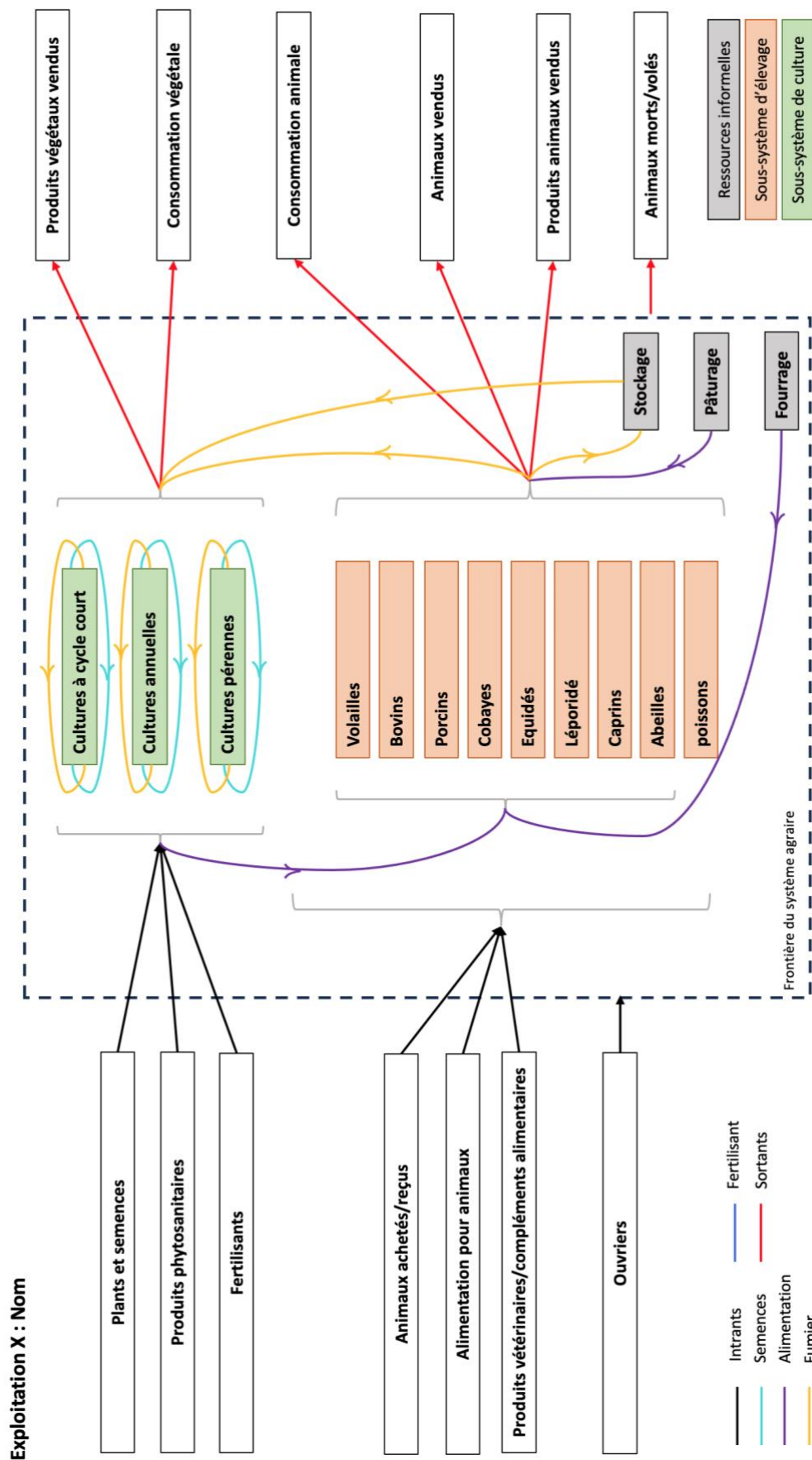


Figure 9 - Modèle conceptuel général décrivant la limite du système, les sous-systèmes de culture et d'élevage et les flux intrants, sortants et interagissant au sein du système

4.4. Analyse quantitative

L'analyse quantitative se base sur l'analyse conceptuelle effectuée au préalable. Elle a pour but de quantifier les flux que nous avons déterminés. Afin de comparer ces flux, une unité commune est choisie : le dollar. L'objectif de cette partie est de réaliser une analyse économique de la situation initiale (c'est-à-dire au moment de l'interview) de chaque exploitation pour une période d'un an.

Afin de réaliser cette analyse, nous utilisons l'outil Excel. Le fichier détaille les neuf sections suivantes : les cultures (quantité produite, vendue, consommée, destinée aux animaux et prix au kilo), les fertilisants (prix et quantité utilisée par culture), les produits phytosanitaires (prix et quantité utilisée par culture), la main d'œuvre (nombre d'heures ou de jours par an, prix par jour ou par an, nombre d'ouvriers, spécifique à chaque tâche dans la ferme), le bétail (prix d'achat, prix de vente, naissances par an, quantité de produits animaux, prix des produits animaux, consommation, vente et quantité destinée aux petits des produits animaux), la nourriture pour le bétail (inclut l'achat de nourriture extérieure à la ferme et la nourriture provenant de la ferme), les produits vétérinaires (quantité par animal et prix), les déjections (quantité produite par animal et précision de la quantité utilisée par culture) et les productions végétales et animales (résumé de l'ensemble des productions de la ferme).

Les valeurs calculées sont les suivantes :

- La valeur annuelle brute, qui correspond à la valeur fictive totale des cultures et des animaux au sein de la ferme si la production entière et tout le bétail étaient vendus.
- Le revenu annuel brut, qui représente le montant effectivement gagné par la vente des produits agricoles.
- Les coûts annuels de l'activité agricole, comprenant les coûts vétérinaires, alimentaires, de transformation (par exemple la production de fromage), de main d'œuvre, d'engrais, de produits phytosanitaires, de semences et de location d'outils agricoles.
- La valeur annuelle nette, égale à la valeur annuelle brute moins les coûts annuels.
- Le revenu annuel net, calculé par la différence entre le revenu annuel brut et les coûts annuels.

4.5. Détermination des coefficients de perte

Une fois l'analyse économique terminée, nous avons considéré que chaque exploitation pouvait être soumise à un dépôt de téphra de cinq et de cinquante millimètres en nous basant sur les résultats de Ligot (2022) présentés à la Figure 10. Les cinq exploitations se situant à 8,5 km du volcan, et d'après les lignes isopaques, les valeurs sélectionnées sont réalistes. Elles ont également été choisies afin de comparer des scénarios contrastés. Il nous a donc fallu aller dans la littérature chercher les pertes que ces épaisseurs allaient engendrer. Des fonctions de fragilité ainsi que des tables réalisées par Wilson et Kaye (2007), Craig (2021) et Ligot (2023) nous ont permis de déterminer des coefficients de perte divisés en trois catégories : les coefficients de perte sur les productions (Section 4.5.1), les coefficients de saisonnalité (Section 4.5.2) et les coefficients de perte sur les actifs (Section 4.5.3). Ces coefficients sont ensuite ajoutés au modèle effectué sur Excel.

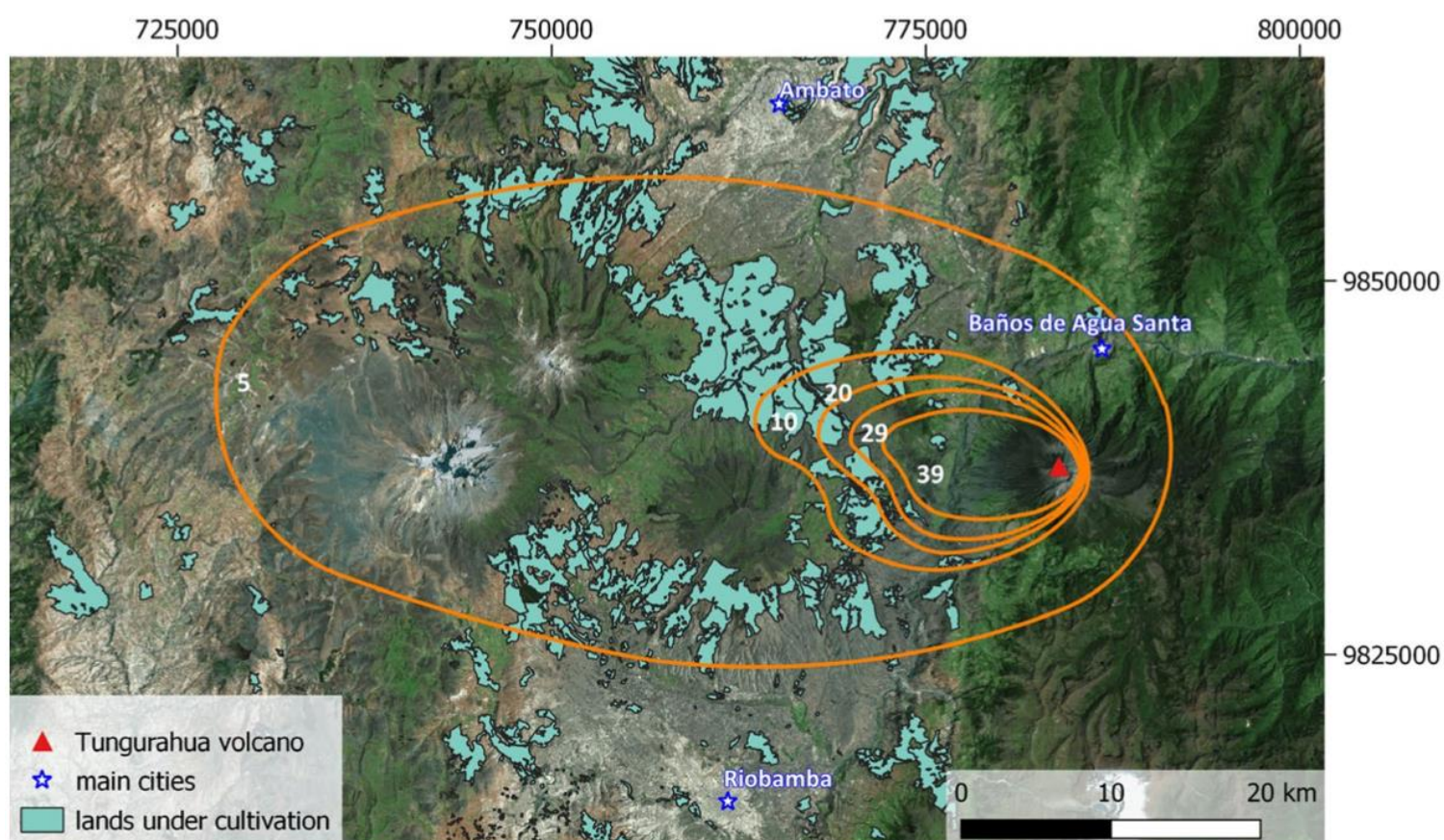


Figure 10 - Carte montrant la surface couverte par cinq lignes d'isopaque de cendres (5, 10, 20, 29, 39 kg m⁻²) qui délimitent les surfaces correspondant aux cinq plages d'accumulation de cendres pendant l'éruption du Tungurahua du 16 et 17 août 2016. (Ligot 2022).

Craig (2015) a démontré que l'épaisseur des dépôts de téphra augmente la gravité des impacts. Par conséquent, cette comparaison entre les deux scénarios nous permettra d'analyser les différences entre les résultats des deux exploitations ainsi qu'au sein de la

même exploitation, mais avec des dépôts de téphra différents. La simulation est exécutée pour chaque mois de l'année afin d'évaluer l'impact du téphra en fonction du stade phénologique des cultures. Le niveau de précision de cette analyse ne permet pas de réduire cette temporalité.

4.5.1. Coefficients de perte sur les productions

Sur base des fonctions de fragilité et des tables de Wilson et al. (2007) et de Craig (2021) présentées en Annexe 2, les coefficients sont déterminés pour les types de cultures et les types d'animaux présents dans les exploitations faisant l'objet de ce travail. Les valeurs sont reprises ci-dessous (Tableaux 2 et 3).

Tableau 2 - Coefficients de perte de production des différents types de cultures

Type de culture	Épaisseur		Source
	5 mm	50 mm	
Céréale	0,45	0,9	Craig 2021
Légume racine	0	0,35	Wilson et Kaye 2007
Légume à feuille	0,8	1	Wilson et Kaye 2007
Légume à fruit	0,8	1	Wilson et Kaye 2007
Culture arboricole	0,3	1	Wilson et Kaye 2007

Les céréales représentent le maïs, les légumes à racines sont pour les pommes de terre, les légumes à feuilles reprennent les haricots et les légumes à fruits incluent les haricots, les citrouilles et les courges. Les cultures arboricoles comprennent des : pommiers, citronniers, pruniers Claudia blancs ou rouges, pêchers, poiriers, mûriers, avocatiers, mandariniers, citronniers verts (lime), orangers, amandiers, babacos, noyers, grenadilles (fruit de la passion), grenadilles (maracuja), chirimoyas, cerisiers acides, guabas, grenadilles (taxo), figues de barbarie.

Tableau 3 - Coefficients de perte de production des différents types d'animaux

Type d'animal	Épaisseur		Source
	5 mm	50 mm	
Bovin adulte	0,2	0,7	Wilson et Kaye 2007
Bovin jeune	0,1	0,57	Wilson et Kaye 2007
Cochon d'Inde	0,55	0,85	Hypothèse
Cochon	0,33	0,78	Hypothèse
Volaille	0,05	0,63	Wilson et Kaye 2007
Caprin	0,2	0,7	Hypothèse
Léporidé	0,48	0,85	Hypothèse

Âne	0,1	0,57	Wilson et Kaye 2007
Abeille	0,6	1	Mariage 2024

Les volailles comprennent les poules, les canards, les oies et les dindons.

N'ayant pas d'information sur les cochons et ceux-ci étant en intérieur dans les exploitations concernées, le choix du coefficient se base sur l'hypothèse que les pertes de reproduction et les taux de survie ne dépendent que de leur alimentation qui est composée essentiellement de l'herbe de pâture et de maïs. Leur coefficient correspond donc à la moyenne des coefficients de ces deux cultures pour chacun des deux scénarios.

Les cochons d'Inde étant également élevés dans des abris, la même hypothèse que précédemment est choisie. Leur alimentation est, tout comme les cochons, composée essentiellement de l'herbe de pâture et de maïs. Nous avons donc fait la moyenne des coefficients de ces cultures en ajoutant un coefficient de 1 afin qu'ils n'aient pas la même valeur que les cochons qui sont plus résistants.

De la même manière, les lapins sont aussi à l'intérieur et s'alimentent principalement de fourrage, de maïs et de courge. Leur coefficient est donc basé sur la moyenne des coefficients de ces trois cultures.

Les caprins sont des ruminants comme les bovins et tous deux se nourrissent d'herbe de pâturages et sont élevés pour leur lait et leur viande. N'ayant pas plus d'informations sur les caprins, nous avons choisi de leur appliquer le même coefficient de perte de production que les bovins adultes.

4.5.2. Coefficients de saisonnalité

Les coefficients de saisonnalité présentés dans le Tableau 4 se basent sur le travail de Wilson et Kaye 2007 qui définissent trois stades de vulnérabilité : peu vulnérable, assez vulnérable et très vulnérable. Nous avons ajouté un quatrième stade : non vulnérable, qui correspond au moment où la culture ne se trouve pas sur le champ. Les différentes phases du cycle de développement des cultures ont été associés à ces stades de vulnérabilité.

Tableau 4 - Coefficients de saisonnalité basés sur le travail de Wilson et Kaye (2007)

Vulnérabilité	Cycle de développement	Coefficient
Non vulnérable	Hors culture	0
Peu vulnérable	Maturation	0,25
Assez vulnérable	Croissance et récolte	0,75
Très vulnérable	Floraison	1

L'établissement d'un calendrier de culture nous permet d'utiliser des coefficients de saisonnalité et d'obtenir des résultats plus précis quant à la vulnérabilité des cultures en fonction de leur stade phénologique (Tableaux 5 et 6).

Tableau 5 - Coefficients de saisonnalité des différents types de cultures avec un dépôt d'une épaisseur de 5 mm de téphra

Type de culture	Épaisseur de 5 mm						Source
	Semis	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte	Hors culture	
Maïs	0,75	0,6	0,8	0,7	0,5	0	Ligot et al 2023
Pomme de terre	0,75	0,75	0,7	0,65	0,5	0	Ligot et al 2023
Fève	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007
Légume à fruit	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007
Culture arboricole	0,75	0,8	1	0,6	1	0	Ligot et al 2023

Tableau 6 - Coefficients de saisonnalité des différents types de cultures avec un dépôt d'une épaisseur de 50 mm de téphra

Type de culture	Épaisseur de 50 mm						Source
	Semis	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte	Hors culture	
Maïs	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007
Pomme de terre	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007
Fève	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007
Légume à fruit	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007
Culture arboricole	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0	Wilson et Kaye 2007

Ligot et al (2023) ont développé des fonctions de fragilité avec des masses de cendres allant de 0 à 40 kg/m² présentées en Annexe 3. Celles-ci ont été réalisées de manière spécifique pour le maïs et les pommes de terre, ce qui les rend plus précises que celles de Wilson et Kaye (2007) qui ont regroupé ces cultures par catégories. Par conséquent, les coefficients de saisonnalité du maïs et des pommes de terre, pour le scénario de cinq millimètres, sont basés sur le travail de Ligot et al (2023).

Concernant le bétail, il n'existe pas de coefficient de saisonnalité qui puisse s'appliquer aux exploitations agricoles en Équateur. Pour cela, nous considérons que lorsque l'animal entre dans le système, il a un coefficient de un et lorsqu'il sort du système (vente ou consommation familiale par exemple), il a un coefficient de zéro.

4.5.3. Coefficients de perte sur les actifs

Dans le cas d'une exploitation agricole, le terme "actif" fait référence à l'ensemble des biens économiques détenus par l'exploitation qui sont utilisés pour produire des biens agricoles ou

fournir des services agricoles. Ces actifs peuvent inclure la terre agricole, les bâtiments, les équipements agricoles, le bétail, les récoltes et tout autre bien utilisé dans les opérations de l'exploitation. Les seules pertes sur les actifs prises en compte dans cette étude concernent les cultures pérennes et le bétail. Les informations disponibles dans la littérature et lors des interviews ne permettent pas d'obtenir un niveau de détail plus précis. Les coefficients de perte sur les actifs pour le bétail sont considérés comme étant les mêmes que les coefficients de perte de production. La raison de ce choix est que nous considérons que la production dépend directement de l'animal. Par exemple, si une vache laitière présente une baisse d'énergie liée au manque de nourriture suite à la chute de téphra, elle peut être atteinte de cétose qui est une maladie qui cause une baisse de production laitière (Curious, 2011). Il en va de même pour le taureau qui, s'il manque de nourriture, va maigrir et par conséquent produire moins de viande.

Concernant les cultures pérennes, leur coefficient se base sur les fonctions de fragilité et les tables de Wilson et Kaye (2007) (Annexe 2). Par manque de données dans la littérature c'est une valeur unique qui est appliquée pour chacun des scénarios d'épaisseur de téphra (Tableau 7).

Tableau 7 - Coefficients de perte sur les actifs des cultures arboricoles avec des dépôts d'une épaisseur de 5 mm et de 50 mm de téphra

Type de culture	Épaisseur		Source
	5 mm	50 mm	
Culture pérenne	0,02	0,14	Wilson et Kaye 2007

Contrairement aux cultures à cycle court et annuelles, lorsqu'une culture pérenne est détruite, l'agriculteur perd parfois des arbres âgés de plusieurs années. Le temps de renouvellement de chaque culture pérenne est présenté dans le Tableau 8 et correspond au temps que prend cette culture pour produire les premiers fruits après avoir été replantée. Notons que la quantité produite par un jeune arbre et celle produite après quelques années peuvent être différentes, le temps de renouvellement en termes de production perdue reste donc une estimation.

Tableau 8 - Temps de renouvellement en années des cultures pérennes

Culture pérenne	Temps de renouvellement (année)	Culture pérenne	Temps de renouvellement (année)
Pommier	3,5	Amandier	2
Citronnier	4,5	Babaco	0,9
Prunier Claudia	4,5	Noyer	15
Pêcher	7	Fruit de la passion	3,5

Poirier	7	Maracuja	3,5
Mûrier	0,6	Chirimoya	3,5
Avocatier	5	Cerisier acide	2,5
Mandarinier	6,5	Guaba	4
Citronnier vert	7	Taxo	0,7
Oranger	18	Figue de barbarie	2,5

4.6. Hypothèses de la simulation

4.6.1. Hypothèses générales

Dans le cadre de la simulation, plusieurs hypothèses sont prises en compte. Tout d'abord, toutes les opérations qui supposent un coût nécessaire aux activités agricoles, telles que la fertilisation ou les soins vétérinaires, sont présumées comme réalisées jusqu'au mois de l'éruption inclus. Les opérations générant des revenus comme la vente des cultures ou des produits animaux, sont considérées comme n'ayant pas encore eu lieu si elles se passent le mois de l'éruption. Enfin, une fois que l'éruption s'est produite, l'exploitation agricole reprend le cours normal du calendrier sans interruption ni modification particulière. Ainsi, les activités agricoles suivantes, telles que le semis de nouvelles cultures, sont effectuées comme prévu dans le calendrier, sans considération pour d'éventuelles interruptions liées à l'évacuation de l'exploitation. De même, en cas de perte de cultures dues à l'éruption, elles ne sont pas remplacées par une nouvelle culture à cycle court avant la culture prévue suivante pour combler le vide.

4.6.2. Hypothèses sur les cultures

Après une perte de production, la répartition des cultures produites entre différentes finalités suit un ordre selon les hypothèses suivantes : d'abord, la priorité est donnée au paiement en nature s'il est nécessaire, puis à la consommation de la famille. Ensuite, les cultures sont destinées au fourrage, puis au semis suivant, et finalement à la vente. Par exemple, si une exploitation agricole produit habituellement 200 kg de riz répartis en 20 kg pour le paiement en nature, 50 kg pour la consommation familiale, aucun pour le fourrage, 10 kg pour le semis suivant, et 120 kg pour la vente, mais que l'éruption réduit la production à 100 kg, la répartition serait alors de 20 kg– 50 kg– 0 kg– 10 kg– 20 kg respectivement.

Pour les cultures pérennes, la récolte des plantes mortes est considérée comme nulle le mois de l'éruption et les mois suivants jusqu'au renouvellement de la plante. La récolte des plantes survivantes est réduite en fonction du coefficient de perte de production correspondant uniquement pour la première récolte après l'éruption. Les cultures annuelles et à cycle court sont affectées par les coefficients de production et de saisonnalité. Leur production reprend son cours habituel l'année succédant l'éruption.

En ce qui concerne les travaux et les traitements agricoles, la (trans)plantation est maintenue dans tous les cas. Si elle a lieu avant l'éruption, elle est déjà considérée comme effectuée, même le mois de l'éruption. Si elle est prévue après l'éruption, elle est maintenue. De même, toute préparation du sol pour la culture en cours ou suivante est maintenue selon le calendrier habituel.

Les traitements tels que la fertilisation, les produits phytosanitaires et les désherbages sont considérés comme réalisés avant l'éruption, y compris le mois de l'éruption. Ceux planifiés pour le mois suivant l'éruption sont annulés jusqu'au semis suivant.

Enfin, les récoltes sont maintenues après l'éruption, même si elles sont prévues pour le mois de l'éruption. Elles sont ajustées en fonction du rendement restant après la perte de production.

4.6.3. Hypothèses sur le bétail

Par simplification, aucun effet interannuel n'est pris en compte, ce qui signifie que l'éruption affecte uniquement l'année en cours et non les animaux nés l'année précédente qui ne sont pas encore vendus. Les animaux destinés à la vente sont tous vendus pendant l'année en cours.

Toutes les naissances d'une espèce donnée sont considérées comme ayant lieu en même temps. Par exemple, toutes les portées annuelles des truies naissent en mars et en août. Les petits censés naître le mois de l'éruption sont considérés comme nés avant l'éruption. En cas de pertes de petits nés, ils sont d'abord destinés à la consommation de la famille et ensuite à la vente.

Les animaux vendus le mois de l'éruption sont considérés comme vendus après l'éruption. La production animale est affectée à partir du mois de l'éruption inclus. En cas de perte de production animale vivante et de produits animaux (lait, miel, etc.), la répartition suit un ordre spécifique : d'abord la priorité est donnée aux jeunes animaux (lait maternel), puis à la consommation de la famille et finalement à la vente.

5. Résultats

5.1 Modèles conceptuels

5.1.1 Exploitation n°1

La première exploitation est localisée à Pomdoa Chico et est la propriété de Gustavo Padilla. Le modèle conceptuel de sa ferme est illustré à la Figure 11. Il comporte deux sous-systèmes : la culture et l'élevage, qui interagissent en utilisant les résidus de culture comme alimentation pour les animaux, et les déjections des animaux comme fertilisant pour les cultures.

Exploitation 1 : Gustavo Padilla

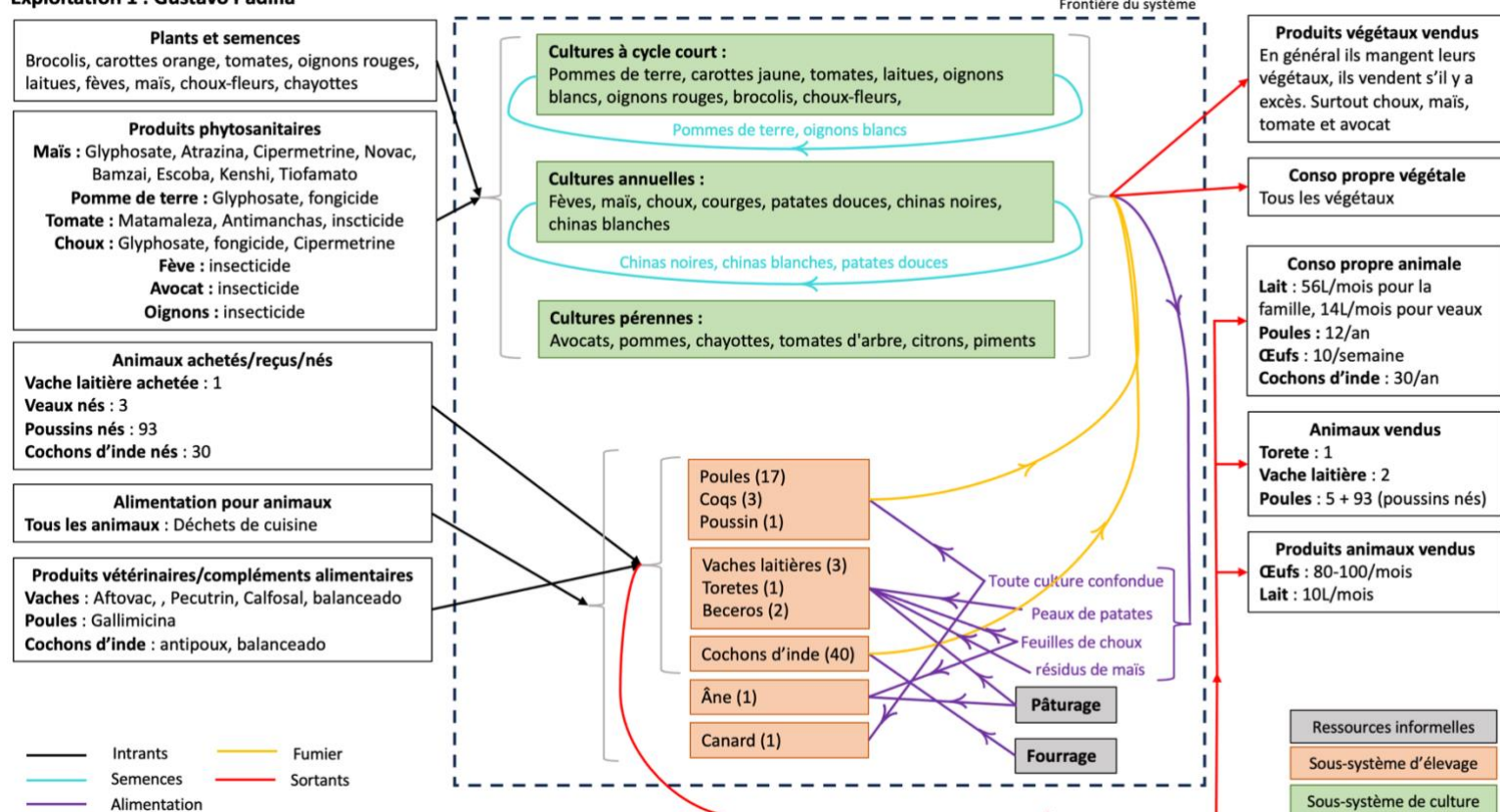


Figure 11 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°1

La superficie totale du terrain s'élève à 5,2 hectares, dont 2,2 hectares sont dédiés aux cultures et trois hectares sont réservés au pâturage. La majeure partie de son espace cultivable est consacrée au maïs, occupant 2 hectares (Annexe 4). Les récoltes sont principalement destinées à la consommation domestique, et seuls les excédents sont vendus. L'agriculteur n'achète pas de fertilisants et utilise les déjections de ses animaux à la place. Les résidus de culture, comme les feuilles de choux, sont utilisés pour l'alimentation des animaux.

En ce qui concerne le système d'élevage, il comprend vingt-deux volailles, six bovins, quarante cobayes et un équidé. Leur alimentation principale provient des résidus de cuisine ou de cultures, ainsi que des pâturages. Les déjections des volailles et des cobayes sont collectées pour être utilisées comme fertilisant pour les cultures. Celles des bovins sont dispersées directement dans la prairie, tandis que celles de l'âne et du canard sont répandues sur tout le terrain car ils sont en liberté dans toute la ferme.

5.1.2 Exploitation n°2

La deuxième exploitation appartient à Roberto Rosera et est située entre les provinces de Chimborazo et de Tungurahua, dans les paroisses de Bilbao et le quartier de Santa Cruz. Ses terres sont vastes et dispersées. L'analyse conceptuelle de sa ferme est représentée sur la Figure 12. Les deux sous-systèmes, culture et élevage, interagissent uniquement par le biais des déjections animales utilisées comme fertilisant pour les cultures et les pâturages.

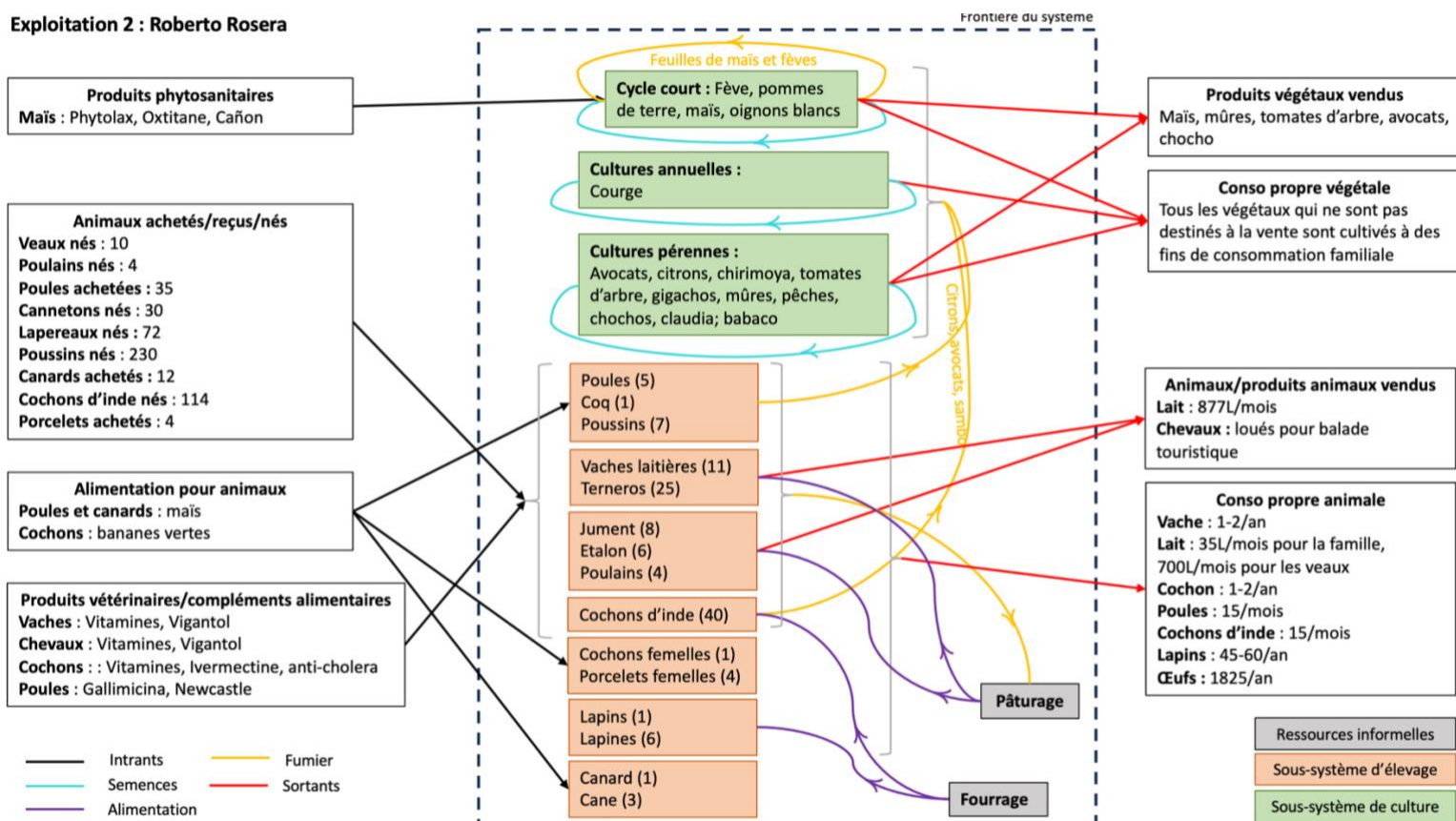


Figure 12 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°2

La superficie totale de son terrain est de 8,6 hectares avec 3,9 hectares de pâturages et 4,7 hectares de cultures. La culture avec la plus grande superficie est la pomme de terre avec 0,25 hectare (5,3% de la surface cultivable). L'agriculteur n'achète pas de plants et de semences. Il

utilise celles de ces anciennes cultures pour les renouveler. Il n'achète pas non plus de fertilisant et utilise les déjections de ces animaux à la place. Il ne consomme pas les cultures qu'il vend et vice-versa. 0,5 hectare de ses cultures sont destinés à la vente soit environ 11% de son terrain de cultures. Les résidus de ses cultures ne sont pas utilisés dans l'alimentation des animaux.

En ce qui concerne le bétail, il comprend dix-sept volailles, trente-six bovins, dix-huit équidés, quarante cobayes, cinq porcins et sept léporidés. La plupart des produits animaux sont destinés à la consommation domestique, seul le lait est vendu.

5.1.3 Exploitation n°3

La troisième exploitation est celle d'Esthela Pallo, située à Chacauco. La Figure 13 illustre le système de son exploitation, composé des sous-systèmes de cultures et d'élevage qui interagissent entre eux par le biais du fumier et de l'alimentation.

Exploitation 3 : Esthela Pallo

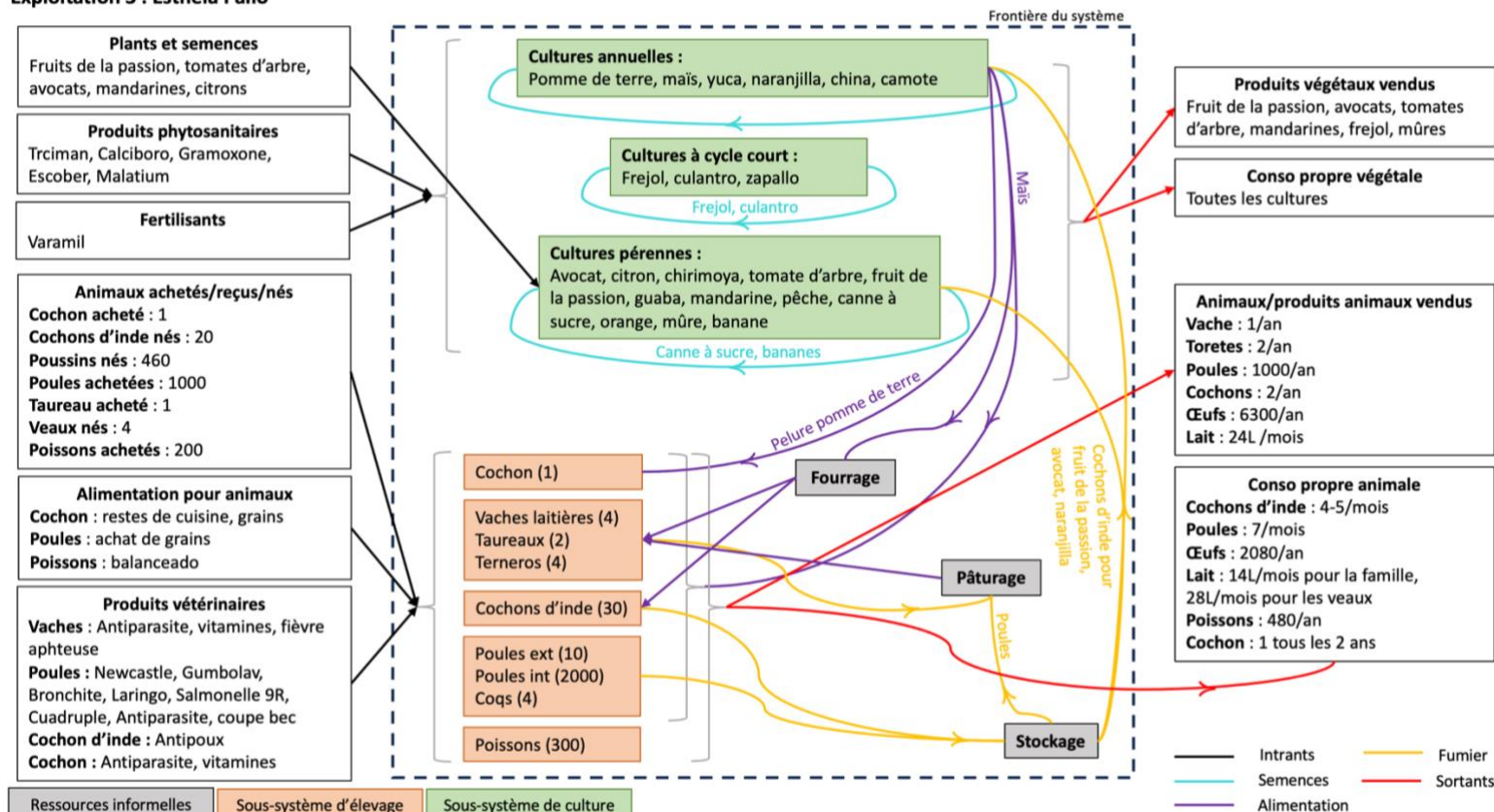


Figure 13 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°3

La superficie totale de son terrain est de 6 hectares, avec 2,2 hectares consacrés aux cultures et 3,8 hectares aux prairies. Sur ces terres cultivables, 2 hectares (représentant 91% de la

surface) sont dédiés aux fruits de la passion, comptant environ 8000 plantes. La famille consomme une partie de chacune des productions végétales, y compris celles provenant des 2,1 hectares destinés à la vente. Les résidus de culture de maïs sont utilisés pour tous les animaux, à l'exception des poissons.

Le système d'élevage comprend un porc, dix bovins, trente cobayes, deux mille quatorze volailles, dont deux mille sont élevés en cages pour la production d'œufs et quatorze sont en liberté à l'extérieur, ainsi que trois cents poissons. Les deux mille poules pondeuses sont élevés pendant deux ans, puis vendues et remplacées. Leur entretien nécessite beaucoup de travail, notamment en termes de soins vétérinaires. Les cochons d'Inde et les poissons sont exclusivement destinés à la consommation familiale.

5.1.4 Exploitation n°4

La quatrième exploitation est localisée à la Paroisse El Altar et appartient à Jorge Totoy. Son exploitation est présentée à la Figure 14. Elle comprend deux sous-systèmes : cultures et élevage, qui interagissent par le biais du fumier et de l'alimentation. Les résidus de maïs sont donnés au bétail, tandis que le fumier est stocké puis déposé au pied de chaque plante pérenne.

Exploitation 4 : Jorge Totoy

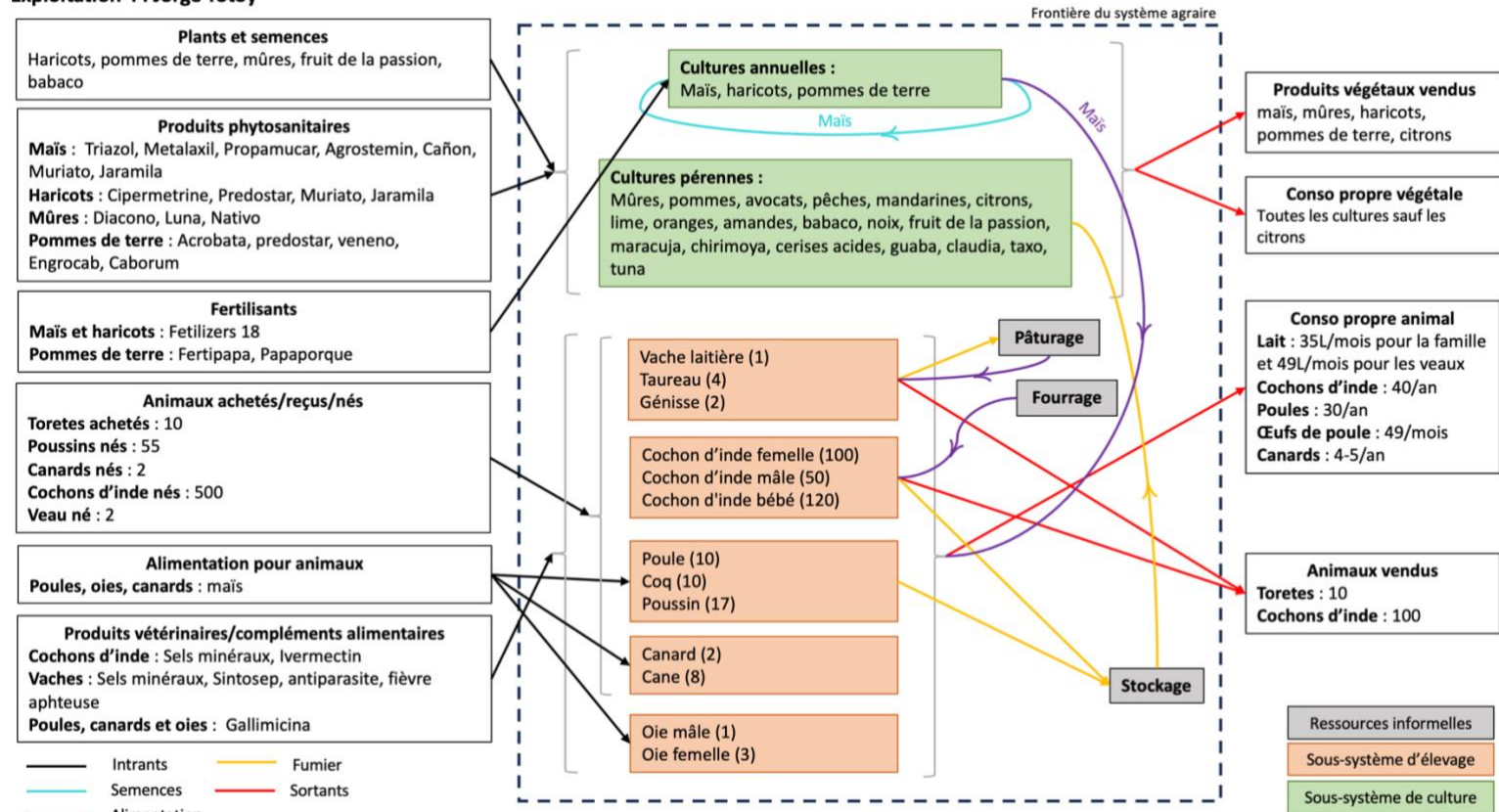


Figure 14 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°4

La superficie totale de son terrain est de 12 hectares au total, comprenant 7 hectares de terres cultivées, 1 hectare de pâturage et 4 hectares de « páramo » caractérisé par un terrain pauvre en végétation, rocheux et à haute altitude. La culture prédominante est le maïs, couvrant 5 hectares, suivie des mûres avec 0,8 hectare. Il n'y a pas de cultures à cycle court, mais une grande diversité de cultures pérennes, avec 19 types différents.

Le système d'élevage comprend sept bovins, deux cent septante cobayes et cinquante et une volailles. Tous les produits animaux, à l'exception des toretes¹ et des cochons d'Inde, sont destinés à la consommation familiale.

5.1.5 Exploitation n°5

La dernière exploitation appartient à Victor Roberto et se situe à Choglontus. Le modèle conceptuel de sa ferme est illustré à la Figure 15. Il comporte deux sous-systèmes : les cultures et l'élevage, qui interagissent en utilisant les résidus de culture comme alimentation pour les animaux, et les déjections des animaux comme fertilisant pour les cultures.

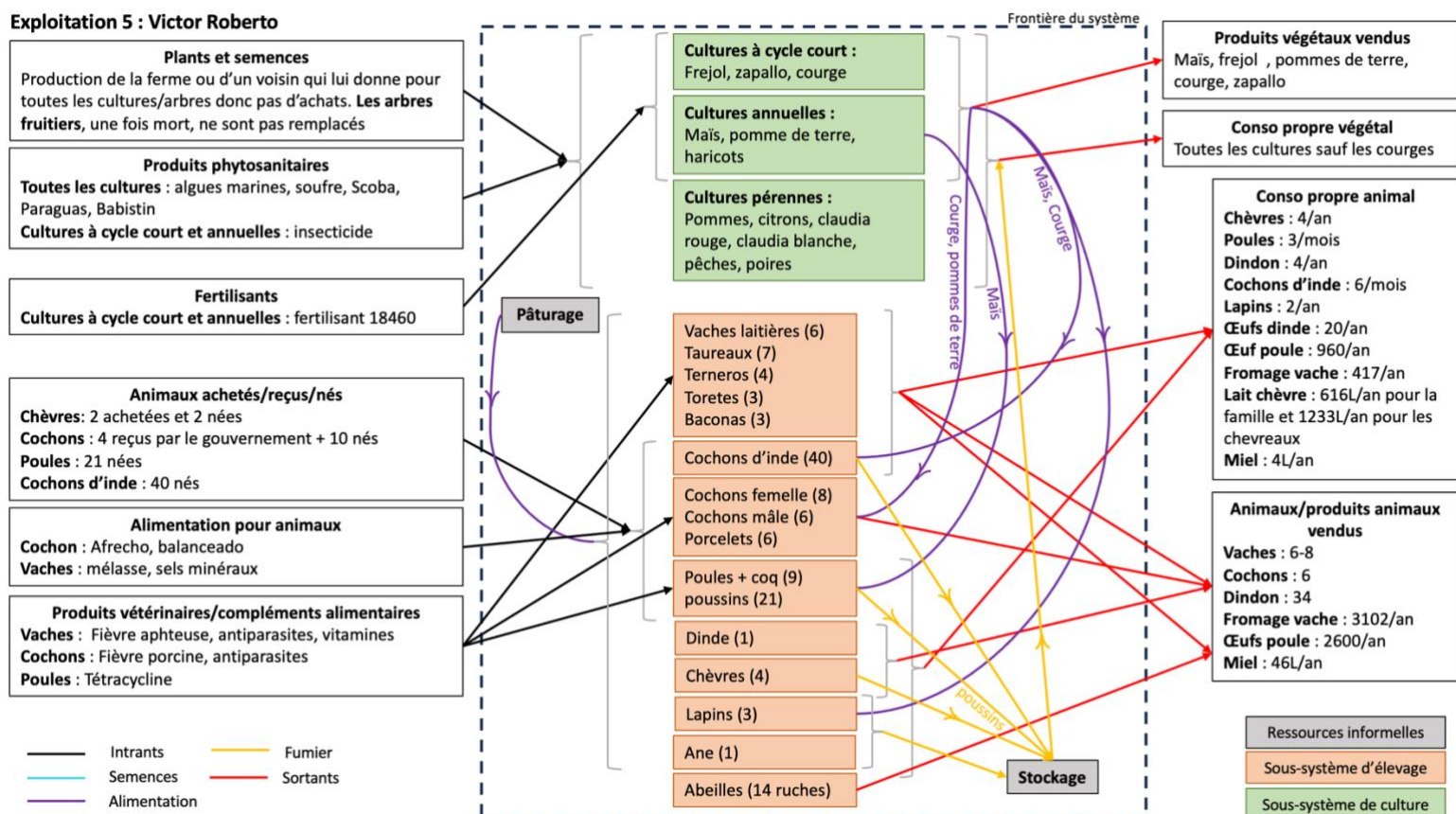


Figure 15 - Analyse conceptuelle de l'exploitation n°5

¹ Taureau d'environ deux ans.

La propriété s'étend sur 20 hectares au total, avec 8 hectares dédiés aux cultures et 12 hectares aux prairies. 6 hectares sont alloués au frejol, au zapallo, à la courge, au maïs et aux haricots, répartis de manière uniforme. Les cultures pérennes couvrent également 1 hectare de manière équitable. Les résidus de maïs, de courge et de pomme de terre sont utilisés comme alimentation pour le bétail.

Le système d'élevage comprend vingt-trois bovins, quarante cobayes, vingt porcins, trente et une volailles, quatre chèvres, trois lapins, un âne et quatorze ruches d'abeilles. Les déjections de tous les animaux, à l'exception des bovins et des abeilles, sont stockées puis réparties sur les cultures. Celles des bovins sont dispersées directement dans la prairie. Les produits animaux sont destinés à la consommation familiale ainsi qu'à la vente.

5.2 Analyses économiques

Pour chaque exploitation étudiée, une valeur économique peut-être assignée à chacun des flux identifiés par le biais des analyses conceptuelles. Dans la représentation schématique de la situation de chaque exploitation (Figures 16, 17, 18, 19, 20), en jaune sont présentées les sorties qui correspondent à la consommation de la famille des produits animaux et végétaux ainsi que ceux destinés aux semis d'une prochaine culture. Le revenu annuel net, présenté en bleu, est calculé par la différence entre les revenus totaux et les coûts totaux.

5.2.1 Exploitation n°1

La Figure 16 représente la situation économique de la ferme n°1.

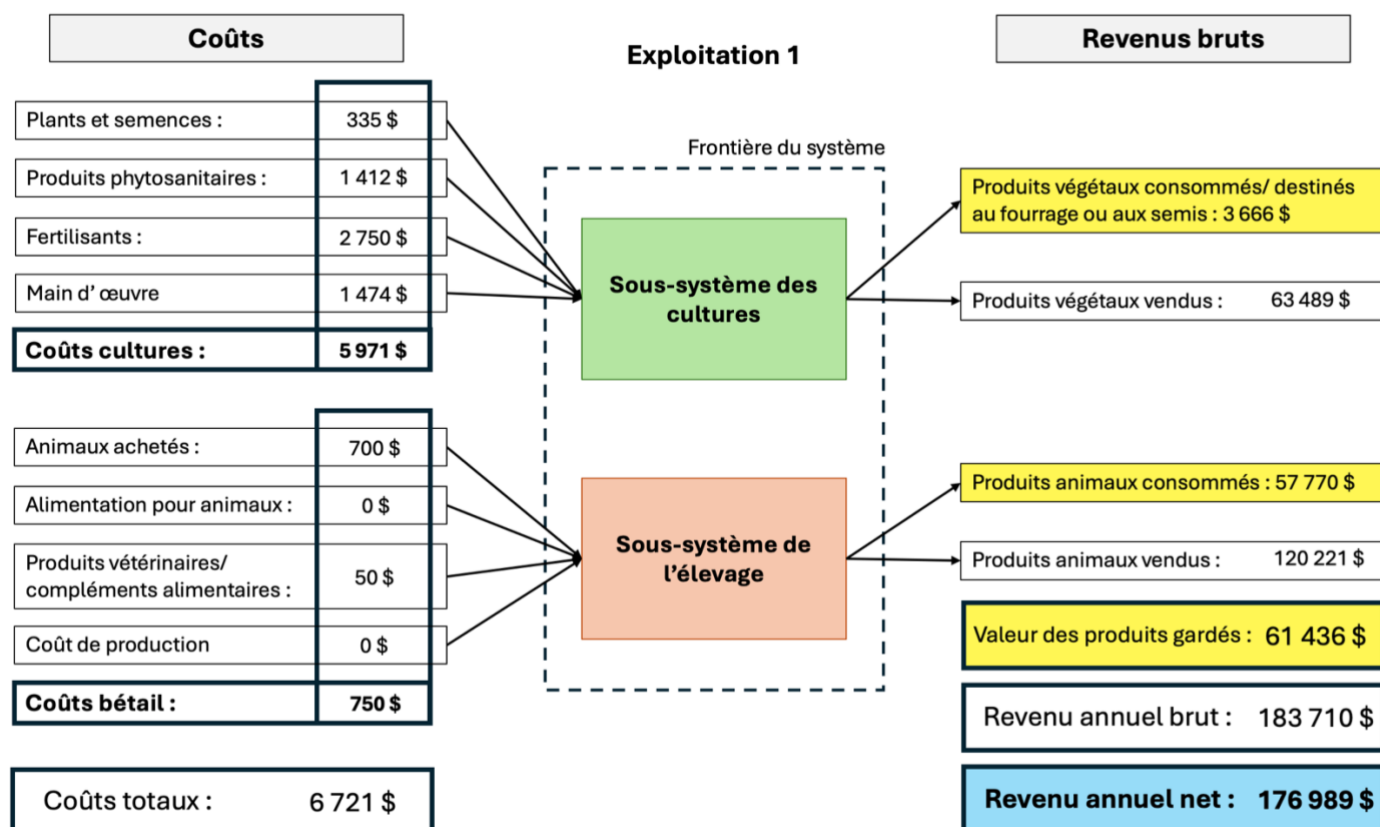


Figure 16 - Analyse économique de l'exploitation n°1

Le flux le plus coûteux correspond aux fertilisants : 1700 \$ sont utilisés pour les tomates, 1000 \$ pour la fertilisation du maïs et 50 \$ pour les pommes de terre. Le coût de la main-d'œuvre est majoritairement dû au maïs car il faut des ouvriers pour désherber le terrain, planter, récolter, et transporter le maïs lors de la vente. La majeure partie des coûts phytosanitaires, soit 51%, vient également du maïs, avec un total de 720 \$. Les coûts phytosanitaires liés aux tomates s'élèvent à 607 \$, soit 43 % du total. La superficie du maïs est de 2 hectares et celle des tomates est de 500 m². Les deux cultures nécessitent des produits différents, et la tomate requiert un traitement continu tout au long de l'année, ce qui explique son coût plus élevé proportionnellement à la superficie de la culture. Pour le bétail, c'est surtout le nombre d'animaux achetés qui a engendré le plus de coûts, car leur alimentation provient entièrement des produits de la ferme.

La majeure partie des revenus provient des œufs vendus, qui rapportent 118 260 \$ par an, soit 98 % des revenus des produits animaux vendus. Ensuite, 1625 \$ sont générés par la vente d'animaux à raison de 265 \$ provenant de la vente de bovins et de volailles nés cette année et de 71 \$ de la vente de lait. Les revenus des produits végétaux vendus varient beaucoup en

fonction de ce que la famille a consommé d’une année à l’autre ; ils représentent 35 % de l’ensemble des revenus de l’année 2023 (Annexe 4).

5.2.2 Exploitation n°2

La Figure 17 représente la situation économique de la ferme n°2.

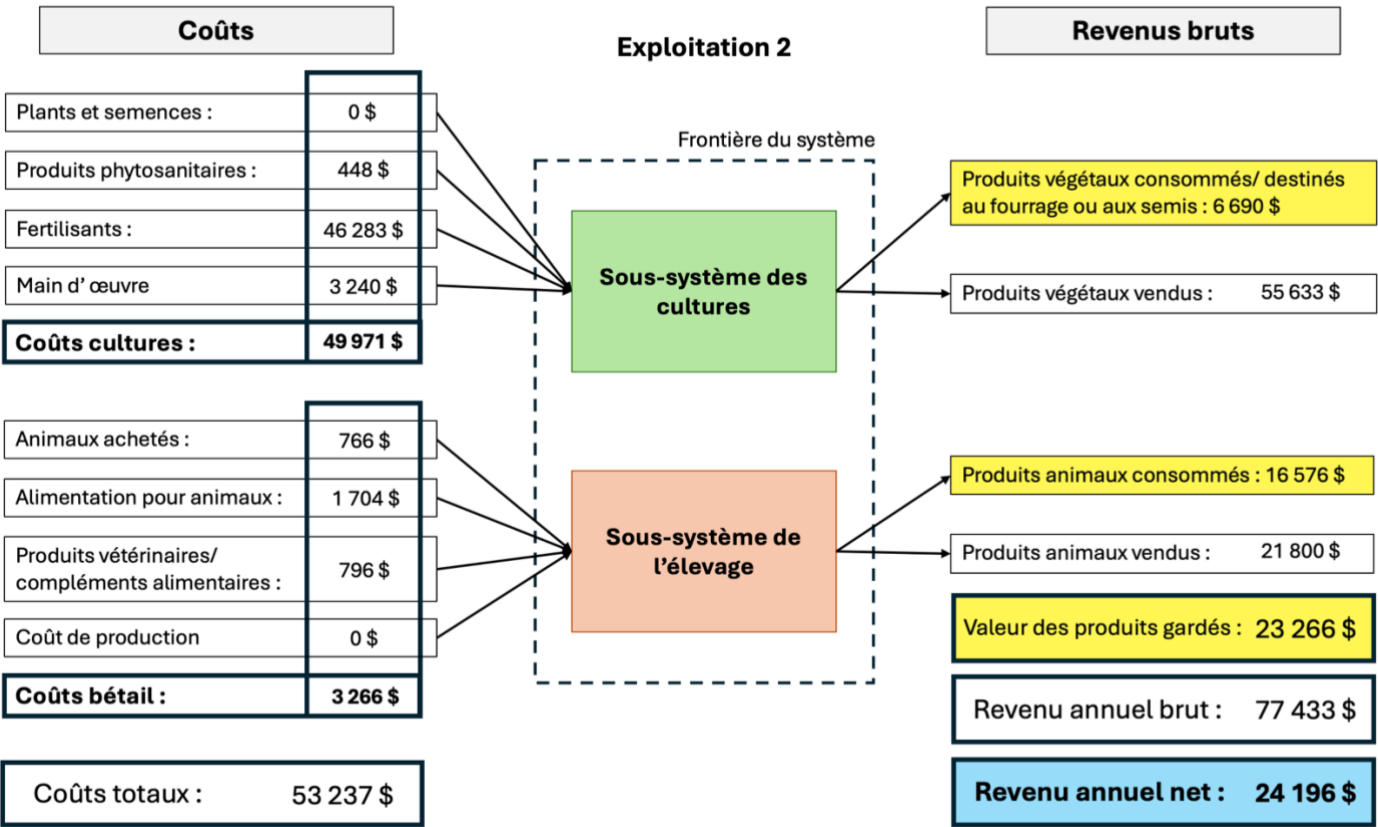


Figure 17 - Analyse économique de l'exploitation n°2

La majorité des coûts de l’exploitation n°2 provient des fertilisants, qui représentent 87 % des coûts totaux. Les tomates nécessitent 44 % des fertilisants, le reste étant réparti entre les avocats (21 %), les chimoyas (17 %), les citrons (14 %) et les oignons blancs (4 %). Le coût de la main-d’œuvre est équitablement réparti entre les tomates d’arbre, les mûres et les avocats. Concernant le bétail, les coûts d’alimentation sont uniquement dus aux volailles et aux cochons représentant respectivement 83 % et 17 %. De manière générale, 94 % des coûts totaux sont engendrés par les cultures.

Les produits végétaux vendus génèrent 72 % des revenus bruts totaux. Parmi ceux-ci, 52 633 \$, soit 95 %, proviennent des cultures pérennes, en particulier des tomates d’arbre, qui rapportent 31 633 \$ par an. En ce qui concerne les produits animaux vendus, 84 % proviennent des bovins, le reste étant attribué aux volailles (Annexe 5).

5.2.3 Exploitation n°3

La Figure 18 représente la situation économique de la ferme n°3.

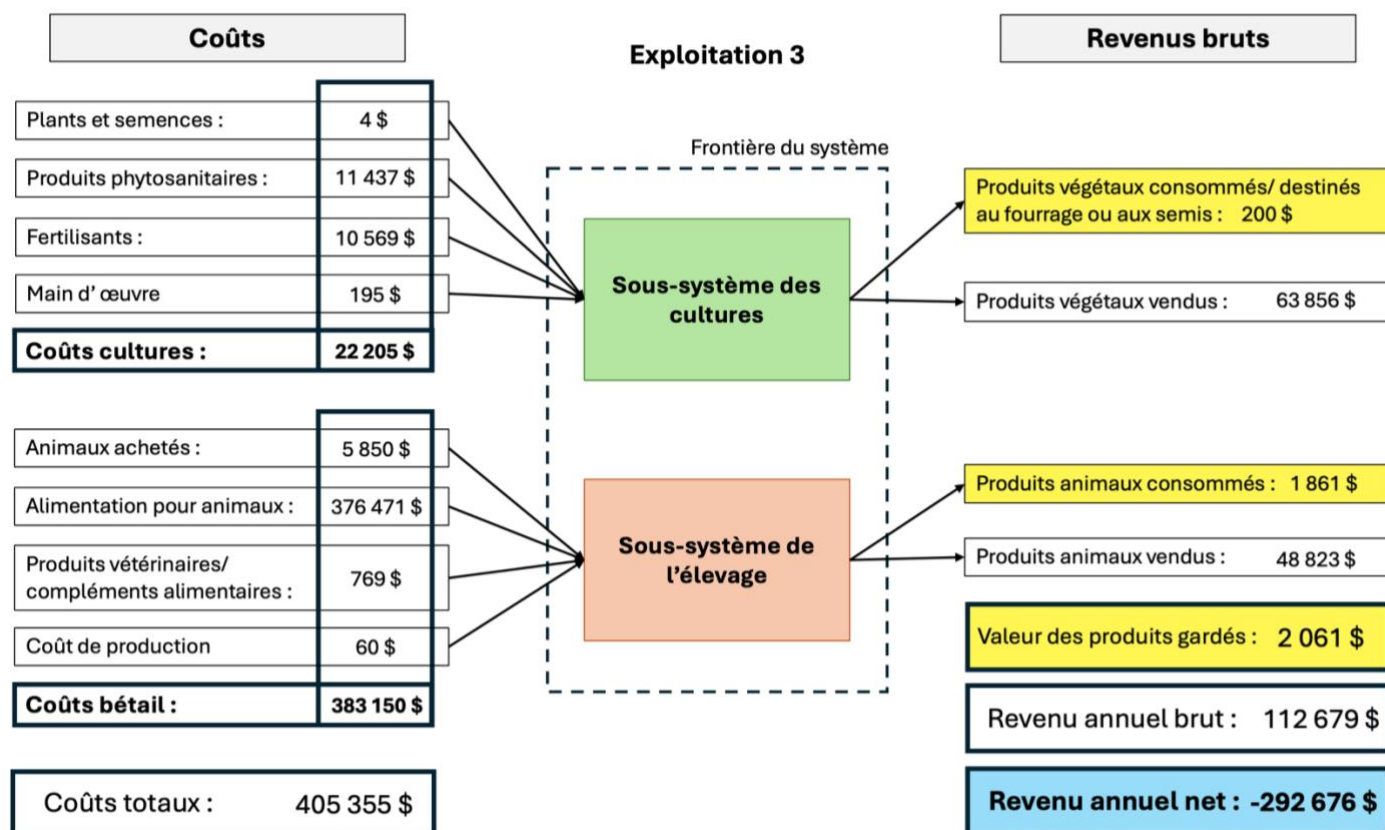


Figure 18 - Analyse économique de l'exploitation n°3

Cette exploitation a un revenu annuel net négatif car ses revenus totaux sont inférieurs à ses coûts totaux. En effet, ces derniers s'élèvent à 405 355 \$, principalement à cause du bétail. L'alimentation des animaux représente 93 % des coûts totaux, avec les 2014 poules générant 99,8 % de ces coûts alimentaires. Pour les cultures, les produits phytosanitaires et les fertilisants constituent 99 % des coûts. En particulier, les fruits de la passion sont responsables de 92 % des coûts des produits phytosanitaires et de 91 % des coûts des fertilisants.

Concernant les revenus bruts, 57 % proviennent des produits végétaux et 43 % des produits animaux. Parmi les cultures, les fruits de la passion rapportent le plus, avec 57 758 \$, suivis par les tomates d'arbre avec 4 760 \$, soit respectivement 90 % et 7 % des revenus végétaux. En termes de revenus de l'élevage, ce sont les poules qui génèrent 99 % des revenus (Annexe 6).

5.2.4 Exploitation n°4

La Figure 19 représente la situation économique de la ferme n°4.

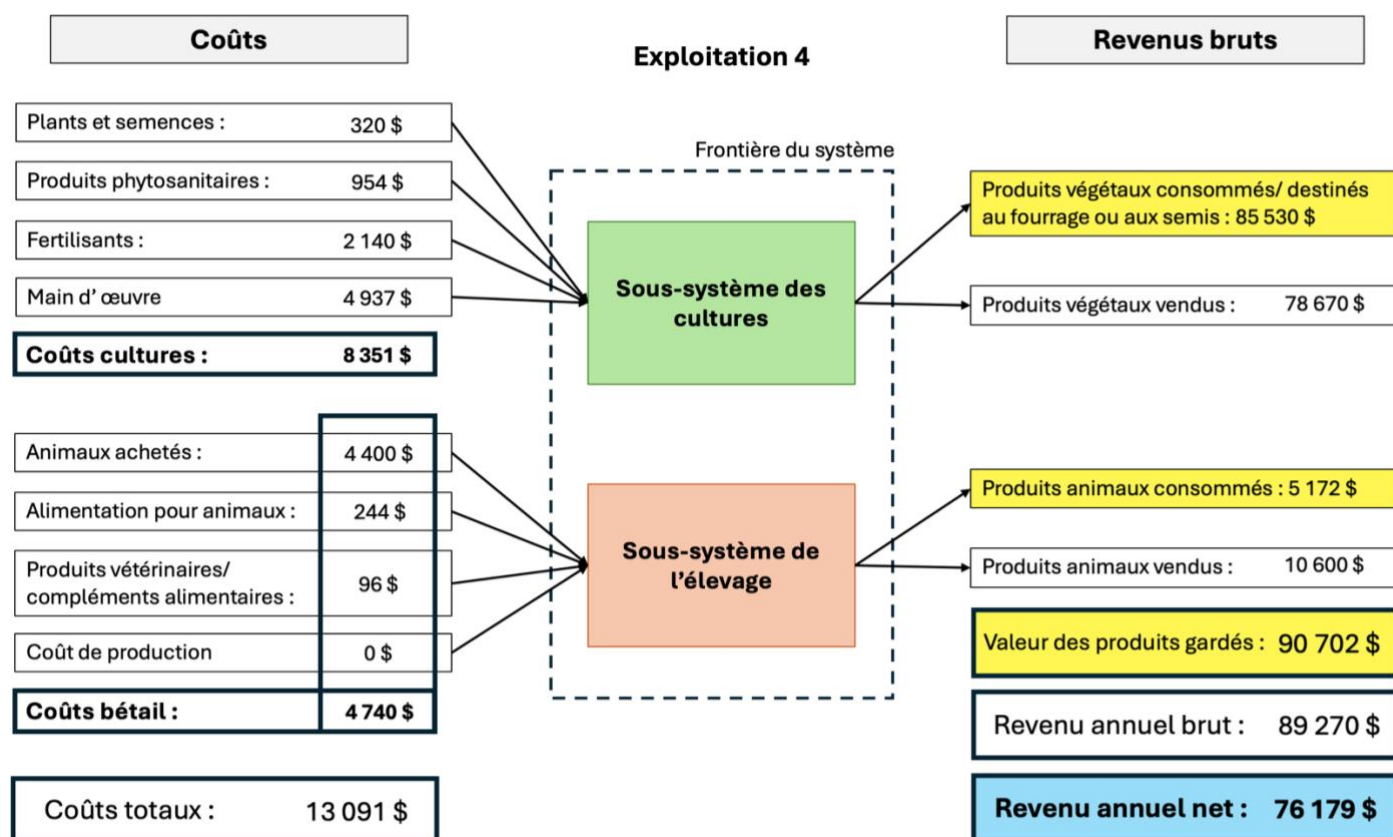


Figure 19 - Analyse économique de l'exploitation n°4

Les coûts des cultures et du bétail représentent respectivement 64 % et 36 % des coûts totaux. Comme l'agriculteur souhaite augmenter son cheptel de bovins, les dépenses les plus élevées proviennent de l'achat de toretes. Le deuxième flux de dépense le plus important est la main-d'œuvre, principalement allouée au maïs (53 %) et aux haricots (34 %). Par ailleurs, 1 400 \$, soit 65 % des coûts des fertilisants, sont consacrés aux mûres.

Les revenus proviennent principalement des produits végétaux vendus, avec 92 % générés par le maïs, 7 % par les mûres, et le reste par les pommes de terre, les haricots et les citrons. En ce qui concerne les produits animaux, les bovins apportent 93 % des revenus, le reste provenant des cobayes (Annexe 7).

La Figure 20 représente la situation économique de la ferme n°5.



Les produits animaux sont répartis à parts égales, soit 50 %, entre la consommation interne à la ferme et la vente. En revanche, la majorité des produits végétaux sont destinés à la vente, seuls 23 % sont réservés à la consommation familiale et aux besoins de fonctionnement de la ferme. La culture de maïs génère la plus grande quantité des revenus totaux à elle seule de 69 %.

5.2.6 Choix des données pour les simulations

Après avoir étudié l'état économique initial des cinq exploitations, l'objectif est de sélectionner deux exploitations les plus différentes possibles pour effectuer les simulations et identifier le système le plus sensible au dépôt de téphra. L'exploitation n°3 présente un revenu annuel net négatif, ce qui complique son analyse, car elle est déjà en déficit avant même d'ajouter la contrainte de téphra. L'exploitation n°2 a subi des pertes animales en raison de l'attaque d'un chien qui a tué une grande partie de ses volailles. Même si l'analyse économique tente de refléter au mieux la situation normale, elle reste plus incertaine que pour les autres exploitations. Le choix se porte donc sur deux des exploitations n°1, n°4 et n°5, comparées dans la Figure 21.

	 1	 4	 5
	69 animaux ┌───────────┐ 22 volailles 6 bovins 40 cobayes 1 équidé	338 animaux ┌───────────┐ 51 volailles 17 bovins 270 cobayes	136 animaux ┌───────────┐ 31 volailles 20 porcins 23 bovins 3 léporidés 40 cobayes 4 caprins 1 équidé 14 ruches
	11 cycle court 4 annuelles 5 pérennes	3 annuelles 19 pérennes	3 cycle court 3 annuelles 6 pérennes

Figure 21 - Comparaison des exploitations n°1, n°4 et n°5

Avec trois types d'animaux d'élevage, l'exploitation n°4 se distingue par la plus petite variété, contrairement à l'exploitation n°5 qui compte huit types d'animaux. Quant aux cultures, l'exploitation n°4 présente la moins grande diversité avec seulement deux types; cependant, elle se distingue par la plus grande variété de cultures pérennes qui est de 19 contre cinq et six pour les fermes n°1 et n°5. Les exploitations n°1 et n°4 se ressemblent en ce qui concerne les cultures. Étant donné que notre objectif est de comparer deux exploitations aux caractéristiques contrastées, nous choisissons l'exploitation n°4 et l'exploitation n°5 pour la suite de ce travail.

5.3. Détail des exploitations n°4 et n°5 avant les simulations

Afin d'évaluer les impacts du téphra sur les exploitations, nous commençons par une analyse de l'état initial des contributions des végétaux et des animaux à la valeur annuelle brute afin de comparer les résultats avec ceux des simulations.

La Figure 22 montre la contribution des cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°4. Le majeur contributeur est le maïs avec 95 %. Les contributions des autres cultures sont toutes inférieures à 4 %.

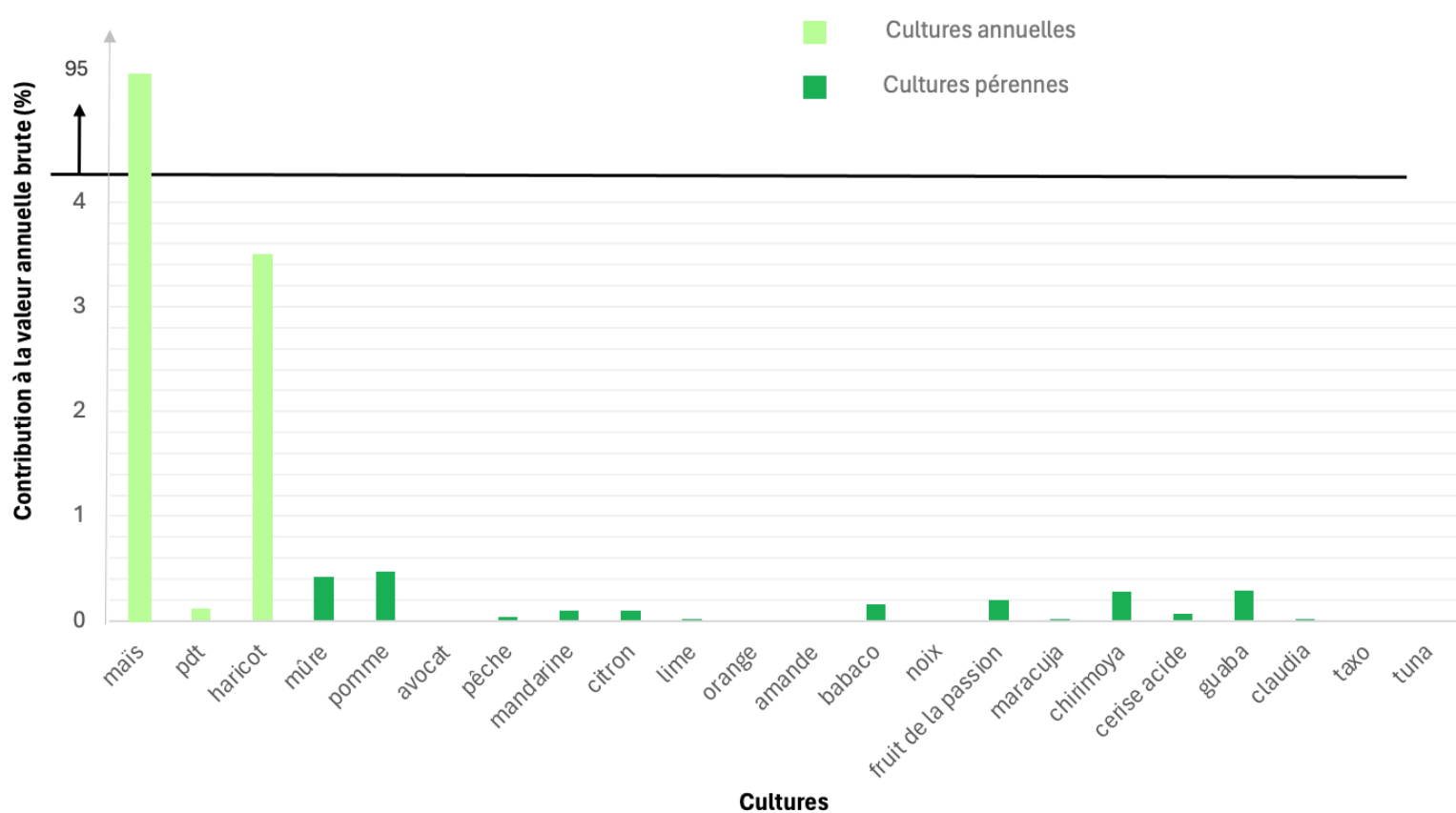


Figure 22 - Contribution des cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°4 en situation normale

La Figure 23 illustre la contribution du bétail à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°4. Ce sont les bovins les majeurs contributeurs avec 73 % de la valeur annuelle brute.

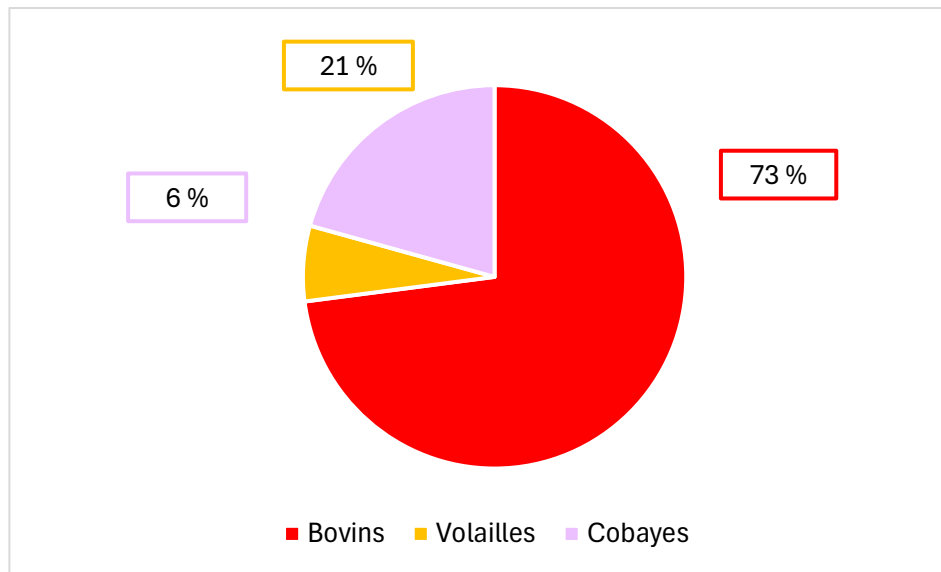


Figure 23 - Contribution du bétail à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°4 en situation normale

La Figure 24 montre la contribution des cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°5. Le majeur contributeur est le maïs avec 55 %, ensuite vient la courge (14 %). Les autres cultures contribuent pour moins de 10 %.

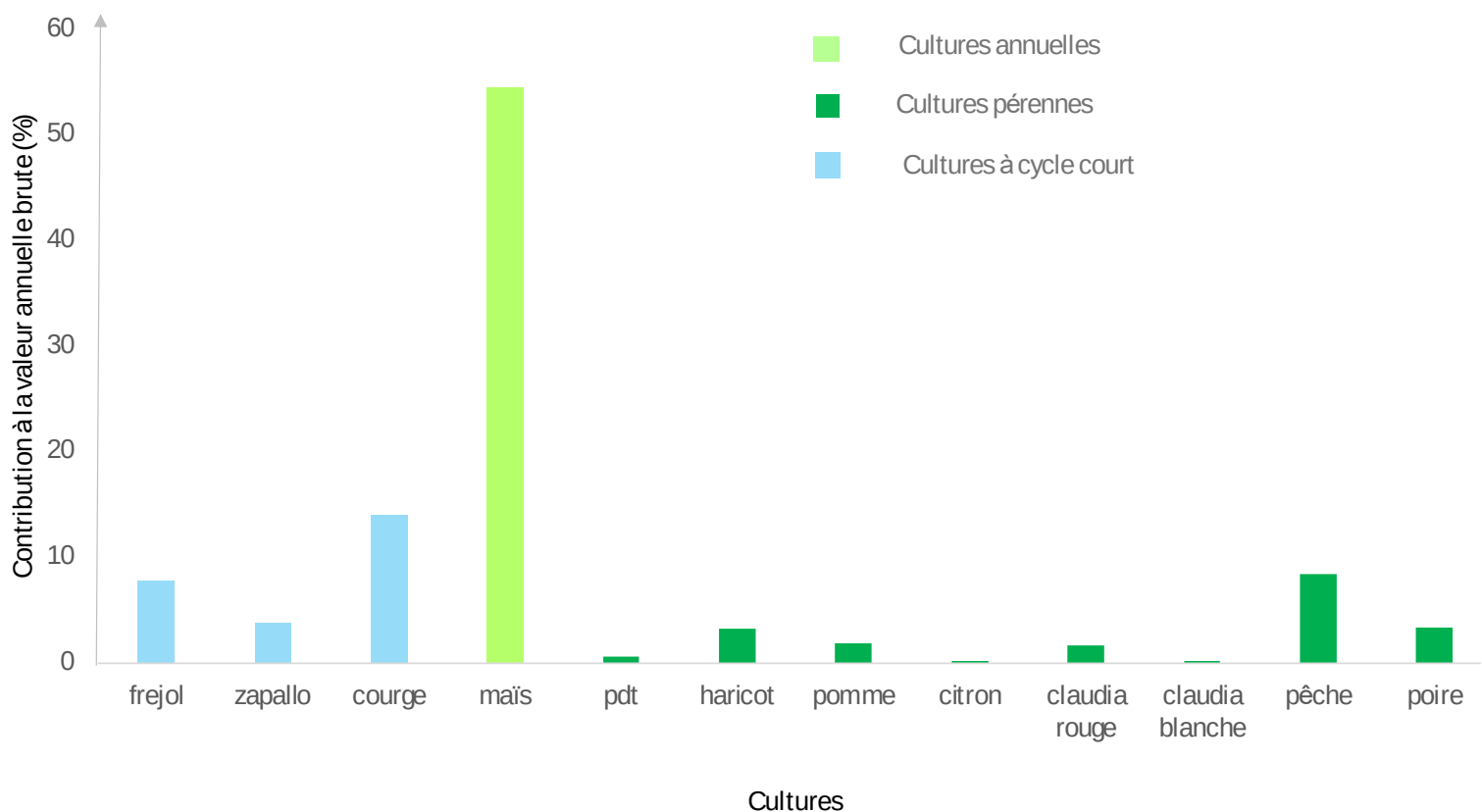


Figure 24 - Contribution des cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°5 en situation normale

La Figure 25 présente la contribution du bétail à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°5. Ce sont les bovins les majeurs contributeurs avec 56 %, suivis des porcins avec 30 % et des

volailles avec 10 %. Les autres animaux ont une contribution très faible inférieure ou égale à 1%.

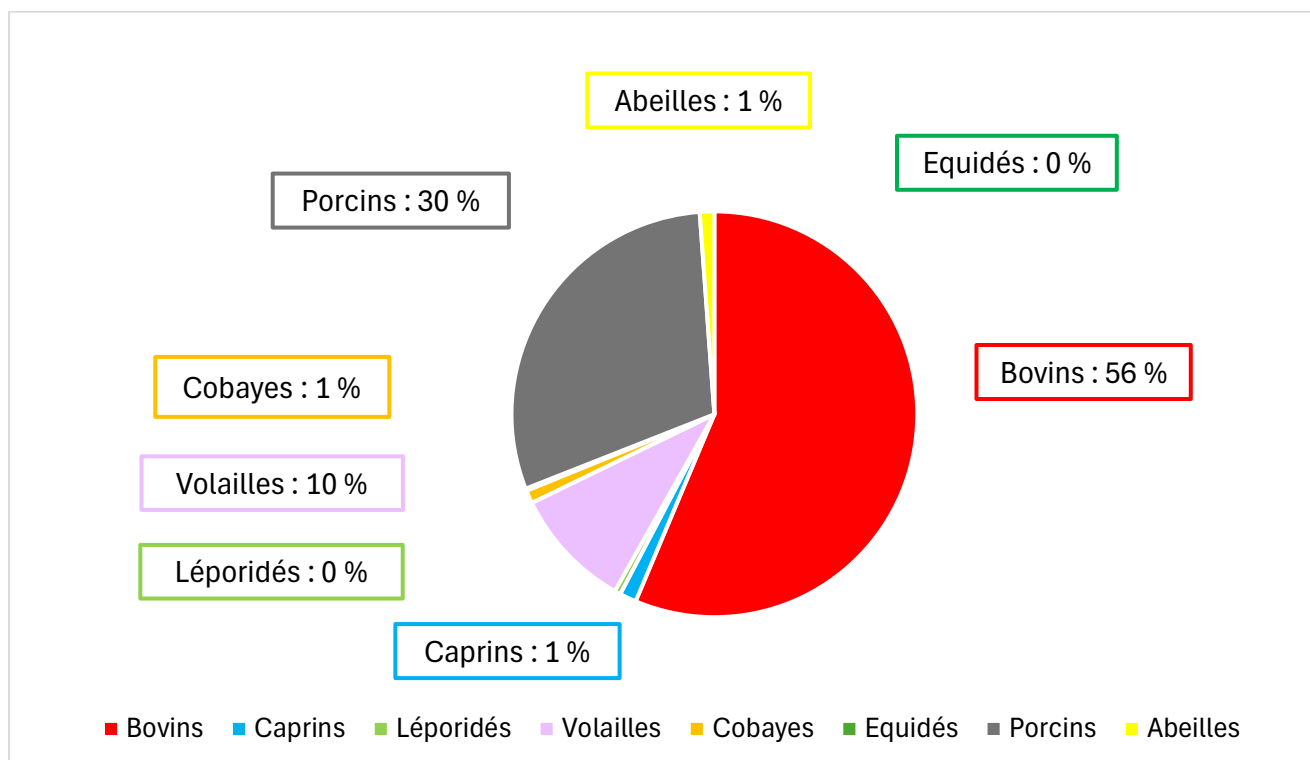


Figure 25 - Contribution du bétail à la valeur annuelle brute de l'exploitation n°5 en situation normale

5.4. Simulations de dépôt de téphra

Dans cette section, nous commençons par analyser le revenu annuel brut de chacune des deux exploitations pendant chaque mois de l'année lorsqu'elles sont soumises à un dépôt de téphra de cinq et cinquante millimètres. Ensuite, nous présentons une analyse économique du mois ayant subi les plus grandes pertes. Finalement, nous examinons les flux de produits végétaux et animaux afin d'identifier les éléments les plus vulnérables des exploitations.

5.4.1. Détermination des pertes de revenu brut de l'exploitation n°4

La Figure 26 montre que les pertes les plus importantes, dans les deux scénarios, se produisent principalement entre juillet et décembre. Les pertes dans le scénario de cinq millimètres de dépôt sont toujours inférieures à celles du scénario de cinquante millimètres. Pour le scénario de cinq millimètres, les pertes les plus élevées sont de 63 % et correspondent aux mois de septembre et d'octobre. Ces pertes équivalent à respectivement 55 997 \$ et 55 983 \$. Nous analyserons plus en détail le mois de septembre. Pour le scénario de cinquante millimètres, ce sont les mois de juillet, août, septembre, octobre et décembre qui montrent les plus

grandes pertes, s'élevant à 82 %. Le mois de juillet correspond à la perte financière la plus élevée, soit 73 182 \$.

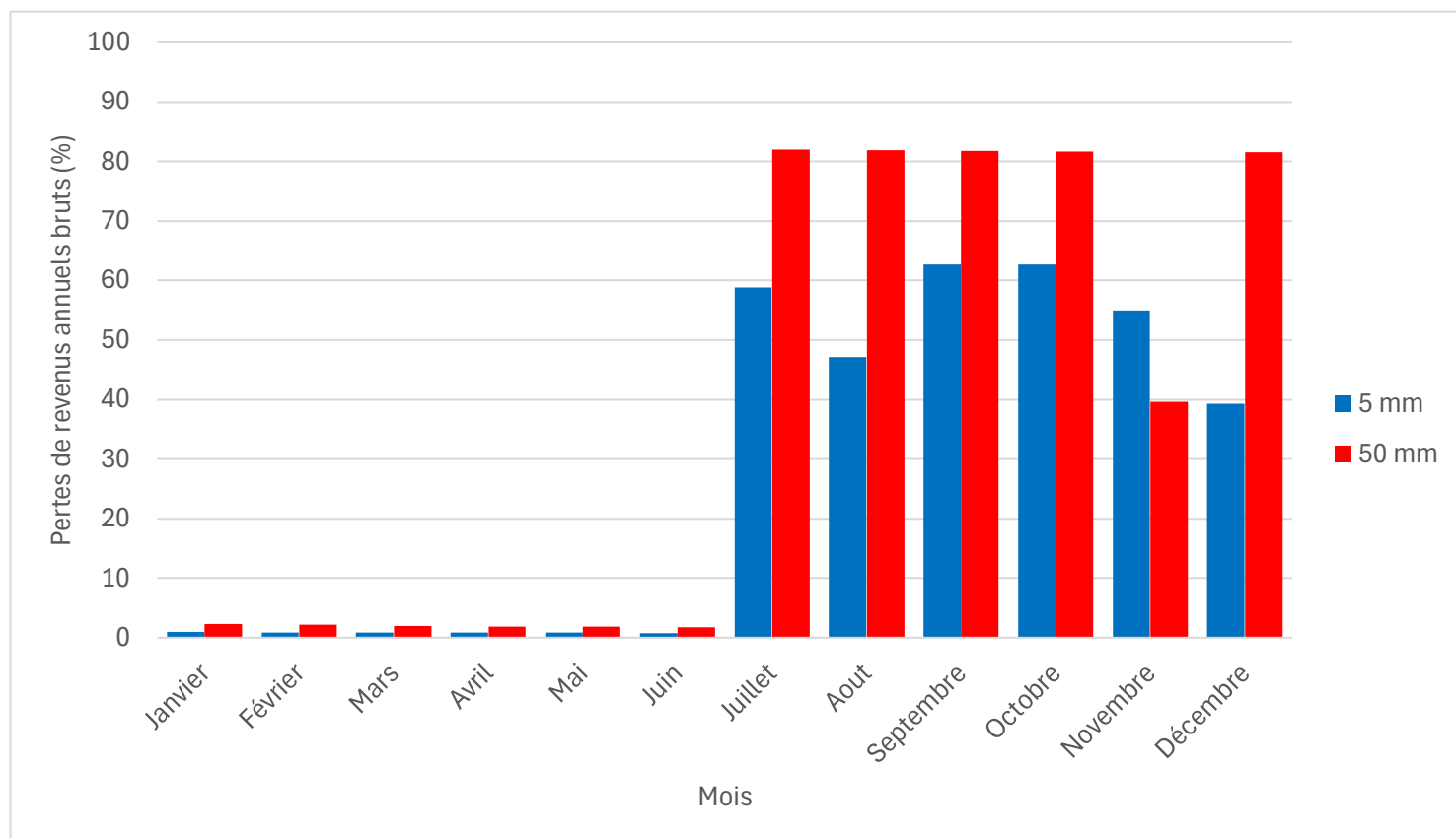


Figure 26 – Pertes sur le revenu annuel brut de l'exploitation n°4 pendant les douze mois de l'année, scénarios de 5 et 50 mm

5.4.2. Exploitation n°4 : scénario de cinq millimètres, septembre

L'analyse économique des pertes illustrée à la Figure 27 indique que les flux les plus impactés pour les cultures sont associés aux produits phytosanitaires, à main d'œuvre et à la vente des végétaux. Le bétail est moins impacté, la vente de produits animaux ne diminue que de 2 %. Le flux qui diminue le plus est l'alimentation qui sert à nourrir seulement les volailles. Le revenu annuel net qui est réduit de 70 % est essentiellement dû aux pertes de produits végétaux vendus.

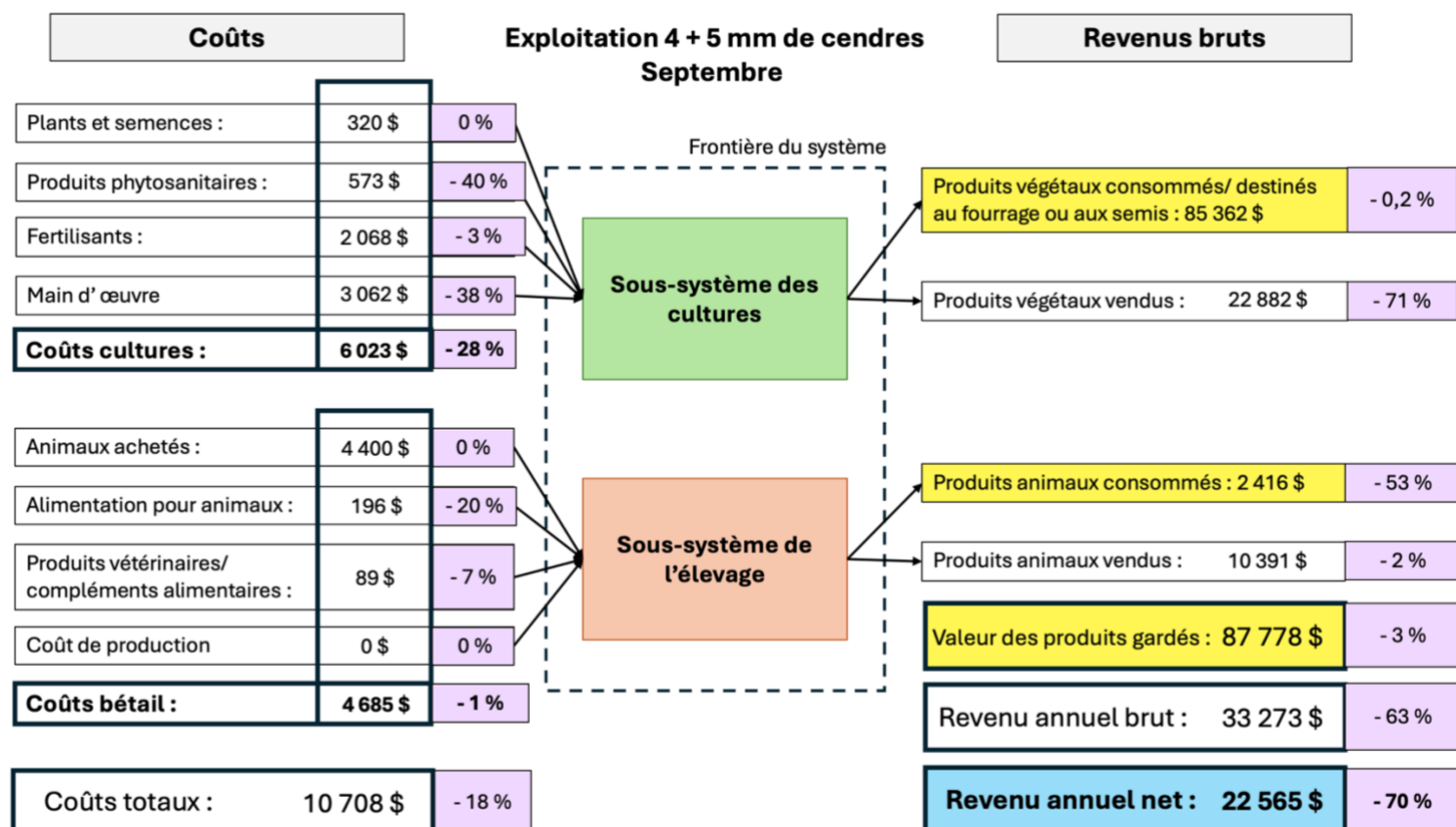


Figure 27 - Analyse économique de l'exploitation n°4, scénario de 5 mm en septembre

La Figure 28 révèle qu'avec un dépôt de cinq millimètres de téphra, le maïs et les mûres sont les principales sources de la valeur annuelle brute. Le maïs contribue à concurrence de 98 796 \$, soit 91 % de la valeur annuelle brute. La contribution de la culture de mûres s'élève à 5 580 \$, ou environ 5 %. Ainsi, le maïs est la culture dominante influençant la valeur annuelle brute, les mûres apportent une petite contribution, tandis que les autres cultures ont un apport négligeable.

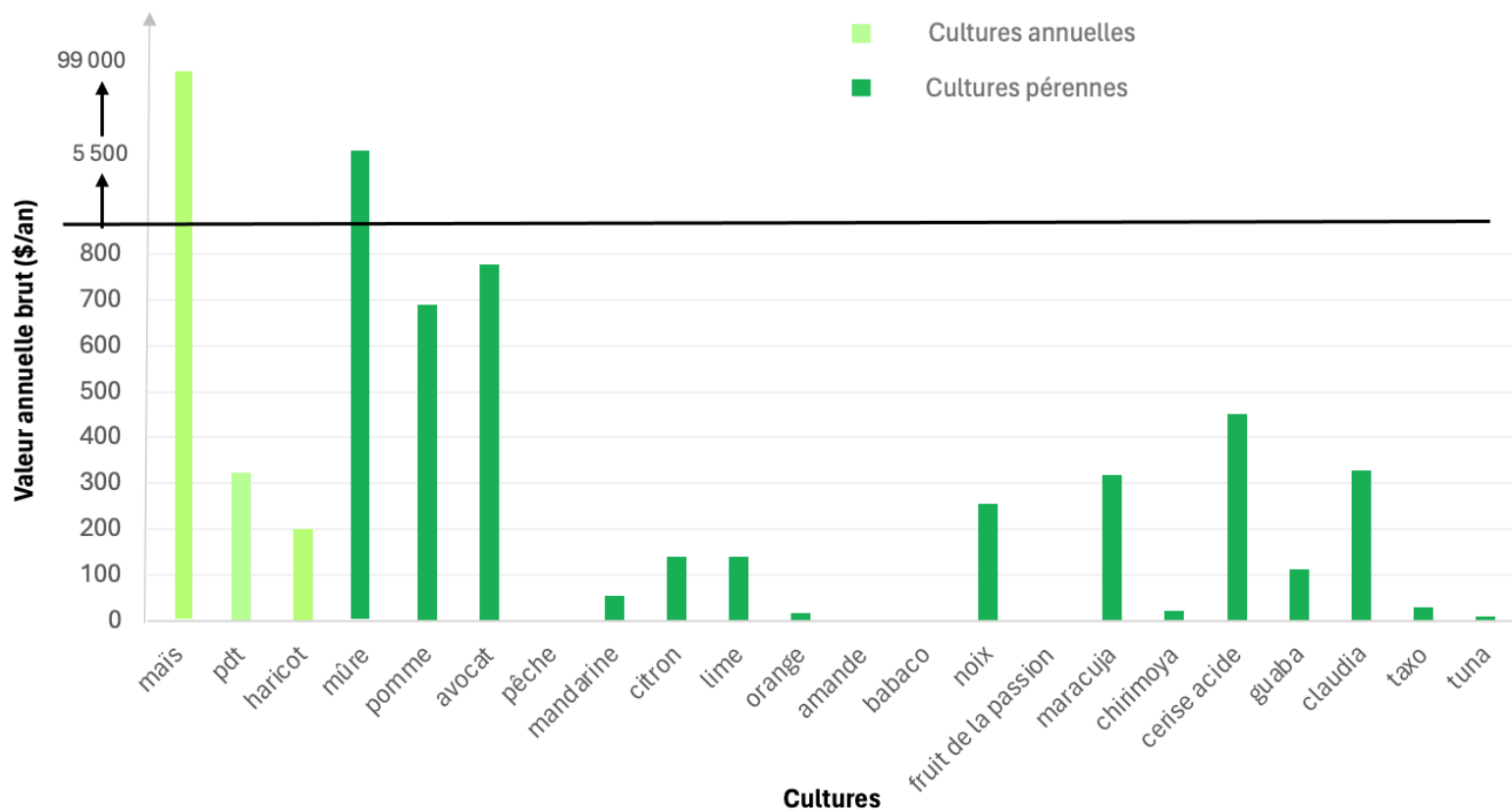


Figure 28 - Exploitation n°4 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre

La Figure 29 montre qu'au niveau des cultures annuelles, le maïs est la seule culture qui subisse des pertes, à hauteur de 36 %. Pour les cultures pérennes ce sont les prunes Claudia qui subissent le plus de pertes avec 31 %. Les cultures qui ne subissent aucunes pertes sont : les pommes de terre et les haricots pour les cultures annuelles ; les pommes, les avocats, les pêches, les amandes, les babaco, les noix, les maracujas, les chirimoyas, les cerises acides, les guabas, les taxos et les tunas pour les cultures pérennes.

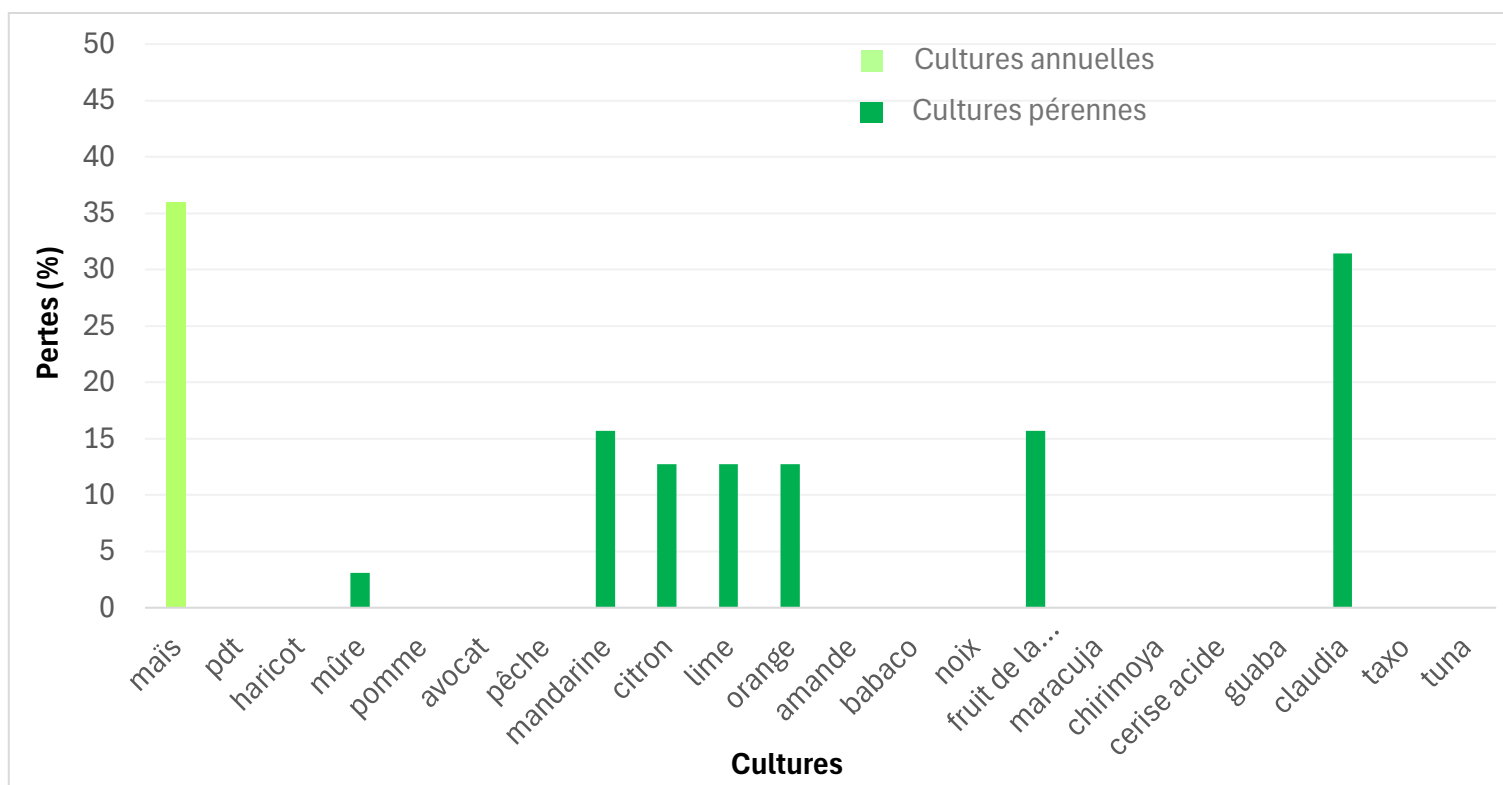


Figure 29 - Exploitation n°4 : pertes par culture, scénario de 5 mm, septembre

Puisque les coefficients de perte sont détaillés au niveau des familles d'animaux (par exemple : volailles) et non au niveau des types spécifiques (par exemple : poules ou canards), l'analyse se limite à ce degré de précision. La Figure 30, ci-dessous, présente la contribution du bétail à la valeur annuelle brute en septembre avec cinq millimètres de téphra. Elle montre que les bovins constituent la majeure contribution à la valeur annuelle brute, suivis des cobayes et des volailles.

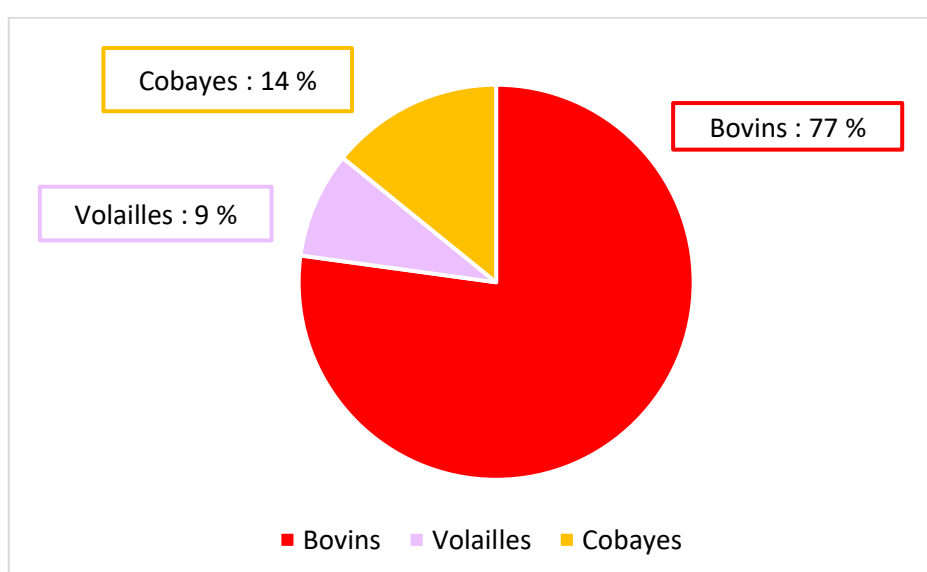


Figure 30 - Exploitation n°4 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre

Comme le suggère la Figure 31, les plus grosses pertes sont subies par les cobayes, ensuite les bovins et les volailles.

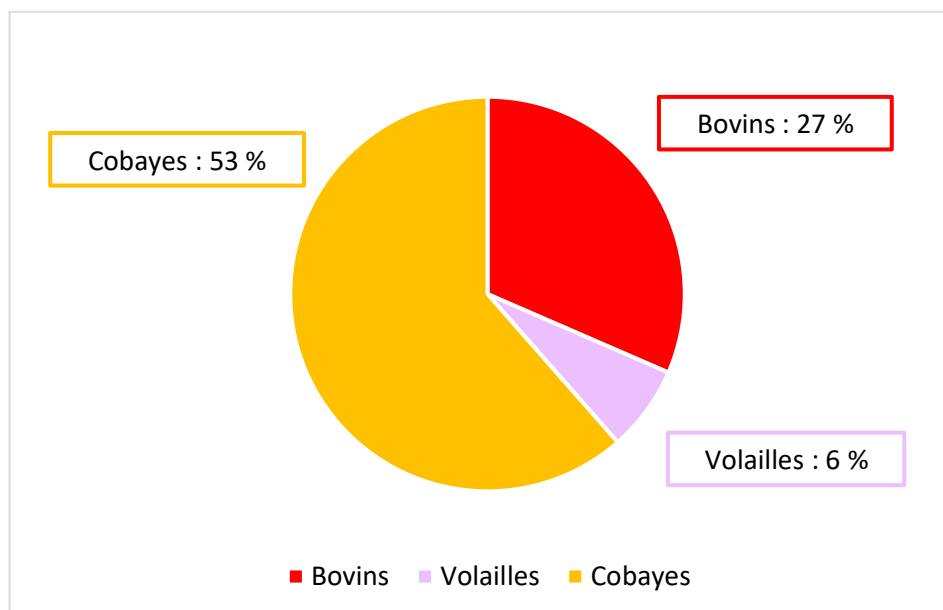


Figure 31 - Exploitation n°4 : pertes sur le bétail, scénario de 5 mm, septembre

5.4.3. Exploitation n°4 : scénario de cinquante millimètres, juillet

Dans le scénario de cinquante millimètres de téphra sur le système (Figure 32), l'ensemble des coûts de cultures se voient réduits. Le revenu annuel brut des produits végétaux baisse drastiquement et ceux destinés à la consommation de la famille et au fonctionnement de la ferme aussi. Les produits animaux vendus ne subissent quasiment pas de pertes contrairement à ceux dédiés à la consommation au sein de la ferme. Le revenu annuel net qui est réduit de 91 % est essentiellement dû aux pertes de produits végétaux vendus.

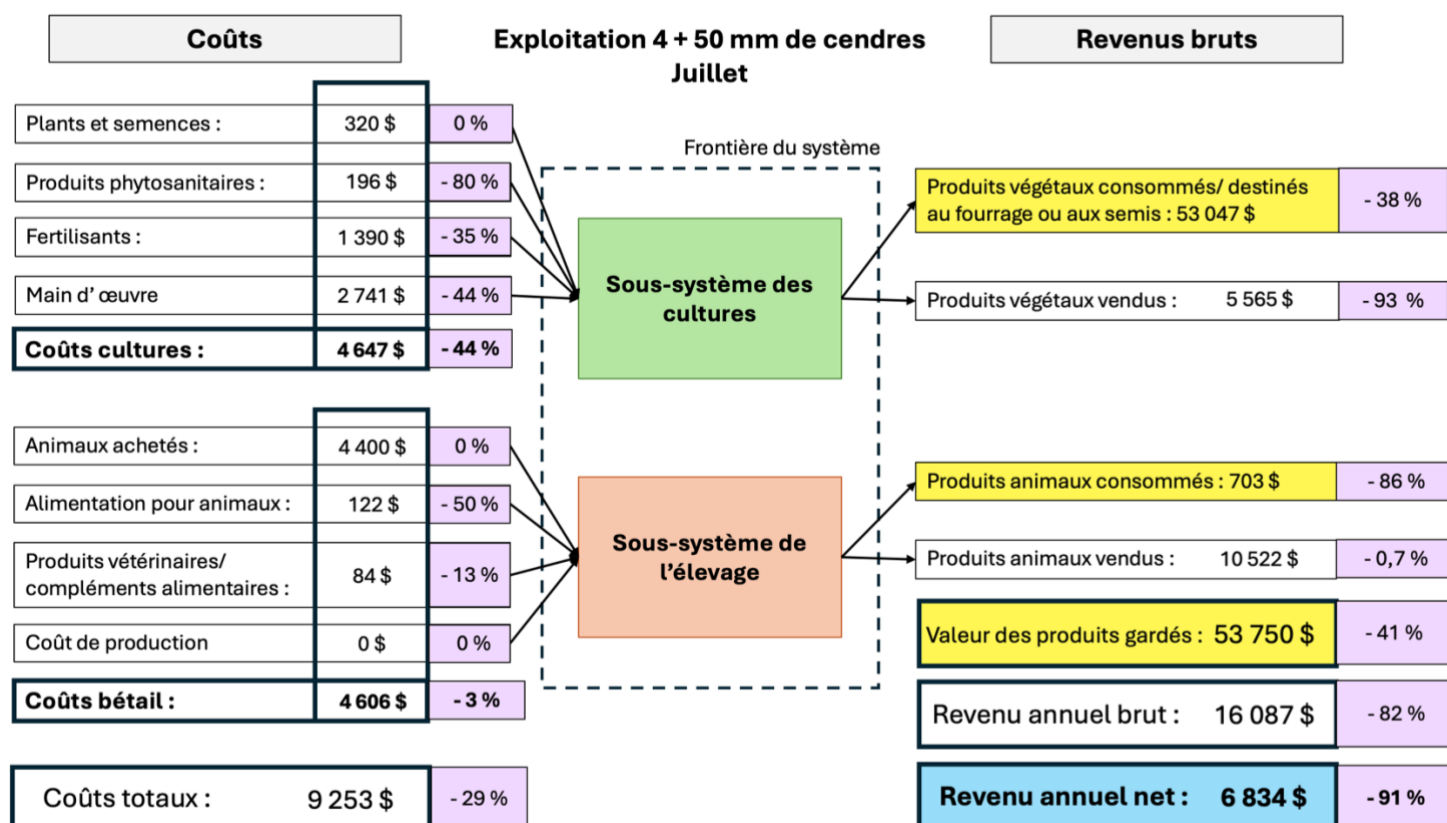


Figure 32 - Analyse économique de l'exploitation n°4, scénario de 50 mm en juillet

La Figure 33 montre que suite à un dépôt de cinquante millimètres de téphra, le maïs et les mûres sont les principales sources de la valeur annuelle brute. Le maïs représente 86 % et les mûres 9 % de la valeur annuelle brute (Annexe 7). Ainsi, le maïs est la culture dominante influençant la valeur annuelle brute, tandis que les mûres apportent une faible contribution. Les autres cultures ont un apport d'un pourcent ou moins.

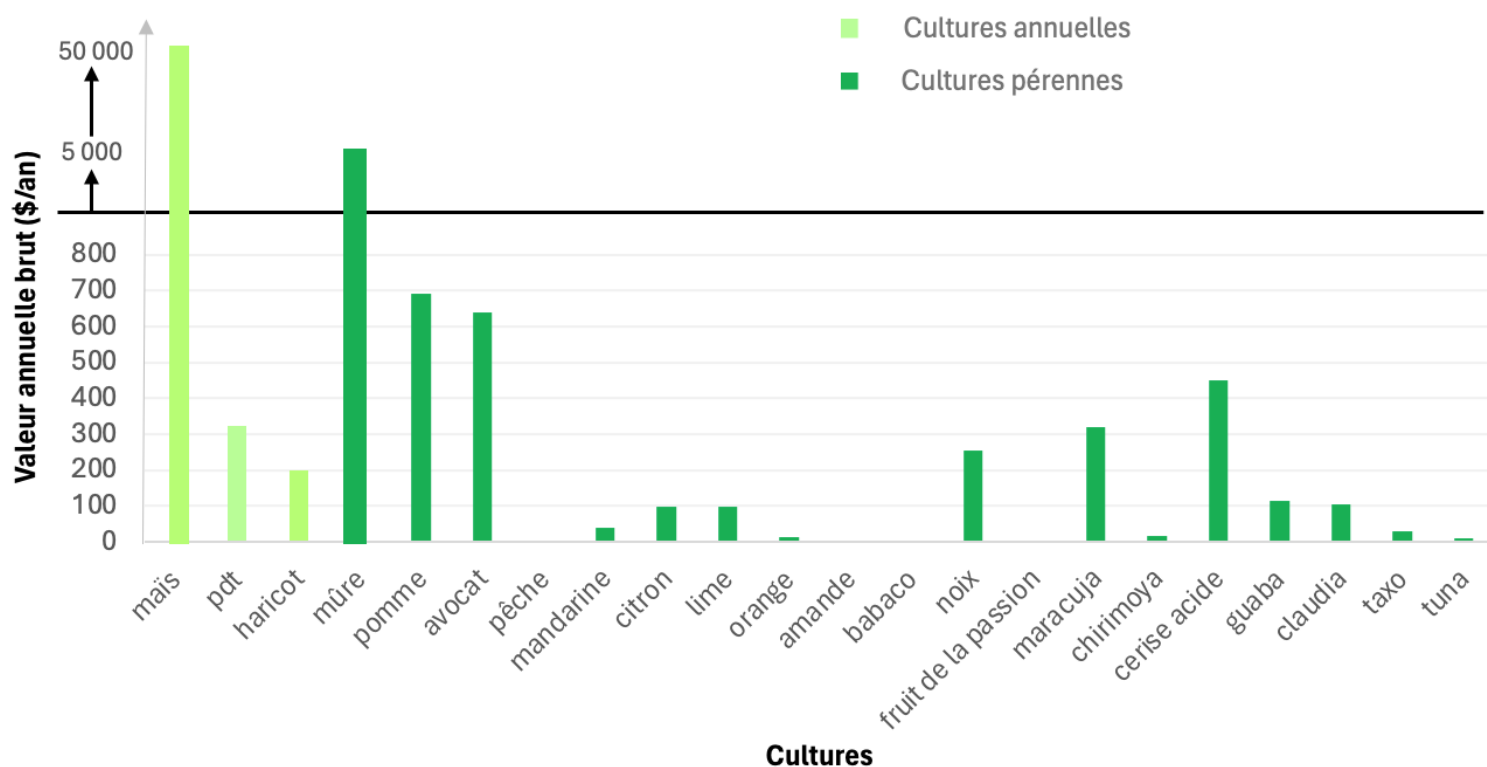


Figure 33 - Exploitation n°4 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, juillet

La Figure 34 montre que la culture ayant subi le plus de pertes est la prune Claudia avec 79 %. Les autres cultures pérennes impactées sont les mandarines, les citrons, les limes, les oranges et les fruits de la passion, à concurrence de 40 %. Les avocats et les chirimoyas subissent des pertes de 18 % dans ce deuxième scénario de cinquante millimètres de téphra. Au niveau des cultures annuelles, la seule qui subit des pertes c'est le maïs avec 68 %.

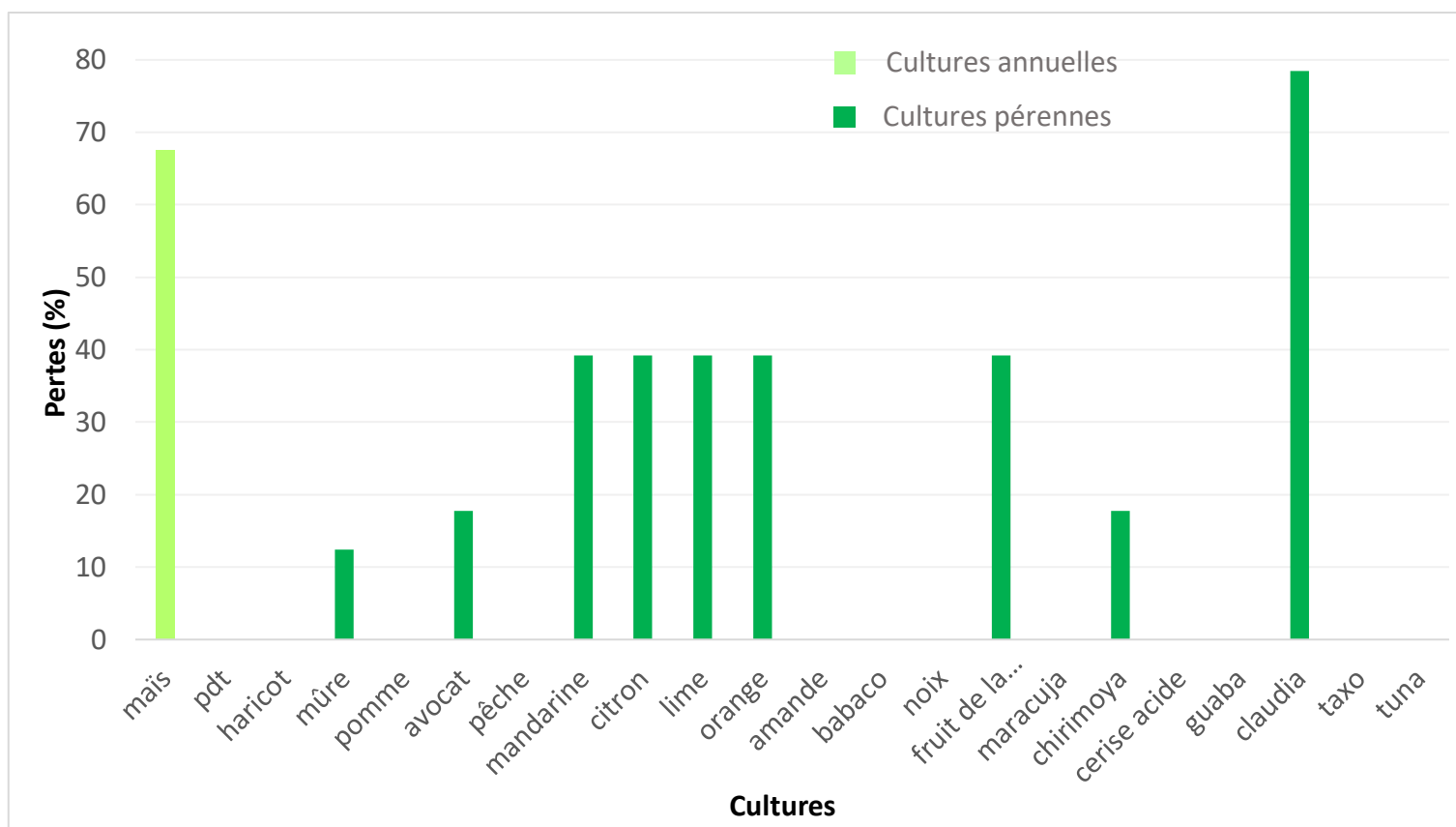


Figure 34 - Exploitation n°4 : pertes par culture, scénario de 50 mm, juillet

La Figure 35 montre que ce sont les bovins qui ont la majeure contribution à la valeur annuelle brute, suivis des cobayes et ensuite des volailles.

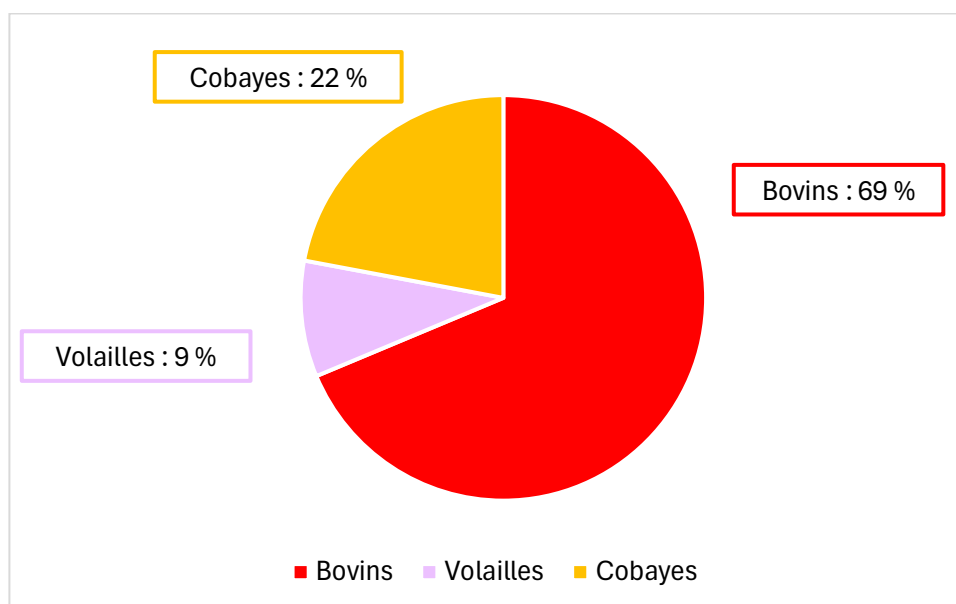


Figure 35 - Exploitation n°4 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, juillet

La Figure 36 montre que les pertes les plus importantes sont subies par les bovins, ensuite les cobayes et les volailles.

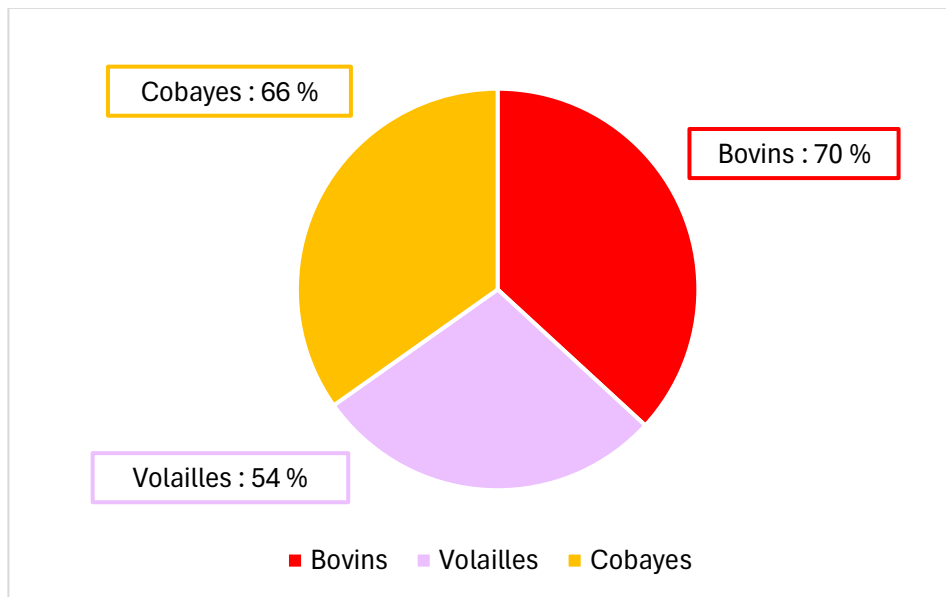


Figure 36 - Exploitation n°4 : pertes sur le bétail, scénario de 50 mm, juillet

5.4.4. Détermination des pertes de revenu brut de l'exploitation n°5

La Figure 37 révèle que les pertes les plus importantes correspondent aux mois de septembre et d'octobre, et qu'elles diminuent pendant les mois de janvier à juin. Les pertes dans le scénario de cinq millimètres de dépôt de téphra sont toujours inférieures à celles du scénario de cinquante millimètres. Pour le scénario de cinq millimètres, les pertes les plus élevées sont de 17 873 \$ (soit 34 %) en juillet et de 20 100 \$ (soit 39 %) en septembre. Nous nous penchons sur l'analyse du mois de septembre. Pour le scénario de cinquante millimètres, ce sont les mois de juillet, août, septembre, octobre et décembre qui montrent les plus grandes pertes. Septembre est le mois le plus affecté, montrant une perte de 71 %, soit 36 959 \$.

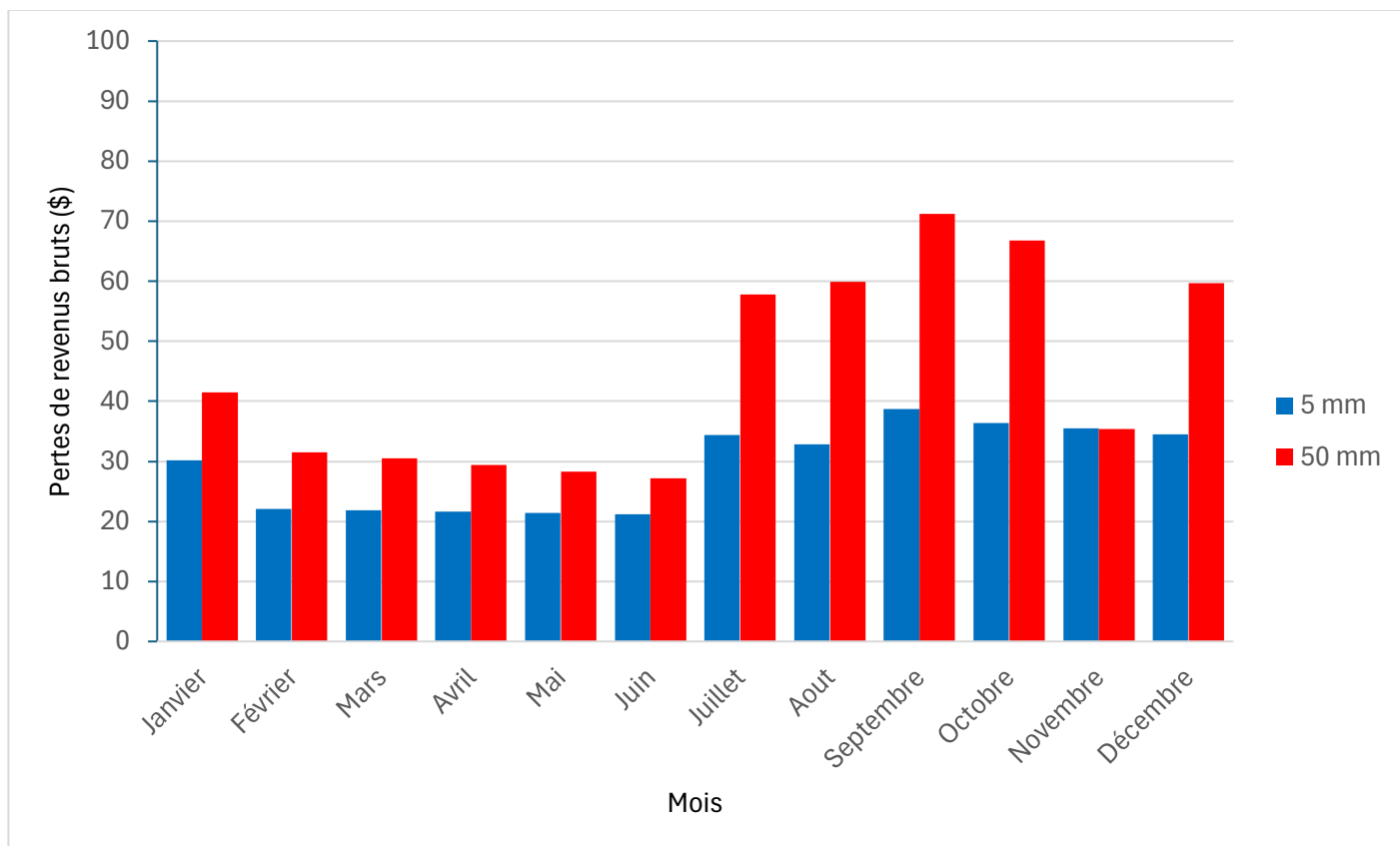


Figure 37 - Pertes sur le revenu annuel brut de l'exploitation n°5 pendant les douze mois de l'année, scénarios de 5 et 50 mm

5.4.5. Exploitation n°5 : scénario de cinq millimètres, septembre

La Figure 38 présente la situation économique de l'exploitation n°5 avec un scénario de cinq millimètres de téphra en septembre. Au niveau des cultures, les coûts des fertilisants sont ceux qui diminuent le plus, suivis par les coûts de main-d'œuvre. Les pertes des produits végétaux se manifestent principalement au niveau des ventes, tandis que celles des produits destinés au fonctionnement de la ferme diminuent très peu. Pour le bétail, les seuls coûts qui diminuent sont ceux des produits vétérinaires. Les pertes se concentrent principalement sur les produits animaux consommés, entraînant une diminution de la valeur des produits gardés. Les revenus et les coûts subissent des pertes similaires, ce qui réduit le chiffre du revenu annuel net.

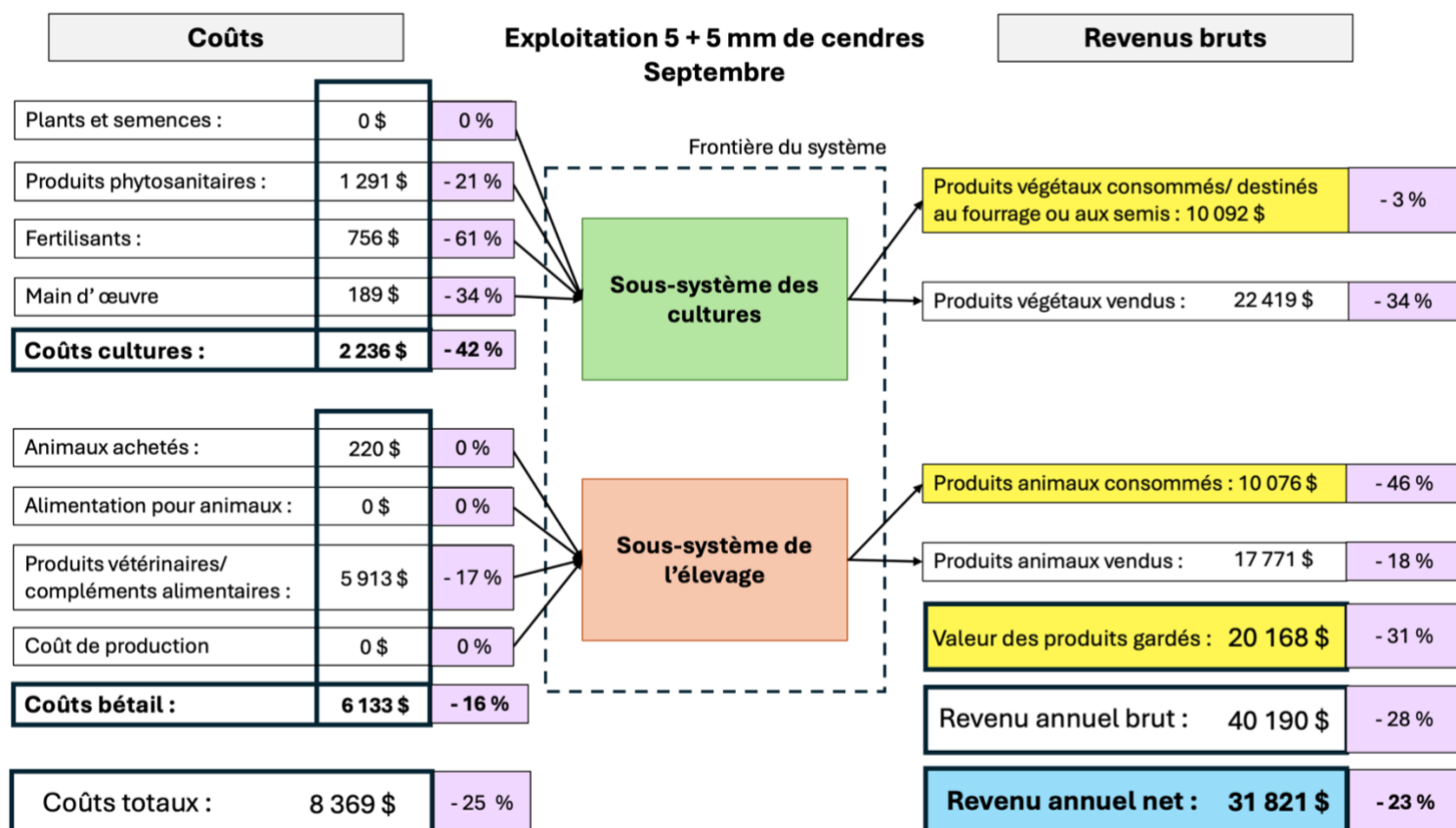


Figure 38 - Analyse économique de l'exploitation n°5, scénario de 5 mm en septembre

La Figure 39 montre qu'après un dépôt de cinq millimètres de téphra, les courges, le maïs et les pêches constituent les principales sources de la valeur annuelle brute. Selon les données de l'Annexe 8, le maïs génère 15 452 \$, les courges 6 200 \$ et les pêches 3 750 \$ et contribuant ainsi respectivement à 45 %, 19 % et 12 % de la valeur annuelle brute. Ainsi, le maïs est la culture dominante influençant ce revenu et chacun des trois types de cultures a un contributeur qui se démarque.

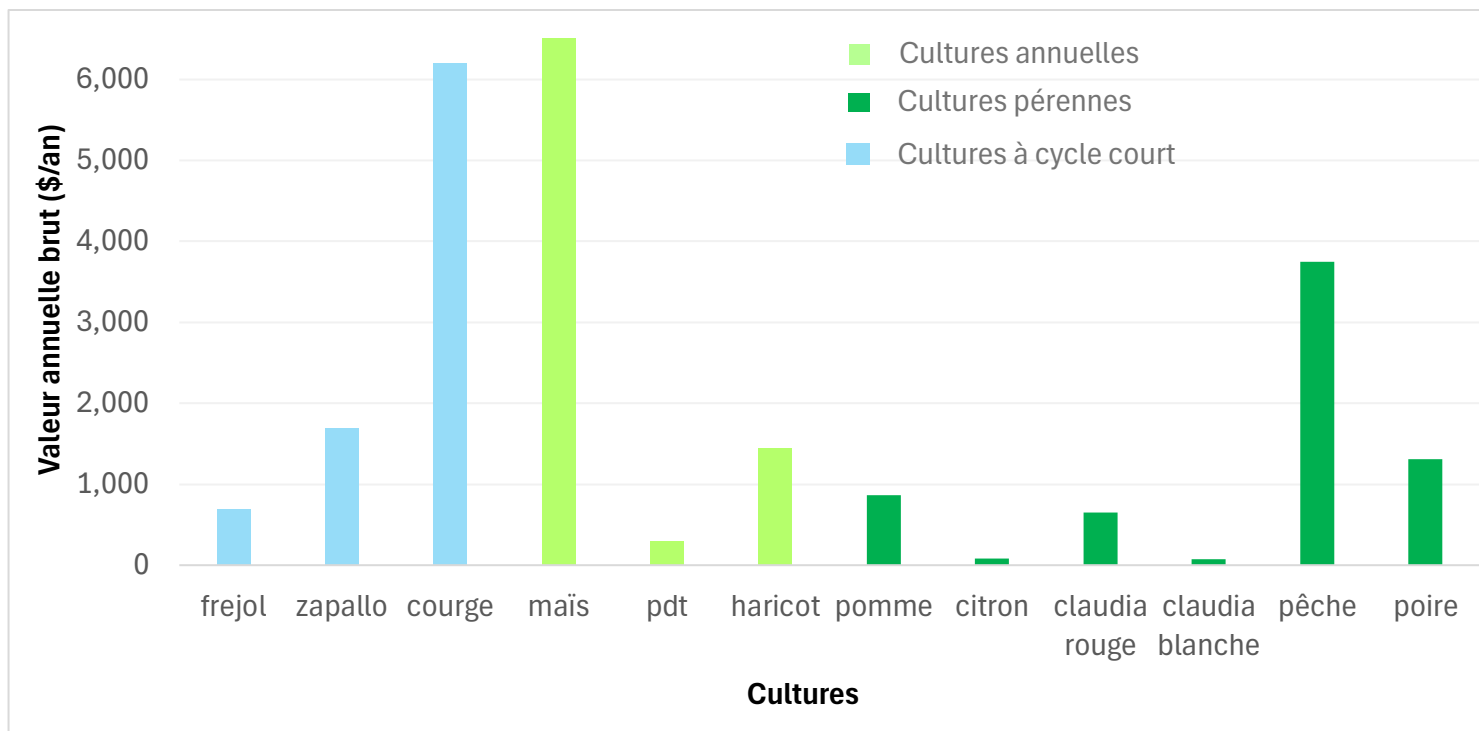


Figure 39 - Exploitation n°5 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre

En regardant l'ensemble des cultures (Figure 40), seulement cinq des douze cultures identifiées subissent des pertes. Parmi les cultures à cycle court, le frejol est le plus affecté avec 80 % de pertes. En ce qui concerne les cultures annuelles, le maïs subit une perte de 36 %. Pour les cultures pérennes, les citrons, les prunes Claudia rouges et les poires connaissent des pertes inférieures à 20 %.

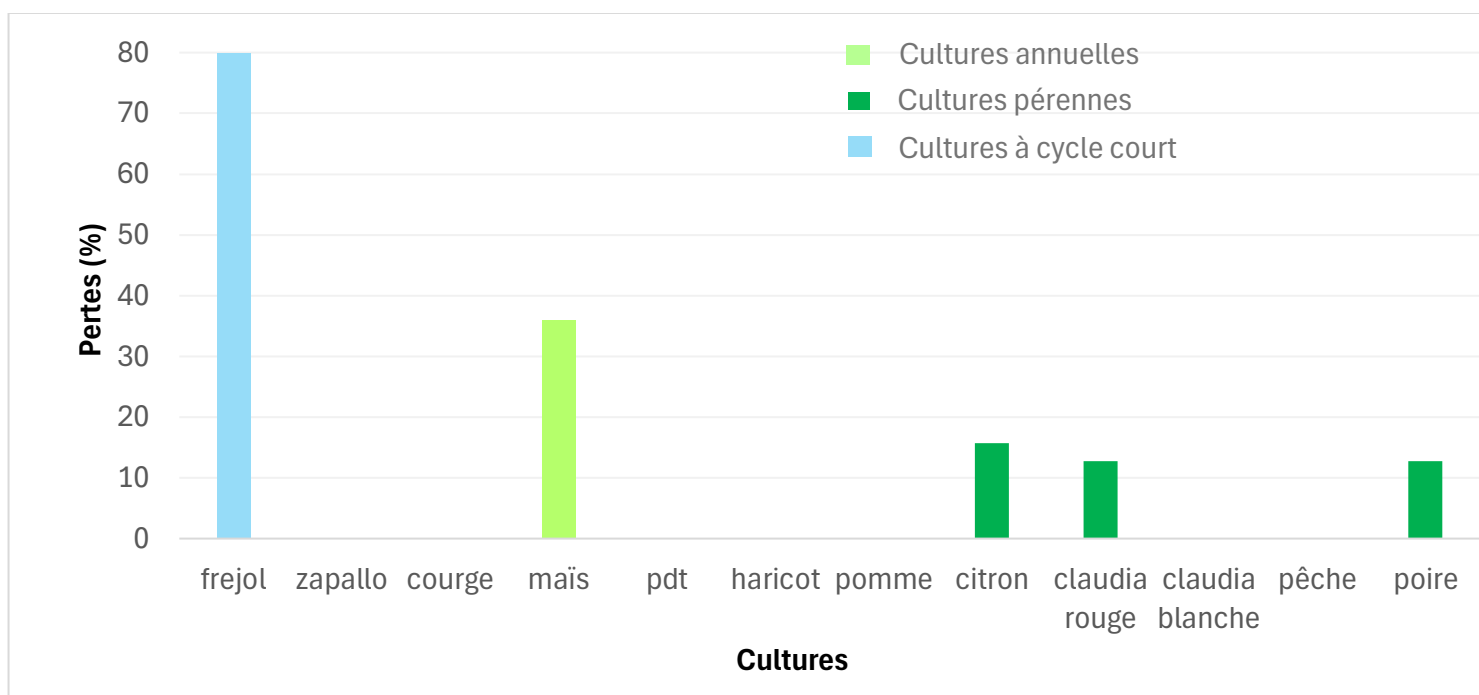


Figure 40 - Exploitation n°5 : pertes par culture, scénario de 5 mm, septembre

La Figure 41 montre la contribution du bétail à la valeur annuelle brute. En comparant tous les animaux, les bovins, les porcins et les volailles sont les principaux contributeurs de la valeur annuelle brute. Les caprins, les abeilles, les cobayes et les léporidés apportent une contribution très faible. Quant aux équidés, ils ne contribuent pas du tout.

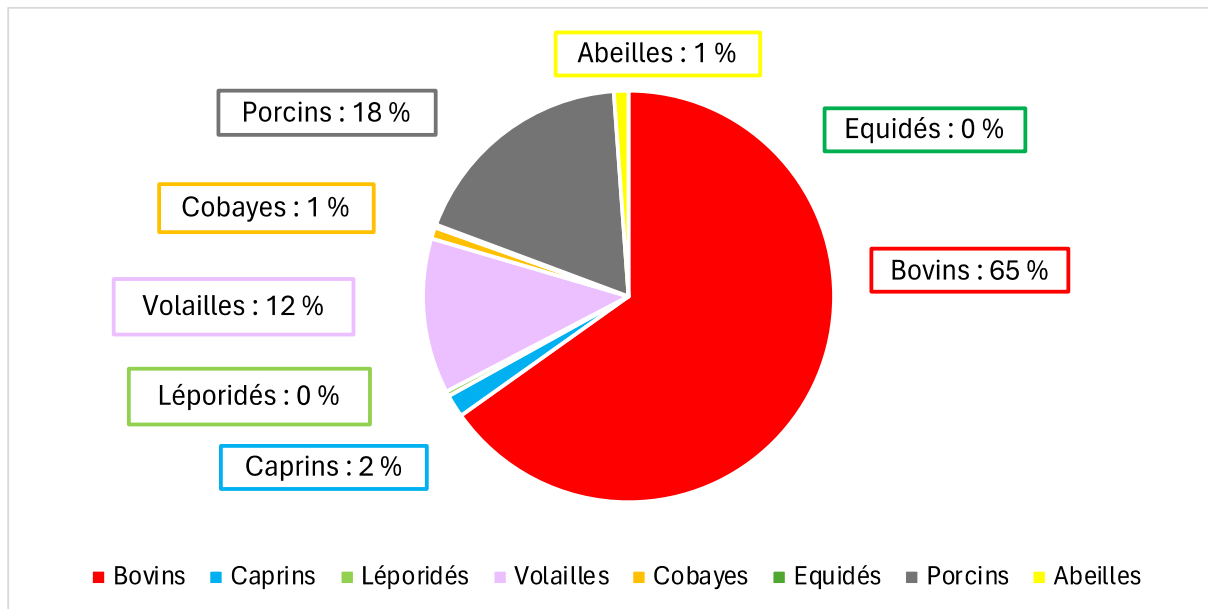


Figure 41 - Exploitation n°5 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 5 mm, septembre

La Figure 42 montre les pertes sur le bétail. Les porcins, les léporidés, les cobayes et les abeilles sont les animaux qui subissent le plus de pertes. Ensuite les bovins et les volailles subissent des pertes plus ou moins grandes. Finalement, les caprins et les équidés ne subissent pas ou très peu de pertes.

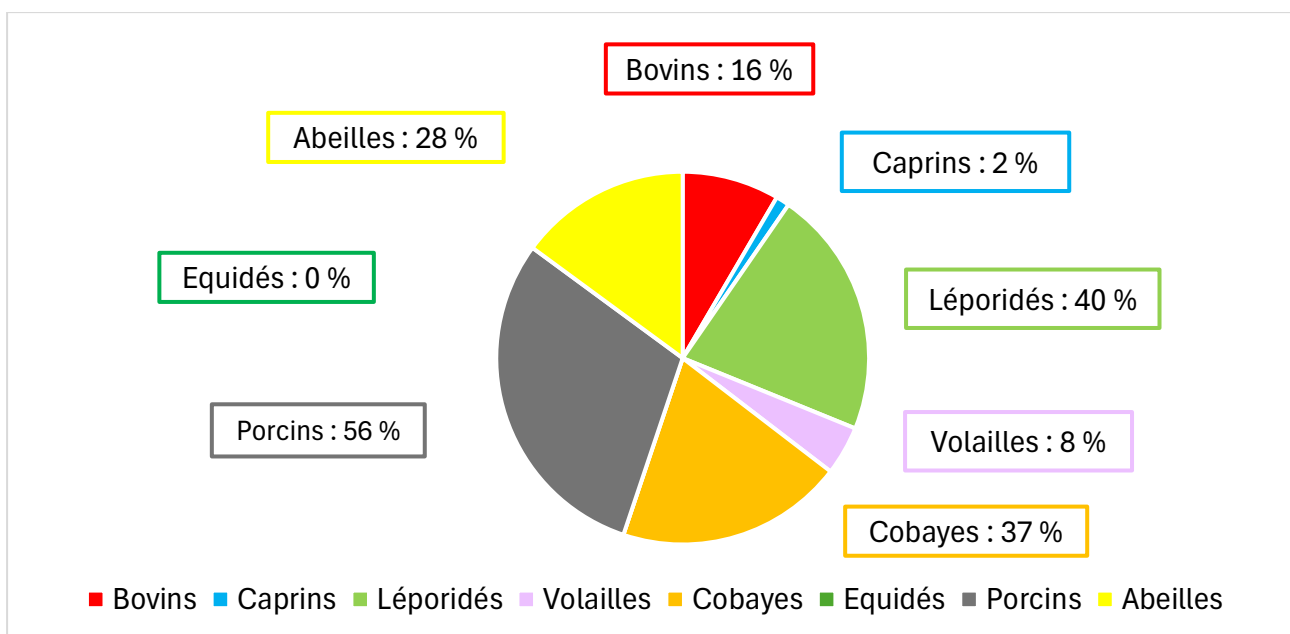


Figure 42 - Exploitation n°5 : pertes sur le bétail, scénario de 5 mm, septembre

5.4.6. Exploitation n°5 : scénario de cinquante millimètres, septembre

Dans le deuxième scénario (Figure 43), pour les cultures, un dépôt de cinquante millimètres de téphra entraîne une réduction des coûts des fertilisants, de la main-d'œuvre et des produits phytosanitaires. Cependant, la plus grande perte concerne la vente des produits végétaux, tandis que ceux destinés au fonctionnement de la ferme diminuent peu.

Pour le bétail, les seuls coûts qui diminuent sont ceux des produits vétérinaires. Les pertes se concentrent principalement sur les produits animaux consommés, bien que les produits vendus subissent également des pertes.

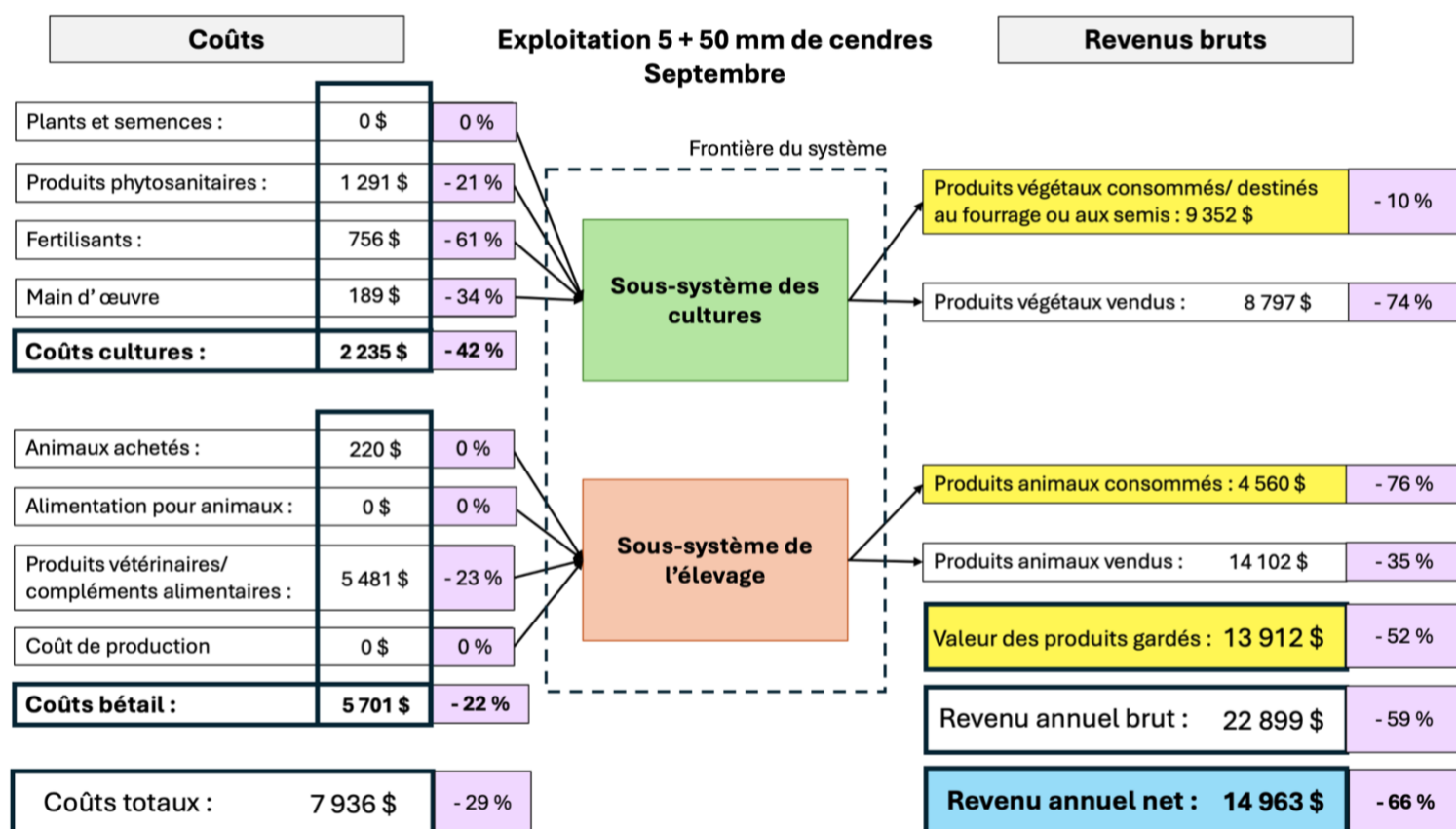


Figure 43 - Analyse économique de l'exploitation n°5, scénario de 50 mm en septembre

La Figure 44 montre qu'un dépôt de cinquante millimètres de téphra, les courges, les pêches et le maïs constituent les principales sources de la valeur annuelle brute. Selon les données de l'Annexe 8, les courges génèrent 6 200 \$, les pêches 3 750 \$ et le maïs 2 414 \$, contribuant ainsi respectivement à 34 %, 21 % et 13 % de la valeur annuelle brute. Ainsi, la courge est la culture dominante influençant cette valeur. La prune Claudia blanche et le citron sont des cultures qui contribuent très peu et le frejol ne contribue pas du tout.

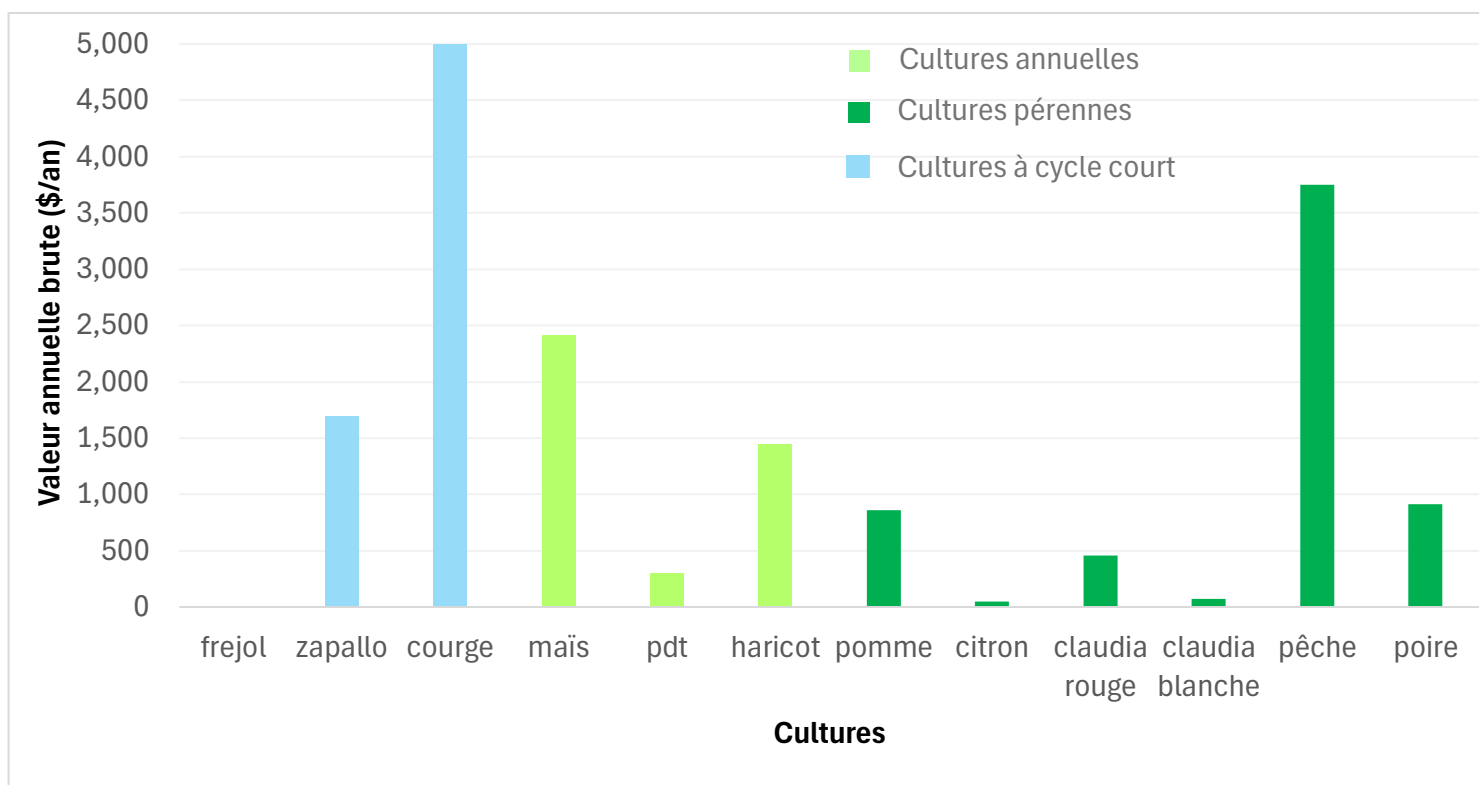


Figure 44 - Exploitation n°5 : contribution des cultures à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, septembre

En examinant les pertes (Figure 45), on constate une perte de 100 % pour le frejol, la seule culture à cycle court affectée. Le maïs est la seule culture annuelle à subir des pertes, avec une diminution de 90 %. Quant aux cultures pérennes, trois sur six souffrent de pertes.

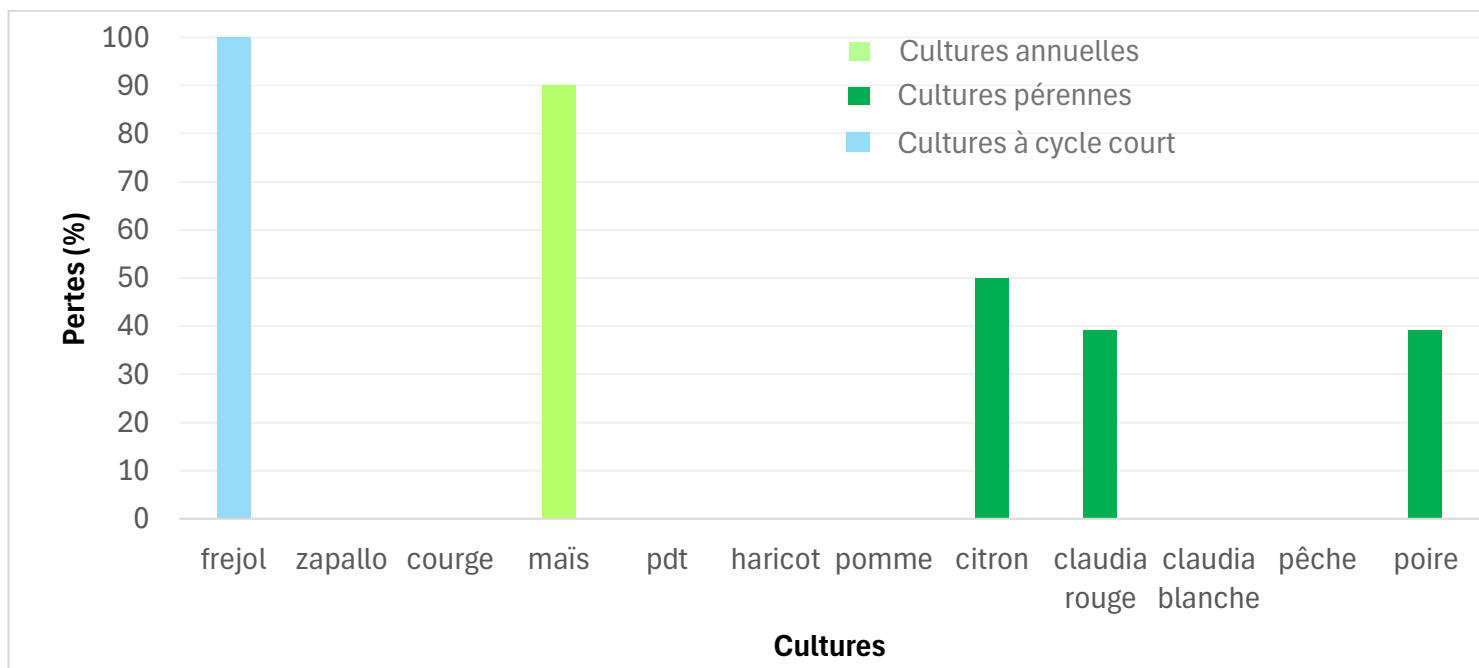


Figure 45 - Exploitation n°5 : pertes par culture, scénario de 50 mm, septembre

La figure 46 montre que les principaux contributeurs à la valeur annuelle brute sont les bovins, les porcins et les volailles. Les caprins, les abeilles, les cobayes et les léporidés apportent une contribution très faible. Quant aux équidés, ils ne contribuent pas du tout.

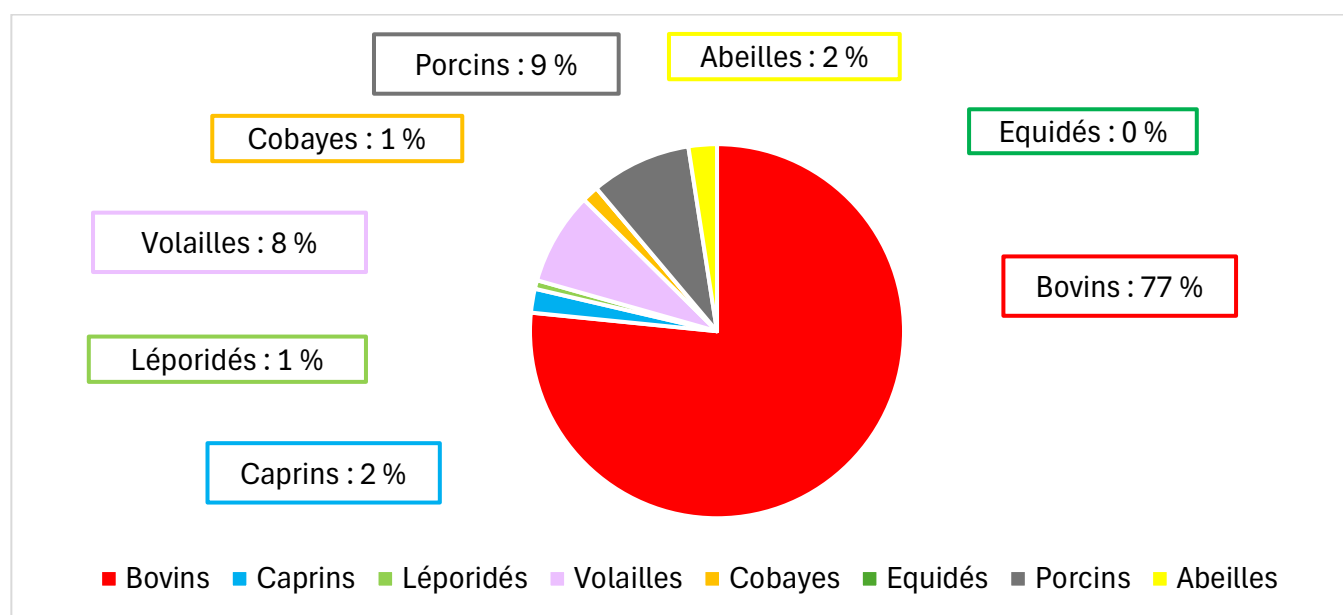


Figure 46 - Exploitation n°5 : contribution du bétail à la valeur annuelle brute, scénario de 50 mm, septembre

La Figure 47 montre que les équidés subissent des pertes totales, avec 100 % d'entre eux affectés, et les porcins ainsi que les volailles sont également fortement touchés. Les bovins et les cobayes subissent des pertes identiques de 57 %. Finalement, les caprins et les léporidés subissent 52 % de pertes.

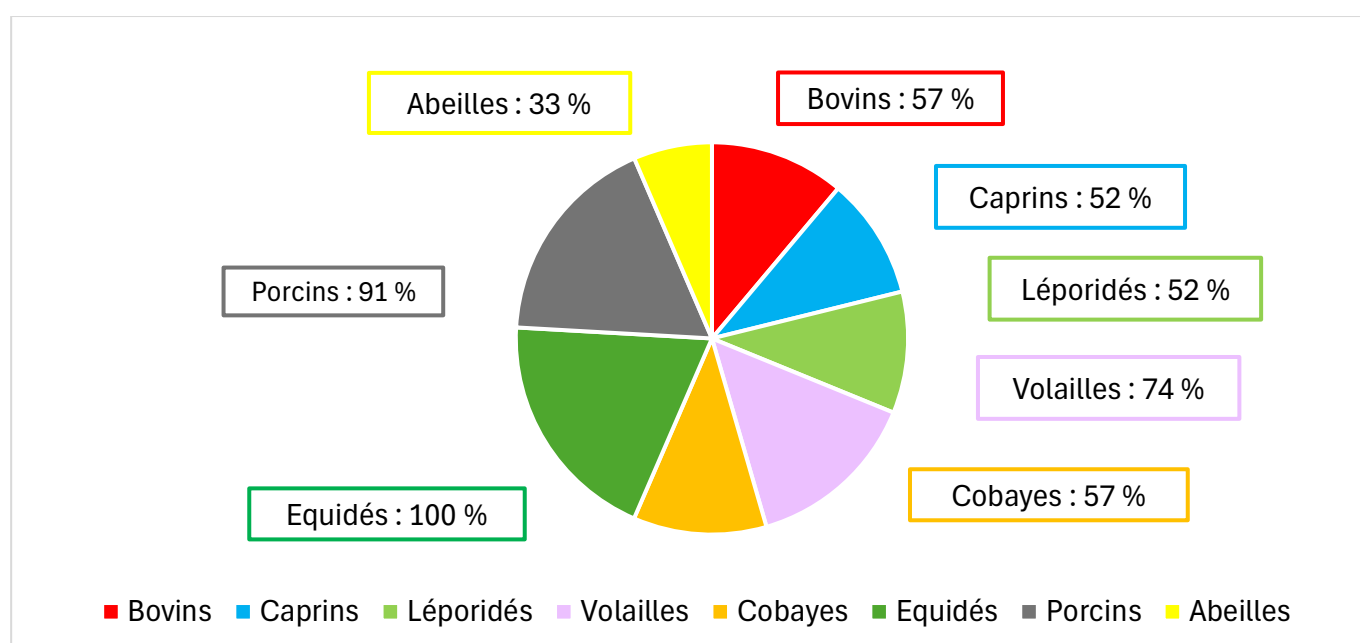


Figure 47 - Exploitation n°5 : pertes sur le bétail, scénario de 50 mm, septembre

6. Discussion

6.1. Interprétation des résultats

D'une manière générale, les résultats montrent que lorsqu'il y a une réduction des coûts de cultures et une diminution des produits végétaux vendus, ces deux phénomènes sont liés. Cela est dû au fait qu'une partie de la culture a été détruite, ce qui nécessite moins de produits ou de main-d'œuvre en raison de la réduction du nombre de plantes. La même interprétation s'applique aux animaux et à leur nourriture ou aux produits vétérinaires. En comparant les valeurs totales annuelles (vendues et gardées) des végétaux et des animaux, il est possible d'identifier les éléments les plus vulnérables, c'est-à-dire ceux subissant le plus de pertes économiques, qu'ils soient destinés à la vente ou au fonctionnement de l'exploitation.

Dans un premier temps, nous analysons les exploitations n°4 et n°5 de manière séparée. Ensuite, nous les comparerons afin d'identifier laquelle est potentiellement la plus vulnérable face au dépôt de téphra.

6.1.1. Exploitation n°4

Pour rappel, nous avons choisi le mois de chaque scénario éruptif (scénarios de cinq et de cinquante millimètres de téphra) en comparant les pertes des revenus annuels bruts de toute l'année et en choisissant la plus élevée. Nous allons identifier les éléments qui expliquent pourquoi les mois de septembre et juillet sont ceux qui génèrent le revenu annuel brut le plus bas.

En utilisant les résultats des Figures 29 et 34, qui illustrent les pertes par culture pour chaque scénario éruptif, nous pouvons identifier directement les cultures les plus vulnérables pendant le mois de septembre pour le scénario de cinq millimètres de téphra et pendant le mois de juillet pour celui de cinquante millimètres. Dans le premier cas, les cultures les plus vulnérables, par ordre décroissant, sont : le maïs, la prune Claudia, le fruit de la passion et la mandarine. Pour le scénario de cinquante millimètres, les cultures les plus vulnérables, par ordre décroissant, sont : la prune Claudia, le maïs, et au même niveau, le fruit de la passion, la mandarine, le citron, le citron vert et l'orange.

Les cultures vendues sont celles qui influencent le revenu annuel et qui ont donc déterminé le choix du mois de simulation. Ces cultures sont le maïs, les mûres, les haricots, les pommes de terre et les citrons. La culture prédominante de l'exploitation est le maïs, qui occupe cinq

hectares. En situation normale, 81 % du revenu annuel brut et 92 % des revenus des produits végétaux proviennent de la vente de cette culture.

En situation normale (hors éruption), la Figure 22 montre que le majeur contributeur à la valeur annuelle brute est le maïs, à hauteur de 95 % du total. Dans la simulation de dépôt de cinq millimètres de téphra, le maïs reste le principal contributeur, avec 91 %. La Figure 29 montre qu'il s'agit de la culture qui subit le plus de pertes, de 36 %. Pour la simulation de cinquante millimètres de téphra, le maïs reste le principal contributeur de la valeur annuelle brute avec 86 % et subit des pertes 68 %. Les choix des mois de septembre et juillet pour les simulations des deux scénarios de cinq et cinquante millimètres respectivement sont donc liés à la culture du maïs, qui influence directement le revenu annuel brut.

Effectivement, en prenant comme exemple le scénario de cinq millimètres, les valeurs reprises dans le Tableau 9 montrent que les mois avec les plus grosses pertes pour le maïs correspondent à la période de floraison en septembre et en octobre. Pour départager ces deux mois, la simulation s'est basée sur les autres cultures vendues. Parmi elles, les seules qui subissent des pertes sont les citrons et les mûres. Les mûres sont en récolte pendant les mois de septembre et octobre, tandis que les citrons sont en croissance en septembre (avec un coefficient de perte, dès lors, plus élevé que celui des mûres) et en maturation en octobre. Il est également important de considérer leur contribution au revenu annuel brut en scénario de cinq millimètres. Ce sont les mûres qui contribuent le plus après le maïs. Ainsi, bien que les citrons subissent plus de pertes, ce sont les mûres qui ont influencé le choix final du mois pour la simulation.

Les cultures, ayant la plus grande contribution au revenu annuel brut quel que soit le scénario ; ce sont elles qui ont influencé le choix final du mois.

Tableau 9 - Détermination des pertes de la valeur annuelle brute du maïs en fonction de son stade phénologique, exploitation n°4, 5 mm

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
Pertes 5 mm (%)	0	0	0	0	0	0
	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	Semis	Croissance	Floraison	Floraison	Maturation	Récolte
Pertes 5 mm (%)	34	27	36	36	32	23

Maintenant que nous avons identifié les raisons qui ont causé les pertes les plus grandes en septembre pour le scénario de 5 millimètres et en juillet pour celui de cinquante millimètres ; nous allons étudier l'ensemble des productions végétales et animales de l'exploitation afin d'en ressortir les éléments les plus vulnérables indépendamment de s'ils sont destinés à la vente ou à la consommation.

Dans le cas de l'exploitation n°4, certaines cultures gardées pour la consommation propre, comme les pommes, les pêches ou les noix, ne subissent aucune perte dans les deux scénarios. La prune Claudia, en revanche, subit de grosses pertes : 31 % pour cinq millimètres et 79 % pour cinquante millimètres. La famille va alors choisir de consommer un autre aliment qu'elle produit ou alors elle va acheter des produits végétaux au magasin, provoquant ainsi des coûts supplémentaires. La culture de maïs reste la culture qui subit le plus de pertes en septembre pour cinq millimètres mais la prune Claudia est la plus vulnérable en juillet pour cinquante millimètres.

Concernant le bétail, contrairement aux cultures, il ne possède pas de calendrier en fonction des saisons. Les naissances, se produisant à certains mois, elles sont affectées à un moment précis. Ensuite, les animaux peuvent être affectés tant qu'ils sont dans la ferme et ne sont pas sortis du système. Sinon, le bétail subit des pertes en fonction de s'il se trouve sous un bâtiment ou non, de la contamination du fourrage ou non et des potentielles maladies (problèmes respiratoires, blocage du rumen, etc.) qu'ils peuvent contracter.

Le Tableau 10 présente les pertes annuelles que subit le bétail pour le scénario de cinq millimètres. La simulation est donc effectuée douze fois afin de comparer des différences de pertes annuelles en fonction du mois de l'éruption. Les estimations réalisées pour les mois de septembre et d'octobre (les deux mois potentiels de simulation pour le scénario de cinq millimètres) révèlent que pour les bovins et les cobayes cela représente les pertes les plus basses. Pour les volailles c'est également un moment où les pertes sont plus faibles. Nous pouvons dès lors confirmer que le choix du mois de simulation trouve son origine dans la vulnérabilité des cultures.

Tableau 10 - Exploitation n°4, comparaison des pertes (en %) que subit le bétail en fonction du mois impacté, pour le scénario de 5 mm. Les naissances des volailles sont séparées pour les poussins (p) et les canetons (c). Les (ventes) représentent les ventes de l'année d'après qui ne sont pas prises en compte dans les pourcentages car la simulation est sur un an.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Bovins	Naissances											Vente
	28	28	28	28	28	28	27	27	27	27	27	27
Volailles	Naissances (p)			(Vente)	Naissances (p)			(Vente)	Naissances (p)			Vente
	Naissances (c)											Vente
	11	10	10	9	9	8	7	7	6	6	5	4
Cobayes	Naissances					Vente	Naissances					Vente
	76	76	76	76	76	76	53	53	53	53	53	53

Un seul bovin est né en janvier, comme c'est le cas dans la situation normale. Avec un dépôt de téphra de cinq millimètres en janvier, les plus grosses pertes sont au niveau du veau qui

passer d'une valeur de 1800 \$ à 810 \$. La production de lait ainsi que les animaux adultes subissent aussi des pertes passant respectivement de 600 \$ à 320 \$ et de 14 700 \$ à 11 150 \$ (Annexe 7). Les autres mois présentent exactement les mêmes pertes des animaux adultes. L'augmentation de 1 % entre juin et juillet est en fait une variation graduelle de la production de lait et de l'impact sur le veau. Lorsque la production de lait ou le veau sont impactés en janvier, cela va se répercuter jusqu'au mois de décembre et donc causer des plus grosses pertes que s'ils sont affectés, par exemple en juin et que seulement six mois sont impactés sur l'année.

Les volailles naissent en janvier, mai et septembre pour les poussins, et seulement en janvier pour les canetons. Les plus grosses pertes sont en janvier car c'est à ce moment-là que toutes les naissances sont affectées et se répercutent jusqu'en décembre. En situation normale, 55 poussins et 3 canetons naissent; dans ce scénario, 40 poussins et 2 canetons naissent, il y a donc une perte de 15 poussins et 1 caneton (Annexe 7). Ensuite, les pertes diminuent car la production d'œufs lorsqu'elle est impactée plus tard dans l'année se répercute sur moins de mois. Les « (vente) » sont des ventes qui arrivent l'année suivante. Comme la simulation couvre une période d'une année, les ventes ont été notées dans le Tableau 10 mais ne se répercutent pas dans les résultats directement. Si elles avaient été prises en compte, il y aurait normalement eu une diminution des pertes car les volailles sortant du système sont considérées comme non affectées. La vente en décembre n'influence pas les pertes des petits qui ne sont plus affectés en sortant du système. La raison est que nous avons suivi l'hypothèse qu'ils étaient vendus après avoir été affectés par le téphra. Les cobayes naissent en janvier et en juillet. Les plus grosses pertes sont entre janvier et juin car le téphra va affecter les deux naissances. Une fois que les premières naissances sortent du système (par la vente), elles ne sont plus affectées ce qui réduit les pertes. Les animaux les plus vulnérables pendant toute l'année pour le scénario de cinq millimètres de téphra sont les cobayes car ce sont eux qui subissent les plus grosses pertes.

Pour les deux niveaux d'épaisseur, les pertes sont toujours plus faibles pour les produits animaux (productions et animaux) que pour les produits végétaux. L'exploitation n°4 possède trois types d'animaux différents. Dans le premier scénario, l'ordre décroissant de vulnérabilité est le suivant : les cobayes, les bovins et les volailles. Dans le deuxième scénario, les bovins sont les plus vulnérables et dépassent les cobayes. Cela s'explique sur base des données reprises dans le Tableau 2. Celles-ci indiquent que les premières des deux naissances des cobayes étant vendues en juin, elles réduisent les pertes sur l'ensemble de l'année en sortant du système. À l'inverse, les veaux sont impactés toute l'année car ils ne sont vendus qu'en décembre. De plus, la production de lait est un élément qui subit également des pertes pendant toute l'année. En temps normal tout comme en temps d'éruption, excepté dix bovins et cent cobayes vendus, le reste des produits animaux est gardé pour la famille et le fonctionnement de la ferme. Les pertes devraient donc se manifester au niveau des ventes,

mais comme nous avons considéré que la priorité était donnée à la vente avant la consommation personnelle, c'est en fait le flux de consommation qui subit le plus de pertes : 53 % pour le scénario de cinq millimètres et 86 % pour le scénario de cinquante millimètres (Figures 27 et 32).

6.1.2. Exploitation n°5

Nous allons maintenant identifier les éléments qui ont conduit au choix du mois de septembre pour les simulations des deux scénarios.

Les cultures considérées comme les plus vulnérables en termes de pertes au niveau de la valeur annuelle brute en septembre, dans les deux scénarios, sont par ordre décroissant : le frejol, le maïs et le citron. Les cultures vendues sont le frejol, le maïs, les pommes de terre, les courges et les zapallos. En termes de surface cultivable, l'exploitation n°5 est plus homogène que la n°4, sans culture prédominante. Économiquement, le maïs est la culture qui contribue le plus au revenu annuel, soit 69 % en situation normale, suivi des courges (15 %) et du frejol (10 %).

En situation normale, le majeur contributeur (55 %) à la valeur annuelle brute est le maïs (Figure 24). Dans le scénario de cinq millimètres de téphra, le maïs reste le principal contributeur à la valeur annuelle brute, de 48 %, bien qu'il subisse 36 % de pertes. La courge, contribuant à 19 % (contre 14 % en situation normale) de la valeur annuelle brute, ne subit aucune perte, ce qui permet à l'exploitation n°5 de maintenir un revenu de 15 600 \$, soit 68 % de son revenu total des végétaux en scénario de cinq millimètres malgré les pertes du maïs s'élevant à 37 %. À l'inverse, le frejol subit les pertes les plus importantes, soit 80 % de la production, mais comme il ne représente que 2 % de la valeur annuelle brute, son impact économique est très faible. Dans le scénario de cinquante millimètres de téphra, la courge devient le plus gros contributeur de la valeur annuelle brute, 34 %, car le maïs subit des pertes trop importantes pour conserver sa place.

Il est important de noter que ce n'est pas parce qu'une culture ne subit pas de pertes qu'elle se trouve hors culture (coefficient de perte égale à zéro). Si nous prenons l'exemple de la courge et du frejol (dont les calendriers de culture sont repris à l'Annexe 9) ; les Figures 40 et 45 montrent que le frejol subit des grandes pertes alors que l'impact sur les courges est négligeable. En fait, le moment de la récolte du frejol est en décembre alors que celui de la courge est en janvier. Cela veut dire que les pertes du frejol se marquent dans les résultats de l'année de la simulation, alors que les pertes des courges affecteront l'année qui suit car la récolte de l'année en cours est déjà passée.

Nous allons reprendre l'exemple du maïs afin d'étudier les pertes de la valeur annuelle brute de cette culture en fonction de son stade phénologique (Tableau 9). Les résultats sont les mêmes pour les deux exploitations car le maïs possède exactement le même calendrier cultural. Pour rappel, les plus grandes pertes surviennent en septembre et en octobre, lors de la floraison. Septembre est le mois le plus critique en termes de pertes de revenu annuel brut car les cultures qui contribuent au revenu sont toutes en floraison à ce moment-là, tandis qu'en octobre, le frejol et le zapallo sont en maturation ce qui correspond à un coefficient de pertes plus faible pour les deux et donc un revenu légèrement plus grand en octobre en fonction de leur contribution.

En examinant les cultures conservées au sein de la ferme, on constate que la pêche est la troisième culture contribuant le plus à la valeur annuelle avec 12 % dans le scénario de cinq millimètres, et la deuxième avec 13 % dans celui de cinquante millimètres, bien que cette culture ne contribuait qu'à 8 % en situation normale. De plus, elle ne subit aucune perte dans les deux cas. Les haricots, les pommes et les prunes Claudia blanches ne subissent pas non plus de pertes dans les deux scénarios. Ces cultures sont les moins vulnérables pendant le mois de septembre. Comme indiqué dans les Figures 38 et 43, le flux des produits végétaux consommés ou destinés au fourrage ou aux semis est peu impacté, de 3 % et 10 % pour les deux scénarios comparé au flux des produits végétaux vendus qui subit des pertes de 34 % et 74 % pour chacun des scénarios.

Concernant le bétail, le Tableau 11 présente les différentes pertes de chaque animal pour les douze mois de l'année. Pour les bovins, nous savons qu'un veau sur les six qui devaient naître en janvier est décédé. Les pertes sur les adultes et sur les productions de lait devraient être les mêmes d'un mois à l'autre. Mais le nombre de mois sur lesquels se répercutent les pertes font que celles-ci augmentent si elles se produisent au début de l'année. C'est pour cela que les pertes diminuent graduellement au cours de l'année.

Concernant les porcins, 11 porcelets sont morts sur les 34. Les naissances ont lieu en janvier et juillet. Si la simulation du dépôt de téphra se fait avant le mois de juillet elle n'affectera que la première portée de janvier alors que si la contrainte arrive à partir de juillet les deux portées sont affectées. C'est la raison pour laquelle les pertes à partir de juillet augmentent. Pour rappel, la vente en juin n'est pas prise en compte car la simulation ne se fait que sur un an.

Les volailles naissent en janvier, mars, mai, juillet et août. Si la chute de téphra est en janvier, les portées de janvier seront affectées pas les portées suivantes. Alors que si le téphra se dépose en août, les naissances de toute l'année sont impactées. Contrairement aux porcins, les pertes diminuent au cours de l'année. Cela est dû à la production d'œufs qui ; si elle est affectée en janvier, sera affectée pendant les douze mois de l'année alors que si elle est affectée en décembre, les onze mois précédant connaissent des productions habituelles.

Les cobayes naissent en janvier. En temps normal, 60 devraient naître mais avec la contrainte de cinq millimètres de téphra, 33 meurent. Les plus grandes pertes qui sont de janvier à juin

sont liées aux naissances qui sont affectées jusqu'au moment de la vente. Les adultes sont affectés de la même manière quel que soit le mois car ils possèdent le même coefficient, ce qui explique que les pertes soient les mêmes de juillet à décembre.

Le seul équidé de l'exploitation ne se reproduit pas, n'est pas vendu ni consommé et semble ne pas subir de pertes. Comme il n'y a qu'un seul animal et que les pertes ne peuvent que l'affecter lui (il ne produit rien) ; soit il reste en vie et ne subit pas de pertes, soit il meurt et subit 100 % de pertes comme c'est le cas pour le scénario de cinquante millimètres (Figure 47). Les léporidés naissent en janvier et en août ; les pertes suivent le cycle des naissances.

Les caprins ne sont vendus que trois ans plus tard en décembre. Les naissances de janvier sont donc affectées pendant les douze mois de la simulation si le téphra se dépose en janvier. Dans les cas où elles se déposent plus tard, les pertes diminuent car les naissances sont affectées plus tard dans l'année.

Les abeilles subissent des pertes sur leur production de miel de plus en plus faibles en fonction du temps d'impact. Si le téphra se dépose en janvier, la période durant laquelle l'impact sera ressenti sera de douze mois, alors que si elles se déposent en décembre, la durée de l'impact ne sera que d'un seul mois.

Tableau 11 - Exploitation n°5, comparaison des pertes (en %) que subit le bétail en fonction du mois impacté, pour le scénario de 5 mm.. Les naissances des volailles sont divisées en poussins et dindonneaux. Les (vente) correspondent aux ventes de l'année suivante qui ne sont pas prises en compte dans la simulation qui est sur un an. Le (((vente))) correspond à la vente des caprins trois ans plus tard.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
Bovins	Naissances											Vente	
	23	22	21	20	19	18	18	17	16	15	14	13	
Porcin	Naissances						(Vente)	Naissances					Vente
	48	48	48	48	48	48	56	56	56	56	56	56	
Volailles	Naissances (p)	(Vente)	Naissances (p)	(Vente)	Naissances (p)	(Vente)	Naissances (p)					Vente	
	Naissances (d)						(Vente)	Naissances (d)				Vente	
	10	10	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	
Cobayes	Naissances					Vente							
	63	63	63	63	63	63	37	37	37	37	37	37	
Equidés													
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Léporidés	Naissances	(Vente)					Vente	Naissances					
	68	68	68	68	68	68	68	40	40	40	40	40	
Caprins	Naissances											(((Vente)))	
	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	
Abeilles													
	83	76	69	62	56	49	42	35	28	21	14	7	

En examinant les flux des produits animaux vendus et consommés (Figures 38 et 43), force est de constater que ceux destinés à la consommation diminuent le plus ce qui est logique car nous privilégions la vente à la consommation dans notre simulation. L'analyse conceptuelle

de la Figure 15 montre que la plupart des produits sont destinés à la consommation propre. Les seuls produits vendus sont le fromage de vache, les œufs de poule et le miel. Dans le scénario du dépôt de cinq millimètres de téphra, les plus grosses pertes touchent les porcins, les léporidés et les cobayes, qui sont exclusivement destinés à la consommation familiale. Les abeilles et les bovins subissent des pertes de respectivement 28 % et 16 %, affectant les revenus des produits vendus, tandis que les pertes des volailles qui sont de 8 %, sont plus faibles. Dans le deuxième scénario, pour un dépôt de cinquante millimètres de téphra, les pertes augmentent pour tous les animaux. Le flux le plus impacté reste celui des produits consommés, avec de grosses pertes au niveau des porcins (91 %) et des cobayes (57 %). L'animal le plus vulnérable est l'âne, mais celui-ci n'est ni consommé ni vendu et n'impacte donc pas les revenus de l'exploitation.

À l'exception des abeilles, qui trouvent leur nourriture dans les fleurs, tous les animaux dépendent pour leur alimentation d'au moins une des trois cultures suivantes : le maïs, les courges et les pommes de terre. Parmi ces trois cultures, seule la culture de maïs est sujette à des pertes. Or, le maïs est l'unique source de nourriture des poules. Ces pertes peuvent donc entraîner des coûts supplémentaires indirects pour l'agriculteur, qui devra trouver une autre source de nourriture pour ses poules, par exemple en l'achetant en magasin.

6.1.3. Comparaison des exploitations n°4 et n°5

A première vue, en comparant les analyses conceptuelles des deux exploitations, leurs fonctionnements sont semblables : elles achètent toutes les deux des produits phytosanitaires et des fertilisants, elles utilisent une partie de leurs propres cultures pour l'alimentation de leurs animaux, elles stockent les déjections de certains de leurs animaux pour ensuite fertiliser leurs cultures et elles consomment une partie de toutes leurs productions végétales à l'exception d'une culture : les citrons pour l'exploitation n°4 et les courges pour l'exploitation n°5.

Ce qui les rend différentes réside dans leurs types de productions. En effet, l'exploitation n°4 possède des cultures annuelles et des cultures pérennes mais aucune culture à cycle court, contrairement à l'exploitation n°5. Cependant, la première possède une plus grande variété de cultures pérennes, soit dix-neuf différentes contre six pour la ferme n°5. Cette diversification tend à diminuer les pertes globales de production, car le calendrier de culture diffère entre ces espèces. Au niveau du bétail, l'exploitation n°4 possède des bovins, des cobayes et des volailles et l'exploitation n°5 possède les mêmes types d'animaux et en plus des porcins, des caprins, des léporidés, un équidé et des abeilles. Les pertes chez le bétail restent assez stables pendant l'année et varient surtout avec les naissances qui correspondent au moment le plus vulnérable de l'animal. La diversité de l'exploitation n°5 lui permet de

réduire le risque car certains animaux sont moins vulnérables que d'autres et permettront de maintenir une source de revenu. Le nombre d'animaux est aussi un facteur important. Si nous prenons l'exemple des bovins, ceux de l'exploitation n°4 subissent plus de pertes que ceux de la n°5 (Tableaux 10 et 11). Les naissances et les ventes se produisent au même moment et leurs coefficients de perte sont les mêmes. L'unique différence entre les deux exploitations réside dans leur nombre d'animaux. L'exploitation n°4 n'a qu'un seul veau alors que l'exploitation n°5 en a six. Si le seul veau de l'exploitation n°4 meurt, il y a 100 % de pertes alors que si un veau décède dans la n°5 cela représente 17 % de pertes.

Les simulations ont montré que le mois le plus vulnérable des deux exploitations coïncidait avec la période la plus vulnérable du maïs. Par conséquent, en situation d'éruption pendant les mois de simulation, elles doivent compter sur leurs autres sources de revenus. En analysant ces sources, nous pouvons identifier quelle exploitation s'en sort le mieux, c'est-à-dire subit le moins de pertes de revenu annuel, et laquelle est la plus vulnérable. Nous évaluons donc la vulnérabilité en comparant les pertes économiques entre la situation avant-après des deux exploitations et non pas en identifiant quelle exploitation a le plus de revenu pendant l'éruption.

Les coûts totaux de l'exploitation n°4 baissent de 18 % et 29 % pour les scénarios de cinq et cinquante millimètres respectivement. Ses revenus annuels bruts baissent de 63 % et de 82 % (Figures 27 et 32). Les coûts de l'exploitation n°5 baissent de 25 % et 29 %. Ses revenus annuels bruts baissent de 28 % et 59 % (Figures 38 et 43). Les coûts de l'exploitation n°5 diminuent davantage et ses revenus annuels baissent moins que ceux de l'exploitation n°4. Ainsi, l'exploitation n°5 réagit mieux à la contrainte de téphra que l'exploitation n°4. Nous allons tenter de comprendre les raisons de cette différence.

La Figure 48 indique que la ferme n°4 a des coûts d'alimentation, tandis que la ferme n°5 est autosuffisante. Ensuite, les coûts des fertilisants diffèrent considérablement entre les deux fermes. La ferme n°4 fertilise le maïs, les haricots et les pommes de terre, et parmi ces trois cultures, seul le maïs subit des pertes, entraînant une diminution des coûts de fertilisation. La ferme n°5 fertilise toutes ses cultures, à l'exception des cultures pérennes, et parmi ces cultures, seul le maïs subit des pertes. La raison pour laquelle la ferme n°5 connaît une plus grande réduction de ses coûts de fertilisation est que l'exploitation n°4 ne fertilise son maïs que de juillet à octobre alors que l'exploitation n°5 le fertilise de juillet à décembre. Il y a donc quatre fertilisations pour l'exploitation n°4 contre six pour la n°5. Comme notre simulation estime que lorsqu'il y a des pertes de cultures, les fertilisations suivantes s'arrêtent jusqu'au semis suivant, cela entraîne une diminution plus importante des coûts dans l'exploitation n°5. Cependant, ce n'est pas ce qui se passe au niveau des revenus des cultures vendues, où la ferme n°4 voit son revenu diminuer de 71 %, contre 34 % pour la ferme n°5. La raison est que la ferme n°4 vend du maïs, des mûres, des haricots, des pommes de terre et des citrons. Parmi ces cinq cultures, le maïs, les mûres et les citrons subissent des pertes, et ce sont précisément le maïs et les mûres qui contribuent le plus au revenu annuel de cette ferme. En revanche, la

ferme n°5 vend du frejol, du maïs, des pommes de terre, des courges et des zapallos ; seuls le maïs et le frejol subissent des pertes. Les principaux contributeurs au revenu de la ferme n°5 restent le maïs et la courge pour le scénario de cinq millimètres. Cette dernière ne subit pas de pertes du tout, ce qui permet de réduire les pertes du flux des produits végétaux vendus.

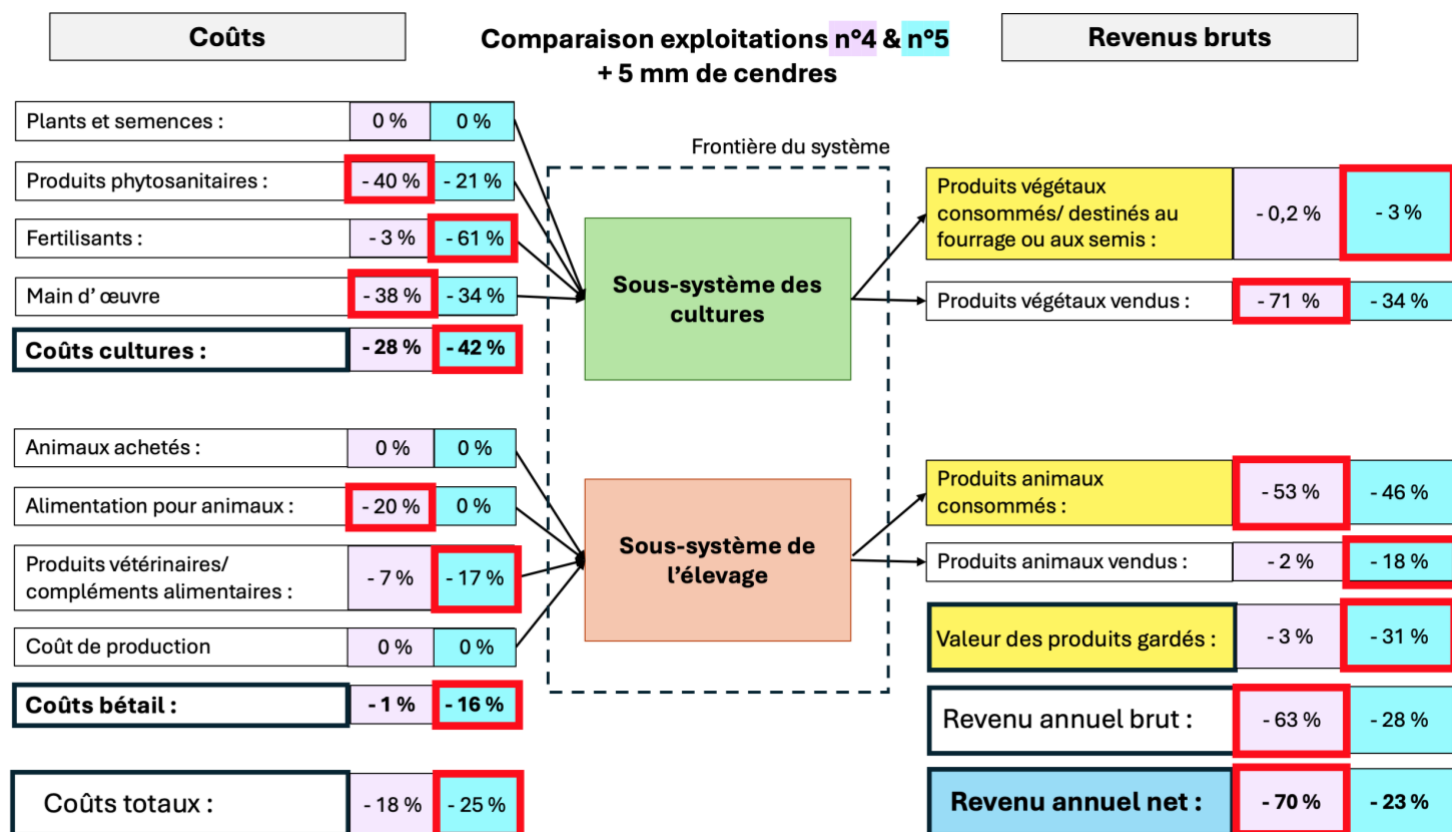


Figure 48 - Comparaison des pertes économiques de chaque flux des exploitations n°4 et n°5 pour le scénario de 5 mm en septembre

La ferme n°5 vend des produits issus des vaches, des poules, des abeilles, des cochons et des dindons. Le plus gros contributeur au revenu annuel est la vache, suivie par le porc, puis la volaille. Tous subissent des pertes, mais grâce à la diversification, la ferme ne perd pas tout si une catégorie d'animaux est impactée beaucoup plus que les autres. La ferme n°4 fonctionne différemment, car la majorité de ses produits animaux ne sont pas destinés à la vente. Elle vend des toretes et des cochons d'Inde, donc elle génère initialement moins de revenus provenant de ses produits animaux et subit proportionnellement moins de pertes. Notre simulation privilégie la vente avant la consommation pour les produits animaux, donc les pertes de cochons d'Inde se répercutent sur les produits consommés et non sur les produits vendus pour l'exploitation n°4. C'est pour cette raison que ce flux de vente ne diminue que de 2 % contre 53 % pour les produits consommés.

La valeur des produits gardés de l'exploitation n°4 ne diminue presque pas car le principal flux des produits conservés est celui des végétaux, qui ne diminue que de 0,3 %. En revanche, l'exploitation n°5 produit beaucoup plus de produits animaux, représentant un flux plus important. Comme nous privilégions la vente avant la consommation propre, les pertes sont plus importantes pour la consommation, ce qui fait diminuer beaucoup plus la valeur des produits gardés de l'exploitation n°5.

En résumé, dans les deux exploitations, le principal flux générateur de revenus provient des végétaux. Les deux exploitations tirent la majorité de leurs revenus du maïs, ce qui explique le choix du mois étudié, soit celui où les pertes de revenus étaient les plus élevées, qui correspond au moment le plus vulnérable pour cette culture. La principale différence entre les deux exploitations réside dans le fait que l'exploitation n°4 dépend de la vente de maïs et de mûres, toutes deux sujettes à des pertes de rendement. En revanche, l'exploitation n°5, qui dépend du maïs et des courges, ne subit des pertes qu'au niveau du maïs, et les courges lui permettent de réduire les pertes sur son revenu. Cela met en évidence l'importance de la diversification qui permet d'étaler les différents stades phénologiques du calendrier. Ainsi, le stade le plus vulnérable qui est celui de la floraison n'est pas condensé sur un seul mois. Il faut également multiplier ses sources de revenus pour ne pas dépendre entièrement d'un seul type de culture pour lequel nous avons le même calendrier et les mêmes coefficients de perte.

La Figure 49 montre que pour l'exploitation n°5, les diminutions des coûts liés aux produits phytosanitaires et fertilisants ne changent pas du tout entre cinq millimètres et cinquante millimètres, car une fois que la culture est impactée, la fertilisation suivante est supprimée, quelle que soit la quantité de culture perdue. L'ensemble des valeurs de l'exploitation n°4 changent car le mois est différent entre les deux scénarios. Pendant le mois de juillet, c'est encore le maïs qui est le principal contributeur du revenu annuel, et donc c'est cette culture qui dicte les pertes de revenu. Les produits phytosanitaires sont utilisés sur le maïs, les haricots, les mûres et les pommes de terre. Parmi eux, seuls le maïs et les mûres subissent des pertes, et ce sont précisément ces cultures qui ont la plus grande contribution dans la valeur annuelle brute. Cette diminution de 80 % vient de là.

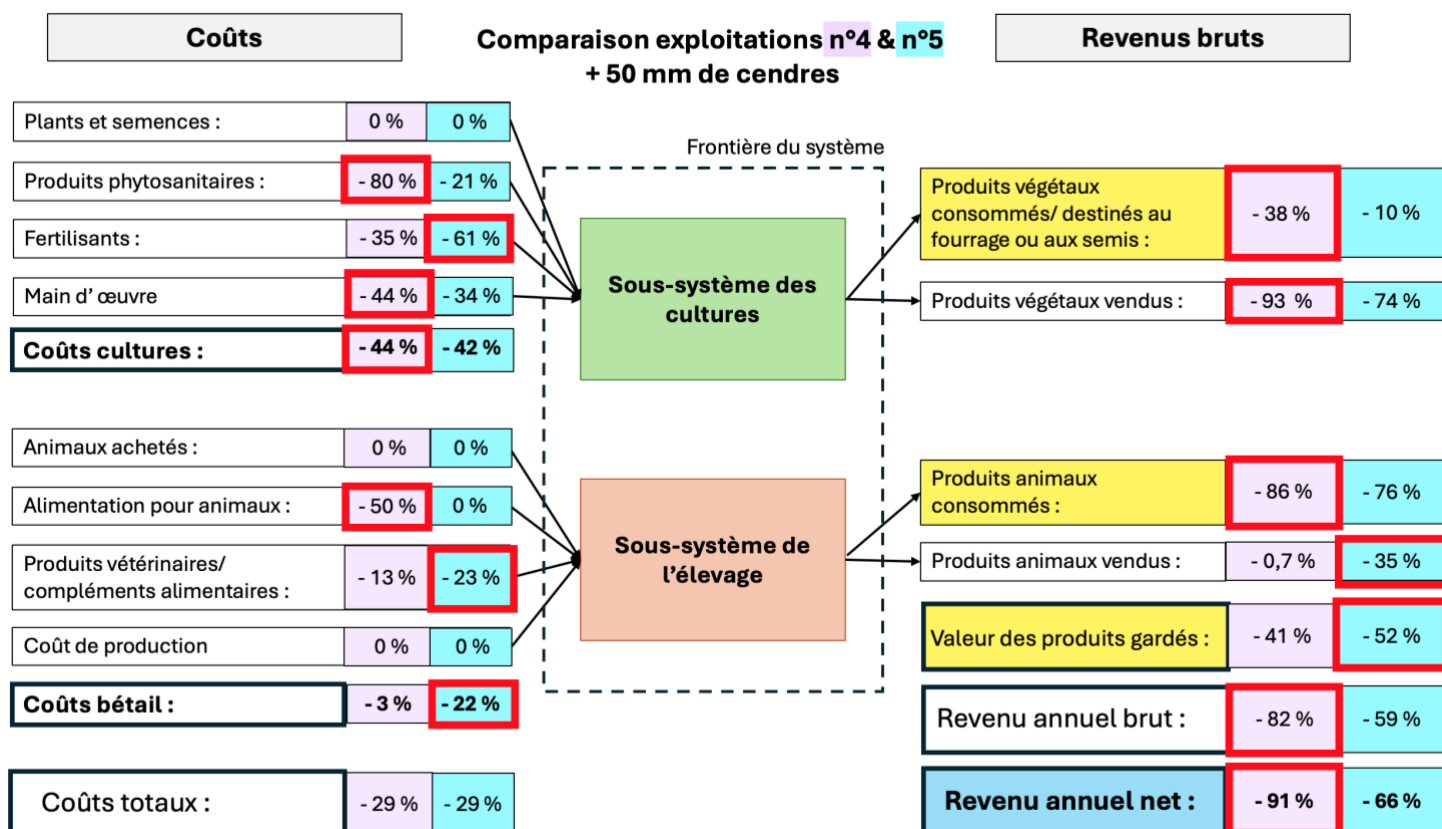


Figure 49 - Comparaison des pertes économiques de chaque flux des exploitations n°4 et n°5 pour le scénario de 50 mm en juillet (exploitation n°4) et en septembre (exploitation n°5)

Au niveau des produits végétaux vendus, l'exploitation n°4 perd presque la totalité de ses revenus car elle dépend majoritairement du maïs et des mûres, qui subissent toutes les deux des pertes qui augmentent dans ce deuxième scénario. Le revenu des produits végétaux de la ferme n°5 diminue également, car les pertes du maïs augmentent considérablement. Néanmoins, les courges ne subissent toujours aucune perte, ce qui permet de garder une partie du revenu intacte.

Concernant le bétail, pour l'exploitation n°4, les pertes du flux d'alimentation sont totalement dues aux pertes de volailles car l'exploitant n'achète de nourriture – du maïs – que pour elles. En juillet, avec cinquante millimètres de téphra, les cobayes passent d'une perte de 53 % pour le scénario de cinq millimètres à 66 % pour celui de cinquante. En plus de ça, leur contribution à la valeur annuelle brute augmente de 8 % passant de 14 % pour le scénario de cinq millimètres à 22 % pour celui de cinquante. Les bovins passent de 27 % de pertes à 70 % entre les deux scénarios mais leur contribution à la valeur annuelle brute diminue de 8 %. Les volailles subissent 48 % de pertes en plus entre les deux scénarios et leur contribution ne change pas. Cela, en plus du fait que les coefficients de perte du bétail sont plus élevés pour le scénario de cinquante millimètres par rapport à celui de cinq, explique l'augmentation des pertes au niveau des produits animaux consommés pour le scénario de cinquante millimètres. Pour l'exploitation n°5, les pertes de tous les animaux à part celles des léporidés augmentent.

Les changements de pertes les plus marqués sont associés aux équidés qui passent de 0 à 100 %, ensuite des bovins qui augmentent de 41 % et des porcins de 35 %.

Étant donné que l'exploitation n°4 vend moins de produits animaux que l'exploitation n°5 et en consomme la majorité, et qu'en plus la vente est privilégiée à la consommation, il est logique qu'elle ne subisse presque pas de perte au niveau des produits animaux vendus contrairement à l'exploitation n°5. En considérant les pertes des produits animaux consommés et vendus de l'exploitation n°5, on constate que le sous-système de l'élevage est globalement plus affecté que celui des cultures. La raison est que tous les animaux subissent des pertes, contrairement aux cultures dont une partie n'est pas du tout affectée.

Dans le scénario de cinquante millimètres, les impacts deviennent critiques pour les deux exploitations, car celles-ci perdent plus de la moitié de la valeur annuelle de leurs produits conservés ainsi que plus de la moitié de leur revenu annuel brut et net. C'était déjà le cas pour l'exploitation n°4 avec cinq millimètres de téphra, mais dans le second scénario (cinquante millimètres), l'exploitation n°5 garde des pertes plus faibles que l'exploitation n°4 lors du premier scénario. Globalement, le système agricole de l'exploitation n°5 résiste mieux à l'exposition aux émissions de téphra et est dès lors moins vulnérable que celui de l'exploitation n°4.

6.2. Limitations du travail

Ce mémoire a permis d'estimer les pertes de revenu subies par des exploitations agricoles en fonction du mois de l'année et sous deux épaisseurs de dépôt de téphra. Cependant, la méthode utilisée dans cette étude peut encore être améliorée.

Premièrement, lors de la collecte de données, des erreurs de compréhension ou de traduction peuvent être survenues. Dans les deux équipes, certaines personnes ne parlaient pas espagnol. Le transfert d'information entre les membres de l'équipe, combiné au fait que certains agriculteurs s'exprimaient rapidement, a pu entraîner des biais de compréhension. Des enregistrements ont été fait durant les interviews pour limiter ces erreurs.

Les agriculteurs équatoriens ne répertorient pas les informations relatives à leur exploitation dans des documents. Les données fournies lors des entretiens sont donc basées sur leur mémoire ou sur des estimations faites sur le moment. Par conséquent, certaines données restent manquantes et doivent être comblées à l'aide de la littérature ou d'autres interviews.

Certains agriculteurs, notamment celui de l'exploitation n°2, signalent des cas de vol d'animaux ou de décès causés par des animaux sauvages. Il est alors difficile de représenter l'état de l'exploitation dans une situation normale lorsque ces incidents arrivent.

Dans nos calculs, nous supposons que les prix d'achat et de vente restent constants, non seulement au long de l'année et d'une année à l'autre, mais aussi en situation de crise post-éruptive, et nous utilisons les prix donnés par les agriculteurs. Des biais peuvent être causés par les fluctuations de l'offre et de la demande sur le marché.

En Équateur, les saisons étant moins marquées que chez nous, la majeure partie des agriculteurs ne possède pas de calendrier de cultures très précis. Les périodes de semis, croissance, floraison, maturation et récolte sont très variables. Pour une analyse plus précise il aurait fallu déterminer exactement les stades phénologiques de chaque culture.

La principale limitation de cette approche réside dans le manque d'informations concernant la quantification des impacts provoqués par les retombées de téphra sur les composantes du système agricole. Malgré les études menées par Wilson et al. (2007), Craig et al. (2021) et Ligo (2023) qui proposent des fonctions de fragilité, celles-ci demeurent peu nombreuses, souvent approximatives et limitées en termes de niveau de précision.

En outre, seuls les animaux issus de l'agriculture pastorale sont évoqués dans ces études. Dès lors, les pertes relatives aux abeilles de l'exploitation n°5 ont été estimées sur base de données issues d'interviews réalisées aux Philippines lors d'une mission en 2022 (Mariage, 2024). De même, les cultures sont souvent regroupées au sein d'une seule même catégorie ce qui rend incertaine la quantification des pertes de certaines plantes.

Le manque de coefficients dans la littérature nous a conduit à faire des hypothèses sur les calculs qui pourraient se révéler fausses. Il faudrait faire une étude de sensibilité pour les coefficients que nous avons estimés.

Finalement, il y a aussi des limitations inhérentes aux hypothèses que nous avons posées dans la simulation. Le fait que toutes les naissances soient simultanées par exemple, et le fait que nous avons imposé un arbre de décision quant aux destinations des productions et au maintien ou non des travaux agricoles. Il faudrait pouvoir demander à chaque agriculteur ce qu'il ferait dans les différents cas de figure, ou alors calculer toutes les variations afin de recommander aux exploitants d'adopter l'une ou l'autre méthode. Il serait dans ce cas nécessaire de faire des études de champ.

6.3. Perspectives

Dans cette étude, le modèle conceptuel repose sur les flux quantifiables à l'aide d'une unité économique. Cependant, cette approche demeure simplifiée, car elle ne fait pas apparaître tous les flux présents dans le système. Par exemple, quel est le coût de l'herbe pâturée par les ruminants ? Ou encore, quelle valeur attribuer à l'excrétion directe au pâturage ? La quantité d'aliments ingérés par les vaches ne se reflète pas directement dans leur lait et leurs déjections. Comment quantifier ces pertes ? Il est nécessaire de trouver une unité de mesure capable d'englober le maximum d'éléments d'un système agricole, incluant cultures et élevage, afin de quantifier les flux qui ne peuvent être évalués économiquement. Stark et al. (2019) ont développé une méthode utilisant l'azote comme unité commune. L'azote, présent à la fois dans les cultures et chez le bétail, permet de quantifier les transferts entre ces deux sous-systèmes. Ensuite, quatre propriétés, alignées sur les principes de l'agroécologie définis par Bonaudo et al. (2014), peuvent être déterminées pour évaluer les performances agroécologiques du système agricole :

- La résilience (-) représente la capacité du système à s'adapter et à faire face à des perturbations.
- La productivité ($\text{kg.N.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) se mesure en additionnant les flux sortants du système, en excluant les pertes et les émissions. Elle est ramenée à l'hectare pour pouvoir comparer les systèmes entre eux. Une productivité élevée signifie que le système est capable de produire une grande quantité de sortie par hectare.
- La dépendance ($\text{kg.N.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) est mesurée par la somme des flux entrants dans le système et permet de mesurer à quel point le système dépend de ressources externes pour fonctionner.
- L'efficacité (%) mesure l'utilisation efficace par le système des ressources externes pour créer une production.

L'utilisation de cette approche permettrait une meilleure compréhension de la dynamique complexe des systèmes agricoles (Rufino et al., 2009 ; Stark et al., 2019). Nous avons créé un nouveau modèle conceptuel général à l'aide de l'outil Mural. Conçu pour couvrir divers scénarios représentatifs de différentes exploitations agricoles, il est plus complet que celui utilisé dans le présent travail et est présenté dans la Figure 50. Les flux supplémentaires par rapport au modèle précédent comprennent :

- Les services animaux qui représentent la location d'animaux pour des travaux agricoles ou pour la reproduction.
- La fixation de l'azote par les légumineuses et la déposition des composés azotés atmosphériques.
- Les pertes par lixiviation et les émissions
- L'achat de litière pour certains animaux comme les cochons d'Inde
- Les animaux morts ou volés, représentant des pertes en capital animal
- La différenciation des cultures sous bâche ou en serre en verre, mieux protégées mais susceptibles d'être entièrement détruites en cas d'effondrement de la structure.
- Le stockage des produits végétaux, certaines exploitations stockant leurs produits pour nourrir leurs animaux.
- La différenciation des animaux à cycle court ou à cycle long car tout comme dans le cas des plantes pérennes, le temps de renouvellement sont importants à prendre en compte. Si l'agriculteur perd des cochons d'Inde ou des vaches, les temps de renouvellement ne sont pas du tout les mêmes, il remplacera les cochons d'Inde beaucoup plus vite.
- La différenciation des animaux élevés dans des bâtiments robustes, moyennement robuste ou fragile car la survie des animaux dépend de la solidité du bâtiment dans lequel ils se trouvent.

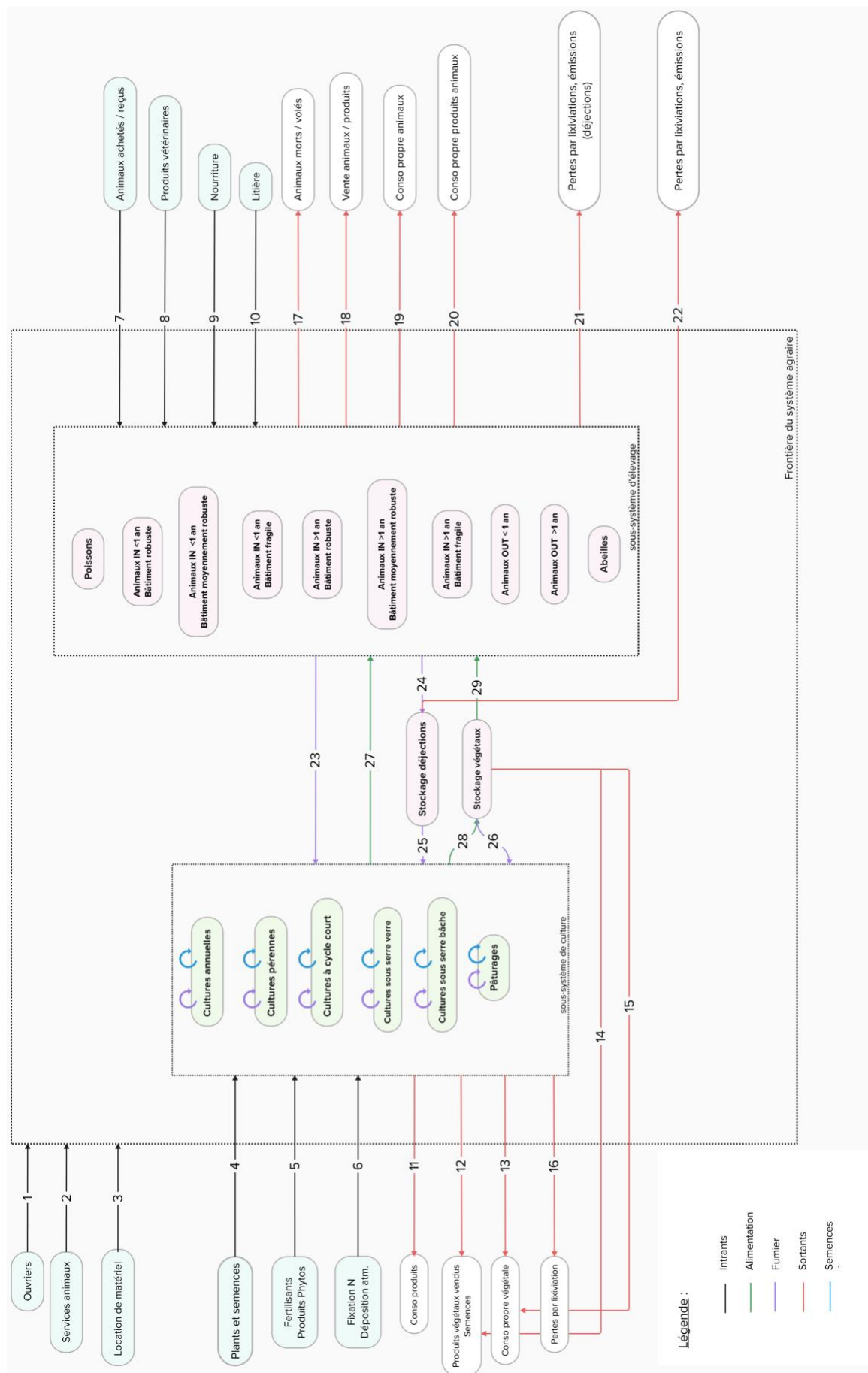


Figure 50 - Nouveau modèle conceptuel général d'un système agricole

7. Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif principal de développer une méthode pour quantifier la vulnérabilité des exploitations agricoles face au danger de la chute de téphra.

L'étude a été réalisée sur cinq exploitations agricoles situées en Équateur, autour du volcan Tungurahua. Des interviews sur le terrain ont été conduites afin d'obtenir les données nécessaires à ce travail. Deux exploitations sur les cinq ont été sélectionnées afin de comparer deux systèmes agricoles contrastés et d'identifier le plus vulnérable. Pour ce faire, nous avons testé l'impact de deux épaisseurs de téphra : cinq et cinquante millimètres. La quantification de la vulnérabilité a été réalisée au travers de l'estimation des pertes économiques des exploitations suite au dépôt de téphra.

Il en résulte que la dimension temporelle du travail est importante à prendre en compte car les pertes de production d'une année peuvent se répercuter sur les suivantes. Nous avons également vu que le moment le plus vulnérable des deux exploitations coïncidait avec le mois le plus vulnérable de la production ayant la majeure contribution au revenu annuel. Pour les deux exploitations, le principal flux générateur de revenus provient des végétaux. Ce travail a mis en évidence l'importance de la diversification des cultures qui permet d'étaler les différents stades phénologiques du calendrier. Ainsi, le stade le plus vulnérable qui est celui de la floraison n'est pas condensé sur un seul mois. Il faut également multiplier ses sources de revenus pour ne pas dépendre entièrement d'un seul type de culture pour lequel nous avons le même calendrier et les mêmes coefficients de perte. Contrairement aux cultures, le bétail présente des pertes relativement constantes sur l'année qui varient majoritairement par les naissances et les ventes. De plus, nous avons mis en évidence l'importance de l'approche systémique en considérant les interactions au sein du système et entre le système et son environnement.

La méthode utilisée dans cette étude peut encore être améliorée. Notre approche demeure simplifiée car elle ne fait pas apparaître tous les flux présents dans le système. Stark et al. (2019) proposent une méthode utilisant l'azote comme unité commune. L'azote, présent à la fois dans les cultures et chez le bétail, permet de quantifier les transferts entre ces deux sous-systèmes. Avec l'amélioration de nos connaissances sur la vulnérabilité des cultures et du bétail de manière plus détaillée, nous pourrions améliorer notre méthode et proposer des prédictions plus pertinentes des pertes subies par les exploitations dans les régions volcaniques.

Références

- Arnold, D. W. D., Biggs, J., Anderson, K., Vallejo Vargas, S., Wadge, G., Ebmeier, S. K., et al. (2017). Decaying lava extrusion rate at El Reventador volcano, Ecuador, measured using high-resolution satellite radar. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122 (12), 9966–9988. doi:10.1002/2017JB014580
- Aspinall, W. and Blong, R.: Volcanic risk assessment, in: *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*, edited by: Sigurdsson, H., Academic Press, Amsterdam, 1215-1231, doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00070-5, 2015.
- Ayris, P. M. and Delmelle, P.: The immediate environmental effects of tephra emission, *Bulletin of Volcanology*, 74, 1905-1936, doi: 10.1007/s00445-012-0654-5, 2012.
- Black, R. A. and Mack, R. N.: Aseasonal leaf abscission in *Populus* induced by volcanic ash, *Oecologia*, 64, 295-299, doi: 10.1007/bf00379124, 1984.
- Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur J Agron* 57, 43-51.
- Brown, S. K., Auker, M. R., and Sparks, R. S. J.: Populations around Holocene volcanoes and development of a Population Exposure Index, in: *Global Volcanic Hazards and Risk*, edited by: Vye-Brown, C., Brown, S. K., Sparks, S., Loughlin, S. C., and Jenkins, S. F., Cambridge University Press, Cambridge, 223-232, doi: 10.1017/CBO9781316276273.006, 2015.
- Burket, S. D., Furlow, E. P., Golding, P. R., Grant, L. C., Lipovsky, W. A., and Lopp, T. G.: The economic effects of the eruptions of Mt. St. Helens, United States International Trade Commission, Washington, D.C. 20438, 84 pp., 1980.
- Carrasco, C., Eduardo M. (2018). Análisis de la pobreza en la provincia de Tungurahua: su evolución y determinantes en el período 2012-2016
- Cashman, K. Sturtevant, B. Papale, P. y Navon, E. (2000) Magmatic Fragmentation. *Encyclopedia of Volcanoes*, USA: Academic Press.

- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I., and Williams, G. J.: Impact on agriculture of the mount St. Helens eruptions, *Science*, 211, 16-22, doi: 10.1126/science.211.4477.16, 1981.
- Craig, H., Wilson, T., Magill, C., Stewart, C., Wild, A.J., 2021. Agriculture and forestry impact assessment for tephra fall hazard: Fragility function development and New Zealand scenario application. *Volcanica* 4, 345–367. <https://doi.org/10.30909/vol.04.02.345367>
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Outes, V., Villarosa, G., Baxter, P., 2016a. Impacts to agriculture and critical infrastructure in Argentina after ashfall from the 2011 eruption of the Cordón Caulle volcanic complex: an assessment of published damage and function thresholds. *Journal of Applied Volcanology* 5, 7. doi:10.1186/s13617-016-0046-1
- Curious, A. (2011). La cétose de la vache laitière. SNGTV. <https://www2.sngtv.org/article-bulletin/la-cetose-de-la-vache-laitiere/>
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., and Ugolini, F. C.: The nature, properties and management of volcanic soils, *Adv. Agron.*, 82, 113-182, doi: 10.1016/s0065-2113(03)82003-5, 2004.
- Decker, R. and Decker, B.: *Mountains of Fire: The Nature of Volcanoes*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 1991.
- 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>
- Easdale, M. H., Sacchero, D., Vigna, M., and Willems, P. (2014). Assessing the magnitude of impact of volcanic ash deposits on Merino wool production and fibre traits in the context of a drought in North-west Patagonia, Argentina. *The Rangeland Journal* 36, 143–149.
- Eggler, W. A.: Plant communities in the vicinity of the volcano El Parícutin, Mexico, after two and a half years of eruption, *Ecology*, 29, 415- 436, doi: 10.2307/1932635, 1948.
- Elcomercio (2015). 25 000 habitantes aprendieron a vivir con el volcán Tungurahua Consulté 1 mai 2024, à l'adresse <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/volcantungurahua-habitantes-convivencia-prevencion.html>
- Erickson, J.: *Volcanoes and earthquakes*, Blue Ridge Summit, PA : TAB Books, 1988.

- FAO (Food and Agriculture Organisation): The impact of disasters and crises on agriculture and food security: 2021, Rome, 245 pp., doi: 10.4060/cb3673en, 2021.
- Flueck, W. T. (2013). Effects of fluoride intoxication on teeth of livestock due to a recent volcanic eruption in Patagonia, Argentina. *Online Journal of Veterinary Research* 17, 167–176.
- Flueck, W. T. (2016). The impact of recent volcanic ash depositions on herbivores in Patagonia : A review. *The Rangeland Journal*, 38(1), 27. <https://doi.org/10.1071/RJ14124>
- Gonnermann, H. M. (2015). Magma Fragmentation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1), 431-458. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105206>
- Griggs, R. F.: The Beginnings of Revegetation in Katmai Valley (Part IX of Series), *J. Sci.*, 19, 319-342, 1919.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., and Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: a review of Late Pliocene to present activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 176 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- Heiken, G. y Wohletz, K. (1985). *Volcanic Ash*. USA: University of California Press, 239, ISBN 0520-05241-2.
- Hirano, T., Kiyota, M., and Aiga, I.: The effects of dust by covering and plugging stomata and by increasing leaf temperature on photosynthetic rate of plant leaves, *J. Agric. Meteorol.*, 46, 215-222, doi: 10.2480/agrmet.46.215, 1991.
- ISDR (International Strategy fo Disaster Reduction): *Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives* Geneva: United Nations, United Nations, New York and Geneva, 2004.
- Jenkins S., Wilson T, Magill C, Miller V. (2015) Volcanic ash fall hazard and risk, doi:10.1017/CBO9781316276273.005
- Keller, E. A., DeVecchio, D. E., & Blodgett, R. H. (2015). *Natural hazards: Earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes* [OCLC: 864789911].
- Kelman, I. and Mather, T. A.: *Living with volcanoes: the sustainable livelihoods approach for volcano-related opportunities*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 172, 189-198, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.12.007, 2008.

- Lane, L. R., Tobin, G. A., and Whiteford, L. M.: Volcanic hazard or economic destitution: hard choices in Baños, Ecuador, *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 5, 23-34, doi: 10.1016/j.hazards.2004.01.001, 2003.
- Larousse, É. (s.d.). *Définitions : Agriculture—Dictionnaire de français Larousse*. (s. d.). Consulté 13 février 2024, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/agriculture/1773>
- LE MAITRE, R. W. (ed.) 2002. *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*, 2nd ed. xvi + 236 pp. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. Price £45.00, US \$65.00 (hard covers). ISBN 0 521 66215 X. *Geological Magazine*. 2003;140(3):367-367. doi:10.1017/S0016756803388028 <div></div> Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.
- Ligot (2023), A quantitative assessment of crop vulnerability to tephra hazard at Tungurahua volcano, Ecuador: understanding the effect of volcanic and biological factors, doi:10.21203/rs.3.rs-2915673/v1
- Ligot, N., 2022. Crop vulnerability to tephra fall in volcanic regions: field, experimental and modelling approaches.
- 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>
- Macedonio, G. and Costa, A.: Brief communication "Rain effect on the load of tephra deposits", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 12, 1229-1233, doi: 10.5194/nhess-12-1229-2012, 2012.
- Mack, R. N.: Initial effects of ashfall from mount St. Helens on vegetation in eastern Washington and adjacent Idaho, *Science*, 213, 537-539, doi: 10.1126/science.213.4507.537, 1981.

- Mariage C. (2024), Évaluation de la vulnérabilité des systèmes agraires face aux retombées de téphra. Cas d'étude : Volcan Mayon, Philippines.
- Miller, C. F.: Operation ceniza-arena: The retention of fallout particles from volcan Irazu (Costa Rica) by plant and people. Part 2, Stanford Research Institute, San Francisco, California, MU-4890, 247 pp., 1967b.
- Naranjo, M. F., Ebmeier, S. K., Vallejo, S., Ramón, P., Mothes, P., Biggs, J., et al. (2016). Mapping and measuring lava volumes from 2002 to 2009 at El Reventador Volcano, Ecuador, from field measurements and satellite remote sensing. *J. Appl. Volcanol.* 5, 8–11. doi:10.1186/s13617-016-0048-z
- Neild, J., O'Flaherty, P., Hedley, P., Underwood, R., Johnston, D., Christenson, B., and Brown, P.: Impact of a volcanic eruption on agriculture and forestry in New Zealand, Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand, 99/2, 88 pp., 1998.
- Newhall, C. G. and Hoblitt, R. P. (2002) - Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology* 64, 3-20. doi:10.1007/s004450100173
- Newhall, C., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of the explosive magnitude for historical eruptions. *J. Geophys. Res.* 87.
- Proag, V. (2014). The Concept of Vulnerability and Resilience. *Procedia Economics and Finance*, 18. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00952-6](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00952-6)
- 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>
- Ramón, P., Vallejo, S., Mothes, P., Andrade, D., Vásconez, F., Yepes, H., et al. (2021). Instituto geofísico–escuela Politécnica nacional, the Ecuadorian seismology and Volcanology service. *Volcanica* 4 (S1), 93–112. doi:10.30909/vol.04.s1.93112
- Rhoades, R.: Informal survey methods for farming systems research, *Human Organization*, 44, 215-218, doi: 10.17730/humo.44.3.50m51pwn437h40m0, 1985.
- Rufino, M.C., Hengsdijk, H., Verhagen, A., 2009a. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 84, 229–247, <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>

- Ryschawy J., Joannon A., Gibon A. (2014). L'exploitation de polyculture-élevage : définitions et questions de recherche. Une revue
- Sahni, P. (Éd.). (2001). Disaster mitigation: Experiences and reflections. Prentice-Hall of India.
- Siebert, L., Simkin, T., and Kimberly, P.: Volcanoes of the world, 3rd, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California, 2010.
- Simkin, T., and L. Siebert, Volcanoes of the World, 2nd ed., 349 pp., Geoscience Press, Tucson, Ariz., 1994.
- Simkin, T., L. Siebert, L. McClelland, D. Bridge, C. G. Newhall, and J. H. Latter, Volcanoes of the World, 232 pp., Van Nostrand Reinhold, New York, 1981.
- 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>
- TALOS. (s. d.). Consulté le 27 mai 2024, à l'adresse <https://talos.minoan-aegis.net/accueil>
- TUNGURAHUA - Instituto Geofísico—EPN. (s. d.). Consulté 30 avril 2024, à l'adresse <https://www.igepn.edu.ec/tungurahua>
- Tungurahua_Demografia. (s. d.). Consulté 1 mai 2024, à l'adresse https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Sitios/Panorama_estadistico_provincial/tungurahua_demografia.html
- UNDRO (Office of the United Nations Disaster Relief co-Ordinator): Natural disasters and vulnerability analysis: report of expert group meeting, 9-12 July 1979, UN, Geneva, 48 pp., 1980.
- Van Keulen, H., & Schiere, J. B. (2004). *Crop-livestock systems: old wine in new bottles*. Paper presented at 4th International Crop Science Congress. https://www.researchgate.net/publication/40121882_Crop-livestock_systems_old_wine_in_new_bottles
- Vásconez, F., Moussallam, Y., Bani, P., Battaglia, J., Hidalgo, S., Benbakkar, M., et al. (2022b). Ash and gas discharge during open vent activity at El Reventador (Ecuador): explosion-style transitions driven by conduit capping. *Bull. Volcanol.* 84 (8), 77. doi:10.1007/s00445-022-01585-1

- Wilson, T. M., Cole, J., Cronin, S., Stewart, C., and Johnston, D.: Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia: lessons for recovery, *Nat. Hazards*, 57, 185-212, doi: 10.1007/s11069-010-9604-8, 2011.
- Wilson, T. M., Jenkins, S., and Stewart, C.: Impacts from volcanic ash fall, in: *Volcanic hazards, risks and disasters*, edited by: Shroder, J. F., and Papale, P., Elsevier, Boston, 47-86, doi: 10.1016/B978-0-12-396453-3.00003-4, 2015.
- Wilson, T. M., Kaye, G., Stewart, C., and Cole, J.: Impacts of the 2006 eruption of Merapi volcano, Indonesia, on agriculture and infrastructure, *Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand*, 64 pp., 2007.
- 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., Stewart, C., Bickerton, H., Baxter, P., Outes, A. V., Villarosa, G., and Rovere, E. (2013). Impacts of the June 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex eruption on urban infrastructure, agriculture and public health. *GNS Science Report 2012/20*, 1–88.
- World Population Clock : 8.1 Billion People (LIVE, 2024) - Worldometer. (s. d.). Consulté 1 juin 2024, à l'adresse <https://www.worldometers.info/world-population/>
- Wright, R. (2016). MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 426 (1), 23–53. doi:10.1144/sp426.12

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire pour les interviews (version anglaise)

Questionnaire for farm n°

1. Contact information and generalities



1.1. Contact information

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



1.2. Farm – Generalities

- **Address:**
- **Total surface area of the farm (taking into account all crop fields, buildings and/or plots dedicated to livestock, and infrastructures):**
Make sure that the farmer gives correct units, such as square kilometers or hectares, and that the information is trustworthy, or give a reliability index on a scale of 1 (least reliable) to 5.
- **Type of production (select all that apply):**
apiary – crops – flower – hay – rice – orchard – vineyard
Livestock raising: poultry – cows – pigs – goats; meat – eggs – dairy
Other:
- **Type of income source (select all that apply):**
commercial – cooperative – subsistence farm
- **Additional information:**

1.3. Landscape

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

- **Additional information:**

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

2. Livestock system

2.1. Description of the livestock system

- **What are the types of farm animals that you raise, and how many of each type?** (*example: three goats and five pigs*)
- **Are the animals kept outside or inside, and for how long during an average year?**
- **If animals are kept inside a building, what do you with the dejections?**

If the dejections are stored:

- **In which form(s)?**
- **For how long?**
- **For what purposes?**

If the dejections are not stored or used:

- **What is the reason for not keeping or using them?**

2.2. Animals

- **How many animals did you buy or receive this year (as opposed to those born in your farm)? Is that usual or was this year different from a typical year (and why)?**
- **When did you buy or receive each animal?**
- **How much did each animal cost?**
- **For what purpose do you raise your animals (reproduction, meat production, milk production, other)?**

2.3. Livestock food

- **Do you grow food in your farm to feed the animals?**
If so, what types of crops do you grow and for which animal(s) specifically? What is the daily quantity of crop (specify which one) used to feed each animal? *(clarify the estimate if the amount varies with the season)?*
- **Do you use crop residues to feed your farm animals?**
If so which crop residue(s) and for which animal(s)? What is the daily quantity of crop residue (specify which one) used to feed each animal? *(clarify the estimate if the amount varies with the season)?*
- **What types of animal food come from fodder storage (do you store crop residue, do you store crops that you grow specifically for your animals, do you store hay)? In what quantities?**

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

- **How much animal food do you buy? How much does the animal food cost?** *(make sure that units are specified, for example kg per month, bag per month; then pesos per kg, pesos per bag, (what is bag weigh?))*
- **Under which circumstances do you have to purchase food for your animals? Provide details for the different food types given** *(example: I buy fodder for the cow during two months in the dry season. Make sure to specify time periods for each special circumstance).*

2.4. Livestock grazing

- Do you let your animals graze?

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

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

2.5. Veterinary products (medicine or vaccine) given to animals

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

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

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

2.6. Livestock outflow

- What types of animals do you sell and how many did you sell this year? Is that usual or is this year different from a typical year (and why)?
- At what age is an animal sold (provide details by animal type)? (for example, do you sell piglets when they are two months old, or do you fatten them and sell them when they are six months old?)
- For what purpose do you sell your animals (provide details by animal type)? (example: for butchering, for someone else to raise...)
- How much do you sell the animal for (provide estimate for each animal type)?
- Are any animals kept for the farm household self-consumption?
If so, which animals and in how many? (clarify units, for example, one pig/year)

- **Are any animal products sold?**
If so, which ones and in what quantity (clarify units, for example, kg/year)
How much do you sell your animal products for? (clarify units, for example, pesos per kg, pesos per liter, pesos per bag (what is bag weigh?))
- **Are any animal products kept for the farm household self-consumption?**
If so, which ones and in what quantity? (clarify units, for example, kg/year)

3. Cropping system

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

3.1. Description of the crops

- **Do you always plant the same crops every year, or are there crops that you only grow every two years (or more)?** Answer is “yes” if the same crop is grown every year and “no” if a different crop is grown every year or every few years. (If answer is “no”, ask all the “crop cycle” sub-questions below. If answer is “yes”, then the “crop cycle” sub-questions can be skipped).
- **What are the crops that you cultivate in your farm? What is the surface area allocated to each crop?** Please refer to the farm sketch to locate the different fields but remember to also write down every surface area on the questionnaire to make sure they are correct and don’t rely on the sketch’s scale, which might not be correct.
Crop cycle: give details for each separate year. (example, one hectare of corn on year 1, then one hectare of eggplants on year 2).
- **Do you always grow the same crops on the same plots?** (example, a farmer has 1.5 ha of land, divided into 1 ha and 0.5 ha; does he/she grow corn on the 1 ha plot and eggplant on the 0.5 ha plot every time, or corn on the 1 ha plot and eggplant on the 0.5 ha plot one year, then corn on the 0.5 ha plot and eggplant on the 1 ha plot the next year?).
If not, what is your crop rotation?
Note that this is not the same as the crop cycle; here a farmer grows the same thing every year, but not on the same farm plots.
- **When do you sow and harvest each crop? Please fill in the calendar attached to the questionnaire** (it will also be used for documenting the use of fertilizers, phytosanitary products, and working forces. Use one calendar per year if the farm has a crop cycle).

3.2. Cropping system: seeds/plants

- Do you buy the seeds/seedlings to grow your crops, or do you produce them from your own farm with the previous harvest (provide details by crop type)?
Crop cycle: give details for each separate year
- What amount of seeds (weight) or seedlings (number) do you use per unit of surface area? (clarify units for each crop type).
Crop cycle: give details for each separate year
- How much do the seeds/seedlings you buy cost (provide details by crop type)? (clarify units, for example pesos per bag (what is bag weigh?)), pesos per plant...)
Crop cycle: give details for each separate year
- Are the seeds you use chemically treated (for instance, to prevent fungal diseases)?
Crop cycle: give details for each separate year

3.3. Cropping system: fertilizers

- Do you use composted crops as fertilizer?
If so, which crops are composted and how much composted crops do you apply and how often? At what time of the year (before sowing, a month after...)? Provide details for each crop you grow. Please fill in the calendar.
- Do you use animal manure as fertilizer?
If so, from which animals?
Do the animals graze and fertilize the grazing plot, or are they kept inside?
If they are kept inside, how is the manure collected and stored?
How long are the animals kept inside during the year, and how many animals? (example, two cows inside for three months, one mother pig inside all year and five piglets inside for two months every year. Keep in mind that each type of animal produces a different quantity of manure, and we want the best estimate possible. This question allows us to cross reference the amount given previously).
- How much manure do you apply to your crops and how often? At what time of the year (before sowing, a month after...)? Provide details for each crop you grow. Please fill in the calendar.
- Do you purchase fertilizer?
If so, what type of fertilizer do you purchase?
- How much of the purchased fertilizer do you apply and how often? At what time of the year (before sowing, a month after...)? Provide details for each crop you grow. Please fill in the calendar.

- **How much does the fertilizer cost?** *(clarify units, for example pesos per kg, pesos per bag (what is bag weigh?)).*
- **Do you apply fertilizer systematically, or in a particular situation? If so, in which situation?**
Crop cycle: give details for each separate year.

3.4. Cropping system: phytosanitary/protection products

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

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

3.5. Cropping system outflows

- **What crops do you sell and in what quantity? Provide quantity for each crop you grow.**
Crop cycle: give details for each separate year.
- **How much do you sell your crops for? Provide details for each crop you grow. (make sure to clarify the units, for example pesos per kg, pesos per bag (what is bag weigh?))**
Crop cycle: give details for each separate year.

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

Crop cycle: give details for each separate year.

- **What amount of fodder is stored?**

4. Working forces

4.1. Generalities

- **How many people work daily on the farm?**
- **How much do you pay your workers (example: how much pesos per hour, pesos per harvest...)?**
- **Do you share facilities and/or equipment with your neighbors?**
If so, which ones, and how does everyone pay to use them?
- **What is the farm's main activity and what is the average income generated yearly for this activity?**

4.2. Cropping system

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

4.3. Livestock system

- How many working hours do you need to tend to each type of your animals?
- Do you need workers to tend to your animals?
If so, for which animals, and how many workers and hours per day?
- Additional information:

5. Expenses and income

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

5.1. Generalities

- What is the total income of your farm per year on average?
- What are the total expenses of your farm per year on average?
- Do you have other sources of income besides your farming activity? If so, what are these activities and how much income do they generate?

5.2. Cropping system and livestock system

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

6. Concerns and fears

- What is the major constraint on the farm's activities? Please explain in detail.
- Are you facing other constraints or problems on a regular basis?
- What are your main concerns and fears regarding the future as a farmer in this region?
- What are your future plans for your farm?

- Additional information

7. The volcano and volcanic ashfall

- What did bring you here (i.e. to farm in an area that may be affected by an eruption from Mayon volcano)?
- In your opinion, what is the main risk that the volcano poses to your farming activities?
- Is volcanic ash fall bad or good to farming? Is it always good or always bad? Can you elaborate?
- Are you alerted of an impending volcanic eruption and how (siren sound, TV/radio news, text message)?
- What do you do in priority to protect your farm assets (crops, livestock, infrastructure) when you have to evacuate due to an impending eruption?
- After an ash fall event, do you clean crop plants that have received ash? Do you clean the soil? Do you clean water reservoirs where the livestock animals drink? How do you do that?
- Are there other operations you need to do after a volcanic ashfall affected your farm?
- How frequent are volcanic ash deposits on your farm? Do you consider having ash on your farm to be a "normal" situation, or something unusual?
If dealing with ash on your farm is not "normal", how much time does it usually take to come back to a "normal" situation after a volcanic ash deposit, with no consequences from ashfall?
- In your experience with previous ashfall from volcanic eruptions, what are the factors that have helped you go back to that "normal" situation?
- What do you think should be done (by yourself, your community, the authorities...) to allow you to go back to a "normal" situation after a volcanic ashfall, regarding your farming activities?
- Please fill in the table below, evaluating the volcanic impact on each of your farm elements, and give us some details as to why you characterize the impact this way. *For*

example, "Element 1: bananas, impact of 1 because I lost a small portion of the harvest after the eruption" or "Good 2: pineapple, impact of 3 because the whole harvest was lost and I had to replant the whole field". The impact can be negative (-3 to -1), neutral (0, no impact) or positive (+1 to +3). 1 is a slight impact, 2 is moderate and 3 is important.

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

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

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

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

Month	Sow	Harvest	Fertilizer	Phytosanitary products
January				
February				
March				
April				
May				
June				
July				
August				
September				
October				
November				
December				

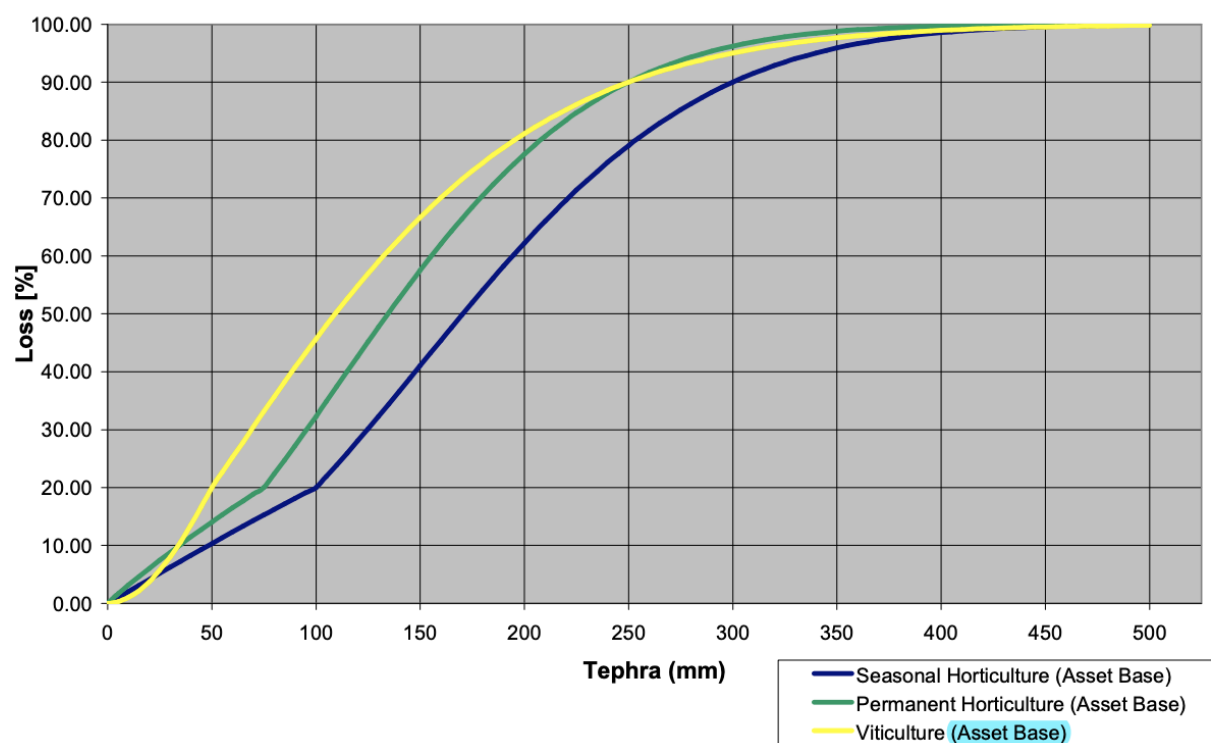
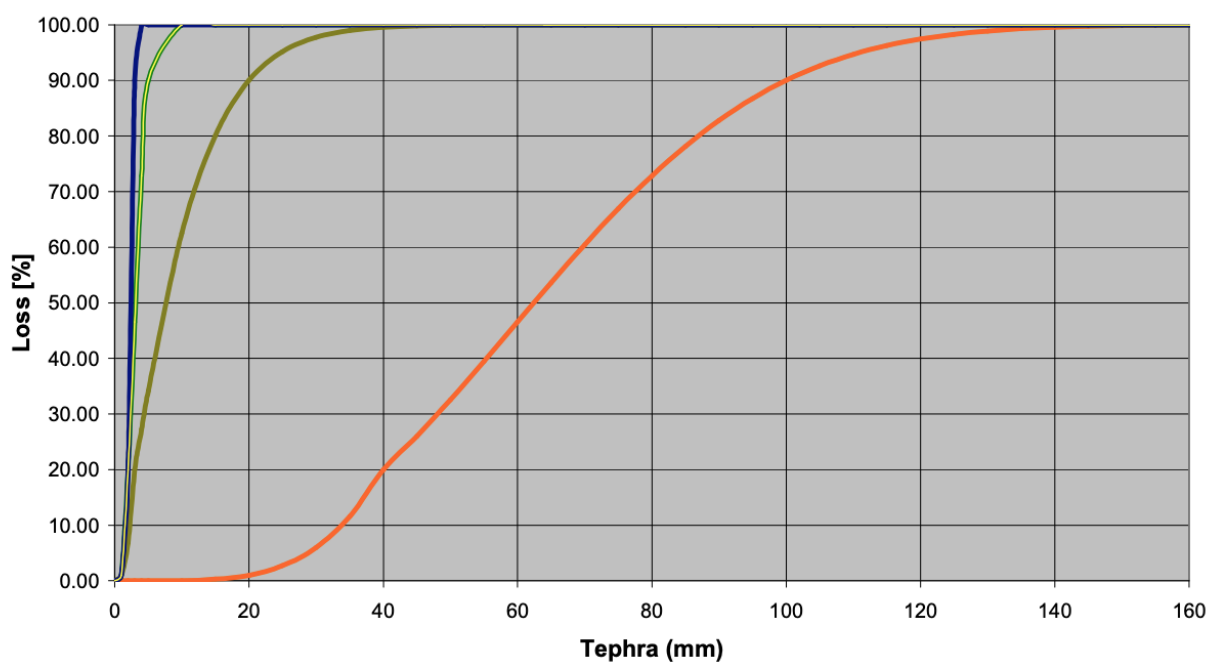
Please specify the hours of work per day and number of days of each operation. For example, if the farmer harvests coconuts in February for 8 hours a day, for four days, with three seasonal workers, use the February/Harvest slot to write "Coconut, 8h, 4 days, 3 workers"

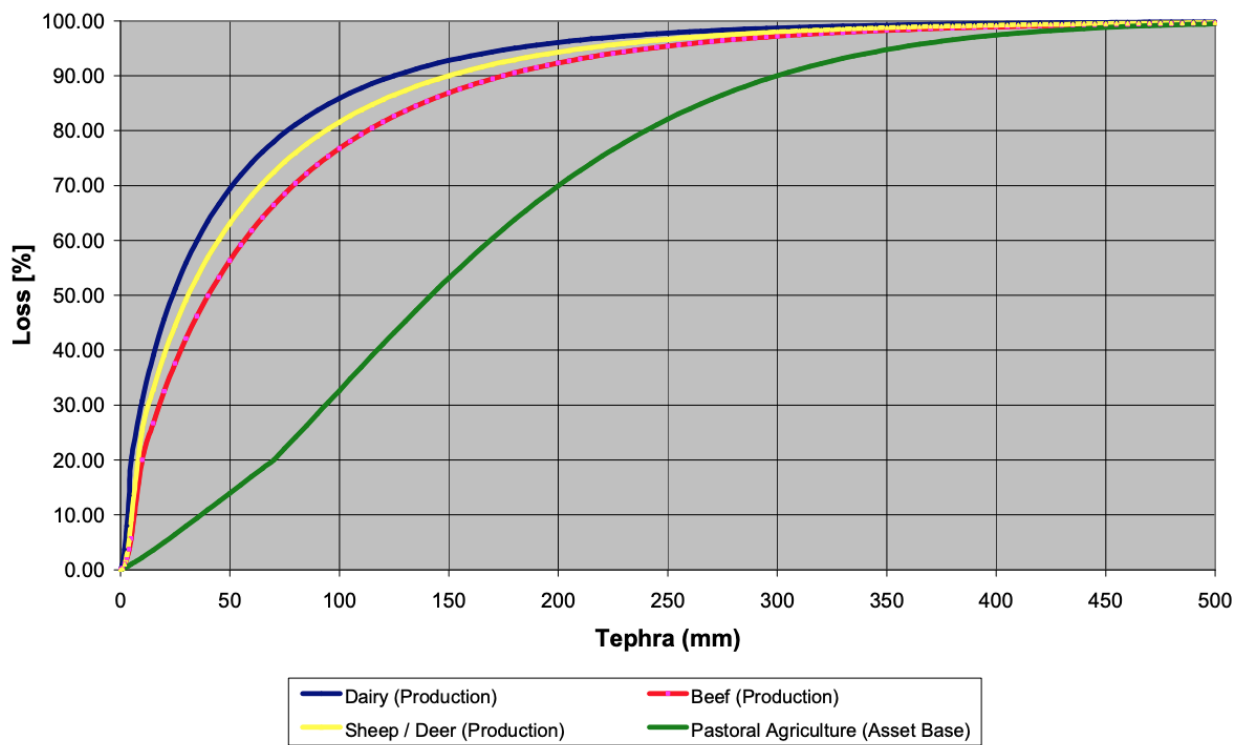
Livestock	Animal type	Number	Food costs per animal	Food cost total	Veterinary costs per animal	Veterinary costs total	Income per animal sold	Income per year	Total
Crops	Type	Surface	Seeds/plants costs per year	Fertilizer costs	Phytosanitary costs	Seasonal workers costs	Income per kg	Income total	Total
Other costs									

Map of the farm

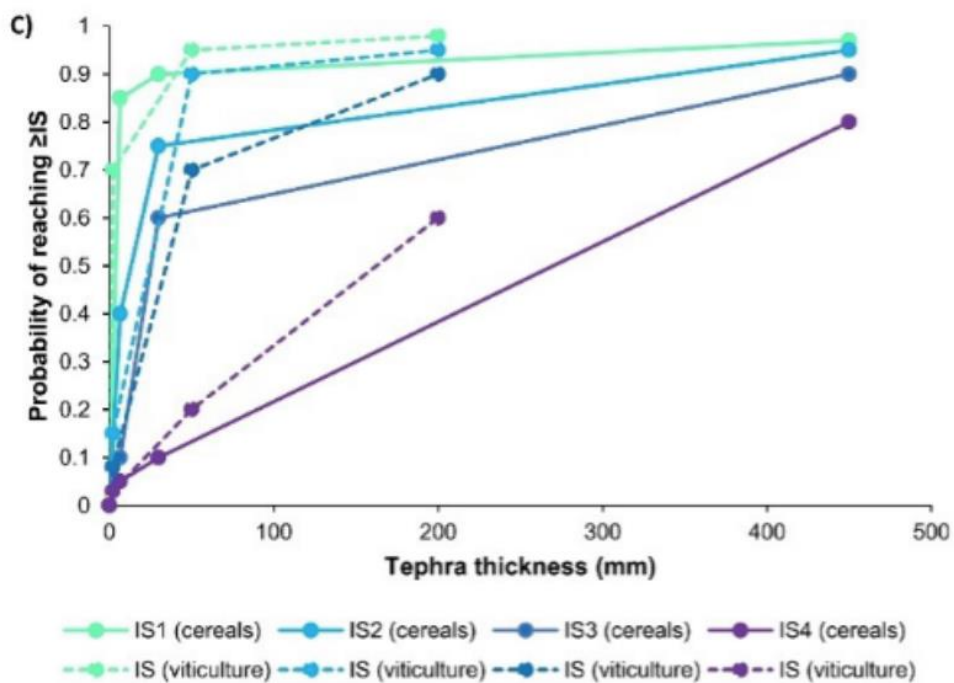
Annexe 2 : Fonctions de fragilité

- Fonctions de fragilité de Wilson et Kaye (2007)

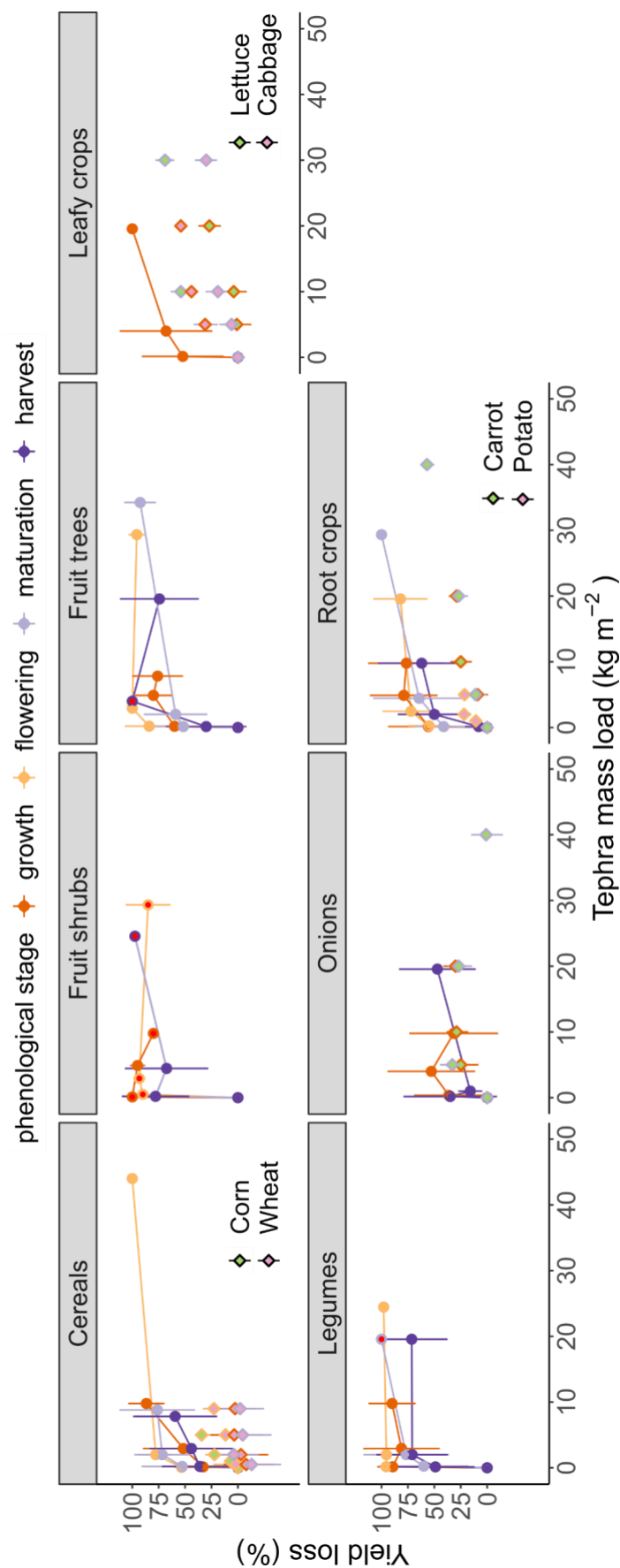




- Fonctions de fragilité de Craig (2021)



Annexe 3 : Fonctions de fragilité de Ligot (2023)



Annexe 4 : Excel de l'analyse économique de l'exploitation n°1

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1VOAlVh8eeD5OLT5LWdqU5GAW6Cl1NxuP/edit?usp=sharing&ouid=107232509043912531355&rtpof=true&sd=true>

Annexe 5 : Excel de l'analyse économique de l'exploitation n°2

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1czdpORO2E7d3T1wHbGNANLP5N-i0i3zc/edit?usp=sharing&ouid=107232509043912531355&rtpof=true&sd=true>

Annexe 6 : Excel de l'analyse économique de l'exploitation n°3

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1HBiSbabjmK-oBSliG6ykBsB787KldNWl/edit?usp=sharing&ouid=107232509043912531355&rtpof=true&sd=true>

Annexe 7 : Excel de l'analyse économique et scénarios éruptifs de l'exploitation n°4



Une fois ouvert sur la version en ligne, il faut télécharger le fichier Excel (format xlsx) afin de pouvoir accéder aux données et ne pas avoir de message d'erreur.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/12zQdVHZ-OZOGZQR3N4V9HknYBPbHbiPC/edit?usp=sharing&ouid=107232509043912531355&rtpof=true&sd=true>

Annexe 8 : Excel de l'analyse économique et scénarios éruptifs de l'exploitation n°5



Une fois ouvert sur la version en ligne, il faut télécharger le fichier Excel (format xlsx) afin de pouvoir accéder aux données et ne pas avoir de message d'erreur.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Qhqe5q2r7coSJ2fCndkaqPuUdo40dY6N/edit?usp=sharing&ouid=107232509043912531355&rtpof=true&sd=true>

Annexe 9 : calendrier culturel de l'exploitation n°5

Culture	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
frejol	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
zapallo	Récolte	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
courge	Récolte	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
maïs	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
pdt	Récolte	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
fève	Récolte	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture	Hors Culture
pomme	Maturation	Récolte	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance
citron	Croissance	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte	Croissance
claudia rouge	Récolte	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance
claudia blanche	Maturation	Récolte	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance
pêche	Maturation	Récolte	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance
poire	Récolte	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance
prairie	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Récolte

Culture	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
frejol	Semis	Croissance	Floraison	Maturation	Maturation	Récolte
zapallo	Semis	Croissance	Floraison	Maturation	Maturation	Maturation
courge	Semis	Croissance	Floraison	Maturation	Maturation	Maturation
maïs	Semis	Croissance	Floraison	Floraison	Maturation	Récolte
pdt	Semis	Croissance	Floraison	Floraison	Maturation	Maturation
fève	Semis	Croissance	Floraison	Floraison	Maturation	Maturation
pomme	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Floraison
citron	Croissance	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte	Croissance
claudia rouge	Croissance	Croissance	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte
claudia blanche	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Floraison
pêche	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Floraison
poire	Croissance	Croissance	Croissance	Floraison	Maturation	Récolte
prairie	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance	Croissance

Évaluation de la vulnérabilité des systèmes agricoles face aux retombées de téphra : une approche économique

Cas d'étude : volcan Tungurahua, Équateur

De Meunynck Saskia

Environ 10 % de la population mondiale vit à moins de 100 km d'un volcan actif. L'une des principales raisons est la grande fertilité des sols volcaniques. Bien qu'ils ne représentent qu'environ 0,7% de la surface terrestre totale, ils nourrissent approximativement 10% de la population mondiale grâce à leur potentiel agronomique élevé, ce qui les rend propices à l'agriculture.

Cependant, cette proximité expose l'agriculture au risque des retombées de téphra ; des particules de magma éjectées lors d'éruptions explosives. À ce jour, les études sur la vulnérabilité de l'agriculture face aux retombées de téphra se limitent à quantifier les effets néfastes sur les cultures et sur le bétail de manière isolée. Pourtant, les interactions entre les éléments d'une exploitation agricole sont nombreuses. Par exemple, les résidus de culture peuvent être utilisés pour nourrir les animaux, et les déjections des animaux comme engrais pour les cultures. Nous proposons dans ce travail d'étudier l'exploitation agricole dans son ensemble en utilisant une approche systémique.

L'objectif de ce travail est de développer et d'appliquer une méthode pour quantifier la vulnérabilité des exploitations agricoles. Pour ce faire, l'exploitation est considérée comme un système composé de deux sous-systèmes : les cultures et l'élevage, ainsi que des interactions entre leurs différents composants et des flux entrants et sortants du système.

Plus spécifiquement, nous visons à : (I) Caractériser la situation économique de deux exploitations agricoles contrastées. (II) Analyser la vulnérabilité des deux exploitations en simulant l'impact du téphra. (III) Comparer les deux exploitations afin d'identifier le système le plus vulnérable.

Les informations générées dans notre travail ouvrent des perspectives quant au développement d'une méthode pour quantifier la vulnérabilité des exploitations agricoles sujettes à l'aléa des retombées de téphra et ainsi permettre de proposer des prédictions plus pertinentes des pertes subies par les exploitations dans les régions volcaniques.

Université Catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

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